

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

**VANADYUM REDOKS AKIŞ BATARYASINDA AKIŞ
KANALLARININ VE KANAL GEOMETRİLERİNİN
BATARYA İÇERİSİNDE GERÇEKLEŞEN ISI
TRANSFERİ ÜZERİNE ETKİLERİ**

**Hazırlayan
İlker KAYALI**

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Gülşah ELDEN**

Yüksek Lisans Tezi

**Ocak 2022
KAYSERİ**

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

**VANADYUM REDOKS AKIŞ BATARYASINDA AKIŞ
KANALLARININ VE KANAL GEOMETRİLERİNİN
BATARYA İÇERİSİNDE GERÇEKLEŞEN ISI
TRANSFERİ ÜZERİNE ETKİLERİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hazırlayan
İlker KAYALI**

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Gülşah ELDEN**

**Bu çalışma; Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi
tarafından FYL-2020-10397 kodlu proje ile desteklenmiştir.**

**Ocak 2022
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

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

Adı-Soyadı : İlker KAYALI

İmza :

Vanadyum Redoks Akış Bataryasında Akış Kanallarının ve Kanal Geometrilerinin Batarya İçerisinde Gerçekleşen Isı Transferi Üzerine Etkileri adlı Yüksek Lisans tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi'ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan

İlker KAYALI

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Gülşah ELDEN

Enerji Sistemleri Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Nesrin KAYATAŞ DEMİR

ÖNSÖZ

Çalışmalarım boyunca farklı bakış açıları ve bilimsel katkılarıyla beni aydınlatan, yakın ilgi ve yardımlarını esirgemeyen sayın Dr. Öğr. Üyesi Gülşah ELDEN hocama teşekkürlerimi sunarım.

Akademik çalışmalarım boyunca beni cesaretlendiren ve destekleyen sayın Prof. Dr. Mustafa Serdar GENÇ hocama teşekkür ederim.

Araştırmalarım ve öğrenme sürecimde yanımda olan ve sıkıntılı anlarımda bana destek veren Araştırma Görevlisi Mert TAŞ'a ve arkadaşım Phil Jacques ALPHONSE'ya teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasına maddi destek vererek çalışmamızı tamamlamamıza katkıda bulunduğu için Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (Proje No: FYL-2020-10397) teşekkür ederim.

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

İlker KAYALI

Ocak 2022, Kayseri

VANADYUM REDOKS AKIŞ BATARYASINDA AKIŞ KANALLARININ VE KANAL GEOMETRİLERİNİN BATARYA İÇERİSİNDE GERÇEKLEŞEN ISI TRANSFERİ ÜZERİNE ETKİLERİ

İlker KAYALI

**Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Ocak 2022
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Gülşah ELDEN**

ÖZET

Bu tez çalışmasında, Vanadyum Redoks Akış Batarya'sında farklı kanal geometrilerinin batarya potansiyel performansına, türlerin konsantrasyonuna ve batarya içerisinde gerçekleşen ısı transferine etkileri ayrıntılı bir şekilde analiz edilmektedir. Bu analizleri gerçekleştirebilmek için serpantin ve iç içe geçmeli akış alanlarına sahip iki boyutlu iki ayrı model oluşturuldu. Dikdörtgen, kare, daire ve yamuk kesitli kanal geometrileri bu iki ayrı modele tek tek uygulanıp sürekli rejim ve sabit batarya çalışma sıcaklığı için sayısal çözümler gerçekleştirildi. Sayısal çözümlerden elde edilen sonuçlardan, iç içe geçmeli akış alanında farklı kanal geometrilerinin batarya potansiyel performansına çok büyük bir etkisi olmaz iken serpantin akış alanında en yüksek performans yamuk kanal geometrisinden en düşük performans ise kare kanal geometrisinden elde edildi. Kanal geometrilerinin değiştirilmesiyle batarya içerisindeki sıcaklık, serpantin akış alanında yaklaşık 2 K kadar artarken iç içe geçmeli akış alanında bu değer 10 K'e kadar artmaktadır. Bununla birlikte, her iki akış alanında da en düşük tersinir ve tersinmez ısı yoğunlukları yamuk kanal geometrisinden elde edilmektedir. Ayrıca, bu tez çalışmasında, hem serpantin akış alanında hem de iç içe geçmeli akış alanında batarya potansiyel performansı en iyi olan kanal geometrisi için farklı kanal oranlarının bataryadaki ısı transferi üzerine etkileri de araştırıldı. Her iki akış alanında da kanal oranlarının artışıyla tersinir ve tersinmez ısı yoğunlukları azalırken ohmik ısı yoğunluklarının arttığı görüldü.

Anahtar Kelimeler: Enerji depolama, vanadyum redoks akış bataryalar, akış alanları, kanal geometrisi, ısı yoğunluğu

THE EFFECTS OF FLOW CHANNELS AND CHANNEL GEOMETRY IN VANADIUM REDOX FLOW BATTERY ON THE HEAT TRANSFER IN THE BATTERY

İlker KAYALI

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

M.Sc. Thesis, January 2022

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Gülşah ELDEN

ABSTRACT

In this thesis, the effects of different channel geometries on the battery potential performance, species concentration, and heat transfer in the Vanadium Redox Flow Battery are analyzed in detail. In order to carry out these analyzes, two different models that were two-dimensional models with serpentine and interdigitated flow fields were developed. Rectangular, square, circular, and trapezoidal channel geometries were separately applied to these two models, and numerical solutions were performed for steady-state and constant operating temperature conditions. The results of the numerical solutions showed that the different channel geometries did not have a great effect on the battery potential performance in the interdigitated flow field. While the highest performance in the serpentine flow field was obtained from the trapezoidal channel geometry, the lowest performance was seen in the square channel geometry. The temperature in the battery increased by about 2 K in the serpentine flow field with changing of the channel geometries, while the temperature in the battery enhanced up to 10 K in the interdigitated flow field. The lowest reversible and irreversible heat sources in both flow fields were obtained from trapezoidal channel geometry. Also in this thesis, the effects of different channel fractions on the heat transfer in the battery were investigated for the channel geometry with the best potential performance in both the serpentine and the interdigitated flow fields. It was achieved that when the irreversible and reversible heat sources decreased with increasing of channel fractions, the ohmic heat sources increased in both flow fields.

Key Words: Energy storage, vanadium redox flow batteries, flow fields, channel geometry, heat density

İÇİNDEKİLER

VANADYUM REDOKS AKIŞ BATARYASINDA AKIŞ KANALLARININ VE KANAL GEOMETRİLERİNİN BATARYA İÇERİSİNDE GERÇEKLEŞEN ISI TRANSFERİ ÜZERİNE ETKİLERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK.....	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	iii
ÖNSÖZ	v
ÖZET	vi
ABSTRACT.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR VE SİMGELER.....	xi
TABLolar LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xv
GİRİŞ	1

1. BÖLÜM

ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ

1.1. Enerji Depolama Sistemleri	3
1.2. Redoks Akış Bataryalar.....	4
1.3. Vanadyum Redoks Akış Bataryalar.....	6
1.3.1. VRAB Elektrolit Bileşeni.....	8
1.3.2. VRAB Elektrot Bileşeni	9
1.3.3. VRAB Membran Bileşeni	11
1.3.4. VRAB’da Akış Alanları ve Akım Toplayıcı Tabakalar	12
1.4. VRAB’da Performansı Etkileyen Kayıplar	13
1.4.1. Aktivasyon Kayıpları.....	13
1.4.2. Ohmik Kayıplar	13
1.4.3. Konsantrasyon Kayıpları.....	14
1.4.4. Şönt Akımı ve İyon Geçiş Kayıpları.....	14

2. BÖLÜM

LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Literatür Değerlendirmesi.....	15
2.2. Tezin Amacı	19

3. BÖLÜM

MATEMATİKSEL MODEL

3.1. Model Geometrileri.....	20
3.2. Model Varsayımları	22
3.3. Model Denklemleri.....	23
3.4. Başlangıç ve Sınır Şartları.....	31
3.5. Sayısal Method	32

4. BÖLÜM

SERPANTİN AKIŞ ALANI İÇİN FARKLI KANAL GEOMETRİLERİ VE FARKLI KANAL ORANLARININ BATARYA ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

4.1. Sayısal Modelin DeneySEL Veriler ile Doğrulanması	34
4.2. Farklı Kanal Geometrilerinin Potansiyel Performansına Etkisi	35
4.3. Farklı Kanal Geometrilerinin Elektrot Potansiyeli, Elektrolit Potansiyeli ve Konsantrasyon Dağılımına Etkisi.....	35
4.4. Farklı Kanal Geometrilerinin Sıcaklık ve Isı Yoğunluğu Üzerine Etkisi	40
4.5. Farklı Kanal Oranlarının Sıcaklık ve Isı Yoğunluğu Üzerine Etkisi	44

5. BÖLÜM

İÇ İÇE GEÇMELİ AKIŞ ALANI İÇİN FARKLI KANAL GEOMETRİLERİ VE FARKLI KANAL ORANLARININ BATARYA ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

5.1. Farklı Kanal Geometrilerinin Performansa Etkisi.....	49
---	----

5.2. Farklı Kanal Geometrilerinin Elektrot Potansiyeli, Elektrolit Potansiyeli ve Konsantrasyon Dağılımına Etkisi.....	50
5.3. Farklı Kanal Geometrilerinin Sıcaklık ve Isı Yoğunluğu Üzerine Etkisi	53
5.4. Farklı Kanal Oranlarının Sıcaklık ve Isı Yoğunluğu Üzerine Etkisi	57

6. BÖLÜM

SONUÇLAR

KAYNAKÇA	65
ÖZGEÇMİŞ.....	69



KISALTMALAR VE SİMGELER

<u>Kısaltma</u>	<u>Anlamı</u>	<u>Birim</u>
A	Kesit alanı	m^2
a	Belirli Yüzey Alanı	1/m
C_i	Konsantrasyon	mol/m^3
C_l	Özgül Isı Kapasitesi	J/kgK
D	Difüzyon Katsayısı	m^2/s
d_f	Elektrot Fiber Çapı	m
E	Hücre Voltajı	V
F	Faraday Sabiti	C/mol
I	Uygulanan Akım Yoğunluğu	A/m^2
i_{loc}	Yerel Akım Yoğunluğu	A/m^2
k	Reaksiyon Hız Sabiti	m/s
K	Elektrot geçirgenliği	m^2
K_d	Ayrışma Hız Sabiti	S^{-1}
C_k	Carman-Kozeny Sabiti	-
L	Genişlik	m
$\vec{N}$	Molar Akı	mol/m^3s
P	Basınç	Pa
R	Ulusal gaz sabiti	J/molK
SOC	Şarj Durumu	mol/m^3s
S	Entropi	J/molK
S_i	Tür Koruma Denkleminde Kaynak terim	mol/m^3
T	Sıcaklık	K
Q	Isı Kaynağı	W/m^3
Q	Hacimsel Akış Hızı	mL/dk
$\vec{u}$	Hız	m/s
z	Türlerin Yük Numarası	-
α	Transfer Katsayısı	-
ε	Elektrot Gözenekliliği	-
η	Aşırı Potansiyel	V

<u>Kısaltma</u>	<u>Anlamı</u>	<u>Birim</u>
ϕ_s	Elektrot Potansiyeli	V
ϕ_l	Elektrolit Potansiyeli	V
ϕ_m	Membran Elektrolit Potansiyeli	V
σ_s	Elektrotun Elektriksel iletkenliği	S/m
k_l	Elektrolitin Elektriksel İletkenliği	S/m
σ_m	Membranın İyonik İletkenliği	S/m
μ	Dinamik Viskozite	Pa s
ρ	Yoğunluk	kg/m ³
λ	Termal İletkenlik	W/mK
$\lambda_{1,2,3,4}$	Kanal Oranı	-
neg	Negatif Elektrot Özellikleri	-
pos	Pozitif Elektrot Özellikleri	-
in	Giriş Değerleri	-
out	Çıkış Değerleri	-
1	Negatif Elektrot Özellikleri	-
2	Pozitif Elektrot Özellikleri	-
4	VO ²⁺	-
5	VO ₂ ⁺	-
eff	Etkili Değer	-
0	Başlangıç Değerleri	-
mem	Membran Özellikleri	-
s	Elektrot Özellikleri	-
l	Elektrolit Özellikleri	-
x,y	Kartezyen Yönler	-

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1.	Enerji depolama sistemleri ile akış bataryaların karşılaştırılması.....	4
Tablo 2.	Her tür için kaynak terim	24
Tablo 3.	Başlangıç konsantrasyon değerleri.....	29
Tablo 4.	Enerji korunum denklemleri için parametre değerleri	29
Tablo 5.	Enerji korunumu denklemi için kaynak terimler.....	29
Tablo 6.	25°C’de VRAB reaksiyonunda yer alan sulu türlerin standart termodinamik değerleri	29
Tablo 7.	Geometrik özellikler, çalışma parametreleri ve kinetik özellikler	30
Tablo 8.	Serpantin akış alanında yamuk kanal geometrisi için kanal oranları	44
Tablo 9.	İç içe geçmeli akış alanında yamuk kanal geometrisi için kanal oranları	57

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Enerji depolama teknolojilerinin sınıflandırılması.....	3
Şekil 1.2.	Akış bataryanın tarihsel gelişimi.....	5
Şekil 1.3.	Vanadyum sembolü ve elektrolit çözeltileri.....	6
Şekil 1.4.	Vanadyum redoks akış batarya sistem bileşenleri.....	7
Şekil 1.5.	İndirgenme ve yükseltgenme reaksiyonları; a) Katolit redoks çifti VO_2^+ ve VO^{2+} şeması b) Anolit redoks çifti V^{2+} ve V^{3+} şeması	11
Şekil 1.6.	Vanadyum redoks akış bataryalarda akış alanları	12
Şekil 3.1.	Akış alanları için iki boyutlu VRAB sınırları; (I) Serpantin akış alanı, (II) İç içe geçmeli akış alanı	20
Şekil 3.2.	Serpantin akış alanında farklı kanal geometrileri; (a) Dikdörtgen, (b) Kare (c) Daire, (d) Yamuk	21
Şekil 3.3.	Serpantin akış alanında farklı kanal geometrilerinin geometrik boyutları; (a) Dikdörtgen, (b) Kare (c) Daire, (d) Yamuk	21
Şekil 3.4.	İç içe geçmeli akış alanında farklı kanal geometrileri; (a) Dikdörtgen, (b) Kare (c) Daire, (d) Yamuk.....	22
Şekil 3.5.	İç içe geçmeli akış alanında farklı kanal geometrilerinin geometrik boyutları; (a) Dikdörtgen, (b) Kare (c) Daire, (d) Yamuk	22
Şekil 3.6.	Farklı ağ elemanına göre ortalama hızın değişimi	33
Şekil 4.1.	Sayısal model verilerinin deneysel verilerle karşılaştırılması.....	34
Şekil 4.2.	Serpantin akış alanında kanal geometrilerine göre potansiyel performansların değişimi.....	35
Şekil 4.3.	Serpantin akış alanında farklı kanal geometrileri için elektrot potansiyelinin elektrot içerisinde dağılımı; (I) Negatif elektrot, (II) Pozitif elektrot, (a) Dikdörtgen, (b) Kare, (c) Daire, (d) Yamuk	36
Şekil 4.4.	Serpantin akış alanında farklı kanal geometrileri için elektrolit potansiyelinin elektrot içerisinde dağılımı; (I) Negatif elektrot, (II) Pozitif elektrot, (a) Dikdörtgen, (b) Kare, (c) Daire, (d) Yamuk	37
Şekil 4.5.	Serpantin akış alanında farklı kanal geometrileri için V^{2+} ve VO_2^+ konsantrasyonunun elektrottaki dağılımı; (I) Negatif elektrot, (II) Pozitif elektrot, (a) Dikdörtgen, (b) Kare, (c) Daire, (d) Yamuk	38

Şekil 4.6. Serpantin akış alanında farklı kanal geometrileri için V^{3+} ve VO^{2+} konsantrasyonunun elektrottaki dağılımı; (I) Negatif elektrot, (II) Pozitif elektrot, (a) Dikdörtgen, (b) Kare, (c) Daire, (d) Yamuk	39
Şekil 4.7. Serpantin akış alanında farklı kanal geometrileri için elektrottaki sıcaklık dağılımı; (I) Negatif elektrot, (II) Pozitif elektrot, (a) Dikdörtgen, (b) Kare, (c) Daire, (d) Yamuk	40
Şekil 4.8. Serpantin akış alanında farklı kanal geometrileri için tersinmez ısı yoğunluğunun SOC'la değişimi; (I) Negatif Elektrot, (II) Pozitif Elektrot.....	41
Şekil 4.9. Serpantin akış alanında farklı kanal geometrileri için tersinir ısı yoğunluğunun SOC'la değişimi; (I) Negatif Elektrot, (II) Pozitif Elektrot.....	42
Şekil 4.10. Serpantin akış alanında farklı kanal geometrilerinin ohmik ısı yoğunluğu üzerine etkisi; (I) Negatif Elektrot, (II) Pozitif Elektrot	43
Şekil 4.11. Serpantin akış alanında kanal geometrilerinin membranda gerçekleşen ohmik ısı yoğunluğu üzerine etkisi	43
Şekil 4.12. Serpantin akış alanında kanal oranlarına göre potansiyel performansların değişimi.....	44
Şekil 4.13. Serpantin akış alanında farklı kanal oranlarında elektrotlardaki sıcaklık dağılımı; (I) Negatif elektrot, (II) Pozitif elektrot, (a) 0.25, (b) 0.50, (c) 0.75, (d) 0.95.....	45
Şekil 4.14. Serpantin akış alanında farklı kanal oranları için tersinmez ısı yoğunluğunun SOC'la değişimi; (I) Negatif Elektrot, (II) Pozitif Elektrot.....	46
Şekil 4.15. Serpantin akış alanında farklı kanal oranları için tersinir ısı yoğunluğunun SOC'la değişimi; (I) Negatif Elektrot, (II) Pozitif Elektrot.....	47
Şekil 4.16. Serpantin akış alanında farklı kanal oranları için ohmik ısı yoğunluğunun SOC'la değişimi; (I) Negatif Elektrot, (II) Pozitif Elektrot.....	47
Şekil 4.17. Serpantin akış alanında farklı kanal oranları için membranda gerçekleşen ohmik ısı yoğunluğunun SOC'la değişimi	48

Şekil 5.1. İç içe geçmeli akış alanında kanal geometrilerine göre potansiyel performansların değişimi.....	49
Şekil 5.2. İç içe geçmeli akış alanında kanal geometrileri için elektrot potansiyelinin dağılımı; (I) Negatif elektrot, (II) Pozitif elektrot, (a) Dikdörtgen, (b) Kare, (c) Daire, (d) Yamuk	50
Şekil 5.3. İç içe geçmeli akış alanında kanal geometrileri için elektrot potansiyelinin dağılımı; (I) Negatif elektrot, (II) Pozitif elektrot, (a) Dikdörtgen, (b) Kare, (c) Daire, (d) Yamuk	51
Şekil 5.4. İç içe geçmeli akış alanında farklı kanal geometrileri için elektrottaki V^{2+} ve VO_2^+ konsantrasyonlarının dağılımı; (I) Negatif elektrot, (II) Pozitif elektrot, (a) Dikdörtgen, (b) Kare, (c) Daire, (d) Yamuk	52
Şekil 5.5. İç içe geçmeli akış alanında farklı kanal geometrileri için elektrottaki V^{3+} ve VO^{2+} konsantrasyonlarının dağılımı; (I) Negatif elektrot, (II) Pozitif elektrot, (a) Dikdörtgen, (b) Kare, (c) Daire, (d) Yamuk	53
Şekil 5.6. İç içe geçmeli akış alanında farklı kanal geometrileri için elektrottaki sıcaklık dağılımı; (I) Negatif elektrot, (II) Pozitif elektrot, (a) Dikdörtgen, (b) Kare, (c) Daire, (d) Yamuk	54
Şekil 5.7. İç içe geçmeli akış alanında farklı kanal geometrileri için tersinmez ısı yoğunluğunun SOC'la değişimi; (I) Negatif Elektrot, (II) Pozitif Elektrot.....	55
Şekil 5.8. İç içe geçmeli akış alanında farklı kanal geometrileri için tersinir ısı yoğunluğunun SOC'la değişimi; (I) Negatif Elektrot, (II) Pozitif Elektrot.....	56
Şekil 5.9. İç içe geçmeli akış alanında farklı kanal geometrileri için ohmik ısı yoğunluğunun SOC'la değişimi; (I) Negatif Elektrot, (II) Pozitif Elektrot.....	56
Şekil 5.10. İç içe geçmeli akış alanında farklı kanal geometrileri için membrandaki ohmik ısı yoğunluğunun SOC'la değişimi	57
Şekil 5.11. İç içe geçmeli akış alanında kanal oranlarına göre potansiyel performansların değişimi.....	58
Şekil 5.12. İç içe geçmeli akış alanında farklı kanal oranları için elektrottaki sıcaklık dağılımı; (I) Negatif elektrot, (II) Pozitif elektrot, (a) 0.20, (b) 0.40, (c) 0.60, (d) 0.80.....	59

Şekil 5.13. İç içe geçmeli akış alanında yamuk kanal geometrisi için farklı kanal oranlarındaki tersinmez ısı yoğunluğunun SOC'la değişimi; (I) Negatif Elektrot, (II) Pozitif Elektrot	60
Şekil 5.14. İç içe geçmeli akış alanında yamuk kanal geometrisi için farklı kanal oranlarındaki tersinir ısı yoğunluğunun SOC'la değişimi; (I) Negatif Elektrot, (II) Pozitif Elektrot	60
Şekil 5.15. İç içe geçmeli akış alanında farklı yamuk kanal geometrisi için kanal oranlarındaki ohmik ısı yoğunluğunun SOC'la değişimi; (I) Negatif Elektrot, (II) Pozitif Elektrot	61
Şekil 5.16. İç içe geçmeli akış alanında yamuk kanal geometrisinin farklı kanal oranları için membran üzerinde gerçekleşen ohmik ısı yoğunluğunun SOC'la değişimi	61

GİRİŞ

Enerji kaynaklarına olan ihtiyaç gelişen teknoloji, artan nüfus ve ivmelenen endüstriyel faaliyetlerden dolayı her geçen gün artmaktadır. Bundan dolayıdır ki, petrol, kömür ve nükleer enerji gibi konvansiyonel enerji kaynaklarının sürdürülebilirliği ile ilgili endişeler artmaktadır. Konvansiyonel enerji kaynaklarına alternatif olabilecek en önemli kaynak yenilenebilir enerji kaynakları olup enerji kaynağının tükenmemesi, olumlu çevresel etkilere sahip olması ve bakım maliyetinin düşük olması gibi avantajlara sahiptir. Birçok avantajı bulunan yenilenebilir enerji kaynaklarının önemli bir dezavantajı ise kaynağın sürekli olmaması ve ihtiyaç anında enerji üretememesidir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının anında kullanılmadığı durumda ve ihtiyaç dâhilinde hemen kullanılabilmesi için yüksek verimle depolanması gerekmektedir. Rüzgâr ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen enerjinin depolandığı sistemlerin, depolama gücü ve depolama hacmi bakımından bazı önemli gereksinimlere sahip olması gerekir. Şöyle ki, büyük ölçekli enerji depolama sistemlerinde güvenlik, kullanım döngüsünün maliyet performansı ve kullanım döngüsünün çevresel etkileri gibi hususlar dikkate alınmalıdır [1].

Kentsel ve endüstriyel alanlarda, günün belirli saatlerinde elektrik tüketimi farklılık göstermektedir. Gündüz ve günün belirli saatlerinde yüksek elektrik talebi olmakta iken, gece elektrik talebi minimum seviyelerdedir. Bu talepte meydana gelen seviye farkını dengelemek için düşük elektrik enerjisi talebinde üretilen fazla enerjinin yeniden kullanılabilmesi için depolanması gerekmektedir [2]. Bu depolama ihtiyacı bataryalar ile sağlanabilmektedir.

Redoks akış bataryalar (RAB) çözünmüş elektrolitler kullanarak kimyasal enerjiyi elektriksel enerjiye dönüştüren depolama aracıdır. RAB'ın diğer elektrokimyasal bataryalardan farkı, reaktantın elektrot etrafında bulunan hücrede depolanması yerine harici sıvı tanklarda depolanmasıdır.

Bu durum tankın boyutuna baēlı olarak enerji depolama kapasitenin artmasına sebep olmaktadır. RAB'ın yenilenebilir enerji kaynaklarında kullanımının artmasından dolayı bu tip bataryaların gelişimi hızlanmıştır. Dünyada farklı güçlerde RAB sistemleri tasarlanmış olup, bunlar arasında en büyük güce sahip RAB sistemi 200 MW/800 MWh kapasite ile Çin'de tasarlanmaktadır [3].

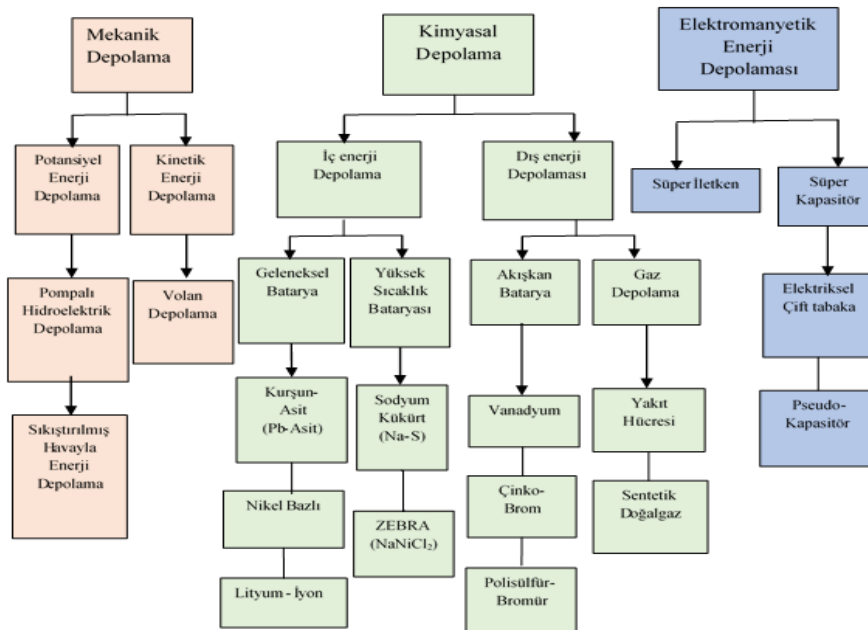


1. BÖLÜM

ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ

1.1. Enerji Depolama Sistemleri

Ülkemizde ve Dünya’da elektrik enerjisine olan ihtiyaç artarak devam etmektedir. Rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir enerji sistemlerinden elde edilen enerjinin şebeke ihtiyacından fazla olan kısmının şebekeye verilemeyerek yüksek verimde depolanması, ihtiyaç anında kullanılması için enerji depolama sistemleri önemli bir konu haline gelmektedir. Bununla birlikte, elektrikli araçların daha fazla yaygınlaşması ve enerji depolamanın güvenilir bir şekilde talep edilen enerjiyi karşılaması enerji depolama konusunu daha önemli hale getirmektedir. Enerji depolama sistemleri, mekanik, kimyasal, termal, elektriksel, elektrokimyasal ve hibrit enerji depolama sistemleri olarak sınıflandırılmaktadır. Şekil 1.1’de enerji depolama teknolojilerinin üç ana kategoride sınıflandırıldığı diyagram gösterilmektedir [4].



Şekil 1.1. Enerji depolama teknolojilerinin sınıflandırılması

Şarj edilebilen batarya teknolojisinin gelişimi, 1. nesil bataryaların deşarj işleminden sonra yeniden şarj işlemi yapamamasından ve çevreye olan olumsuz etkilerinden dolayı 2. nesil batarya sistemleri olarak geliştirilmiştir. Bu bataryalardan RAB'ların diğer batarya sistemleri ile karşılaştırılması Tablo 1'de verilmektedir. Tablo 1'den görülebileceği üzere depolama sistemleri içerisinde çevrim sayısına bakıldığında yüksek çevrim ömrüne sahip depolama aygıtının süper kapasitörler olduğu görülmektedir. Enerji verimliliği için süper kapasitörler ve volanlar yüksek verimliliğe sahip olmasına rağmen, bu iki depolama sistemlerinin deşarj süreleri düşüktür. Güç seviyesi MW seviyelerine çıkan depolama sistemlerinde deşarj süresi en yüksek olan depolama sisteminin ise akış bataryalar olduğu görülmektedir. Bununla beraber, akış bataryaları çevrim sayısı, enerji verimliliği, güç seviyesi ve deşarj süresi açısından depolama sistemleri arasında önemli bir yere sahip olduğu açıkça görülmektedir.

Tablo 1. Enerji depolama sistemleri ile akış bataryaların karşılaştırılması [5]

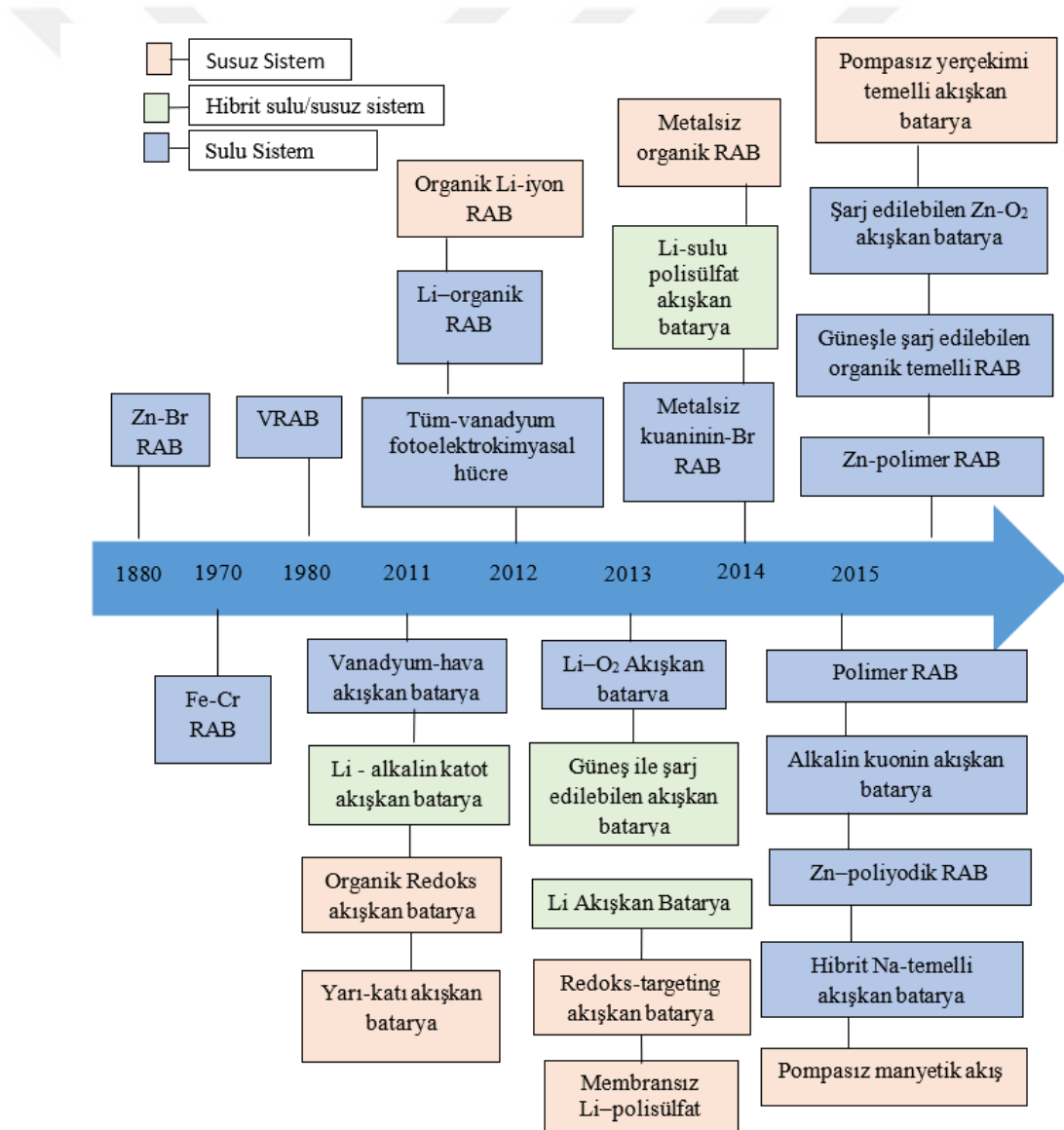
Depolama Sistemi	Batarya ömrü ya da çevrim sayısı	Enerji Verimliliği (%)	Güç Seviyesi	Deşarj Süresi
Kurşun-Asit	5–10 yıl	85	<50MW	1dk–8saat
Akış Bataryalar	1500–2500 çevrim	75–85	<15MW	<20 saat
Sıkıştırılmış Hava	30 yıl	57–64	50–300MW	1–20 saat
Pompaj Hidrolik Enerji Depolama	30 yıl	70–85	100–4000MW	4–12 saat
Süper Kapasitörler	10000 çevrim	90–95	<100kW	<1dk
Volanlar	20 yıl	90–95	<750kW	<1 saat

1.2. Redoks Akış Bataryalar

Enerji depolama sistemlerine olan ihtiyaç doğrultusunda yüksek enerji verimliliği, tasarım esnekliği, enerji depolama kapasitesi ve gücü ile RAB'lar umut verici depolama sistemi olarak kabul edilmektedir [6-9]. RAB'ın çalışma prensibi sıvı elektrolitlerin içerisinde çözünmüş redoks çiftlerinin elektrokimyasal tepkime sonucu elektrik enerjisi depolama amacına dayanmaktadır. RAB sistemi, anolit ve katolit tanklarda elektrolitlerin depolanması ve bir pompa vasıtasıyla çözeltilerin elektrotlara doğru iletilmesi ile gerçekleşmektedir. Elektrolitlerin birbirlerine karışmasını önlemek için

elektrotlar arasında bir iyon değiştirici membran bulunmakta ve yük taşıyıcı olarak görev yapmaktadır.

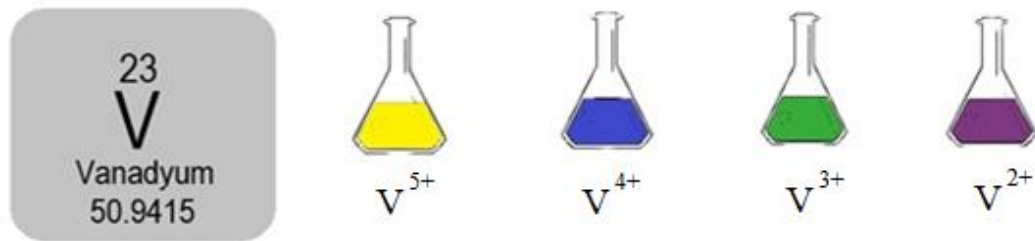
İlk RAB sistemi 1970’lerde Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA) tarafından Fe/Cr redoks çiftleri ile tanıtılmıştır [10]. Şekil 1.2 akış batarya sistemleri için yıllar içerisinde meydana gelen önemli gelişmeleri göstermektedir [11]. 1984’te Prof. Skyllas-Kazacos ve arkadaşları VRAB teknolojisi çalışmalarında vanadyum redoks çiftinin yüksek konsantrasyonda elektrolit kararlılığına ve işlenmemiş vanadyum malzemelerinde elektrolit üretimi üzerine odaklanarak VRAB’ın gelişmesini sağlamışlardır [12-15].



Şekil 1.2. Akış bataryanın tarihsel gelişimi

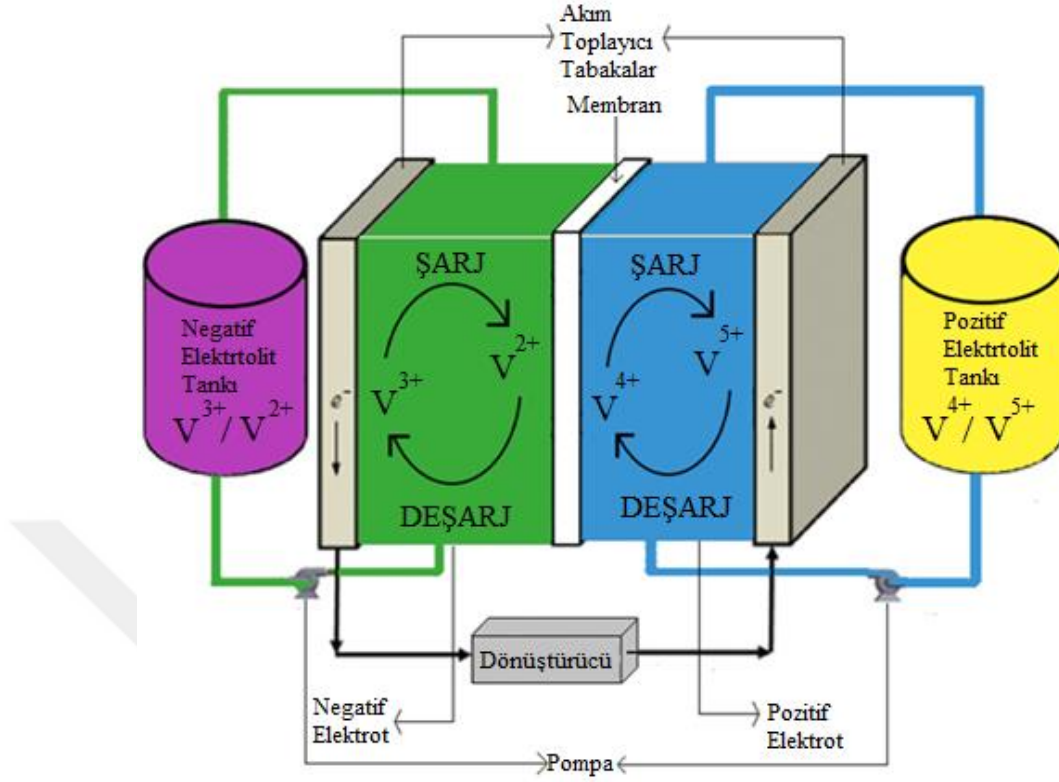
1.3. Vanadyum Redoks Akış Bataryalar

VRAB, farklı seviyelerde bulunan vanadyum türlerinin (V^{2+} , V^{3+} , VO^{2+} , VO_2^+) indirgenme ve yükseltgenme reaksiyonları gerçekleştirilmesiyle elektrik enerjisi depolayan bir sistemdir. Bataryada elektrolit türü olarak kullanılan Vanadyum, 23 atom numarasına sahip sert, gümüş renkli bir geçiş metalidir ve “V” sembolü ile gösterilmektedir. Vanadyum, V^{2+} , V^{3+} , VO^{2+} ve VO_2^+ olmak üzere dört farklı türde çözelti halinde bulunmaktadır. Pozitif elektrotta VO^{2+} ve VO_2^+ çiftleri kullanırken, negatif elektrotta V^{2+} ve V^{3+} çiftleri kullanılmaktadır. Vanadyum iyonları, VO_2^+ , sarı, VO^{2+} , mavi, V^{3+} , yeşil ve V^{2+} , mor olmak üzere farklı renklere sahiptir. Böylelikle VRAB sisteminin kapasitesi, hat içerisinde izlenerek elektrolitlerin şarj/deşarj durumları görülebilmektedir. Şekil 1.3’te vanadyum sembolü ve 4 farklı tür için elektrolit çözeltileri görülmektedir.



Şekil 1.3. Vanadyum sembolü ve elektrolit çözeltileri

Vanadyum Redoks Akış Bataryanın ana sistem bileşenleri gözenekli elektrot, elektrolit ve membrandan oluşmaktadır. Hücre, elektrolitlerin karışmasını engelleyen membran ile ayrılmış iki bölmeden (pozitif yarım hücre ve negatif yarım hücre) oluşmaktadır. Her iki yarım hücre tarafında, yüksek oranda gözenekli karbon yapıdan yapılmış elektrot bulunmaktadır. Elektrolitler, anolit ve katolit olarak iki harici rezervuarda depolanmaktadır [16]. Şekil 1.4’te VRAB sistem bileşenleri ile farklı vanadyum iyonlarının elektrokimyasal reaksiyon sonucu oluşan yükseltgenme ve indirgenme reaksiyonları için şarj vedeşarj işlemleri gösterilmektedir.



Şekil 1.4. Vanadyum redoks akış batarya sistem bileşenleri

VRAB sistemlerinin avantajları aşağıda maddeler halinde verilmektedir [17]:

- Yüksek çevrim ömrüne sahiptirler. Bundan dolayı sadece mekanik bileşenlerin kullanım ömürlerinin sonunda değiştirilmesi gerekir.
- Kullanılan elektrolitlerin değiştirilmesi ile yeniden şarj edilebilmeleri mümkündür.
- Çözelti hacminin artması ile sistem kapasitesi artırılabilir.
- Yenilenebilir enerji kaynaklarında kullanılabilir.
- Şarj-deşarj verimliliği yüksektir.
- Yanma, alev alma ve patlama gibi riskleri bulunmamaktadır.
- Ölçeklendirilebilir olması ile W seviyelerinden MW seviyelerine kadar batarya sistemleri geliştirilebilir.
- Atık ürün bulunmadığı için çevre dostudur.
- Düşük kurulum ve bakım maliyetine sahiptirler.

VRAB sistemlerinin çalışma prensibi ise şu şekildedir: VRAB'da, bir tankta depolanan pozitif ve negatif yarı hücrelerde bulunan vanadyum elektrolitleri önce şarj edilebilecekleri sonra deşarj edilebilecekleri hücre içinde dolaştırılır. Anolit ve katolit

tanklarda bulunan elektrolit türleri gözenekli elektrota pompalanır. Burada elektrolitlerin karışmasını önlemek için iki yarı hücre membran ile ayrılır. Bu sırada elektrokimyasal reaksiyon elektrot/elektrolit ara yüzeyinde meydana gelmektedir. Şarj işlemi pozitif elektrotta V^{4+} türünün elektron vererek V^{5+} 'e dönüşmesiyle gerçekleşir. Bu elektrokimyasal reaksiyon sonucunda elektron ve H^+ iyonu açığa çıkar. Elektron akım toplayıcı tabaka aracılığıyla dış devreden diğer yarı hücreye ulaşır. Bu elektron transferi ile V^{3+} türü elektronu kullanarak V^{2+} ye dönüşerek indirgenme reaksiyonu gerçekleşir. Deşarj işlemi sırasında ise V^{2+} türü elektron vererek V^{3+} 'e yükseltgenir. Açığa çıkan elektron dış devre üzerinden pozitif yarı hücreye geçer. Pozitif yarı hücrede V^{5+} türü elektronu alarak indirgenir ve V^{4+} 'e dönüşür. Deşarj işleminde ilk tükenen tür bataryanın kapasitesini belirlemektedir.

1.3.1. VRAB Elektrolit Bileşeni

VRAB'da kullanılan elektrolit, elektrokimyasal enerjinin depolandığı bileşendir. Bileşenler sıvı formda olup su, asit ve vanadyum türlerinden (V^{2+} , V^{3+} , VO^{2+} , VO_2^+) oluşmaktadır. VRAB üzerinde yapılan ilk çalışmalarda elektrolit çözeltisi $VOSO_4$ tuzunun H_2SO_4 içerisinde çözünmesiyle hazırlanmaktaydı [18]. Ancak, $VOSO_4$ tuzunun yüksek maliyeti sebebi ile alternatif olarak V_2O_5 tuzu kullanılmaya başlandı. VRAB elektrolitleri birbirine karışmadan pozitif elektrolit tankı ve negatif elektrolit tankı içerisinde depolanarak elektrotlarda redoks tepkimeleri gerçekleştirirler. Pozitif elektrot kısmında tepkimeye giren elektrolit VO^{2+} ve VO_2^+ türleri olurken negatif elektrot kısmında tepkimeye giren elektrolit V^{2+} ve V^{3+} türleridir. Elektrolit, bataryanın enerji yoğunluğunu, enerji depolama kapasitesini, enerji verimliliğini ve çevrim ömrünü belirlemesi açısından önemli bir yere sahiptir. Elektrolitten beklenen özellikler aşağıdaki maddeler halinde verilmektedir.

- a. Kimyasal kararlılığın yüksek olmalıdır.
- b. Çözünürlüğünün yüksek olmalıdır.
- c. İyonik iletkenliğinin yüksek olmalıdır.
- d. Viskozitesinin düşük olmalıdır.

1.3.2. VRAB Elektrot Bileşeni

VRAB’da indirgenme ve yükseltgenme reaksiyonları pozitif ve negatif elektrot bileşenlerin de gerçekleşmektedir. Elektrot içerisinde yük, kütle, momentum ve ısı transferi gibi olgular meydana gelmektedir. Bu yüzden elektrottan beklenen özellikler şu şekilde olmalıdır.

- a. Elektrokatalitik aktivite
- b. Uygun gözenek yapısı
- c. Elektrot geometrisinin korunması
- d. Elektrokimyasal aktif yüzey alanının yüksek olması
- e. Yüksek elektriksel iletkenlik
- f. Yüksek mekanik iletkenlik ve dayanıklılık
- g. Kararlı çalışan elektrokimyasal aralık
- h. Düşük maliyet

Elektrotların malzeme içeriği ise karbon temelli malzemelerden oluşmaktadır. Karbon temelli malzemeler için kumaş, grafit kumaş, karbon kâğıt, karbon nanotüp, grafen oksit, grafit ve grafen örnekleri verilebilir.

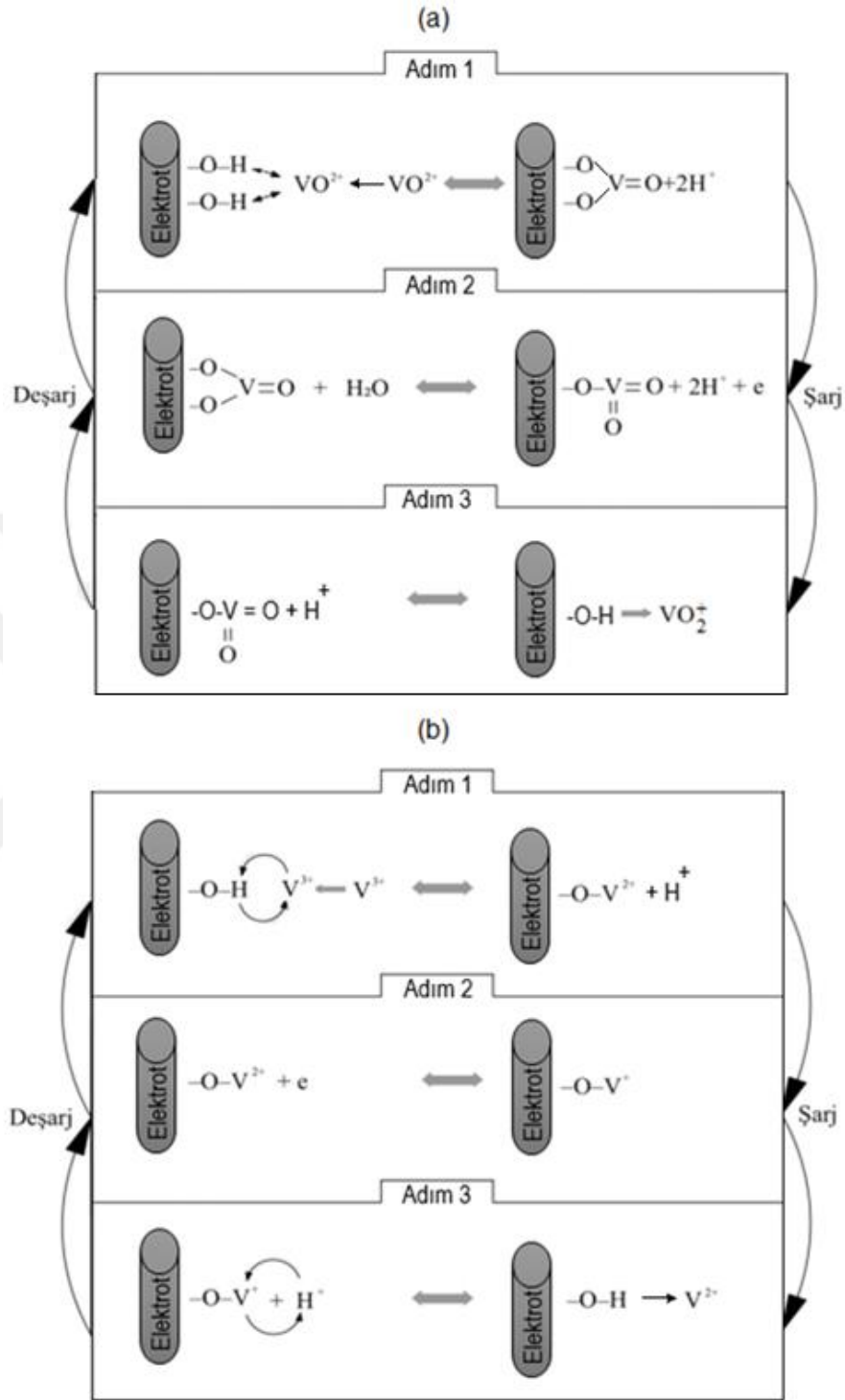
Pozitif ve negatif elektrotlarda gerçekleşen indirgenme ve yükseltgenme reaksiyonları eşitlikler 1.1 ve 1.2’de sırasıyla verilmektedir.



Anot ve katot elektrotta meydana gelen indirgenme ve yükseltgenme reaksiyonları Şekil 1.5’te ayrıntılı bir şekilde gösterilmektedir [13]. Şekil 1.5.a’da pozitif elektrotta, gerçekleşen şarj ve deşarj reaksiyonları gösterilirken, Şekil 1.5.b’de negatif elektrotta gerçekleşen şarj ve deşarj reaksiyonları gösterilmektedir. Pozitif elektrotta şarj reaksiyonu için, Adım 1’de, VO^{2+} türü elektrottaki hidroksil grubuna bağlanarak, hidroksil grubunda bulunan hidrojen iyonunun serbest kalmasına sebep olmaktadır. Adım 2’de, 1 mol su, OH^- ve H^+ iyonlarına ayrılmaktadır ve bu işlem sonucunda OH^- grubu vanadyuma bağlanırken H^+ iyonu serbest kalmaktadır. Bununla birlikte, yükseltgenme reaksiyonu ile 1 e^- açığa çıkar ve vanadyuma bağlı olan hidroksil grubundaki H^+ iyonu serbest kalır. Adım 3’te, H^+

iyonu tekrar kullanılarak elektrottaki OH^- gurubu yapısını korumaktadır. Adım 3'te oluşan VO_2^+ elektrottan ayrılmaktadır. Negatif elektrotta gerçekleşen şarj reaksiyonu için 1 numaralı basamakta, V^{3+} elektrotta bulunan OH^- grubundaki oksijene bağlanarak H^+ iyonunun serbest kalmasına sebep olmaktadır. Adım 2'de, pozitif elektrottan gelen elektron V^{2+} türüne bağlanarak indirgenmesini sağlayarak VO^+ türüne dönüşmektedir. Adım 3'te, açığa çıkan H^+ iyonu elektrottaki oksijene bağlanarak V^{2+} türünün serbest kalmasına sebep olur ve bu basamak sonunda V^{2+} türü elektrottan ayrılmaktadır. Ters yönünde gerçekleşen redoks tepkimesi sonucunda ise deşarj işlemi gerçekleşmektedir.





Şekil 1.5. İndirgenme ve yükseltgenme reaksiyonları; a) Katodit redoks çifti VO^{2+} ve VO_2^+ şeması b) Anolit redoks çifti V^{2+} ve V^{3+} şeması

1.3.3. VRAB Membran Bileşeni

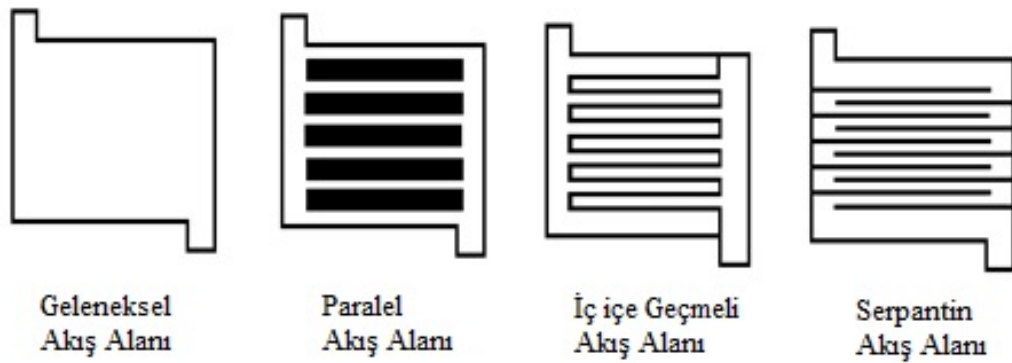
VRAB sistemlerinde kullanılan membranlar, pozitif ve negatif yarı hücreleri fiziksel ve kimyasal olarak ayırıp bu yarı hücrelerde bulunan elektrolitlerin birbirine karışmasını

engellemektedirler. Diğer taraftan membranın iyon geçirgen yapısı sayesinde hidrojen iyonlarının transferine olanak sağlamaktadır. VRAB’da membrandan beklenen özellikler aşağıda sıralanmaktadır:

- a. Yüksek iyonik iletkenlik
- b. İyon seçiciliğinin yüksekliği
- c. Yüksek kimyasal kararlılık olarak söylenebilir.

1.3.4. VRAB’da Akış Alanları ve Akım Toplayıcı Tabakalar

VRAB’da uygun kanal alanı belirlenmesi, kararlı elektrokimyasal reaksiyon gerçekleşmesi ve vanadyum türlerinin homojen bir dağılım göstermesi için önemlidir. VRAB’da en çok kullanılan akış alanları Şekil 1.6’da gösterilmektedir [19].



Şekil 1.6. Vanadyum redoks akış bataryalarda akış alanları

Geleneksel akış alanı; Elektrolitin elektrot boyunca zorlandığı bir akış alanıdır. Yüksek akış hızlarında hidrolik direncin artması basınç düşüşünü artırmaktadır.

Paralel akış alanı; Hücrenin giriş ve çıkışına bağlanan çoklu paralel kanallardır.

İç içe geçmeli akış alanı; Elektrolitin elektrottan geçmesi sırasında zorlanmış konveksiyon ile daha iyi difüzyon sağlamaya yardımcı olmaktadır.

Serpantin akış alanı; Akış yolu baştan sona süreklidir ve bataryanın elektrot yüzeyi boyunca üniform akış dağılımı sağlamada nispeten diğer akış alanlarına göre daha etkilidir. Uzun akış yolu nedeniyle basınç düşüşünü azaltmaya yardımcı olabilir.

VRAB’da kullanılan akım toplayıcı tabakanın görevi ise pozitif ve negatif yarı hücreleri mekanik olarak bir arada tutmak ve bir yarı hücreden diğer yarı hücreye elektron iletimini sağlamaktır. Elektrolitlerin kayıpsız olarak elektrotlara iletimini ve gerçekleşecek olan redoks tepkimesi sonrasında ürünlerin uzaklaştırması için kullanılmaktadır. VRAB’da akım toplayıcı tabakadan istenilen özellikler aşağıda sıralanmaktadır.

- a. Düşük elektriksel direnç
- b. Yüksek korozyon direnci
- c. Yüksek Isıl iletkenlik
- d. Düşük maliyet
- e. Yüksek mekanik kararlılık

1.4. VRAB’da Performansı Etkileyen Kayıplar

VRAB’da aktivasyon kayıpları, ohmik kayıplar, konsantrasyon kayıpları, şönt akımı ve iyon geçişi kayıpları olmak üzere dört farklı kayıp gerçekleşmektedir.

1.4.1. Aktivasyon Kayıpları

Elektron transferi sırasında gerçekleşen kayıplara aktivasyon kayıpları denir. Aktivasyon kayıpları, elektrokimyasal reaksiyonun sürekli olması durumu ile ilgili üretilen voltaj değeri olarak düşünülebilir. Aktivasyon kayıplarının düşürülmesi elektrotlarda uygun malzeme seçimi ile sağlanabilmektedir.

1.4.2. Ohmik Kayıplar

Ohmik kayıplar, elektrotların elektron akışına karşı gösterdiği direnç ile elektrolitin ve membranın iyon akışına karşı gösterdiği direnç sonucu oluşan voltaj kaybı olarak adlandırılır. Ohmik kaybı etkileyen parametreler, elektrot malzemesi, hücrenin montajı elektrolitin ve membranın iyonik iletkenlikleri olarak sıralanabilir. Bu parametrelerin iyileştirilmesi sonucu ohmik kayıplar azalmaktadır.

1.4.3. Konsantrasyon Kayıpları

Elektrot yüzeyi ile çözelti konsantrasyonu arasındaki fark sebebi ile oluşan kayıplardır. Reaktan, elektrotta elektrokimyasal reaksiyon ile tüketildiği için, onu çevreleyen malzemenin ilk konsantrasyonunu koruyamaması nedeniyle potansiyel bir kayıp oluşmaktadır. Bu kayıplar, debi ve kütle transfer mekanizmasının iyileştirilmesi ile azaltılabilmektedir.

1.4.4. Şönt Akımı ve İyon Geçiş Kayıpları

Diğer yarı hücreye iyon geçişini sağlayan membrandan istenmeyen iyon geçişi ve şönt akımı ile kayıplar gerçekleşmektedir. Vanadyum iyonlarının diğer yarı hücreye geçmesi sonucu oluşan kayıplar, membrana yapılacak katkılandırmalar ve iyon geçişi kayıpları ile engellenebilir. Şönt akımı veya kaçak akımlar, elektrolitin kendiliğinden deşarj akımıdır, bataryanın yığın yapısının değiştirilmesi ve iletim borularının tasarımının iyileştirilmesi ile kısa devre kayıplarının giderilmesi sağlanabilmektedir.

2. BÖLÜM

LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Literatür Değerlendirmesi

VRAB bileşenlerine ait fiziksel özelliklerin performans açısından önemli bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Bu bileşenlerden biri olan akım toplayıcı tabaka üzerindeki akış alanlarının ise batarya performansını daha fazla etkilediği yapılan çalışmalarda görülmektedir. Literatürde, bu akış alanlarının ve akış alanlarına ait parametrelerin batarya potansiyel performansına ve batarya içerisinde gerçekleşen yük, kütle, momentum ve ısı transferi üzerine etkileri aşağıdaki şekilde özetlenmektedir.

Ishitobi vd. [6], VRAB’da akış hızı ve yerel akış dağılımlarını görselleştirmek için, sürekli rejimde iki boyutlu bir model geliştirdiler. Elde edilen sonuçlara bakıldığında, akım yoğunluğunun bataryanın rib kenarlarında çok daha fazla olduğu ve aktivasyon kayıplarının, pozitif elektrot ile karşılaştırıldığında negatif elektrotta daha yüksek olduğu görülmektedir. Xu vd. [20], geliştirdikleri 3 boyutlu modelle serpantin, paralel ve geleneksel akış alanlarının VRAB üzerine olan etkilerini araştırdılar. Modelde VO_2^+ konsantrasyon dağılımını hücre voltajını ve kayıpları incelediler. Maksimum verimi elde etmek için her bir kanal tipine uygun bir debinin olması gerektiği görüldü. VRAB’daki aşırı gerilimin hem düzlemde hem de düzlem boyunca elektrolitin homojen bir şekilde dağılmasına bağlı olduğu ortaya konuldu. Elektrot içerisindeki elektrolitin üniform dağılması için serpantin akış alanının, paralel akış alanına göre daha uygun bir akış alanı olduğu tespit edildi. Yin vd. [21], iç içe geçmeli akış kanal alanı için 3 boyutlu VRAB modeli geliştirdiler. VRAB hücresinin çalışması sırasında akışkan basıncını, elektrik potansiyelini, akım yoğunluğunu ve aşırı gerilim dağılımlarını incelemek için tek ve çok girişli olmak üzere modeller tasarladılar. Tek girişli tasarımda, elektrik potansiyeli, akım yoğunluğu ve aşırı gerilim, farklı elektrolit debilerinde ve kanal boylarında akış yönü boyunca homojen şekilde dağılım göstermektedir.

Çok girişli tasarımda ise elektrolit basıncının elektrotun girişinde düşük olduğu ve bu durumun elektrolit akışında ve hücre potansiyelinde eşit olmayan dağılıma neden olduğu belirtildi. Zhang vd. [22], iç içe geçmeli ve serpantin akış alanları için 2 boyutlu model oluşturup hem sayısal hem de deneysel çalışmalar gerçekleştirdiler. Buna ek olarak, serpantin akış alanı için kanal sayısı artırılarak 5 farklı model oluşturuldu. İç içe geçmeli akış alanı ile kanal içerisinde daha düşük basınç düşüşü ve reaktantların elektrotta daha homojen dağılımı olduğu görüldü. Ayrıca, serpantin akış alanı tasarımı için kanal sayısının artması ile pompa gücü düşerken vanadyum iyonlarının homojen dağılımının azaldığı görüldü. Sun vd. [23], iç içe geçmeli akış alanı ile yeni serpantin akış alanı tasarlayarak farklı akış hızları ve sıkıştırma oranlarının akım yoğunluğu ve voltaj üzerindeki etkilerini analiz ettiler. Elde edilen sonuçlara göre, tasarlanan serpantin akış alanının hem düzlem hem de düzlem içi yönlerde aktif türlerin konvektif kütle transferini arttırdığı tespit edildi. Mesaggi vd. [24], VRAB için yarı hücre konfigürasyonunda serpantin ve iç içe geçmeli akış alanlarına sahip üç boyutlu model geliştirdiler. Simülasyon sonuçları, elektrolitin sabit akış hızına sahip olduğu koşulda, serpantin akış alanlı modelin performansı diğerinden daha iyi olduğu gösterdi. Chen vd. [25], paralel, iç içe geçmeli ve optimize edilmiş bir akış alan tasarımı ile VRAB için akım yoğunluklarını ve aşırı gerilimleri karşılaştırdılar. Bu 3 farklı kanal tipi için hız, basınç ve V^{2+}/V^{3+} türleri için konsantrasyon dağılımları analiz edildi. Optimize edilmiş akış alanı diğer akış alanlarına göre daha iyi performans gösterdi. Lee vd. [26], 3 boyutlu serpantin akış alanına sahip 5 farklı (1.9 mm, 2.8 mm, 3.7 mm, 5.3 mm, 9.6mm) kanal genişliği ve kanal sayısı belirleyerek sayısal bir model sundular. Elektrolit debisinin aşırı gerilim, hücre performansı, vanadyum türlerinin konsantrasyon dağılımı, basınç düşüşü ve pompa gücü üzerine etkilerini analiz ettiler. Sonuçlar, kısa kanal uzunluğu ile yüksek kanal sayısına sahip olan kanalların molar konsantrasyon dağılımını iyileştirdiğini ve basınç düşüşünü artırdığını göstermektedir. Yin vd. [27], iç içe geçmeli akış alanında VO^{2+} ve VO_2^+ konsantrasyon dağılımlarını, elektrik voltajını ve lokal akım yoğunluklarını araştırıldılar. Akış kanalı tasarımı için, elektrotu çevreleyen akış kanalı, elektrot üzerindeki akış kanalı ve akış kanalı olmayan geometrik tasarımlar olmak üzere 3 farklı model tasarlayıp bu tasarımlar için basınç düşüşlerini incelediler. En düşük basınç düşüşünün elektrotu çevreleyen akış kanalında olduğu görüldü. Elektrot üzerindeki akış kanalına göre elektrotu çevreleyen akış kanalında reaktif iyonlar daha homojen dağılım gösterdiler. Kütle transferinin sınırlamalarının

daha iyi anlaşılması için 3 boyutlu bir kanal tasarımı Zheng vd. tarafından yapıldı [28]. Konsantrasyonun, yüksek akım yoğunluğunda ve yüksek şarj seviyelerinde daha belirgin olduğu görüldü. Konsantrasyonun olumsuz etkisini gidermek için elektrolit akış yolunun daha kısa olduğu yeni bir kanal tipi denendi. Yeni kanal tipinde elektrolitin daha homojen dağılıma sahip olduğu keşfedildi. Bununla beraber, yüksek şarj durumunda ve yüksek akım yoğunluğunda kütle transfer etkisi daha belirgin olduğu tespit edildi. Al-Yasiri ve Park [29], serpantin akış alanına sahip 3 farklı kanal yüksekliğinin VRAB üzerindeki etkisini 3 boyutlu olarak araştırdılar. Çalışmada, hücre voltajı, enerji verimliliği ve batarya verimliliğini farklı akış hızlarında ve akım yoğunluklarındaki değişimleri incelendi. Sonuçlar, akış hızının artması ile enerji verimliliğinin iyileştiğini gösterdi. Batarya verimliliği artan akış hızı ile önce artarken, büyük pompa kayıplarından dolayı sonradan düştüğü görülmektedir. Düşük akış hızlarında ve yüksek akım yoğunluklarında batarya performans etkisi daha fark edilir bir şekilde görüldü. Her hücre konfigürasyonu için optimum akış hızının, uygulanan akım yoğunluğuna bağlı olarak değiştiği ortaya kondu. You vd. [30], farklı akım yoğunluklarının, elektrot boyunca VRAB performansı üzerine etkisini analiz etmek için 2 boyutlu bir model geliştirdiler. Akım yoğunluğunun 2 katına çıkması ile elektrot potansiyelinin arttığı ve aşırı potansiyelin iki katına çıktığı görüldü. Elektrot kalınlığının veya gözenekliliğinin azalması, reaktan konsantrasyonunun daha hızlı tükenmesine, akım yoğunluğu transferinin daha yüksek değere çıkmasına ve aşırı potansiyelin daha düzgün dağılmasına sebep olduğu ifade edildi. Li vd. [31], 4 farklı kanal aralıklarına sahip (1mm, 3mm, 4.8mm, 6mm) iç içe geçmeli akış alanının VRAB üzerine etkilerini araştırdılar. Çalışmada, farklı akış hızlarında hücre performansı ve pompalama kaybı üzerindeki etkiler incelendi. En yüksek pompa bazlı voltaj verimliliğinin, çeşitli çalışma koşulları için 3 mm kanal aralığında elde edilebileceği belirtildi. Lu vd. [32], serpantin akış alanına sahip 3 boyutlu bir VRAB modeli sundular. Geliştirilen modelde, akış alanları ile elektrot arasında blok yüzeyler oluşturuldu. 0 mm, 0.3 mm, 0.6 mm, 0.9 mm, 1.2 mm, 1.4 mm ve 1.5 mm'ye kadar oluşturulan blok yüzeylerin şarj/deşarj performansı, türlerin taşınımı, akış dağılımı ve sistem verimliliği üzerindeki etkileri analiz edildi. 0 mm'den 1.4 mm'ye kadar artan blok yüksekliği ile VRAB'ın şarj voltajı kademeli olarak azalırken,deşarj voltajının kademeli olarak arttığı görüldü. 1.4 mm ile 1.5 mm blok yüksekliğinde, voltaj değerlerinin neredeyse hiç değişmediği bulundu. Sistem verimliliği 1.4 mm blok yüksekliğinde %87,8 ile maksimum değere ulaştı. Lu

vd. [33], serpantin akış alanı ve iç içe geçmeli akış alanının yanında geliştirilmiş yeni bir serpantin akış alanı geliştirdiler. Geliştirilmiş serpantin akış alanı, geleneksel serpantin akış alanı ve iç içe geçmeli akış alanlarına kıyasla yüksek kütle aktarımı ve elektrottaki türlerin dağılımının tekdüzeliğinden dolayı daha yüksek şarj/deşarj performansı sergilediği ortaya çıktı. Buna ek olarak, geliştirilen serpantin akış alanıdeşarj işlemi sırasında geleneksel serpantin akış alanına göre %4,2 ila %12,6 arasında, iç içe geçmeli akış alanına göre ise %1 ila %4 arasında daha yüksek güç verimliliğine sahip olduğu ifade edildi.

Zheng vd. [34], 3 boyutlu, izotermal olmayan, sayısal bir model oluşturup uygulanan akım yoğunluğunun, gözenekliliğin ve akış hızının ısı üretimine ve sıcaklık üzerine etkilerini incelediler. Bu çalışmada, sıcaklık dağılımının homojenliği için düşük gözeneklilik ve yüksek debinin önemi vurgulandı. Şarj anında oluşan sıcaklığındeşarj anındaki sıcaklıktan daha düşük olduğu görüldü. Bununla birlikte, şarj vedeşarj durumlarında pozitif elektrotta üretilen ısınin negatif elektrottaki ısıdan daha düşük olduğu vurgulandı. Al-Fetlawi vd. [35], 2 boyutlu, izotermal olmayan sayısal bir model sundular. Model, kütle, enerji, yük ve momentum korunumuna dayalı olarak vanadyum türlerinin reaksiyon kinetiğini de içermektedir. Ohmik dirençlerin artışı ısı artışına sebep olduğundan dolayı potansiyel dağılımının sıcaklık dağılımında etkilediği görüldü. Bununla birlikte, elektrolit debisi ve akım yoğunluğundaki değişikliklerin, şarj vedeşarjı etkileyeceği ve böylece sıcaklık artışını da etkileyeceği belirtildi. Sonuç olarak, debinin kontrollü şekilde uygulanması ile sıcaklık seviyesinin optimum düzeyde tutulabileceği ifade edildi. Alphonse ve Elden [36], VRAB için 2 boyutlu model oluşturarak farklı çalışma sıcaklıkları (10°C, 20°C, 30°C ve 40°C) ve farklı elektrolit molar konsantrasyonları için (1.25M, 1.50M, 1.75M, 2.00M) bataryanın şarjı vedeşarjı esnasında potansiyel performansın, sıcaklık dağılımının, tersinmez, tersinir ve ohmik ısı yoğunluğun değişimlerini incelediler. Sonuç olarak, sıcaklık ve elektrolit molar konsantrasyonunun artması VRAB performansını artırdı. Bununla birlikte, sıcaklık ve molar konsantrasyonun artması elektrot içindeki sıcaklık dağılımına büyük bir fark oluşturmadı. Negatif elektrotta gerçekleşen tersinmez ve tersinir ısı yoğunluğunun pozitif elektrottan daha fazla olduğu ortaya kondu. Ayrıca, ohmik ısı yoğunluğu sıcaklığın artışı ile artarken, elektrolit molar konsantrasyonunun artışı ile azaldığı görüldü.

Literatürde görüldüğü üzere akış alanı tasarımının ve ısı transferinin VRAB performansı için önemli olduğu görülmektedir. Bunlara ek olarak, sayısal modellerde serpantin ve iç içe geçmeli akış alanlarının daha çok kullanıldığı görüldü. Yapılan çalışmalarda akış alanlarının ve farklı kanal geometrilerinin batarya içerisinde gerçekleşen ısı transferi üzerine etkisine inceleyen bir araştırmaya rastlanmamaktadır.

2.2. Tezin Amacı

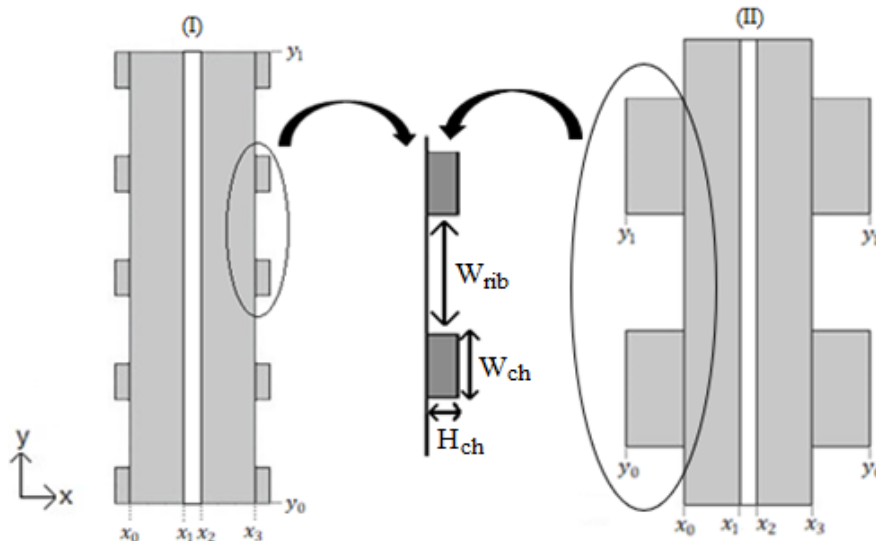
Bu tez çalışmasının amacı; bir vanadyum redoks akış bataryasında serpantin ve iç içe geçmeli akış alanları için farklı kanal geometrilerinin (dikdörtgen, kare, daire ve yamuk) ve farklı kanal oranlarının batarya içerisinde gerçekleşen kütle, yük ve ısı transferleri üzerindeki etkilerini analiz etmektir. Bu amacı gerçekleştirmek için serpantin ve iç içe geçmeli akış alanları için ayrı ayrı iki boyutlu sayısal modeller oluşturulup farklı kanal geometrileri için çözümler yapılmıştır. Her iki akış alanına ayrı ayrı dikdörtgen, daire, kare ve yamuk kanal geometrileri uygulandı. Ayrıca, bu kanal geometrileri arasında en iyi performans gösteren kanal geometrisi için farklı kanal oranları için de bataryada gerçekleşen sıcaklık dağılımları, tersinmez, tersinir ve ohmik ısı yoğunlukları analiz edildi.

3. BÖLÜM

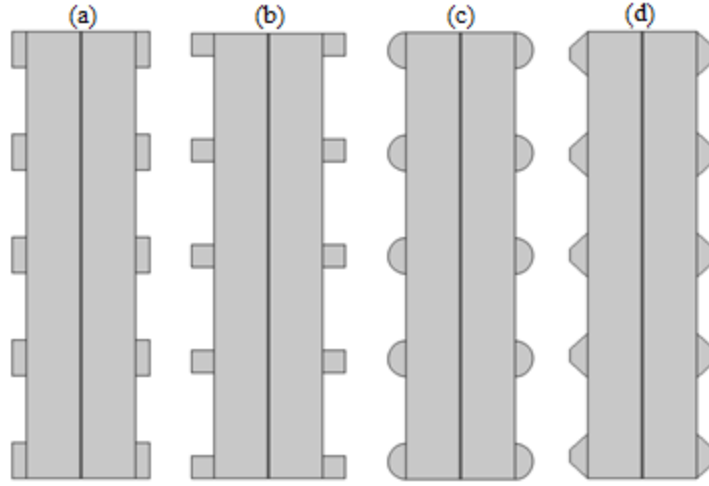
MATEMATİKSEL MODEL

3.1. Model Geometrileri

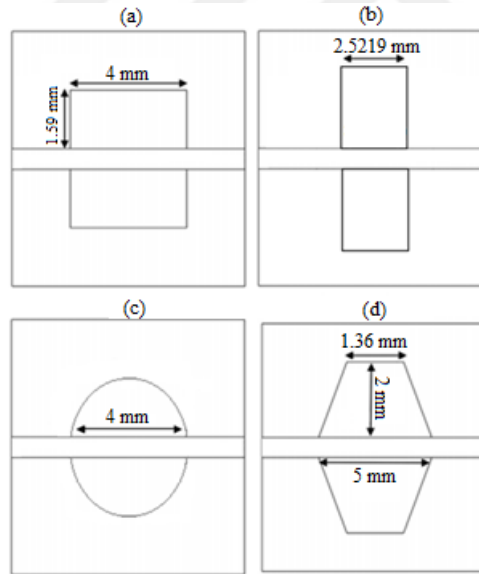
VRAB’da serpantin ve iç içe geçmeli akış alanı için kanal geometrilerinin batarya potansiyel performansı, yük, kütle ve ısı transferi üzerinde etkilerini analiz etmek için dikdörtgen, kare, daire ve yamuk olmak üzere dört farklı kanal geometrisi için modeller oluşturuldu. Her iki akış alanı için belirlenen bu kanal geometrilerinin alanları her bir model için sabit tutuldu. Şekil 3.1’de serpantin ve iç içe geçmeli akış alanı için iki boyutlu VRAB’ın geometrik modeli gösterilmektedir. Şekil 3.2’de serpantin akış alanı için oluşturulan kanal geometrileri gösterilirken, Şekil 3.3’te kanal geometrilerinin boyutları sunulmaktadır.



Şekil 3.1. Akış alanları için iki boyutlu VRAB sınırları; (I) Serpantin akış alanı, (II) İç içe geçmeli akış alanı



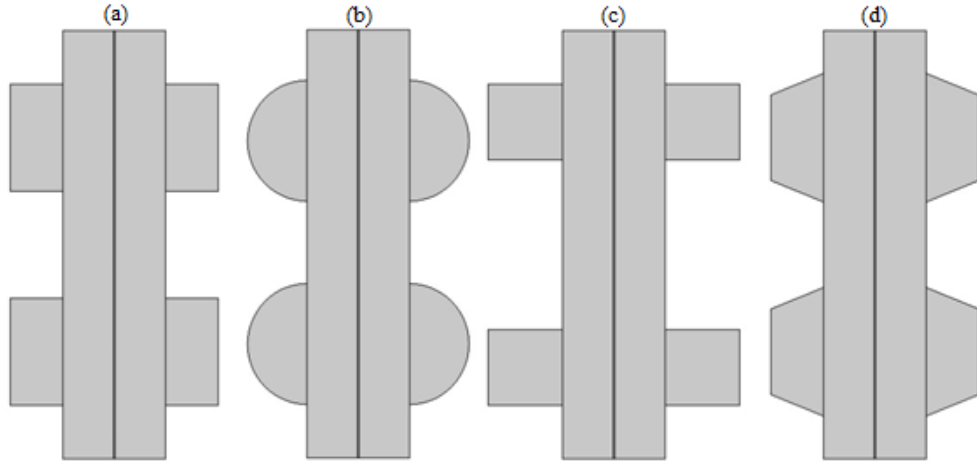
Şekil 3.2. Serpantin akış alanında farklı kanal geometrileri; (a) Dikdörtgen, (b) Kare (c) Daire, (d) Yamuk



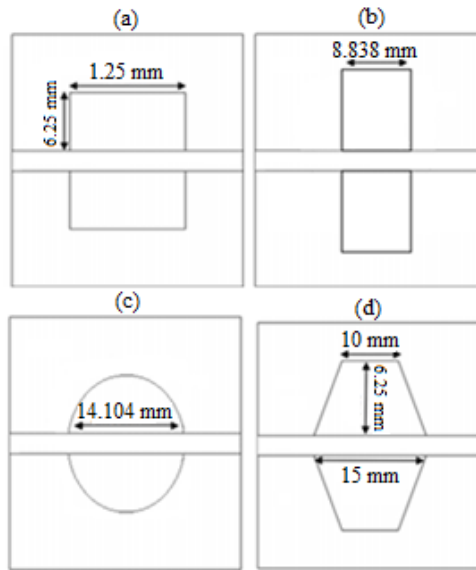
Şekil 3.3. Serpantin akış alanında farklı kanal geometrilerinin geometrik boyutları; (a) Dikdörtgen, (b) Kare (c) Daire, (d) Yamuk

İç içe geçmeli akış alanı için oluşturulan kanal geometrilerinin alanı için Ishitobi ve arkadaşlarının geliştirdiği model geometrisi referans alınarak belirlendi [6]. Bu çalışmadaki dikdörtgen kanal geometrisinin alanı referans alınıp aynı kanal alanına sahip diğer kanal geometrileri oluşturuldu. Model geometrisinde kanal yüksekliğinin (giriş ve çıkış kanalları toplamı) hücre uzunluğuna oranı 0.5 olarak hesaplandı. Buna ilaveten, tek bir kanal genişliğinin kanal yüksekliğine oranı da yine 0.5'tir. Şekil 3.4'te

İç içe geçmeli akış alanı için oluşturulan kanal geometrileri gösterilirken, Şekil 3.5'te farklı kanal geometrilerinin boyutları verilmektedir.



Şekil 3.4. İç içe geçmeli akış alanında farklı kanal geometrileri; (a) Dikdörtgen, (b) Kare (c) Daire, (d) Yamuk



Şekil 3.5. İç içe geçmeli akış alanında farklı kanal geometrilerinin geometrik boyutları; (a) Dikdörtgen, (b) Kare (c) Daire, (d) Yamuk

3.2. Model Varsayımları

Sayısal modelin karmaşıklığını azaltmak için bazı varsayımlar yapıldı. Yapılan varsayımlar aşağıdaki şekildedir:

- Elektrolit sıkıştırılmaz akışkan olduğu ve elektrolit akışının laminar akışa sahip olduğu kabul edildi.
- Membrandan sadece H^+ iyonları geçmektedir.
- Hidrojen ve oksijen oluşumu gibi yan reaksiyonların gerçekleşmediği varsayıldı.
- Elektrotlar ve membran izotropik ve homojen kabul edildi.
- Yüzeyler arasında temas direnci ihmal edildi.
- Komponentlerin termal iletkenliklerinin sıcaklıkla değişmediği kabul edildi.
- Batarya ve çevre arasında taşınım ile ısı transferinin olmadığı kabul edildi.

3.3. Model Denklemleri

Pozitif ve Negatif Elektrot: Kütle, momentum, tür ve yük koruma denklemleri, çoklu alan yaklaşımına dayalı olarak hem pozitif hem de negatif elektrotlara ayrı ayrı uygulanmaktadır [29].

$$\rho(\nabla \cdot \vec{u}) = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\rho}{\varepsilon} \left((\vec{u} \cdot \nabla) \frac{\vec{u}}{\varepsilon} \right) = -\nabla P + \nabla \cdot \left[\frac{\mu}{\varepsilon} (\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T) \right] - \frac{2\mu}{3\varepsilon} \nabla(\nabla \cdot \vec{u}) - \left(\frac{\mu}{K} + Q \right) \vec{u} + \vec{f} \quad (2.2)$$

burada, ρ yoğunlu, $\vec{u}$ akış hızı, ε elektrot gözenekliliği, P basınç, μ dinamik viskozite, Q kütle kaynağı ve K negatif /pozitif elektrotların geçirgenliğidir. K , Carman-Kozeny denklemi tarafından aşağıdaki gibi tanımlanır [29]:

$$K = \frac{d_f^2 \varepsilon^3}{16C_k(1 - \varepsilon)^2} \quad (2.3)$$

Burada, d_f , gözenekli elektrot fiber çapı ve C_k , Carman-Kozeny sabitidir. Gözenekli elektrotlarda türlerin taşınması için Nernst-Planck denklemi kullanılır. Türlerin taşınması difüzyon, migrasyon ve konveksiyon mekanizmaları ile gerçekleştirilir [29].

$$\nabla \cdot \vec{N}_i = S_i \quad (2.4)$$

$$\vec{N}_i = -D_i^{eff} \nabla C_i - z_i M_i C_i F \nabla \phi_i + \vec{u} C_i \quad (2.5)$$

burada, D_i^{eff} etkin difüzyon katsayısı, C_i türlerin konsantrasyonu, z_i sabit yük, M_i elektrolitin iyonik hareketliliği, ϕ_l iyonik potansiyel, F Faraday sabiti ve $\vec{u}$ elektrolit çözeltisinin hızıdır. Her tür için kaynak terimi Tablo 2’de verilmektedir.

Tablo 2. Her tür için kaynak terim [29]

Sembol	Açıklama	Katot	Anot
S_2	V^{2+} için kaynak reaksiyonu	-	I/F
S_3	V^{3+} için kaynak reaksiyonu	-	-I/F
S_4	VO^{2+} için kaynak reaksiyonu	I/F	-
S_5	VO_2^+ için kaynak reaksiyonu	-I/F	-
S_{H^+}	H^+ için kaynak reaksiyonu	$-R_d$	$-2I/F - R_d$
$S_{HSO_4^-}$	HSO_4^- için kaynak reaksiyonu	R_d	R_d

burada, R_u evrensel gaz sabiti ve T bataryanın çalışma sıcaklığıdır.

Etkili difüzyon katsayısı Bruggeman korelasyonu ile şu şekilde ifade edilir [29]:

$$D_i^{eff} = D_i \varepsilon^{1.5} \quad (2.6)$$

İyonik hareketlilik, Nernst-Einstein denklemi ile aşağıdaki gibi hesaplanır [29]:

$$M_i = \frac{D_i^{eff}}{R_u \cdot T} \quad (2.7)$$

Gözenekli elektrotlardaki yük koruma denklemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir [29]:

$$\nabla \vec{l}_s = -\nabla \nabla \vec{l}_l = -\sigma_s^{eff} \nabla^2 \phi_s = k_l^{eff} \nabla^2 \phi_l = S \quad (2.8)$$

burada, $\vec{l}_s$ katı fazdaki akım yoğunluğu, $\vec{l}_l$ elektrolit fazındaki akım yoğunluğu, σ_s^{eff} gözenekli elektrotun etkin elektriksel iletkenliği, k_l^{eff} elektrolitin iyonik iletkenliği ve ϕ_s elektriksel potansiyeldir. Elektrot ve elektrolitin etkili iletkenlikleri sırasıyla aşağıdaki ifadelerle elde edilir [29].

$$\sigma_s^{eff} = (1 - \varepsilon)^{\frac{3}{2}} \sigma_s \quad (2.9)$$

$$k_l^{eff} = \frac{F^2}{RT} \sum_i z_i^2 D_i^{eff} c_i \quad (2.10)$$

Negatif ve pozitif elektrotlar için yerel akım yoğunlukları sırasıyla Butler-Volmer denklemleriyle aşağıdaki şekilde elde edilir [29].

$$iloc_{neg} = aFk_{neg}(C_{V^{2+}})^{1-\alpha_{neg}}(C_{V^{3+}})^{\alpha_{neg}} \left[\frac{C_{V^{2+}}^s}{C_{V^{2+}}} \exp\left(\frac{1-\alpha_{neg}F\eta_{neg}}{RT}\right) - \frac{C_{V^{3+}}^s}{C_{V^{3+}}} \exp\left(\frac{\alpha_{neg}F\eta_{neg}}{RT}\right) \right] \quad (2.11)$$

$$iloc_{pos} = aFk_{pos}(C_{VO^{2+}})^{1-\alpha_{pos}}(C_{VO_2^+})^{\alpha_{pos}} \left[\frac{C_{VO_2^+}^s}{C_{VO_2^+}} \exp\left(\frac{1-\alpha_{pos}F\eta_{pos}}{RT}\right) - \frac{C_{VO^{2+}}^s}{C_{VO^{2+}}} \exp\left(\frac{\alpha_{pos}F\eta_{pos}}{RT}\right) \right] \quad (2.12)$$

burada, $iloc_{pos}$ ve $iloc_{neg}$ yerel yük akımı yoğunluklarıdır, k_{pos} ve k_{neg} sırasıyla negatif ve pozitif elektrotlar için reaksiyon hız sabitleridir. α transfer katsayısı ve η aşırı potansiyeldir. Aşırı potansiyeller şu şekilde yazılır [29]:

$$\eta_{neg} = \phi_s - \phi_l - E_{neg} \quad (2.13)$$

$$\eta_{pos} = \phi_s - \phi_l - E_{pos} \quad (2.14)$$

Her bir yarı hücrenin açık devre voltajları, Nernst denklemi ile ifade edilir [29]:

$$E_{neg} = E_{0,neg} + \frac{RT}{F} \ln\left(\frac{C_{V^{3+}}}{C_{V^{2+}}}\right) \quad (2.15)$$

$$E_{pos} = E_{0,pos} + \frac{RT}{F} \ln\left(\frac{C_{VO_2^+} C_{H, pos}^2}{C_{VO^{2+}}}\right) \quad (2.16)$$

burada, $E_{0,neg}$ ve $E_{0,pos}$ sırasıyla negatif ve pozitif standart potansiyelleri temsil etmektedir. Pozitif elektrot ile negatif elektrot arasındaki farklı proton konsantrasyonunun neden olduğu bir potansiyel olan Donnan potansiyeli hesaplamalarda dikkate alınmıştır ve aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir [29]:

$$E_{mem} = \frac{RT}{F} \ln\left(\frac{C_{H^+}^k}{C_{H^+}^m}\right) \quad (2.17)$$

burada, k negatif veya pozitif elektrotu belirtirken m membranı göstermektedir. Butler-Volmer denklemlerinde, vanadyum türlerinin (V^{2+} ve V^{3+}) elektrot-elektrolit arayüzündeki yüzey konsantrasyonları ($C_{V_i}^s$) şu şekilde ifade edilebilir [29]:

$$FD_2 \left(\frac{C_2 - C_2^s}{R_p} \right) = Fk_{neg} (C_2)^{1-\alpha_{neg}} (C_3)^{\alpha_{neg}} \cdot \left[\frac{C_2^s}{C_2} \exp \left(\frac{(1 - \alpha_{neg})F\eta_{neg}}{RT} \right) - \frac{C_3^s}{C_3} \exp \left(\frac{\alpha_{neg}F\eta_{neg}}{RT} \right) \right] \quad (2.18)$$

$$FD_3 \left(\frac{C_3 - C_3^s}{R_p} \right) = Fk_{neg} (C_2)^{1-\alpha_{neg}} (C_3)^{\alpha_{neg}} \cdot \left[\frac{C_2^s}{C_2} \exp \left(\frac{-\alpha_{neg}F\eta_{neg}}{RT} \right) - \frac{C_3^s}{C_3} \exp \left(\frac{(1 - \alpha_{neg})F\eta_{neg}}{RT} \right) \right] \quad (2.19)$$

burada $R_p = d_f/2$, ortalama difüzyon yol uzunluğu olan elektrot ortalama gözenek yarıçapını ifade etmektedir. VO_2^+ ve VO_2^{2+} vanadyum türlerinin yüzey konsantrasyonları için de benzer denklemler yazılabilir.

Membran: Membranda hidrojen protonunun transferi aşağıdaki şekilde modellendi [37]:

$$N_{H^+} = C_{H^+}u_m - \left(\frac{z_{H^+}F}{RT} \right) D_{H_m^+} C_{H^+} \nabla \varphi_m \quad (2.20)$$

burada, u_m sıvı su hızı iken φ_m membrandaki elektrolit potansiyelidir. Membranın içindeki elektriksel nötrlük şu şekilde tanımlandı:

$$z_{H^+}C_{H^+} = -z_f C_f \quad (2.21)$$

Membranda yük korunum denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir [37]:

$$\nabla \cdot i_m = 0 \quad (2.22)$$

burada, i_m aşağıdaki eşitlikle tanımlanan iyonik akım yoğunluğudur [37]:

$$i_m = z_{H^+}F N_{H^+} \quad (2.23)$$

Eşitlik (2.20) eşitlik (2.23)'te yazıldığında oluşan denklem şu şekildedir [37]:

$$\nabla \cdot \left[z_{H^+}F \left(C_{H^+}u_m - \left(\frac{z_{H^+}F}{RT} \right) D_{H_m^+} C_{H^+} \nabla \varphi_m \right) \right] = 0 \quad (2.24)$$

Eşitlik (2.24) aşağıdaki gibi basitleştirilmiştir [37]:

$$\nabla \cdot (z_{H^+}F C_{H^+}u_m) - \nabla \cdot \left(\left(\frac{z_{H^+}^2 F^2}{RT} \right) D_{H_m^+} C_{H^+} \nabla \varphi_m \right) = 0 \quad (2.25)$$

Eşitlik (2.21)'ye göre membran içerisindeki proton konsantrasyonu sabittir ve eşitlik (2.25)'teki ilk terim kütle korunumundan dolayı ihmal edilmiştir. Elde edilen denklem aşağıdaki gibidir [37]:

$$\nabla \cdot (\sigma_m \nabla \phi_m) = 0 \quad (2.26)$$

burada, σ_m membran iyonik iletkenliğidir ve 2.27 nolu eşitlikle tanımlanmaktadır [37]:

$$\sigma_m = \left(\frac{z_{H^+}^2 F^2}{RT} \right) D_{H_m^+} C_{H^+} \quad (2.27)$$

Sülfürik Asit Ayrışması: Sulu sülfürik asit çözeltisinde H_2SO_4 'ün ayrışması iki aşamada gerçekleşir [29].



Ayrışma oranı S_d aşağıdaki denklemle ifade edilir [29]:

$$S_d = K_d \left(\frac{C_{H^+} - C_{HSO_4^-}}{C_{H^+} + C_{HSO_4^-}} - \beta \right) \quad (2.30)$$

Türlerin başlangıç konsantrasyonları Tablo 3'te verilmiştir. Bu denklemlere ek olarak, negatif ve pozitif yarı hücre için şarj durumu (SOC), sırasıyla aşağıdaki denklemlerle tanımlanmıştır [29].

$$SOC = \frac{C_{2^+}}{C_{2^+} + C_{3^+}} \quad (2.31)$$

$$SOC = \frac{C_{VO_2^+}}{C_{VO_2^+} + C_{VO^{2+}}} \quad (2.32)$$

Enerji Dengesi: Enerji dengesi, ısı iletimini, ısı taşınımını ve reaksiyon ile ohmik dirençten kaynaklanan ısı oluşumunu hesaba katmaktadır. Bununla beraber, elektrotlardaki katı ve sıvı fazların aynı sıcaklıkta olduğu varsayımı ile enerji dengesi aşağıdaki gibi yazılabilir [35]:

$$\nabla \cdot (\vec{u} \rho_l C_l T) - \bar{\lambda} \nabla^2 T = \sum_k Q_k \quad (2.33)$$

ρ_l ve C_l , sırasıyla sıvı yoğunluğu ve özgül ısı kapasitesidir, λ hacim ortalamalı termal iletkenliktir ve aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir [35]:

$$\bar{\lambda} = \varepsilon\lambda_l + (1 - \varepsilon)\lambda_{elec}, \text{ (Gözenekli Elektrot için)} \quad (2.34)$$

$$\bar{\lambda} = \lambda_{mem}, \text{ (Membran için)} \quad (2.35)$$

burada, λ_l , λ_{elec} ve λ_{mem} sırasıyla, elektrolitin, elektrotun ve membranın termal iletkenliğini gösterirken simülasyon modeli için termal özellikler Tablo 4'te verilmektedir. Tablo 4'te C_l , C_{elec} ve C_{mem} sırasıyla, elektrolitin, elektrotun ve membranın (sabit basınçta) özgül ısı kapasitesini temsil etmektedir. Membranda, ısı transferi sadece iletimlidir. Isı üretim terimleri Tablo 5'te gösterilmektedir. Burada - $\Delta S_{0,1}$ negatif elektrot ile ilgili standart potansiyel iken $-\Delta S_{0,2}$ pozitif elektrot ile ilgili standart potansiyeldir. Bu standart potansiyeller şu şekilde ifade edilebilir [35]:

$$\Delta S_{0,j} = \left(\sum_{\text{ürünler}} S_{0,j}^{\text{ürünler}} \right) - \left(\sum_{\text{girenler}} S_{0,j}^{\text{girenler}} \right) \quad (2.36)$$

burada, $S_{0,j}^{\text{ürünler}}$ ürünlerin oluşmasındaki standart entropi iken, $S_{0,j}^{\text{girenler}}$ girenlerin oluşmasındaki standart entropidir ($j=1,2$). Her iki elektrottaki standart reaksiyon entropisi, reaksiyondaki standart Gibbs serbest enerji değişimi ($\Delta G_{0,j}$) ve reaksiyondaki standart entalpi değişimi ($\Delta H_{0,j}$) ile termodinamik ilişki ile ilişkilendirilir [35]:

$$\Delta G_{0,j} = \Delta H_{0,j} + T\Delta S_{0,j} \quad (2.37)$$

Eşitlik (2.37)'deki standart termodinamik değerleri 298.15 K sıcaklığında Tablo 6'da gösterilmektedir. $\Delta G_{0,j} = -nFE_{0,j}$ ilişkisi kullanılarak, $\Delta S_{0,j}$ sıcaklığa bağımlı olarak aşağıdaki gibi yazılabilir [35]:

$$-nF \frac{\partial \Delta E_{0,j}}{\partial T} = \frac{\partial \Delta G_{0,j}}{\partial T} = \Delta S_{0,j} \quad (2.38)$$

burada, $E_{0,j}$ reaksiyonunun standart potansiyelidir.

Geometrik özellikler, çalışma parametreleri ve kinetik özellikler Tablo 7'de verilmektedir.

Tablo 3. Başlangıç konsantrasyon değerleri [29]

Sembol	Açıklama	Değerler
$C_{V^{2+}}^0$	V(II) için başlangıç konsantrasyonu	156 mol/m ³
$C_{V^{3+}}^0$	V(III) için başlangıç konsantrasyonu	884 mol/m ³
$C_{V^{4+}}^0$	V(IV) için başlangıç konsantrasyonu	884 mol/m ³
$C_{V^{5+}}^0$	V(V) için başlangıç konsantrasyonu	156 mol/m ³
$C_{H^{+}neg}^0$	H ⁺ için negatif kısımdaki başlangıç konsantrasyonu	4447.5 mol/m ³
$C_{H^{+}pos}^0$	H ⁺ için pozitif kısımdaki başlangıç konsantrasyonu	5097.5 mol/m ³
$C_{HSO_4^{-}neg}^0$	HSO ₄ ⁻ için negatif kısımdaki başlangıç konsantrasyonu	2668.5 mol/m ³
$C_{HSO_4^{-}pos}^0$	HSO ₄ ⁻ için pozitif kısımdaki başlangıç konsantrasyonu	3058.5 mol/m ³

Tablo 4. Enerji korunum denklemleri için parametre değerleri [35]

Sembol	Değerler	Açıklama
λ_l	0.67 W/mK	Elektrolit termal iletkenliği
λ_{elec}	0.15 W/mK	Elektrot termal iletkenliği
λ_{mem}	0.67 W/mK	Membran termal iletkenliği
$\rho_l C_l$	4.18 x 10 ⁶ J/m ³ K	Sıvı termal kapasitans (Su)
$\rho_{elec} C_{elec}$	3.33 x 10 ⁵ J/m ³ K	Gözenekli elektrot termal kapasitansı
$\rho_{mem} C_{mem}$	2.18 x 10 ⁶ J/m ³ K ^a	Membran termal kapasitansı
$-\Delta S_1$	-100 J/molK	Reaksiyonla ilgili entropi
$-\Delta S_2$	-21.7 J/molK	Reaksiyonla ilgili entropi

^a Nafyon 117® membran için yoğunluk 1580 kg/m³ olarak alınmıştır [38].

Tablo 5. Enerji korunumu denklemi için kaynak terimler [35]

Terim	Membran	Negatif Elektrot	Pozitif Elektrot
Q_{act}	0	$\eta_1 \nabla \cdot iloc_{neg}$	$\eta_2 \nabla \cdot iloc_{pos}$
Q_{rev}	0	$-\Delta S_1 T \nabla \cdot iloc_{neg} / F$	$\Delta S_2 T \nabla \cdot iloc_{pos} / F$
Q_{ohm}	$\sigma_{mem}^{eff} \nabla \phi $	$\sigma_s^{eff} \nabla \phi_s ^2 + K_l^{eff} \nabla \phi_l ^2$	$\sigma_s^{eff} \nabla \phi_s ^2 + K_l^{eff} \nabla \phi_l ^2$

Tablo 6. 25°C’de VRAB reaksiyonunda yer alan sulu türlerin standart termodinamik değerleri [5]

Türler	ΔH_f^0 (kJ/mol)	ΔG_f^0 (kJ/mol)	ΔS_f^0 (J/mol. K)
V(II)	-226	-218	-130
V(III)	-259	-251.3	-230
V(IV)	-486.6	-446.4	-133.9
V(V)	-649.8	-587	-42.3
H ₂ O	-285.8	-237.2	69.95
H ⁺	0	0	0

Tablo 7. Geometrik özellikler, çalışma parametreleri ve kinetik özellikler [29]

Sembol	Açıklama	Değerler
L_e	Elektrot genişliği	6 (mm)
L_m	Membran genişliği	183 (μm)
W_{ch}	Kanal yüksekliği	4 (mm)
H_{ch}	Kanal genişliği	1.59 (mm)
W_{rib}	Rib genişliği	7.50 (mm)
W_{cell}	Elektrot genişliği	50 (mm)
a	Belirli yüzey alanı	$3.5 \times 10^4 \text{ (m}^{-1}\text{)}$
T	Çalışma sıcaklığı	298.15 (K)
P_{out}	Çıkış basıncı	0 (kPa)
V_B^0	Hacimsel akış hızı	75(mL/dk)
I	Uygulanan akım yoğunluğu	40 (mA/cm ²)
k_{neg}	Negatif elektrot reaksiyon hız sabiti	$7 \times 10^{-8} \text{ (m/s)}$
k_{pos}	Pozitif elektrot reaksiyon hız sabiti	$2.5 \times 10^{-8} \text{ (m/s)}$
α_{neg}	Negatif yük transfer katsayısı	0.45
α_{pos}	Pozitif yük transfer katsayısı	0.55
$E_{0,neg}$	Negatif elektrot için standart potansiyel	-0.255 (V)
$E_{0,pos}$	Pozitif elektrot için standart potansiyel	1.004 (V)
β	HSO_4^- ayrışma derecesi	0.25
K_d	HSO_4^- ayrışma oranı	$10^4 \text{ (S}^{-1}\text{)}$
μ_{neg}	Negatif elektrolit viskozitesi	0.0025 (Pa. s)
μ_{pos}	Pozitif elektrolit viskozitesi	0.050 (Pa. s)
ρ_{neg}	Negatif elektrolit yoğunluğu	1300 (kg/m ³)
ρ_{pos}	Pozitif elektrolit yoğunluğu	1350 (kg/m ³)
D_{V2}	V^{2+} difüzyon katsayısı	$2.4 \times 10^{-10} \text{ (m}^2\text{/s)}$
D_{V3}	V^{3+} difüzyon katsayısı	$2.4 \times 10^{-10} \text{ (m}^2\text{/s)}$
D_{V4}	VO^{2+} difüzyon katsayısı	$3.9 \times 10^{-10} \text{ (m}^2\text{/s)}$
D_{V5}	VO_2^+ difüzyon katsayısı	$3.9 \times 10^{-10} \text{ (m}^2\text{/s)}$
D_{H^+}	Proton difüzyon katsayısı	$9.312 \times 10^{-9} \text{ (m}^2\text{/s)}$
$D_{HSO_4^-}$	HSO_4^- difüzyon katsayısı	$1.33 \times 10^{-9} \text{ (m}^2\text{/s)}$
$D_{SO_4^-}$	SO_4^- difüzyon katsayısı	$1.065 \times 10^{-9} \text{ (m}^2\text{/s)}$
ε	Elektrot gözenekliliği	0.929
d_f	Fiber çapı	50.3 (μm)
C_k	Kozeny-Carmen katsayısı	180
σ_s^{eff}	Elektrot elektrik iletkenliği	66.7 (S/m)
σ_m	Membran elektrik iletkenliği	24.88 (S/m)
Z_f	Sabit asit konsantrasyonu	-1
C_f	Membrandaki sabit yük konsantrasyonu	1990 (mol/m ³)
$D_{H^+}^m$	Membran proton difüzyon katsayısı	$3.35 \times 10^{-9} \text{ (m}^2\text{/s)}$

3.4. Başlangıç ve Sınır Şartları

Geliştirilen VRAB modeli için aşağıda açıklandığı gibi sınır koşulları modele uygulanmıştır. Giriş hızı ve basınç koşulu, Şekil 3.1'deki sınırlara göre süreklilik ve momentum koruma denklemlerine aşağıdaki gibi uygulandı [29]:

$$y=0, v = v_{in} = \frac{Q}{\varepsilon A} \quad (2.39)$$

$$y=y_1, P = P_{out} \quad (2.40)$$

Hücrenin diğer sınırlarına kaymama koşulu uygulandı [29]:

$$\nabla P \cdot \vec{n} = 0 \quad (2.41)$$

Türlerin korunum denklemleri için kullanılan sınır koşulları aşağıdaki gibidir [29]:

$$y=0, \begin{cases} c_{in}^i = c_1^0 \cdot soc (c^{V^2} \text{ ve } c^{V^5} \text{ için}) \\ c_{in}^i = c_1^0 (1 - soc) (c^{V^3} \text{ ve } c^{V^4} \text{ için}) \\ c_{in}^i = c_0^{H_{pos}} + c_1^0 \cdot soc (c^{H_{pos}} \text{ için}) \\ c_{in}^i = c_0^{H_{neg}} + c_1^0 \cdot soc (c^{H_{neg}} \text{ için}) \end{cases} \quad (2.42)$$

burada, c_1^0 şarj durumuna (SOC) bağlı olarak başlangıç vanadyum konsantrasyonlarını belirtir. Tam gelişmiş akış yaklaşımına göre tüm türlerin çıkışlardaki difüzyon akıları sıfıra ayarlanmaktadır [29].

$$y=y_1, -D_i^{eff} \nabla c_i \cdot \vec{n} = 0 \quad (2.43)$$

Diğer tüm sınır şartları için [29]:

$$(-D_i^{eff} \nabla c_i + c_i \vec{u}) \cdot \vec{n} = 0 \quad (2.44)$$

Deşarj işleminde, yük korunum denklemlerinin hesaplanmasında uygulanan sınır koşulları aşağıdaki gibidir [29]:

Katı faz için:

$$x=x_0, \sigma_s^{eff} \nabla \phi_s \cdot \vec{n} = I \quad (2.45)$$

$$x=x_3, \sigma_s^{eff} \nabla \phi_s \cdot \vec{n} = -I \quad (2.46)$$

$$x=x_1, x=x_2, y=0 \text{ ve } y=y_1, \sigma_s^{eff} \nabla \phi_s \cdot \vec{n} = 0 \quad (2.47)$$

Elektrolit faz için:

$$x=x_1, k_l^{eff} \nabla \phi_l \cdot \vec{n} = -I \quad (2.48)$$

$$x=x_2, k_l^{eff} \nabla \phi_l \cdot \vec{n} = I \quad (2.49)$$

$$x=x_0, x=x_3, y=y_0 \text{ ve } y=y_1, k_l^{eff} \nabla \phi_l \cdot \vec{n} = 0 \quad (2.50)$$

Buna ek olarak, elektrot-membran arayüzü boyunca sıfır tür akış koşulları uygulandı [29].

$$x=x_1 \text{ ve } x=x_2, -\vec{n} \cdot \vec{N}_e = 0 \quad (2.51)$$

Membranın üst ve alt kısmı boyunca [29]:

$$y=y_0 \text{ ve } y=y_1, -\vec{n} \cdot \vec{N}_m = 0 \quad (2.52)$$

Enerji korunumu denklemi için, uygulanan sınır şartları ise şu şekildedir.

Girişlerdeki sıcaklık aşağıdaki şekilde uygulandı [34]:

$$y=y_0, T = T_{in} \quad (2.53)$$

Çıkışlarda konvektif ısı akısı sıfır olarak kabul edildi [34].

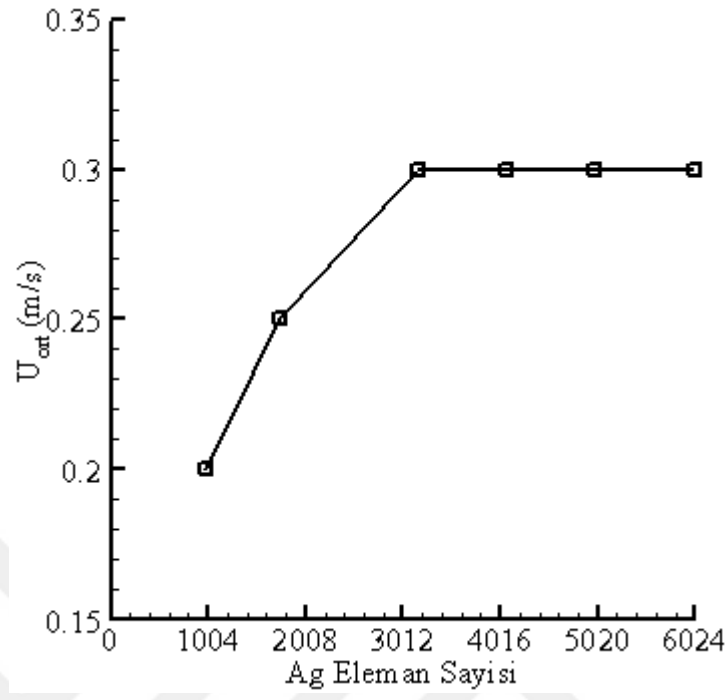
$$y=y_1, -\bar{\lambda} \nabla T \cdot \vec{n} = 0 \quad (2.54)$$

Diğer sınır şartları için [34]:

$$(\vec{u} \rho_l C_l T - \bar{\lambda} \nabla T) \cdot \vec{n} = 0 \quad (2.55)$$

3.5. Sayısal Method

Sayısal analizler, sonlu elemanlar yöntemi ile çözüm yapan COMSOL Multiphysics® 5.5 yazılımı kullanılarak gerçekleştirildi. Ağa bağlı yakınsamayı araştırmak ve tanımlamak için sırasıyla 981/1744/3175/4075/4975/6024 eleman boyutuna sahip altı farklı ağ oluşturuldu. Şekil 3.6'da farklı ağ boyutlarına göre ortalama akış hızının (U_{ort}) değişimi gösterilmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi, 3175'ten fazla öğeye sahip ağlarda elde edilen tüm sonuçlarda hız sabit bir şekilde devam etmektedir. Bu nedenle, sayısal model için elde edilen sonuçlar 3175 ağ elemanı seçilerek tamamlandı. Modele göre hata toleransı 1×10^{-5} olarak hesaplandı.



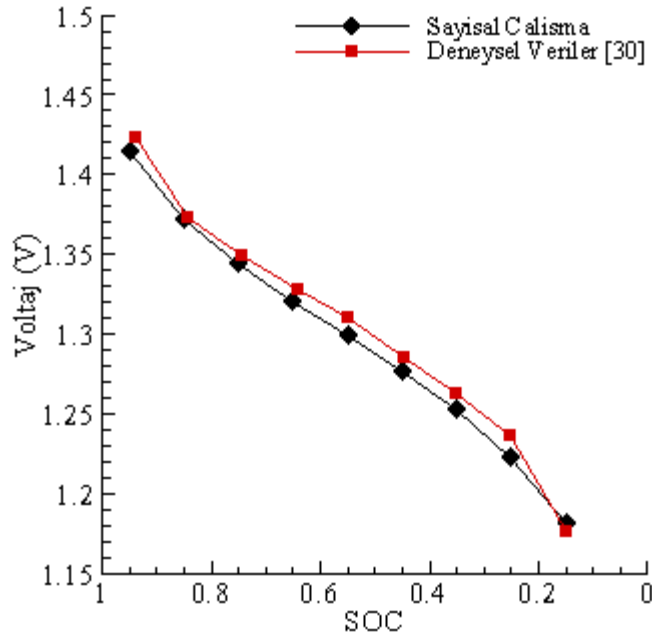
Şekil 3.6. Farklı ağ elemanına göre ortalama hızın değişimi

4. BÖLÜM

SERPANTİN AKIŞ ALANI İÇİN FARKLI KANAL GEOMETRİLERİ VE FARKLI KANAL ORANLARININ BATARYA ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

4.1. Sayısal Modelin Deneysel Veriler ile Doğrulanması

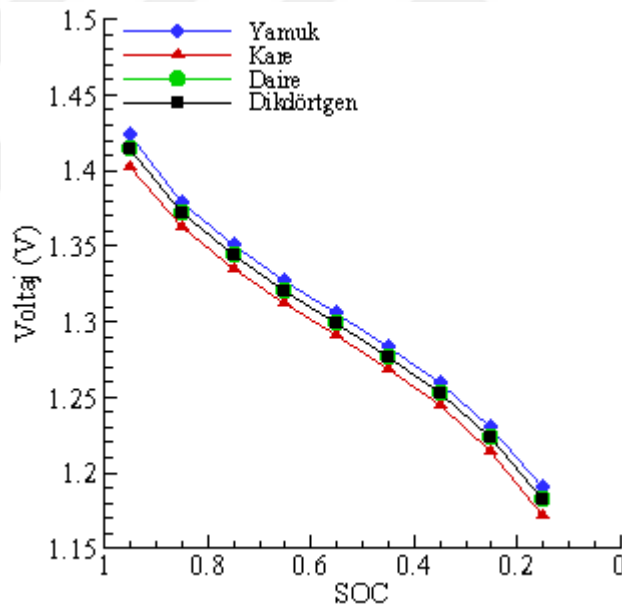
Bu tez çalışmasında ilk olarak geliştirilen sayısal model sonuçları literatürdeki deneysel veriler ile doğrulandı [29]. İki boyutlu ve sürekli rejim için oluşturulan modelde uygulanan akım yoğunluğu 40 mA/cm^2 iken, hacimsel akış hızı 75 mL/dk 'dır. Şekil 4.1'de sayısal model verilerinin deneysel verilerle karşılaştırılması görülmektedir. Şekildende görülebileceği gibi her iki sonuç birbiriyle oldukça uyumludur. Ayrıca, doğrulama işleminde hata oranı %1'den küçüktür.



Şekil 4.1. Sayısal model verilerinin deneysel verilerle karşılaştırılması

4.2. Farklı Kanal Geometrilerinin Potansiyel Performansına Etkisi

VRAB’da serpantin akış alanı için farklı kanal geometrilerinin etkisini araştırmak için dikdörtgen, kare, daire ve yamuk kanal geometrilerine sahip dört farklı model oluşturuldu. Oluşturulan modellerin hepsinde kanal alanları sabit tutuldu. Şekil 4.2’de farklı kanal geometrileri için 0.95 ile 0.15 arasındaki deşarj durumuna karşılık gelen potansiyel performans eğrisi gösterilmektedir. Şekilden görülebileceği üzere potansiyel performansa göre en yüksek performans yamuk kanal geometrisinde olurken en düşük performans ise kare kanal geometrisinde elde edilmektedir. Daire ve dikdörtgen kanal geometrileri için performans eğrileri hemen hemen aynı olmakla beraber daire kanal geometrisi dikdörtgen kanal geometrisine göre çok azda olsa yüksek voltaj değerine sahiptir.

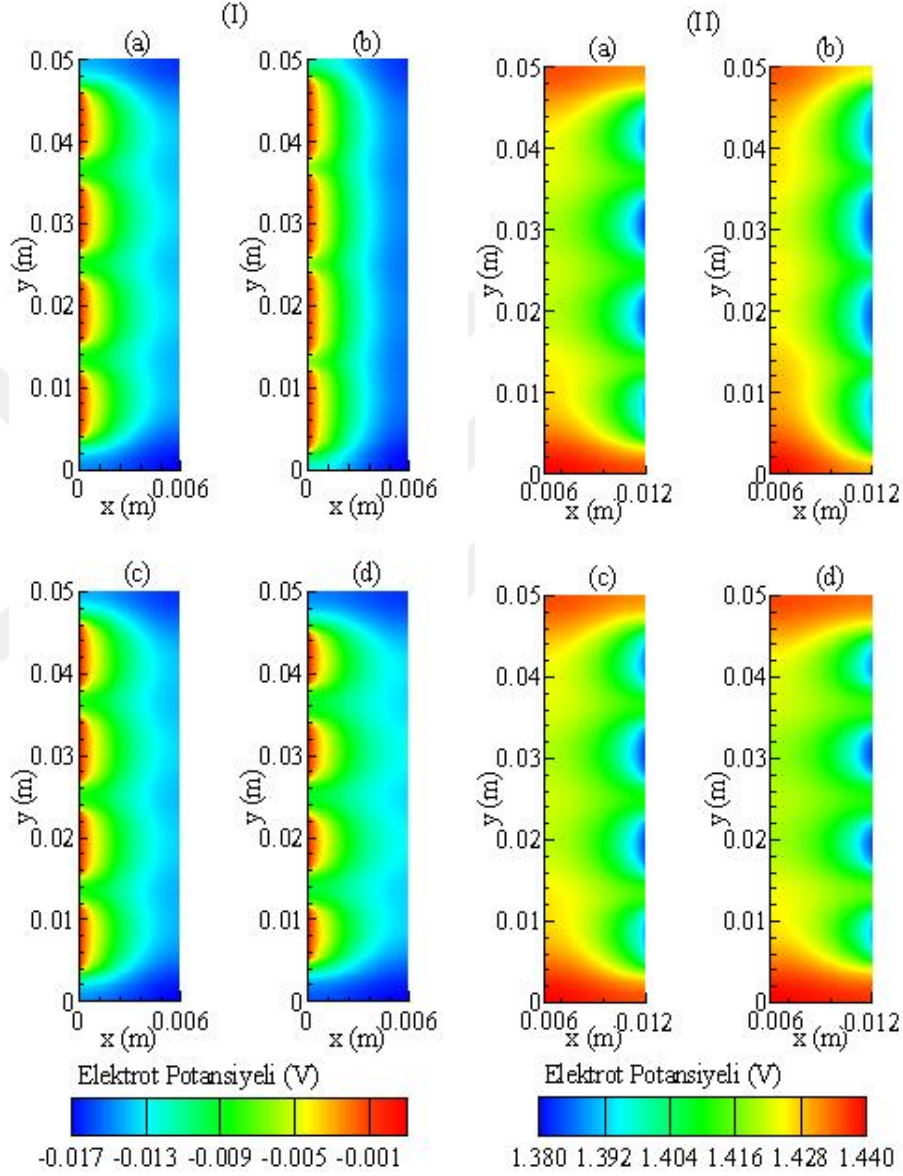


Şekil 4.2. Serpantin akış alanında kanal geometrilerine göre potansiyel performansların değişimi

4.3. Farklı Kanal Geometrilerinin Elektrot Potansiyeli, Elektrolit Potansiyeli ve Konsantrasyon Dağılımına Etkisi

Bataryanın deşarjı esnasında, farklı kanal geometrilerine göre hem pozitif elektrotta hem de negatif elektrottaki elektrot potansiyel dağılımları Şekil 4.3’te gösterilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere tüm kanal geometrileri için elektrot potansiyelinin

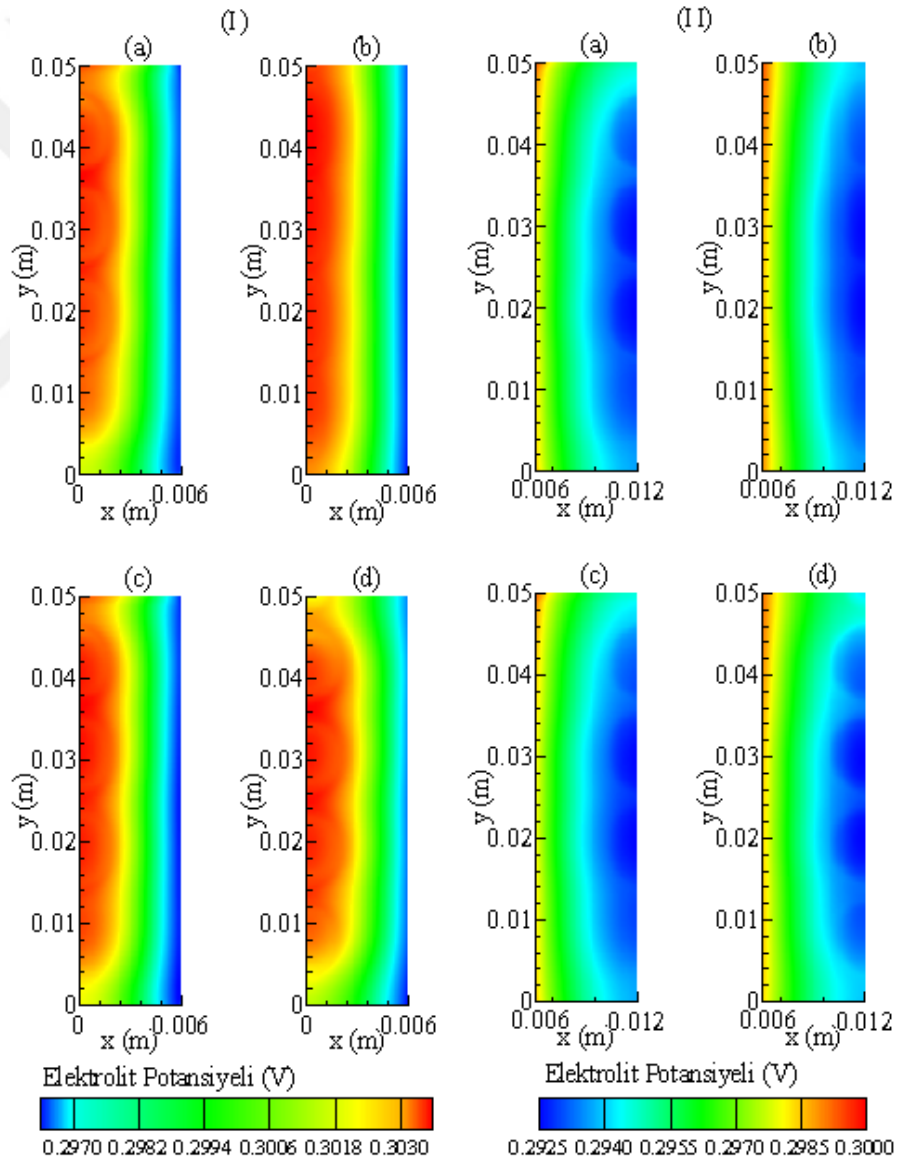
elektrotlardan membrana doğru arttığı görülmektedir. Ayrıca, hem pozitif elektrot hem de negatif elektrot için en yüksek elektrot potansiyeli değerleri sırasıyla yamuk, daire, dikdörtgen ve kare kanal geometrileri için elde edildi.



Şekil 4.3. Serpantin akış alanında farklı kanal geometrileri için elektrot potansiyelinin elektrot içerisinde dağılımı; (I) Negatif elektrot, (II) Pozitif elektrot, (a) Dikdörtgen, (b) Kare, (c) Daire, (d) Yamuk

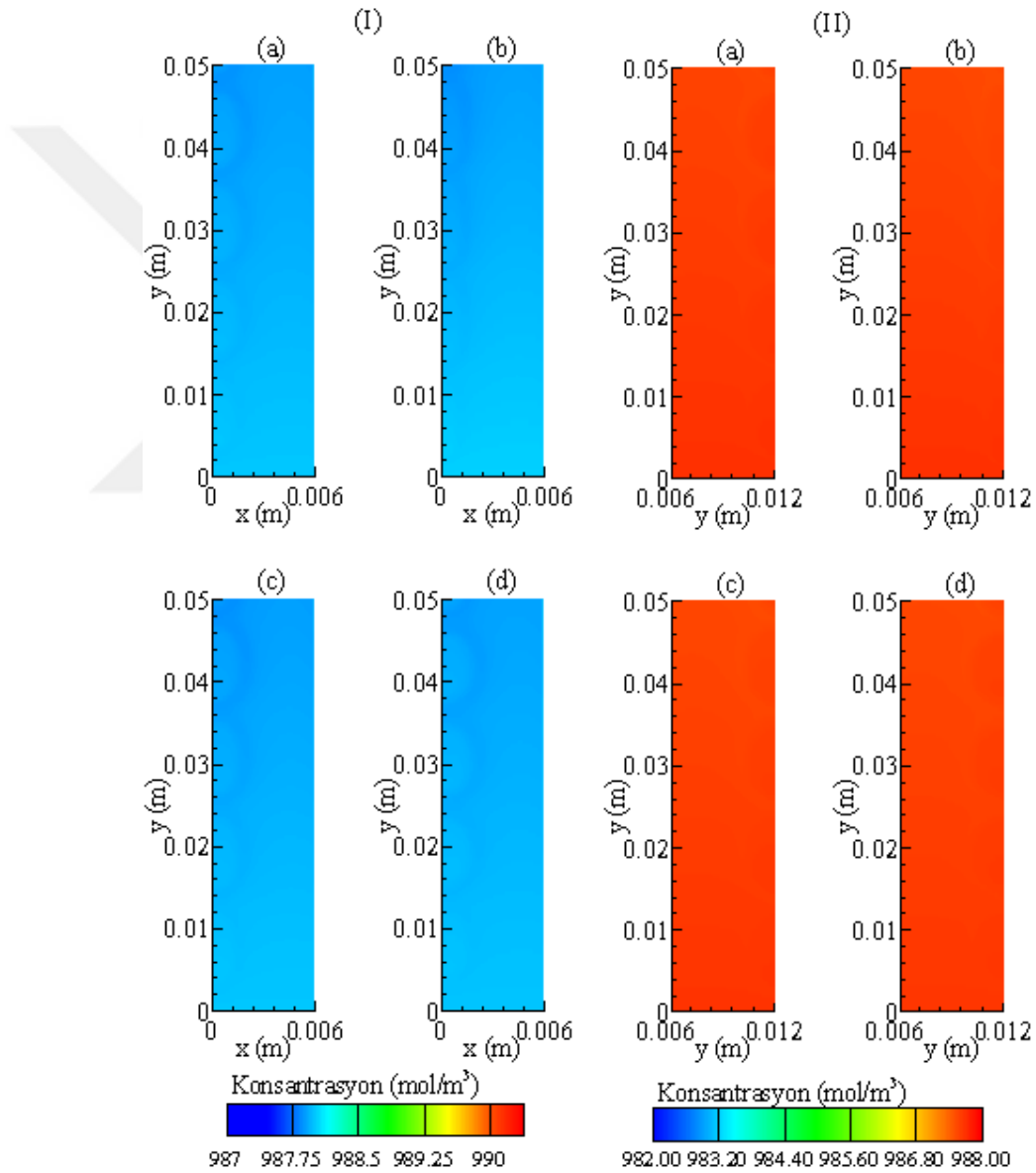
Bunun sebebi, Bölüm 3.1’de gösterilen kanalların geometrik özelliklerine bakıldığında yamuk kanal geometrisinin elektrota daha fazla temas ettiği görülmektedir. Bu temastan kaynaklı olarak elektrot içerisine gönderilen elektrolit daha hızlı bir şekilde yayılarak redoks tepkimelerinin daha hızlı gerçekleşmesine sebep olmaktadır. Bundan dolayı da

yamuk kanal geometrisinde diğer kanal geometrilerine göre daha fazla elektrot potansiyelinin oluştuğu görülmektedir. Şekil 4.4'te farklı kanal geometrileri için negatif ve pozitif elektrotta gerçekleşen elektrolit potansiyelinin dağılımları verilmektedir. En yüksek elektrolit potansiyelini yamuk kanal geometrisi verirken, en düşük elektrolit potansiyelini kare kanal geometrisi vermektedir. Daire ve dikdörtgen kanal geometrilerinde ise çok yakın sonuçlar meydana gelmektedir. Bununla birlikte, hem negatif elektrotta hem de pozitif elektrotta elektrolit potansiyelinin maksimum ve minimum değerleri hemen hemen aynıdır.



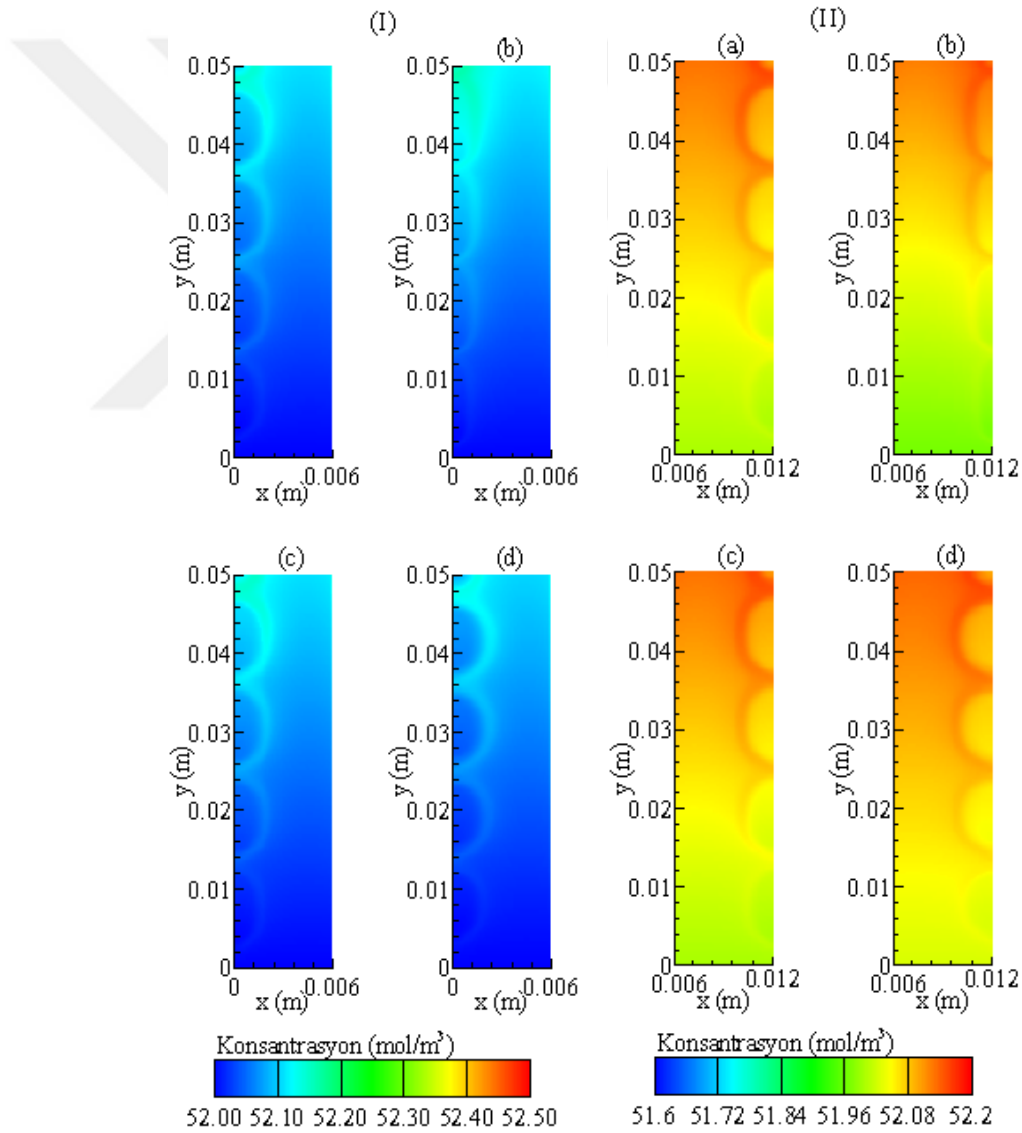
Şekil 4.4. Serpantin akış alanında farklı kanal geometrileri için elektrolit potansiyelinin elektrot içerisinde dağılımı; (I) Negatif elektrot, (II) Pozitif elektrot, (a) Dikdörtgen, (b) Kare, (c) Daire, (d) Yamuk

Negatif elektrotta akım toplayıcı tabakadan membrana doğru elektrolit potansiyeli azalırken, pozitif elektrotta tam tersi yönde bir değişim vardır. Bunun sebebi ise bataryanın deşarjı esnasında her iki elektrotta meydana gelen redoks tepkimeleri sonucunda meydana gelen türlerin etkisi olduğu düşünülmektedir. Bataryanın deşarjı esnasında, V^{2+} ve VO_2^+ türlerinin hem pozitif elektrotta hem de negatif elektrottaki konsantrasyon dağılımları dört farklı kanal geometrisi için Şekil 4.5'te sunulmaktadır.



Şekil 4.5. Serpantin akış alanında farklı kanal geometrileri için V^{2+} ve VO_2^+ konsantrasyonunun elektrottaki dağılımı; (I) Negatif elektrot, (II) Pozitif elektrot, (a) Dikdörtgen, (b) Kare, (c) Daire, (d) Yamuk

Negatif elektrotta 0.95 deşarj durumunda V^{2+} türü için konsantrasyon değerleri 987 mol/m³ ile 990 mol/m³ arasında değişirken, pozitif elektrotta VO_2^+ türü için konsantrasyon değerleri 982 mol/m³ ile 988 mol/m³ arasında değişmektedir. Bununla beraber, V^{2+} ve VO_2^+ türlerinin konsantrasyon dağılımları kanalın girişinden çıkışına doğru homejen bir dağılım göstermesine rağmen bataryanın deşarjı esnasında bu türlerin kanal çıkışına doğru az da olsa tükendiğini söylenebilir. Şekil 4.6'da negatif elektrotta V^{3+} konsantrasyonunun dağılımı gösterilirken, pozitif elektrotta VO^{2+} konsantrasyonunun dağılımı görülmektedir.

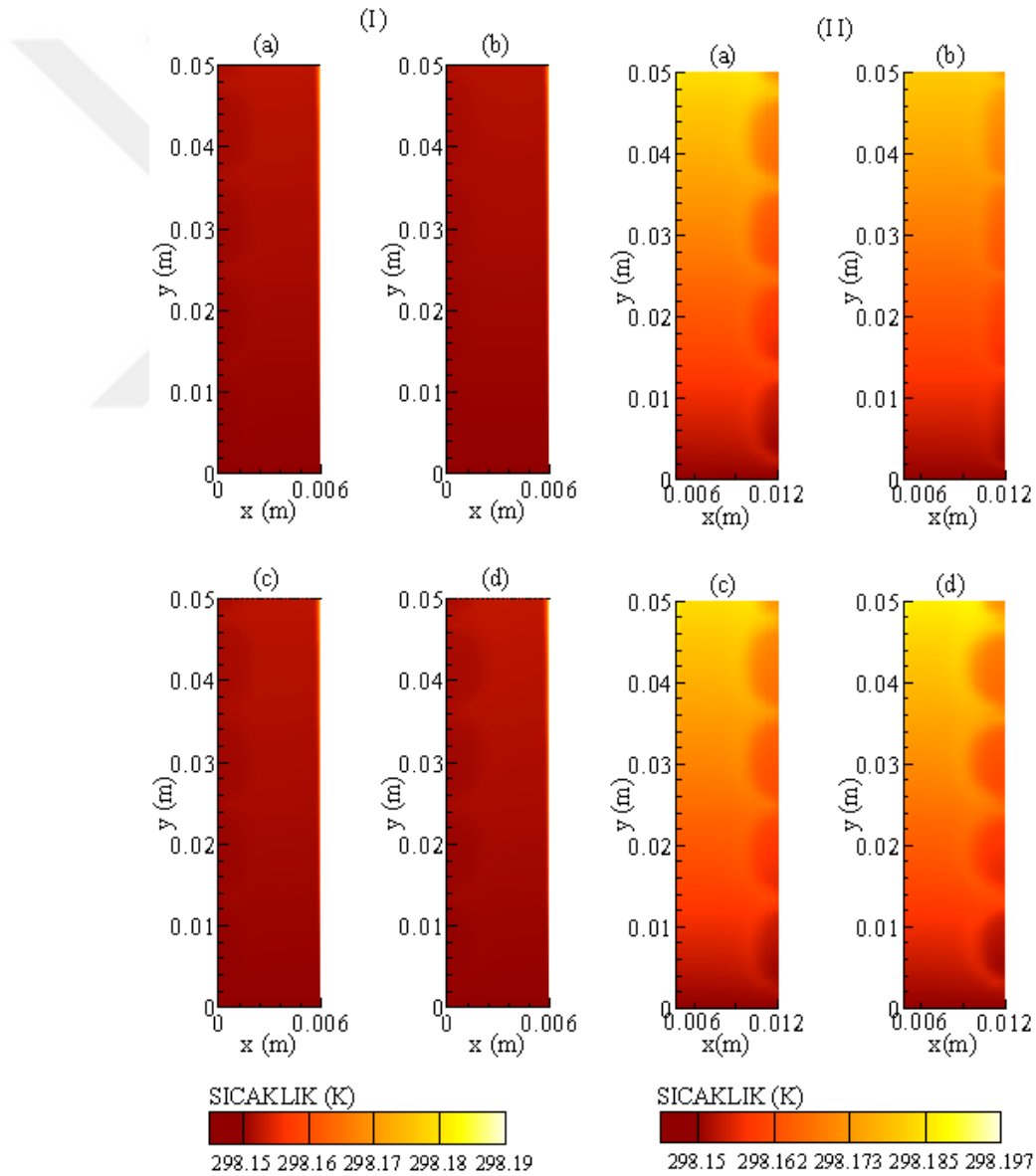


Şekil 4.6. Serpantin akış alanında farklı kanal geometrileri için V^{3+} ve VO^{2+} konsantrasyonunun elektrottaki dağılımı; (I) Negatif elektrot, (II) Pozitif elektrot, (a) Dikdörtgen, (b) Kare, (c) Daire, (d) Yamuk

Deşarj esnasında, V^{3+} ve VO^{2+} türlerinin oluşumundan kaynaklı olarak konsantrasyon dağılımının giriş kanalından çıkış kanalına doğru yoğunlaştığı görülmektedir.

4.4. Farklı Kanal Geometrilerinin Sıcaklık ve Isı Yoğunluğu Üzerine Etkisi

Serpantin akış alanına sahip bir VRAB’da farklı kanal geometrilerinin ısı transfer parametreleri üzerindeki etkileri analiz edildi. Şekil 4.7’de negatif ve pozitif elektrotta farklı kanal geometrileri için elektrotlardaki sıcaklık dağılımları gösterilmektedir.

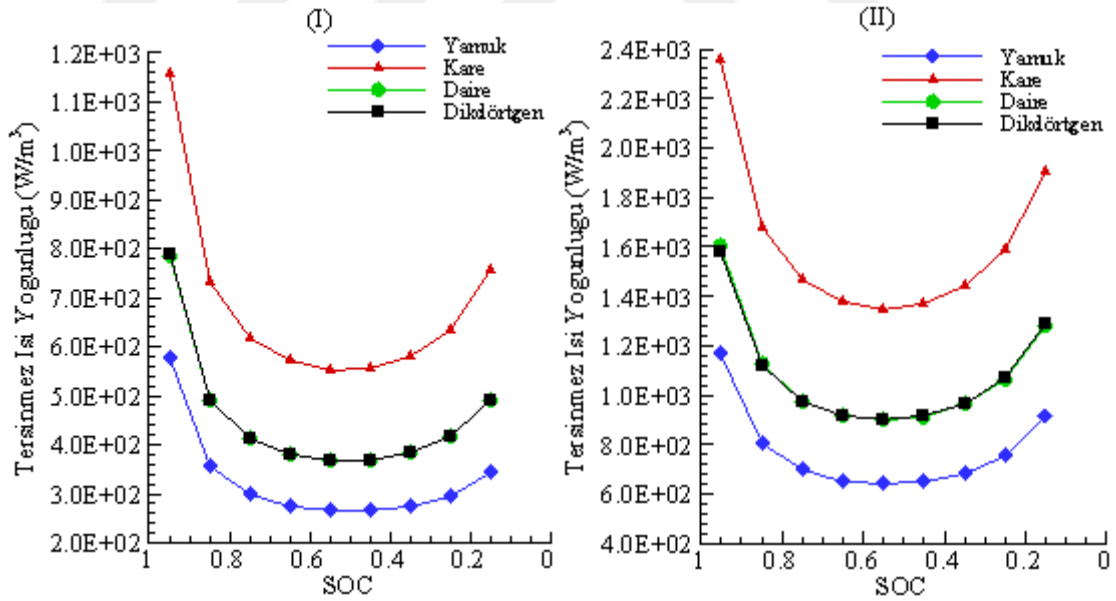


Şekil 4.7. Serpantin akış alanında farklı kanal geometrileri için elektrottaki sıcaklık dağılımı; (I) Negatif elektrot, (II) Pozitif elektrot, (a) Dikdörtgen, (b) Kare, (c) Daire, (d) Yamuk

Negatif elektrot boyunca sıcaklıkta herhangi bir değişim olmaz iken pozitif elektrotta membrana doğru sıcaklığın çok az da olsa (0.05 K civarında) değiştiği görülmektedir.

Şekil 4.8’de farklı kanal geometrileri için negatif ve pozitif elektrotta gerçekleşen tersinmez ısı yoğunluğunun SOC’la değişimi gösterilmektedir. Bataryada meydana gelen kayıplarla ilişkili olarak en yüksek tersinmez ısı yoğunluğu kare kanal geometrisinde meydana gelirken en düşük tersinmez ısı yoğunluğu yamuk kanal geometrisinde görüldü.

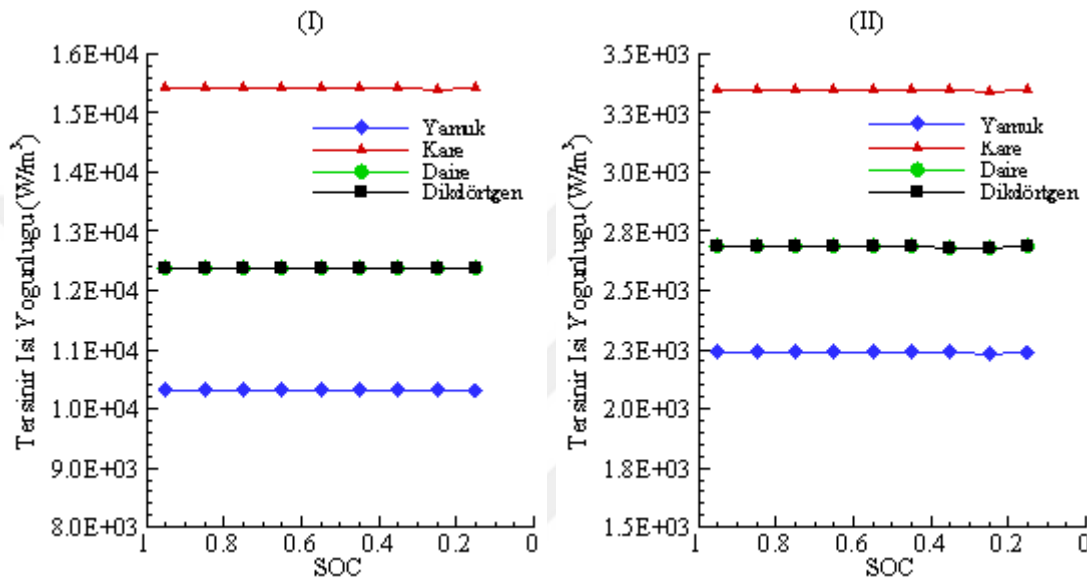
Bölüm 4.2’de bahsedildiği üzere yamuk kanal geometrisine sahip modelde elektrot potansiyel performansı diğer kanal geometrilerine göre daha yüksektir. Bu durum, yamuk kanal geometrisine sahip bir bataryada gerçekleşen kayıpların daha az olduğunu göstermektedir. Tersinmez ısı yoğunluğu da bataryada gerçekleşen kayıplarla ilişkili olduğundan bütün SOC değerleri için bu ısı yoğunluğu yamuk kanal geometrisinde daha düşük değerlerdedir.



Şekil 4.8. Serpantin akış alanında farklı kanal geometrileri için tersinmez ısı yoğunluğunun SOC’la değişimi; (I) Negatif Elektrot, (II) Pozitif Elektrot

Farklı kanal geometrileri için negatif ve pozitif elektrotta gerçekleşen tersinir ısı yoğunluğunun SOC’la değişimi Şekil 4.9’da gösterilmektedir. Şekildende görülebileceği gibi kare kanal geometrisi en yüksek tersinir ısı yoğunluğuna sahip iken, yamuk kanal geometrisi en düşük tersinir ısı yoğunluğuna sahiptir. Daire ve dikdörtgen

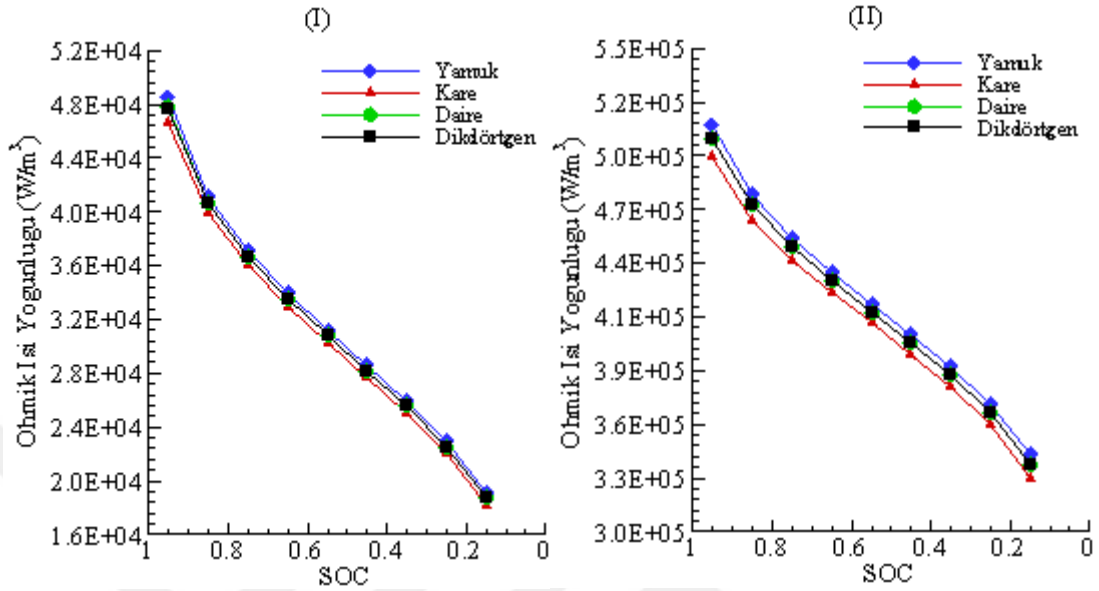
kanal geometrileri hemen hemen aynı değerlere sahip olup bütün kanal geometrileri için SOC değerinin 0.95'den 0.15'e azalmasıyla tersinir ısı yoğunluğunun sabit kaldığı görülmektedir. Bütün kanal geometrileri için, bataryanın deşarjı esnasında hücre sıcaklığının değişmemesi entropiden kaynaklı tersinir ısı yoğunluğunun sabit kalmasına sebep olmaktadır.



Şekil 4.9. Serpantin akış alanında farklı kanal geometrileri için tersinir ısı yoğunluğunun SOC'la değişimi; (I) Negatif Elektrot, (II) Pozitif Elektrot

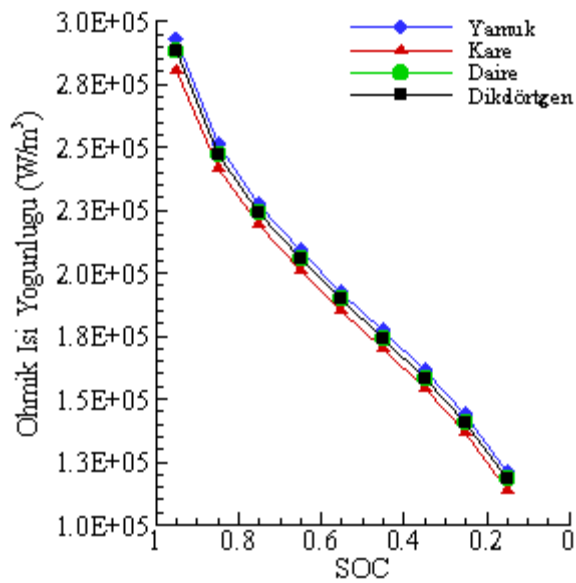
Şekil 4.10'da negatif ve pozitif elektrotta gerçekleşen ohmik ısı yoğunluğunun SOC'la değişimi farklı kanal geometrileri için sunulmaktadır. Şekildende görüldüğü üzere pozitif elektrotta gerçekleşen ohmik ısı yoğunluğunun negatif elektrotta göre daha yüksektir. Her iki elektrot için en yüksek ohmik ısı yoğunluğu yamuk kanal geometrisinde iken en düşük ohmik ısı yoğunluğu kare kanal geometrisine aittir. Ohmik ısı yoğunluğu elektrotun ve elektrolitin iyonik iletkenliğine bağlı olup elektrotta ohmik ısı yoğunluğu yaratan en büyük etken elektrolit iletkenliğidir [35]. Elektrolit iletkenliği ise difüzyon, konveksiyon ve sıcaklıkla ilişkilidir. Yamuk kanal geometrisinden kaynaklı olarak elektrolitin elektrot içerisinde yayılımı ve bataryanın deşarjı esnasında gerçekleşen reaksiyonlarla iyonların hareketinden kaynaklı olarak en yüksek ohmik ısı yoğunluğunun yamuk kanal geometrisinde gerçekleştiği söylenebilir. Şekil 4.11'de membranda gerçekleşen ohmik ısı yoğunluğunun SOC'la değişimi gösterilmektedir.

Membranda sadece H^+ protonun hareketi söz konusu olduğu için burada sadece ohmik ısı yoğunluğunun SOC'la değişimi incelenmektedir.



Şekil 4.10. Serpantin akış alanında farklı kanal geometrilerinin ohmik ısı yoğunluğu üzerine etkisi; (I) Negatif Elektrot, (II) Pozitif Elektrot

Bütün kanal geometrileri için ohmik ısı yoğunluğunun SOC'la hemen hemen lineer olarak değiştiği görülmektedir. Ayrıca SOC'ın değişimi ile en fazla ohmik ısı yoğunluğuna yamuk kanal geometrisi sahip iken, en düşük ohmik ısı yoğunluğuna kare kanal geometrisi sahiptir.



Şekil 4.11. Serpantin akış alanında kanal geometrilerinin membranda gerçekleşen ohmik ısı yoğunluğu üzerine etkisi

4.5. Farklı Kanal Oranlarının Sıcaklık ve Isı Yoğunluğu Üzerine Etkisi

Kanal geometrileri arasında en yüksek potansiyel performans gösteren yamuk kanal geometrisi olduğundan bu kanal geometrisi için farklı kanal oranlarının ısı transferi üzerindeki etkisi incelendi. Eşitlik 4.1 referans alınarak kanal oranları 0.25, 0.50, 0.75 ve 0.95 olarak belirlendi [7].

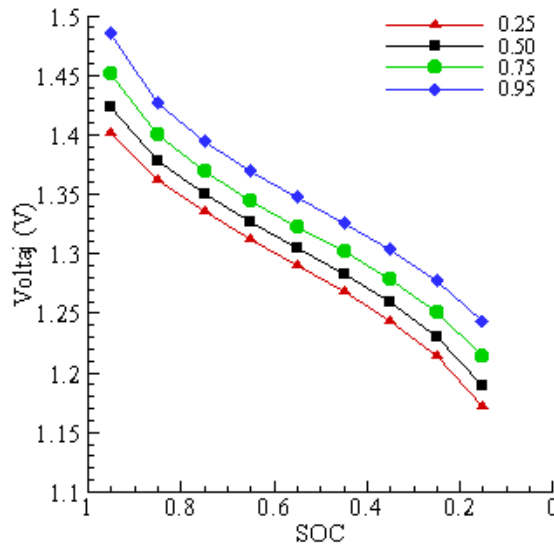
$$\lambda = \frac{W_{ch}}{W_{ch} + W_{rib}} \quad (4.1)$$

Şekil 3.2’de bulunan yamuk kanal geometrisi için kanal oranı 0.5’tir. Belirlenen kanal oranlarına göre Eşitlik 4.1’den kanal yüksekliği ve rib genişliği verildi. Bu hesaplanan değerler Tablo 8’de verilmektedir.

Tablo 8. Serpantin akış alanında yamuk kanal geometrisi için kanal oranları

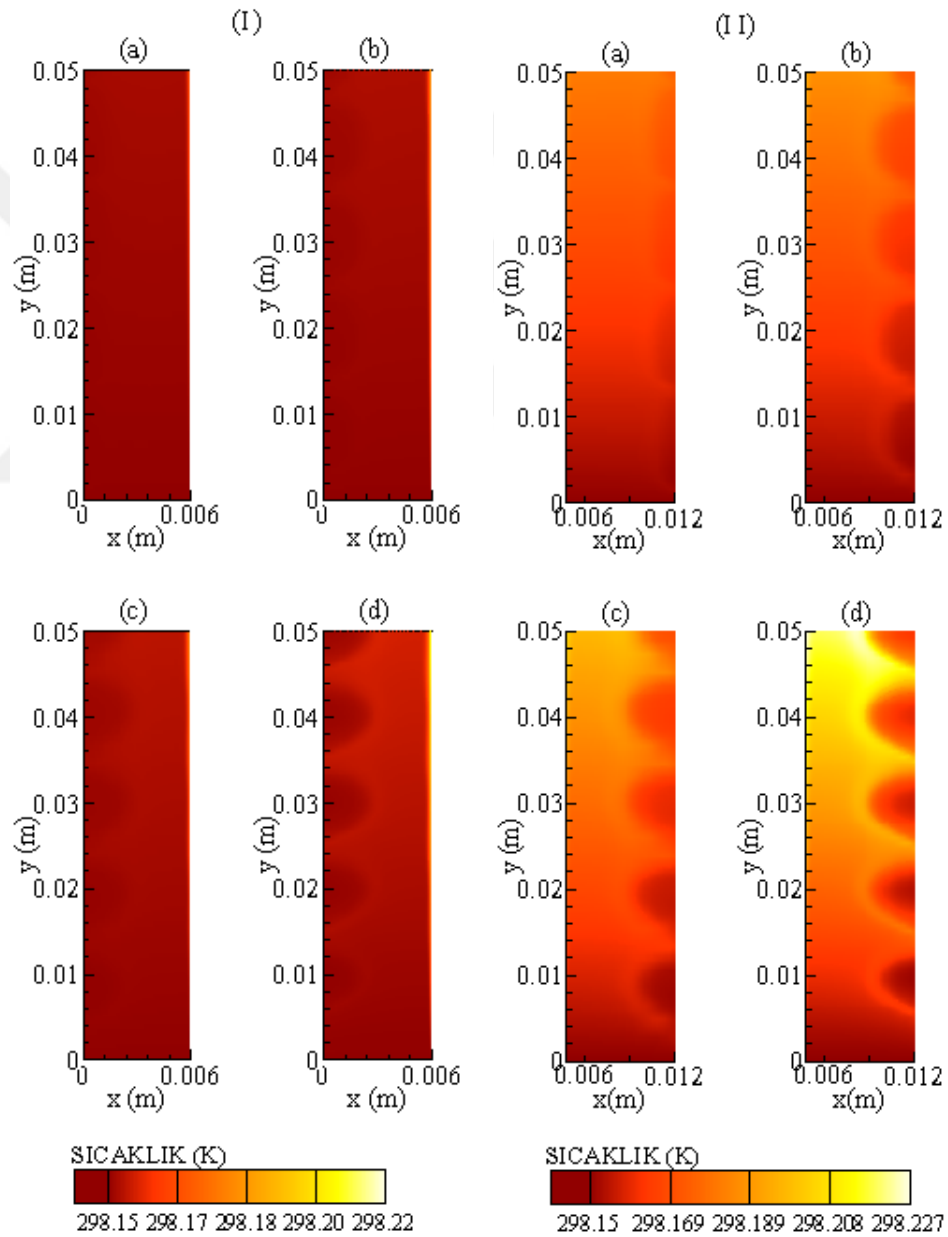
λ	W_{ch}	$W_{rib} + W_{ch}$	$W_{ch} / (W_{ch} + W_{rib})$
λ_1	12.5 (mm)	50 (mm)	0.25
λ_2	25 (mm)	50 (mm)	0.50
λ_3	37.5 (mm)	50 (mm)	0.75
λ_4	47.5 (mm)	50 (mm)	0.95

Farklı kanal oranları için 0.95 ile 0.15 arasındaki deşarj durumu değerlerine karşılık gelen potansiyel performans eğrisi Şekil 4.12’de gösterilmektedir.



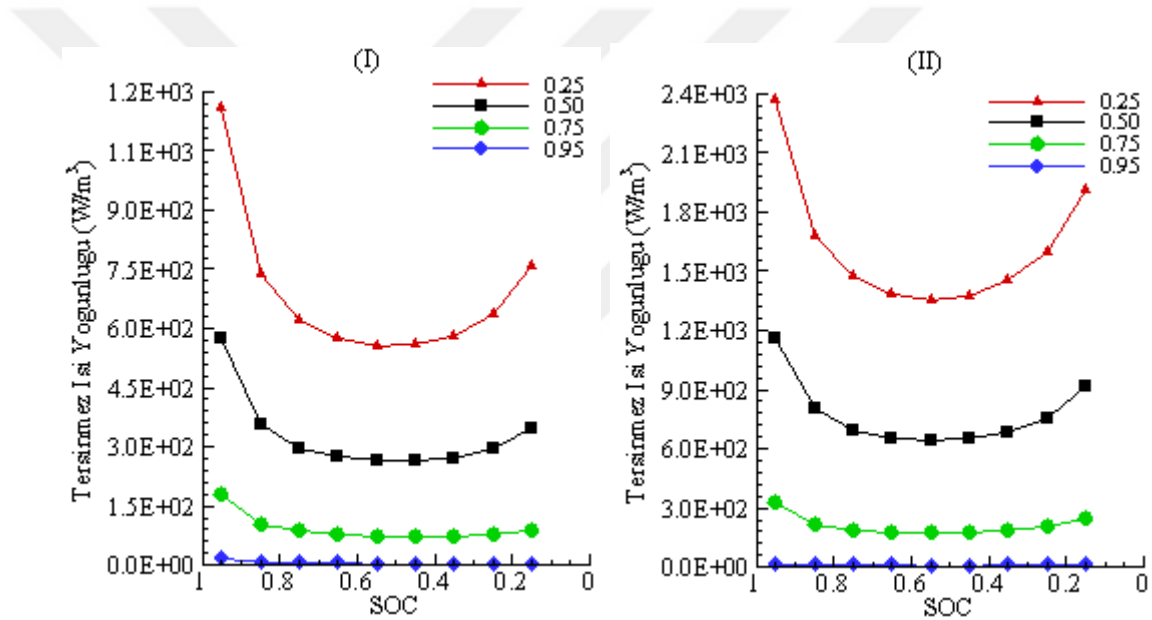
Şekil 4.12. Serpantin akış alanında kanal oranlarına göre potansiyel performansların değişimi

Kanal oranının artması ile hücre potansiyel değerinin arttığı ve en iyi potansiyel performansının 0.95 kanal oranında olduğu görülmektedir. Kanal oranının artmasıyla kanalın elektrotla temas ettiği yüzey artmakta ve elektrolit zorlanmadan elektrot içerisinde dağılmakta ve tepkimeler daha hızlı gerçekleşmesine sebep olmaktadır. Bu da batarya içerisindeki kayıpları azaltmaktadır. Bu sebeple de kanal oranı arttıkça hücre potansiyel değerinin arttığı görülmektedir. Şekil 4.13'te negatif ve pozitif elektrotta sıcaklık dağılımları farklı kanal oranları için verilmektedir.



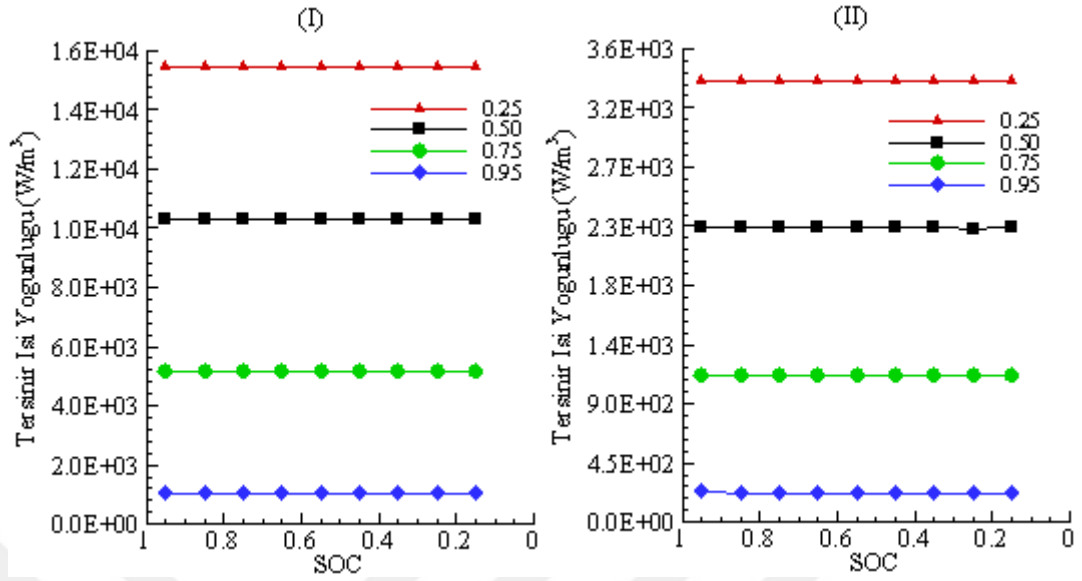
Şekil 4.13. Serpantin akış alanında farklı kanal oranlarında elektrotlardaki sıcaklık dağılımı; (I) Negatif elektrot, (II) Pozitif elektrot, (a) 0.25, (b) 0.50, (c) 0.75, (d) 0.95

Negatif elektrottaki sıcaklık dağılımı kanal oranının artışı ile çok çok az değişirken pozitif elektrotta az da olsa bir değişimin olduğu görülmektedir. Şekil 4.14'te negatif ve pozitif elektrotta farklı kanal oranları için tersinmez ısı yoğunluğunun SOC'la değişimi sunulmaktadır. Kanal oranının artışıyla tersinmez ısı yoğunluğunun azaldığı görülmektedir. Bataryanın yarı yarıya deşarj olması durumunda, negatif elektrotta maksimum tersinmez ısı yoğunluğu 554.05 W/m^3 ile 0.25 kanal oranında iken, 3.3847 W/m^3 değeri ile 0.95 kanal oranında minimum değere sahiptir. Diğer taraftan pozitif elektrotta ise yine 0.25 kanal oranında maksimum tersinmez ısı yoğunlukları görülürken 0.95 kanal oranında minimum ısı yoğunlukları görülmektedir.



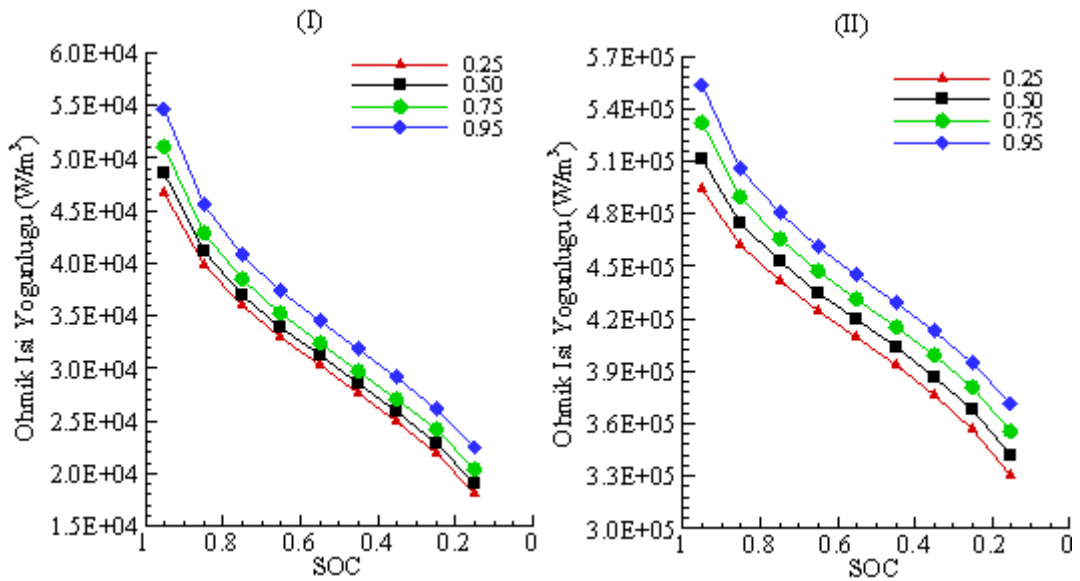
Şekil 4.14. Serpantin akış alanında farklı kanal oranları için tersinmez ısı yoğunluğunun SOC'la değişimi; (I) Negatif Elektrot, (II) Pozitif Elektrot

Hem negatif hem de pozitif elektrotta farklı kanal oranları için tersinir ısı yoğunluğunun SOC'la değişimi Şekil 4.15'te gösterilmektedir. Her iki elektrottada 0.25 kanal oranı en yüksek tersinir ısı yoğunluğu gösterirken, 0.95 kanal oranı en düşük tersinir ısı yoğunluğunu göstermektedir. Kanal oranı azaldıkça batarya içerisinde meydana gelen tersinmezliklerin artışı ile tersinir ısı yoğunluğunun arttığı düşünülmektedir. SOC 'la tersinir ısı yoğunluğunun değişmemesinin sebebi ise bataryaların sabit sıcaklıkta çalışması ve elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda batarya sıcaklığında önemli bir artış olmamasıdır.



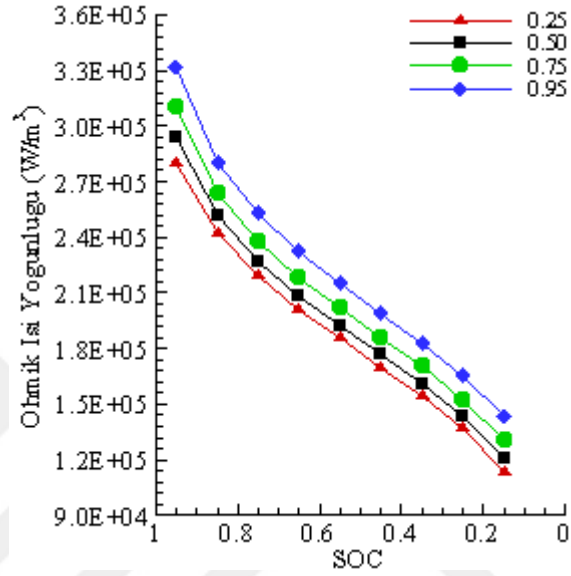
Şekil 4.15. Serpantin akış alanında farklı kanal oranları için tersinir ısı yoğunluğunun SOC'la değişimi; (I) Negatif Elektrot, (II) Pozitif Elektrot

Şekil 4.16'da negatif ve pozitif elektrotta gerçekleşen ohmik ısı yoğunluğunun SOC'la değişimi farklı kanal oranları için gösterilmektedir. Hem negatif elektrotta hem de pozitif elektrotta en yüksek ohmik ısı yoğunluğu 0.95 kanal oranında görülürken değerler yaklaşık olarak sırasıyla $5.5 \cdot 10^4$ W/m² ve $5.6 \cdot 10^5$ W/m²'dür.



Şekil 4.16. Serpantin akış alanında farklı kanal oranları için ohmik ısı yoğunluğunun SOC'la değişimi; (I) Negatif Elektrot, (II) Pozitif Elektrot

Farklı kanal oranları için membranda gerçekleşen ohmik ısı yoğunluğunun SOC'la değişimi Şekil 4.17'de gösterilmektedir. Membrandaki ohmik ısı yoğunluğunun da elektrotlardakine benzer şekilde 0.95 kanal oranında maksimum değerlere ulaştığı görülmektedir.



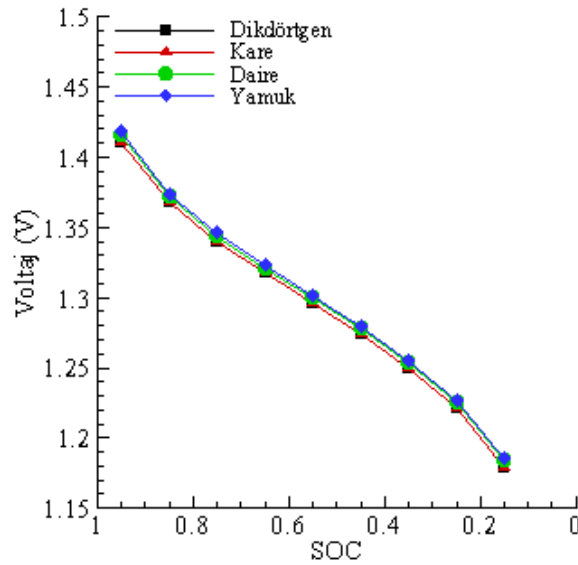
Şekil 4.17. Serpantin akış alanında farklı kanal oranları için membranda gerçekleşen ohmik ısı yoğunluğunun SOC'la değişimi

5. BÖLÜM

İÇ İÇE GEÇMELİ AKIŞ ALANI İÇİN FARKLI KANAL GEOMETRİLERİ VE FARKLI KANAL ORANLARININ BATARYA ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

5.1. Farklı Kanal Geometrilerinin Performansa Etkisi

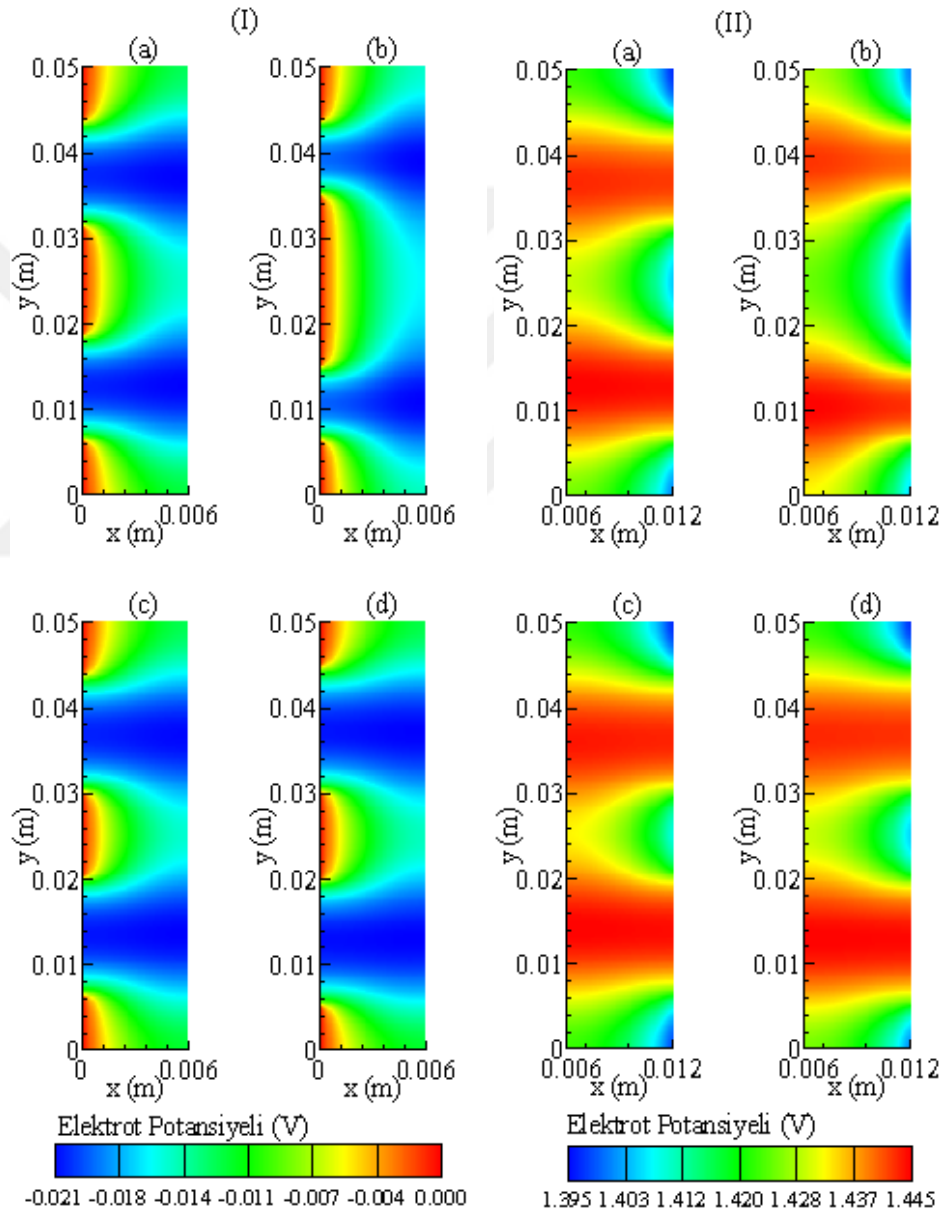
İç içe geçmeli akış alanı için farklı kanal geometrilerinin VRAB'ın potansiyel performansa etkisi aynı kanal alanına sahip dört farklı kanal geometrisi (dikdörtgen, kare, daire ve yamuk) için analiz edildi. İç içe geçmeli akış alanı için oluşturulan kanal boyutları Ishitobi vd.'nin sunduğu model geometrisi esas alınarak elde edildi [6]. Şekil 5.1'de farklı kanal geometrilerinin bataryanın deşarjı esnasında potansiyel performansının SOC'la değişimi gösterilmektedir. İç içe geçmeli akış alanında kanal geometrilerindeki farklılık potansiyel performansda çok büyük bir değişikliğe neden olmamakla birlikte serpantin akış alanında olduğu gibi yamuk kanal geometrisinin potansiyel performansı diğer kanal geometrilerine göre nispeten daha fazladır.



Şekil 5.1. İç içe geçmeli akış alanında kanal geometrilerine göre potansiyel performansların değişimi

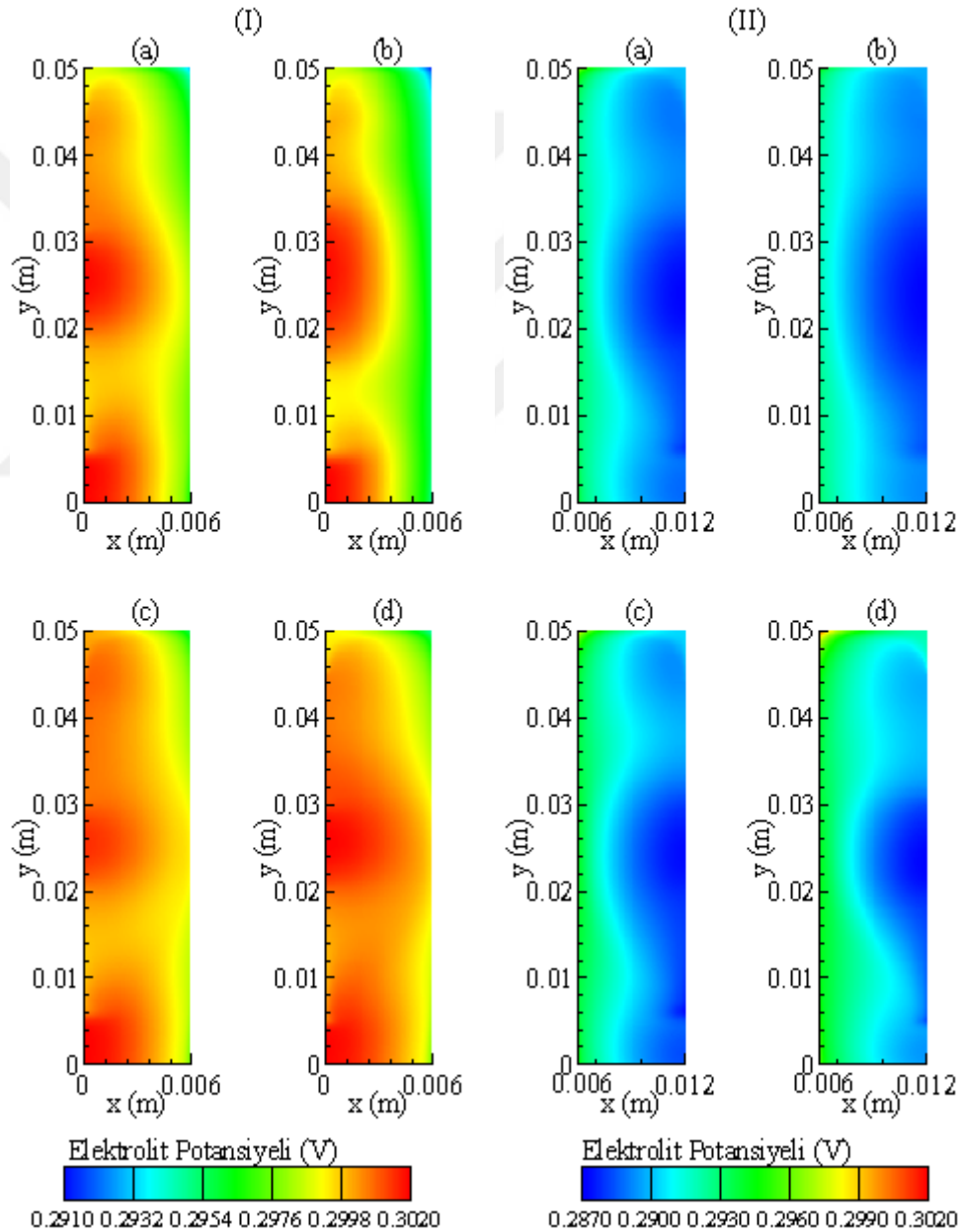
5.2. Farklı Kanal Geometrilerinin Elektrot Potansiyeli, Elektrolit Potansiyeli ve Konsantrasyon Dağılımına Etkisi

Bataryanın deşarjı esnasında, iç içe geçmeli akış alanında farklı kanal geometrileri için hem pozitif elektrottaki hem de negatif elektrottaki elektrot potansiyelinin dağılımı Şekil 5.2’de gösterilmektedir.



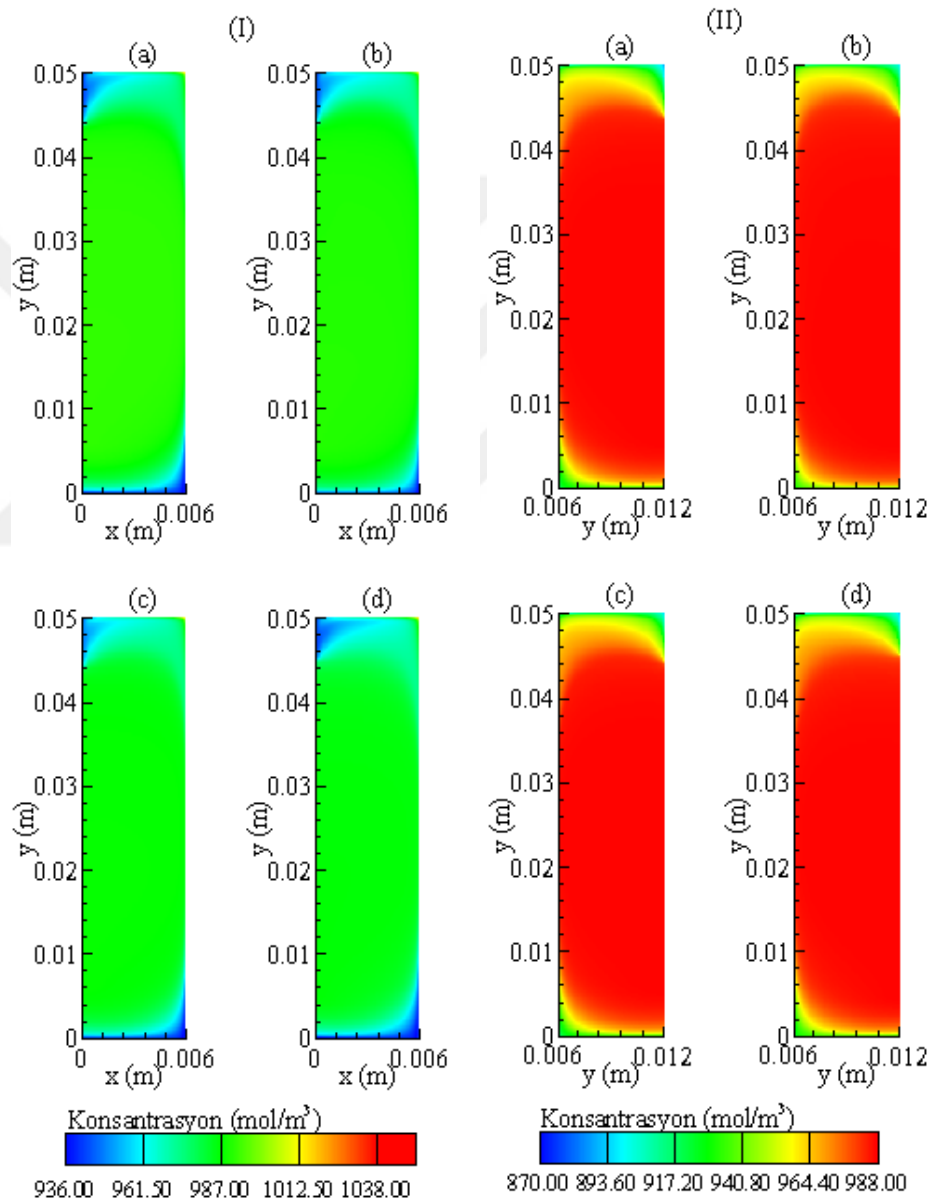
Şekil 5.2. İç İçe geçmeli akış alanında kanal geometrileri için elektrot potansiyelinin dağılımı; (I) Negatif elektrot, (II) Pozitif elektrot, (a) Dikdörtgen, (b) Kare, (c) Daire, (d) Yamuk

Bütün kanal geometrileri için her iki elektrot yüzeyi boyunca elektrot potansiyeli akım toplayıcı tabakanın rib bölgesinde daha az iken akış kanalında daha fazla olduğu görülmektedir. Her bir kanal geometrisi için elektrotların yüzeylerindeki elektrot potansiyelinin dağılımı hemen hemen aynıdır. Şekil 5.3'te negatif ve pozitif elektrotta farklı kanal geometrileri için elektrolit potansiyelinin dağılımı gösterilmektedir. Negatif elektrotta en iyi elektrolit potansiyeli dağılımı yamuk kanal geometrisinde görülmektedir.



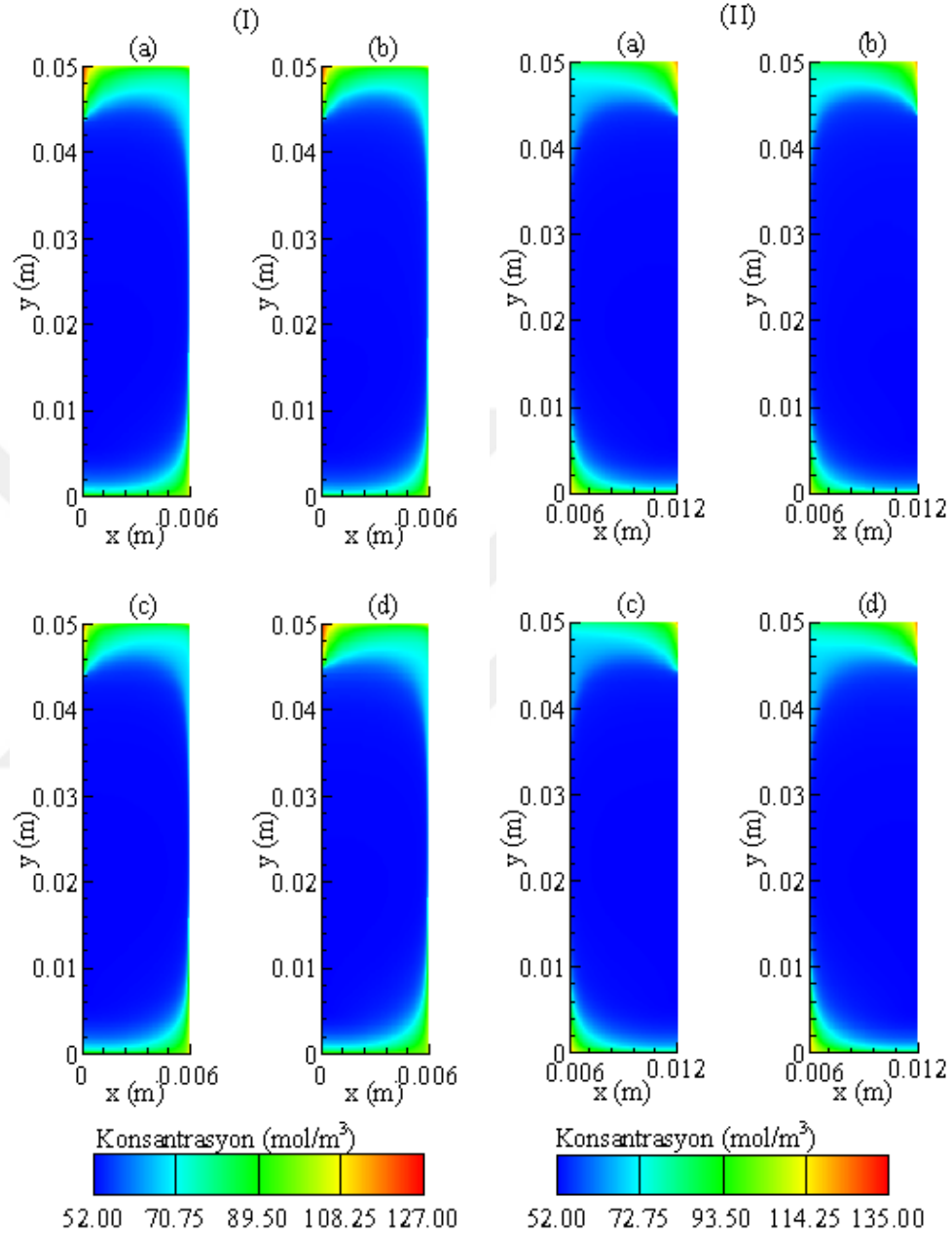
Şekil 5.3. İç İç geçmeli akış alanında kanal geometrileri için elektrolit potansiyelinin dağılımı; (I) Negatif elektrot, (II) Pozitif elektrot, (a) Dikdörtgen, (b) Kare, (c) Daire, (d) Yamuk

Pozitif elektrotta ise yamuk ve daire kanal geometrilerinde elektrolit potansiyeli dağılımı hemen hemen benzerdir. VRAB'nın deşarjı esnasında, iç içe geçmeli akış alanında farklı kanal geometrileri için elektrolardaki V^{2+} ve VO_2^+ konsantrasyon dağılımları Şekil 5.4'te gösterilirken Şekil 5.5'te V^{3+} ve VO^{2+} konsantrasyon dağılımları gösterilmektedir.



Şekil 5.4. İç içe geçmeli akış alanında farklı kanal geometrileri için elektrottaki V^{2+} ve VO_2^+ konsantrasyonlarının dağılımı; (I) Negatif elektrot, (II) Pozitif elektrot, (a) Dikdörtgen, (b) Kare, (c) Daire, (d) Yamuk

Şekillerdende görülebileceği gibi, elektrotlar boyunca türlerinin konsantrasyon dağılımları her kanal geometrisi için aynıdır.

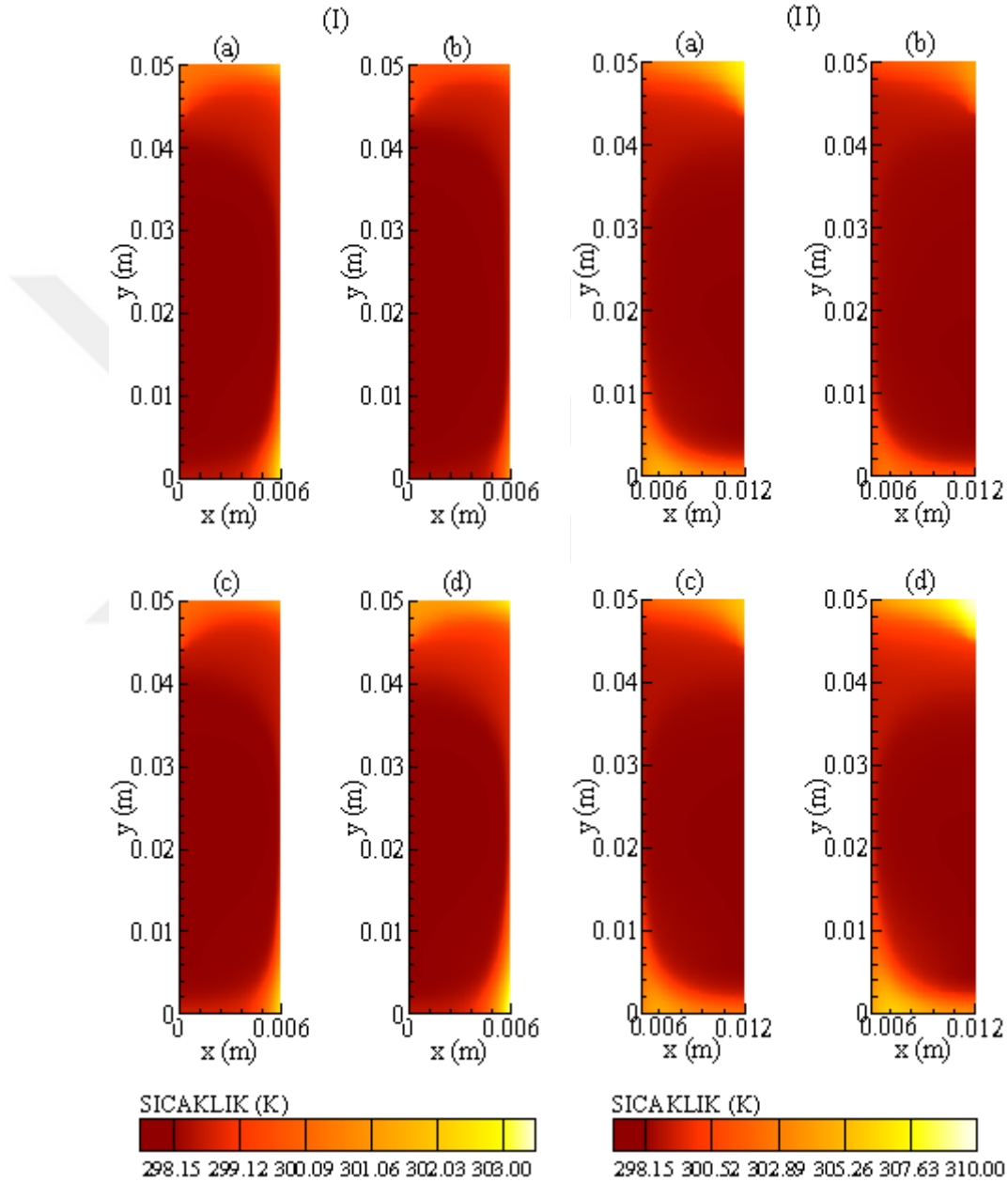


Şekil 5.5. İç içe geçmeli akış alanında farklı kanal geometrileri için elektrottaki V^{3+} ve VO^{2+} konsantrasyonlarının dağılımı; (I) Negatif elektrot, (II) Pozitif elektrot, (a) Dikdörtgen, (b) Kare, (c) Daire, (d) Yamuk

5.3. Farklı Kanal Geometrilerinin Sıcaklık ve Isı Yoğunluğu Üzerine Etkisi

Şekil 5.6'da iç içe geçmeli akış alanı için farklı kanal geometrilerine göre hem negatif hem de pozitif elektrottaki sıcaklık dağılımları verilmektedir. Negatif elektrotta maksimum ve minimum sıcaklık değerleri arasında yaklaşık 5 K fark varken pozitif

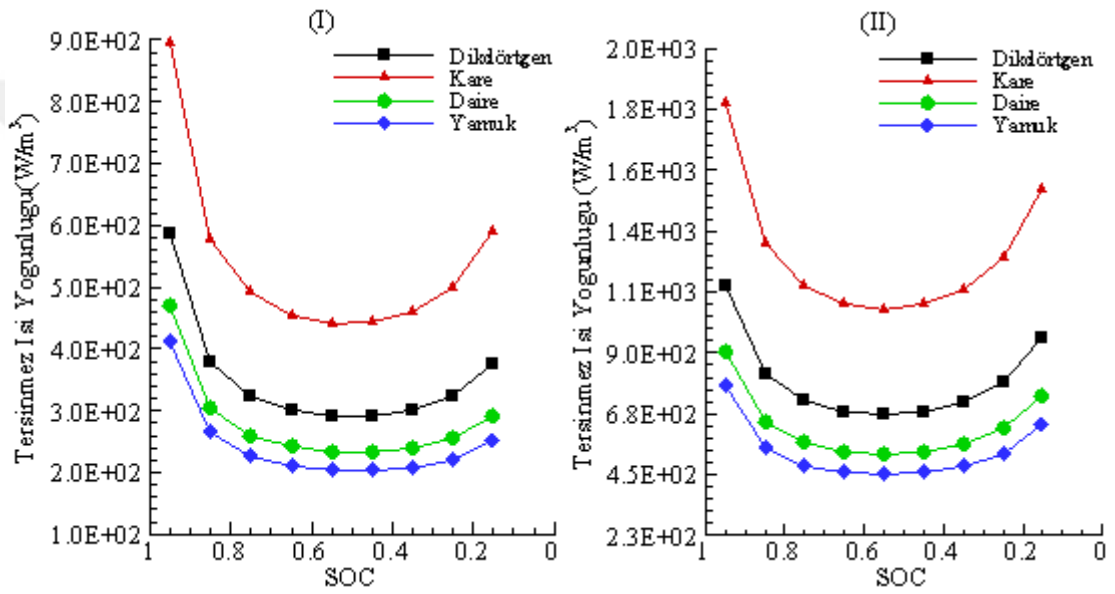
elektrotta ise bu fark yaklaşık 12 K civarındadır. Her iki elektrotta da elektrot boyunca hemen hemen her bölgede en yüksek sıcaklık değeri yamuk kanal geometrisinde görülmektedir.



Şekil 5.6. İç içe geçmeli akış alanında farklı kanal geometrileri için elektrottaki sıcaklık dağılımı; (I) Negatif elektrot, (II) Pozitif elektrot, (a) Dikdörtgen, (b) Kare, (c) Daire, (d) Yamuk

Bataryanın deşarjı esnasında hem negatif hem de pozitif elektrottaki farklı kanal geometrileri için tersinmez ısı yoğunluğunun SOC'la değişimi Şekil 5.7'de sunulmaktadır.

Her iki elektrotta da meydana gelen tersinmez ısı yoğunlukları bütün SOC değerleri için yamuk kanal geometrisinde düşük iken kare kanal geometrisi için en yüksek değerdedir. Ayrıca, her kanal tipi için pozitif elektrottaki tersinmez ısı yoğunluğu negatif elektrottaki tersinmez ısı yoğunluğunun yaklaşık iki katıdır.

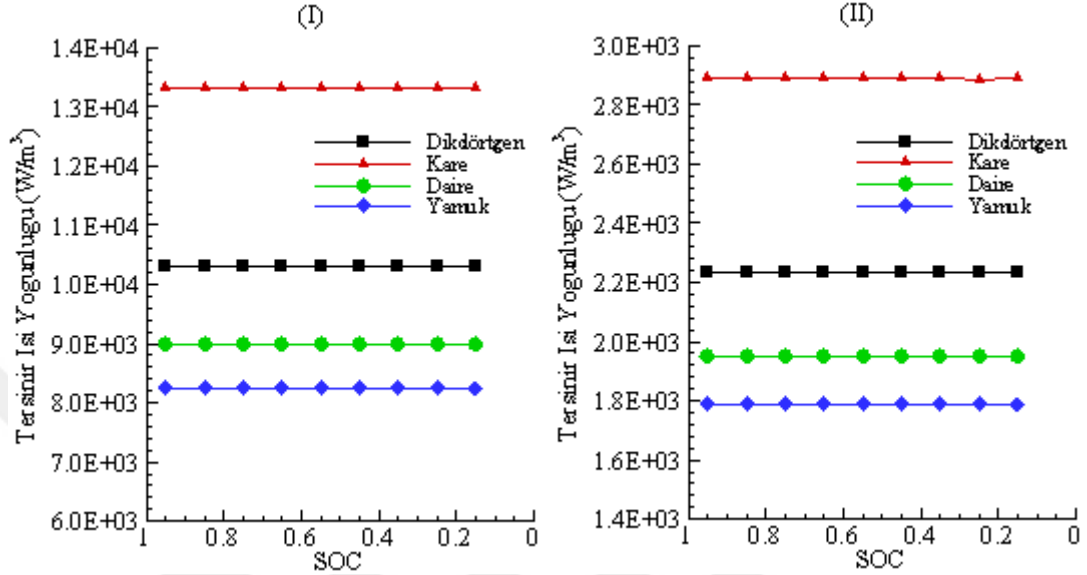


Şekil 5.7. İç içe geçmeli akış alanında farklı kanal geometrileri için tersinmez ısı yoğunluğunun SOC'la değişimi; (I) Negatif Elektrot, (II) Pozitif Elektrot

Şekil 5.8'de hem negatif hem de pozitif elektrotta farklı kanal geometrileri için tersinir ısı yoğunluğunun SOC'la değişimi gösterilmektedir. Her kanal geometrisi için tersinir ısı yoğunluğunun SOC'la değişmediği görülmektedir. Bunun sebebi, Bölüm 4.3'de de ifade edildiği gibi bataryanın sabit sıcaklıkta çalışması batarya içerisinde gerçekleşen reaksiyonlar sonucunda büyük bir sıcaklık artışının olmamasıdır. Bataryanın yarı yarıya deşarj olması durumunda kare kanal geometrisi için bu ısı yoğunluğu negatif elektrotta $13320 W/m^3$ iken pozitif elektrotta $2890.2 W/m^3$ 'tür. Yamuk kanal geometrisi için bu değerler sırasıyla $8241.9 W/m^3$ ve $1788.3 W/m^3$ 'tür.

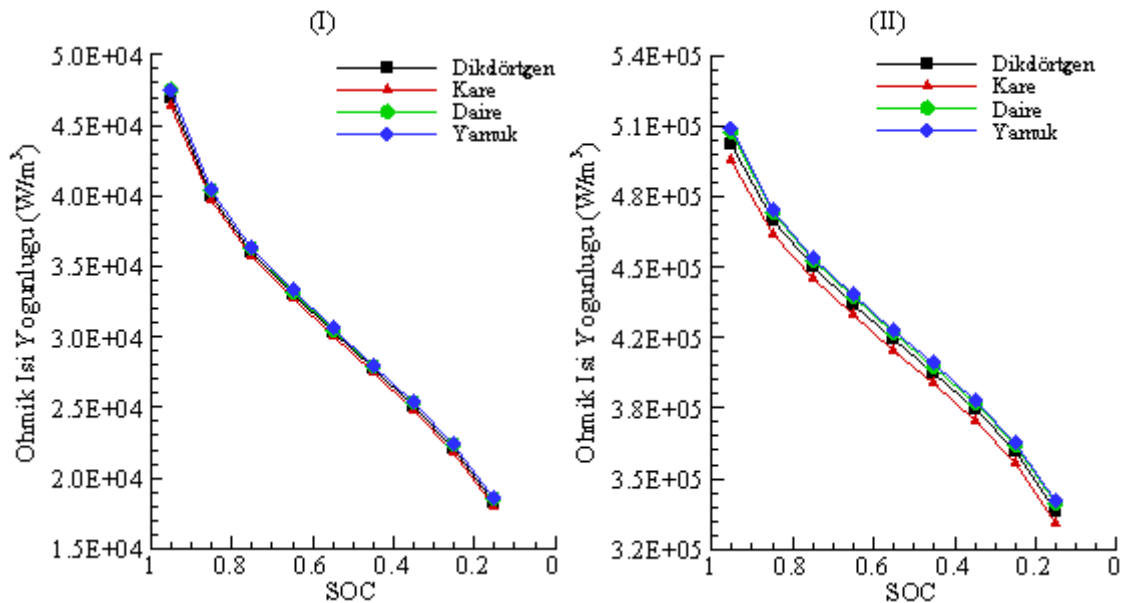
Şekil 5.9'da negatif ve pozitif elektrotta gerçekleşen ohmik ısı yoğunluğunun SOC'la değişimi farklı kanal kesitleri için sunulmaktadır. Negatif elektrotta ohmik ısı

yoğunluğunun SOC'la değişimi incelendiğinde görülüyor ki her kanal geometrisi için bu değişim hemen hemen aynıdır. Diğer taraftan, pozitif elektrotta ise farklı kanal geometrileri için ohmik ısı yoğunlukları az da olsa farklılık göstermektedir.



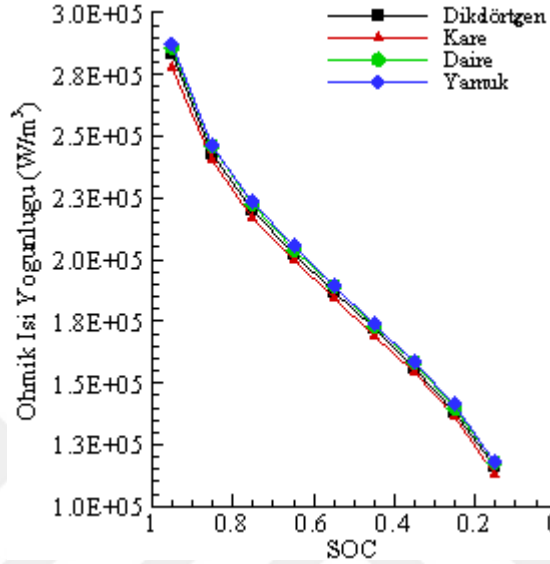
Şekil 5.8. İç içe geçmeli akış alanında farklı kanal geometrileri için tersinir ısı yoğunluğunun SOC'la değişimi; (I) Negatif Elektrot, (II) Pozitif Elektrot

Şekil 5.10'da membranda gerçekleşen ohmik ısı yoğunluğunun SOC'la değişimi gösterilmektedir. Membranda gerçekleşen ohmik ısı yoğunluğunun değeri yüksekten düşüğe doğru yamuk, daire, dikdörtgen ve kare kanal geometrileridir.



Şekil 5.9. İç içe geçmeli akış alanında farklı kanal geometrileri için ohmik ısı yoğunluğunun SOC'la değişimi; (I) Negatif Elektrot, (II) Pozitif Elektrot

Bataryanın yarı yarıya deşarj olması durumunda kare kanallı geometride bu ısı yoğunluğunun değeri $1.76 \cdot 10^5 \text{ W/m}^3$ iken yamuk kanal geometrisine sahip olan modelde bu değer $1.81 \cdot 10^5 \text{ W/m}^3$ 'tür.



Şekil 5.10. İç içe geçmeli akış alanında farklı kanal geometrileri için membrandaki ohmik ısı yoğunluğunun SOC'la değişimi

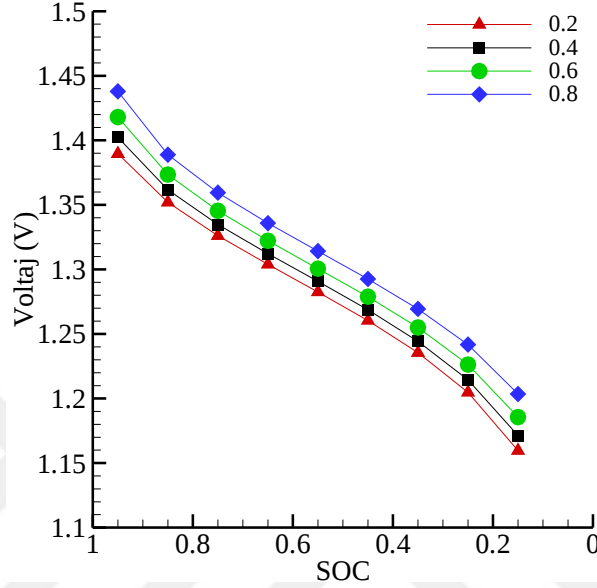
5.4. Farklı Kanal Oranlarının Sıcaklık ve Isı Yoğunluğu Üzerine Etkisi

Kanal geometrileri arasında diğerlerine göre yüksek performans gösteren yamuk kanal geometrisi için farklı kanal oranlarının potansiyel performansı ve ısı transferi üzerindeki etkileri incelendi. Eşitlik 4.1 referans alınarak kanal oranları 0.20, 0.40, 0.60 ve 0.80 olarak belirlendi. Şekil 3.4'te bulunan yamuk kanal geometrisi için kanal oranı 0.6'dır. Belirlenen kanal oranlarına göre Eşitlik 4.1'den kanal yüksekliği ve rib genişliği hesaplandı. Bu hesaplanan değerler Tablo 9'da gösterilmektedir.

Tablo 9. İç içe geçmeli akış alanında yamuk kanal geometrisi için kanal oranları

λ	W_{ch}	$W_{rib} + W_{ch}$	$W_{ch} / (W_{ch} + W_{rib})$
λ_1	10 (mm)	50 (mm)	0.2
λ_2	20 (mm)	50 (mm)	0.4
λ_3	30 (mm)	50 (mm)	0.6
λ_4	40 (mm)	50 (mm)	0.8

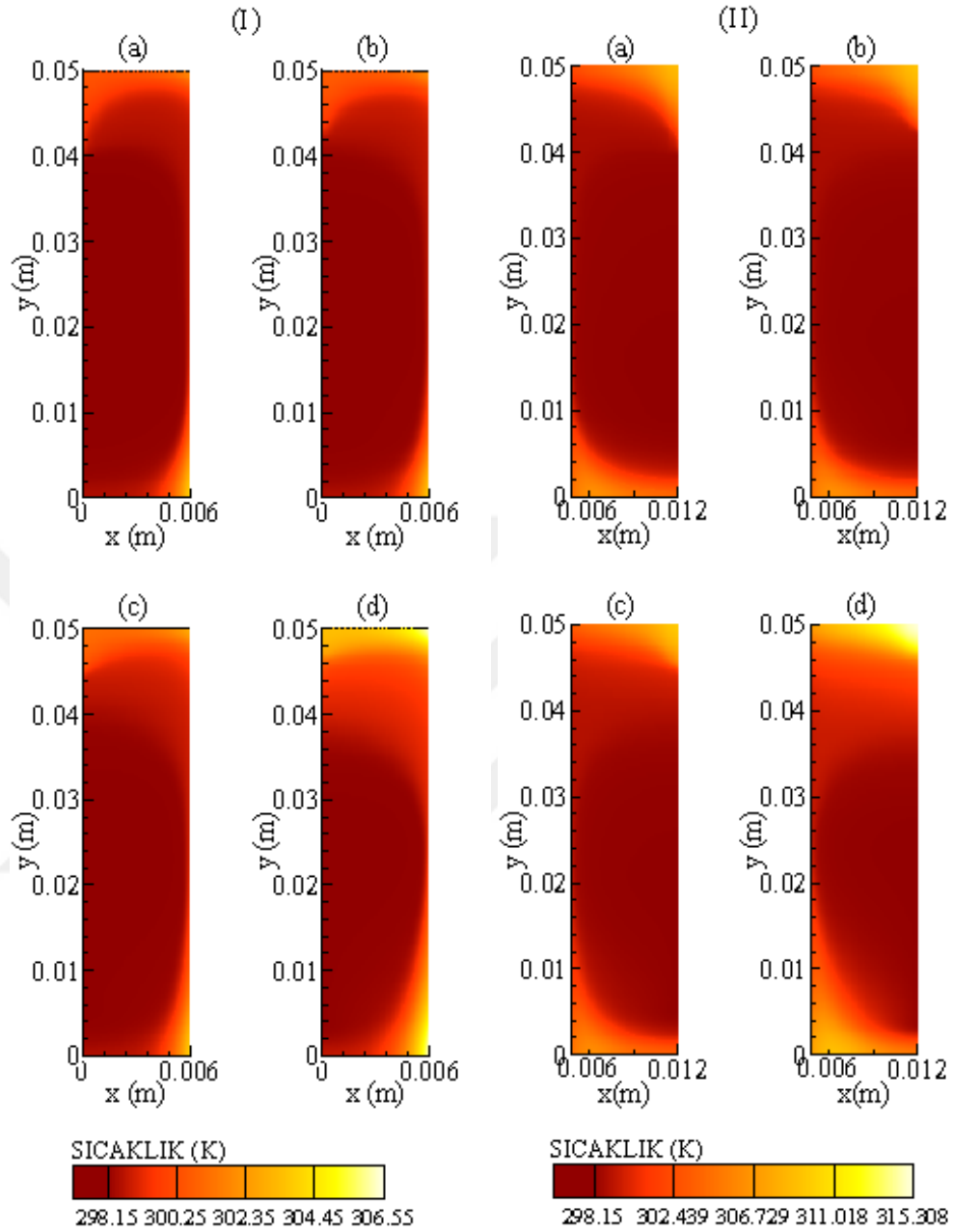
Yamuk kanal geometrisi için farklı kanal oranlarında potansiyel performans eğrisi Şekil 5.11’de gösterilmektedir. Şekilden görülebileceği üzere kanal oranının artması ile bataryanın potansiyel performansı artmaktadır.



Şekil 5.11. İç içe geçmeli akış alanında kanal oranlarına göre potansiyel performansların değişimi

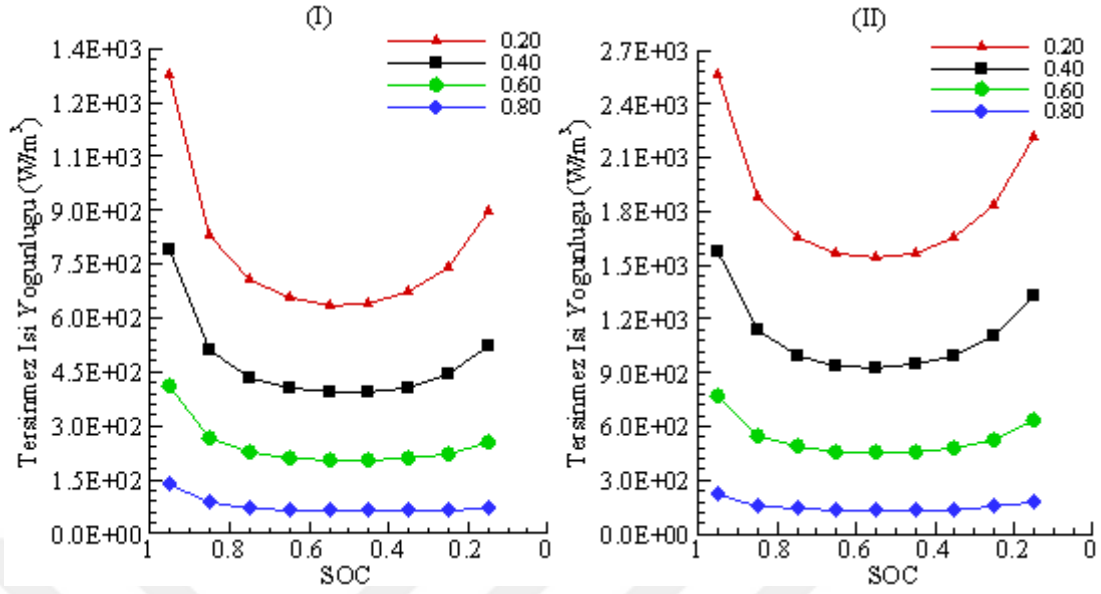
Şekil 5.12’de farklı kanal oranları için negatif ve pozitif elektrottaki sıcaklık dağılımları verilmektedir. Artan kanal genişliği ile elektrotların yüzeylerindeki sıcaklık farklılıklarında meydana gelen değişimlerin arttığı görülmektedir. Bununla birlikte, negatif elektrotta maksimum sıcaklık değeri 306.55 K iken pozitif elektrotta bu değer yaklaşık 315 K’dir.

Negatif ve pozitif elektrotta farklı kanal oranlarında gerçekleşen tersinmez ısı yoğunluğunun SOC’la değişimi Şekil 5.13’te gösterilmektedir. Bataryanın yarı yarıya deşarj olması durumunda negatif elektrotta kanal oranının 0.20’den 0.80’e artışıyla ısı yoğunluğu bu kanal oranları için sırasıyla 634.65 W/m^3 ve 62.518 W/m^3 ’tür. Pozitif elektrotta ise 0.20 ve 0.80 kanal oranları için bu değer 1546.7 W/m^3 ve 127.60 W/m^3 ’tür.

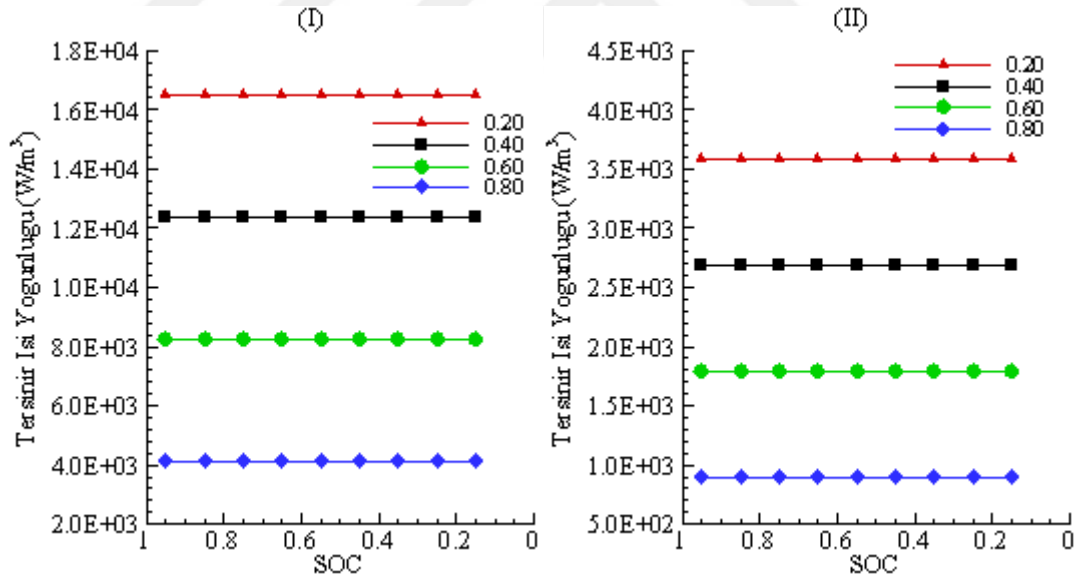


Şekil 5.12. İç içe geçmeli akış alanında farklı kanal oranları için elektrottaki sıcaklık dağılımı; (I) Negatif elektrot, (II) Pozitif elektrot, (a) 0.20, (b) 0.40, (c) 0.60, (d) 0.80

Şekil 5.14'te hem negatif hem de pozitif elektrotta farklı kanal oranları için tersinir ısı yoğunluğunun SOC'la değişimi gösterilmektedir. Kanal oranının artışı ile meydana gelen tersinmezliklerin azalması nedeni ile her iki elektrotta da 0.20 kanal oranı en yüksek tersinir ısı yoğunluğu değerine sahipken, 0.80 kanal oranı en düşük tersinir ısı yoğunluğu değerine sahiptir.



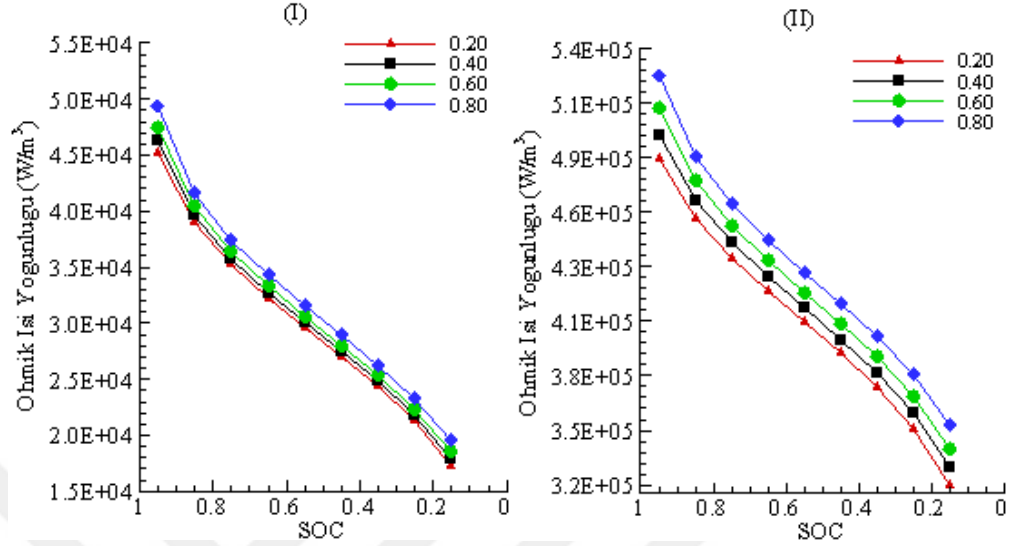
Şekil 5.13. İç içe geçmeli akış alanında yamuk kanal geometrisi için farklı kanal oranlarındaki tersinmez ısı yoğunluğunun SOC'la değişimi; (I) Negatif Elektrot, (II) Pozitif Elektrot



Şekil 5.14. İç içe geçmeli akış alanında yamuk kanal geometrisi için farklı kanal oranlarındaki tersinir ısı yoğunluğunun SOC'la değişimi; (I) Negatif Elektrot, (II) Pozitif Elektrot

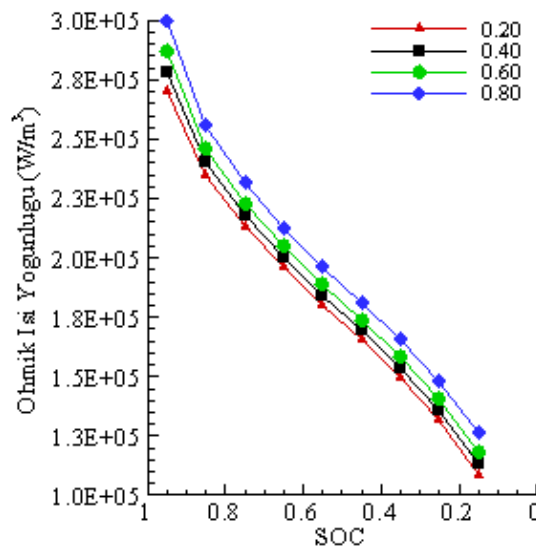
Negatif ve pozitif elektrotta gerçekleşen ohmik ısı yoğunluklarının farklı kanal oranları için değişimi Şekil 5.15'te görülmektedir. Her iki elektrotta kanal oranının artışıyla ohmik ısı yoğunluklarının arttığı görülmektedir. Şekil 5.16'da membranda gerçekleşen ohmik ısı yoğunluğunun SOC'la değişimi farklı kanal oranları için verilmektedir.

Elektrotlarda olduğu gibi membranda da ohmik ısı yoğunluğu kanal oranının artışıyla artmaktadır.



Şekil 5.15. İç içe geçmeli akış alanında farklı yamuk kanal geometrisi için kanal oranlarındaki ohmik ısı yoğunluğunun SOC'la değişimi; (I) Negatif Elektrot, (II) Pozitif Elektrot

Her iki bileşendeki bu ısı yoğunluğunun artışının sebebi bu bileşenlerin iyonik iletkenliklerine bağlı olarak kanal oranının artışıyla elektrolitin elektrot boyunca hızlı ve düzgün dağılması ile gerçekleşen reaksiyonlar sonucunda oluşan türlerin transferinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.16. İç içe geçmeli akış alanında yamuk kanal geometrisinin farklı kanal oranları için membran üzerinde gerçekleşen ohmik ısı yoğunluğunun SOC'la değişimi

6. BÖLÜM

SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, Vanadyum Redoks Akış bataryasında akış kanallarının ve kanal geometrilerinin batarya içerisinde gerçekleşen kütle, yük, tür ve ısı transferleri üzerine etkileri analiz edilmektedir. Bu analizleri gerçekleştirmek amacıyla serpantin akış alanına ve iç içe geçmeli akış alanına sahip 2 boyutlu iki ayrı model geliştirildi. Farklı kanal geometrilerinin etkisini araştırmak için dikdörtgen, kare, daire ve yamuk kanal geometrileri seçildi. Bu geometrilerin her biri serpantin ve iç içe geçmeli akış alanları için ayrı ayrı uygulandı. Serpantin akış alanına ve dikdörtgen kesitli akış kanalına sahip model literatürdeki deneysel verilerle doğrulandıktan sonra sayısal modelin ağ yapısını bağımsız hale getirmek için 981/1744/3175/4075/4975/6024 eleman sayısına sahip altı farklı ağ yapısı için çözümler gerçekleştirildi. Çözümler sonucunda 3175 eleman sayısına sahip ağ yapısı oluşturulan diğer model geometrileri için uygulanarak bütün sayısal çözümler sürekli rejim altında gerçekleştirildi. Daha sonra hem serpantin akış alanında hem de iç içe geçmeli akış alanında en iyi potansiyel performansı veren kanal geometrisi için kanal oranının batarya içerisindeki ısı transferi üzerinde etkilerini araştırmak üzere serpantin akış alanında kanal oranı 0.25'den 0.95'e kadar (0.25 adımla), iç içe geçmeli akış alanında ise kanal oranı 0.20'den 0.80'e kadar (0.20 adımla) değiştirildi ve sayısal analizler gerçekleştirildi. Bu sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar özetle şu şekildedir:

Serpantin akış alanına uygulanan farklı kanal geometrilerinden en yüksek potansiyel performansı veren geometri yamuk kanal geometrisi iken en düşük performansı veren geometri ise kare kanal geometrisidir. Daire ve dikdörtgen kanal geometrileri için elde edilen potansiyel performans eğrilerinin hemen hemen aynı olduğu görüldü. Bataryanın deşarjı durumunda, hem negatif hem de pozitif elektrotta elektrot ve elektrolit potansiyel dağılımlarının yamuk kanal geometrisinde daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

Bütün kanal geometrilerinde her iki elektrot boyunca vanadyum türlerinden V^{2+} ve VO_2^+ türlerinin konsantrasyonunun kanal girişinden çıkışına doğru türlerin az da olsa tükendiğini V^{3+} ve VO^{2+} türlerinin ise batarya deşarjı esnasında oluşumundan dolayı konsantrasyon dağılımlarının giriş kanalından çıkış kanalına doğru yoğunlaştığı görülmektedir. Ayrıca, serpantin akış alanında kullanılan farklı kanal geometrilerinin batarya içerisinde elektrokimyasal reaksiyonlardan ve iyonların hareketlerinden dolayı üretilen tersinmez, tersinir ve ohmik ısı yoğunluklarının SOC'la değişimi araştırıldı. Batarya içerisinde gerçekleşen kayıpların daha az olduğu yamuk kanal geometrisinde tersinmez ısı yoğunluğunun bütün SOC değerlerinde diğer kanal geometrilerde gerçekleşen tersinmez ısı yoğunluklarında çok daha küçük olduğu ortaya konuldu. Tersinir ısı yoğunluklarının SOC'la değişimi ise her kanal geometri için sabit kalırken en düşük ısı yoğunluğu yine yamuk kanal geometrisinde meydana gelmiştir. Bütün kanal geometrileri için SOC'ın 0.95'den 0.15'e kadar düşmesiyle elektrotlardaki ve membrandaki ohmik ısı yoğunluklarının lineere yakın azaldığı görüldü. Ayrıca, serpantin akış alanında en iyi performans veren yamuk kanal geometrisi için kanal oranlarının 0.25'den 0.95'e artırılmasıyla batarya potansiyel performansının arttığı bulundu. Bataryanın deşarjı esnasında, minimum tersinir ve tersinmez ısı yoğunlukları 0.95 kanal oranında elde edildi. Bununla birlikte ohmik ısı yoğunlukları 0.95 kanal oranında maksimum değerlere ulaşmıştır.

İç içe geçmeli akış alanında dikdörtgen, kare, daire ve yamuk kanal geometrilerine ait batarya potansiyel performansları hemen hemen aynı olmakla birlikte yamuk kanal geometrisinin potansiyel performansı az da olsa diğer kanal geometrilerinden daha iyidir. Bütün kanal geometrileri için her iki elektrot yüzeyi boyunca elektrot potansiyeli dağılımının akım toplayıcı tabakanın rib bölgesinde daha düşük olduğu görülmektedir. Elektrolit potansiyel dağılımı ise negatif elektrotta yamuk kanal geometrisinde daha iyi iken pozitif elektrotta bu potansiyel dağılımının yamuk ve daire kanal geometrilerinde hemen hemen birbirine benzer olduğu ortaya kondu. Bütün vanadyum türlerinin elektrotlardaki konsantrasyon dağılımları ünitardır. Bununla birlikte, iç içe geçmeli akış alanında farklı kanal geometrilerinin bataryadaki sıcaklık dağılımları ve ısı yoğunlukları üzerindeki etkileri serpantin akış alanı için yapılan analizlerle benzerlikler gösterdiği görüldü. Her iki elektrotta da meydana gelen tersinir ve tersinmez ısı yoğunlukları bütün SOC değerleri için yamuk kanal geometrisinde en düşük değerlerde

iken kare kanal geometrisi için en yüksek değerlerdedir. Ayrıca her kanal geometrisi için tersinir ısı yoğunluklarının SOC'la değişmediği görüldü. Kare kanal geometrisi için tersinir ısı yoğunluğu negatif elektrotta 13320 W/m^3 iken pozitif elektrotta 2890.2 W/m^3 'tür. Yamuk kanal geometrisi için ise bu değerler sırasıyla 8241.9 W/m^3 ve 1788.3 W/m^3 'tür. Negatif elektrotta bütün kanal geometrileri için ohmik ısı yoğunluğunun SOC'la değişimi hemen hemen aynı iken pozitif elektrotta farklı kanal geometrileri için ohmik ısı yoğunluklarında az da olsa farklılık göstermektedir. Membranda gerçekleşen ohmik ısı yoğunluğu incelendiğinde ise SOC'la ohmik ısı yoğunluğunda en yüksek değişim yamuk kanal geometrisinden elde edilmiştir. Ayrıca, iç içe geçmeli akış alanı için az da olsa potansiyel performansı diğer kanal geometrilerine göre daha iyi olan yamuk kanal geometrisi için 0.20, 0.40, 0.60 ve 0.80 kanal oranlarında elektrotlardaki sıcaklık dağılımları, tersinir, tersinmez ve ohmik ısı yoğunluklarının SOC'la değişimleri araştırıldı. Kanal oranının artışıyla artan kanal genişliği ile elektrotların yüzeylerindeki sıcaklıkta meydana gelen değişimlerin arttığı görüldü. Bataryanın yarı yarıya deşarj olması durumunda, kanal oranının 0.20'den 0.80'e arttırılmasıyla negatif ve pozitif elektrotlardaki tersinmez ısı yoğunluklarının azaldığı görülmektedir. Her iki elektrotta tersinir ısı yoğunlukları 0.20 kanal oranında en yüksek değere sahip iken 0.80 kanal oranında en düşük değerdedir. Son olarak, elektrotlarda ve membranda meydana gelen ohmik ısı yoğunlukları kanal oranının artışıyla artmakta olup bütün kanal oranları için SOC'ın 0.95'den 0.15'e azalmasıyla bu ısı yoğunluklarının azaldığı görüldü.

KAYNAKÇA

1. Zhang J., 2018. Requirements of large-scale energy storage techniques, pp. 4-5. *In: Redox Flow Batteries*. (Eds. H., Zhang, X., Li, J., Zhang). CRC Press, İngiltere.
2. Silva Lima L., Quartier M., Buchmayr A., Sanjuan Delmas D., Laget H., Corbisier D., Mertens J., Dewulf J., 2021. Life cycle assessment of lithium-ion batteries and vanadium redox flow batteries-based renewable energy storage systems. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, **46**: 101286.
3. He, W., King, M., Luo, X., Dooner, M., Li, D., Wang, J., 2021. Technologies and economics of electric energy storages in power systems: Review and perspective. **Advances in Applied Energy**, **4**: 100060.
4. Nikolaidis, P., Poullikkas, A., 2018. Cost metrics of electrical energy storage technologies in potential power system operations. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, **25**: 43-59.
5. Al-Fetlawi H., 2010. Modelling and Simulation of All-Vanadium Redox Flow Batteries. University of Southampton, Faculty of Engineering and The Environment school of engineering sciences, Doktora Tezi, Southampton, 193 s.
6. Ishitobi, H., Saito, J., Sugawara, S., Oba, K., Nakagawa, N., 2019. Visualized cell characteristics by a two-dimensional model of vanadium redox flow battery with interdigitated channel and thin active electrode. **Electrochimica Acta**, **313**: 513-522.
7. Tsushima, S., Suzuki, T., 2020. Modeling and simulation of vanadium redox flow battery with interdigitated flow field for optimizing electrode architecture. **Journal of The Electrochemical Society**, **167** (2): 020553.
8. Knehr, K. W., Agar, E., Dennison, C. R., Kalidindi, A. R., Kumbur, E. C., 2012. A transient vanadium flow battery model incorporating vanadium crossover and water transport through the membrane. **Journal of The Electrochemical Society**, **159** (9): A1446-A1459.

9. Shah, A. A., Watt-Smith, M. J., & Walsh, F. C., 2008. A dynamic performance model for redox-flow batteries involving soluble species. **Electrochimica Acta**, **53** (27): 8087-8100.
10. Zhang J., 2018. Brief History of Redox Flow Battery Development, pp. 45-46. *In: Redox Flow Batteries*. (Eds. H., Zhang, X., Li, J., Zhang). CRC Press, İngiltere.
11. Park, M., Ryu, J., Wang, W., Cho, J., 2016. Material design and engineering of next-generation flow-battery technologies. **Nature Reviews Materials**, **2** (1): 1-18.
12. Zhang J., 2018. History of VFBs, pp. 79-80. *In: Redox Flow Batteries*. (Eds. H., Zhang, X., Li, J., Zhang). CRC Press, İngiltere.
13. Kim, K. J., Park, M. S., Kim, Y. J., Kim, J. H., Dou, S. X., Skyllas-Kazacos, M., 2015. A technology review of electrodes and reaction mechanisms in vanadium redox flow batteries. **Journal of materials chemistry a**, **3** (33): 16913-16933.
14. Skyllas-Kazacos, M., Kazacos, M., 2011. State of charge monitoring methods for vanadium redox flow battery control. **Journal of Power Sources**, **196** (20): 8822-8827.
15. Skyllas-Kazacos, M., Rychick, M., Robins, R., 1988. All-Vanadium Redox Battery. US patent 4 786 567, November 22, 1988.
16. Rahman, F., Skyllas-Kazacos, M., 2009. Vanadium redox battery: Positive half-cell electrolyte studies. **Journal of Power Sources**, **189** (2): 1212-1219.
17. Gürsu H., 2018. Elektrokimyasal Grafen Elektrot Sentezi ve Vanadyum Redoks Akışkan Batarya Sistemlerinde Kullanımının Araştırılması. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, 140s.
18. Rychcik, M., & Skyllas-Kazacos, M., 1988. Characteristics of a new all-vanadium redox flow battery. **Journal of power sources**, **22** (1): 59-67.
19. Lourenssen, K., Williams, J., Ahmadpour, F., Clemmer, R., Tasnim, S., 2019. Vanadium redox flow batteries: A comprehensive review. **Journal of Energy Storage**, **25**: 100844.

20. Xu, Q., Zhao, T. S., & Leung, P. K., 2013. Numerical investigations of flow field designs for vanadium redox flow batteries. **Applied energy**, **105**: 47-56.
21. Yin, C., Gao, Y., Guo, S., Tang, H., 2014. A coupled three dimensional model of vanadium redox flow battery for flow field designs. **Energy**, **74**: 886-895.
22. Zhang, B. W., Lei, Y., Bai, B. F., Zhao, T. S., 2019. A two-dimensional model for the design of flow fields in vanadium redox flow batteries. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, **135**: 460-469.
23. Sun, J., Zheng, M., Luo, Y., Yu, Z., 2019. Three-dimensional detached serpentine flow field design for redox flow batteries. **Journal of Power Sources**, **428**: 136-145.
24. Messaggi, M., Canzi, P., Mereu, R., Baricci, A., Inzoli, F., Casalegno, A., Zago, M., 2018. Analysis of flow field design on vanadium redox flow battery performance: Development of 3D computational fluid dynamic model and experimental validation. **Applied energy**, **228**: 1057-1070.
25. Chen, C. H., Yaji, K., Yamasaki, S., Tsushima, S., Fujita, K., 2019. Computational design of flow fields for vanadium redox flow batteries via topology optimization. **Journal of Energy Storage**, **26**: 100990.
26. Lee, J., Kim, J., Park, H., 2019. Numerical simulation of the power-based efficiency in vanadium redox flow battery with different serpentine channel size. **International Journal of Hydrogen Energy**, **44** (56): 29483-29492.
27. Yin, C., Gao, Y., Xie, G., Li, T., Tang, H., 2019. Three dimensional multi-physical modeling study of interdigitated flow field in porous electrode for vanadium redox flow battery. **Journal of Power Sources**, **438**: 227023.
28. Zheng, Q., Xing, F., Li, X., Ning, G., Zhang, H., 2016. Flow field design and optimization based on the mass transport polarization regulation in a flow-through type vanadium flow battery. **Journal of Power Sources**, **324**: 402-411.
29. Al-Yasiri, M., Park, J., 2017. Study on channel geometry of all-vanadium redox flow batteries. **Journal of The Electrochemical Society**, **164** (9): A1970-A1982.

30. You, D., Zhang, H., Chen, J., 2009. A simple model for the vanadium redox battery. **Electrochimica Acta**, **54** (27): 6827-6836.
31. Li, F., Wei, Y., Tan, P., Zeng, Y., Yuan, Y., 2020. Numerical investigations of effects of the interdigitated channel spacing on overall performance of vanadium redox flow batteries. **Journal of Energy Storage**, **32**: 101781.
32. Lu, M. Y., Jiao, Y. H., Tang, X. Y., Yang, W. W., Ye, M., Xu, Q., 2021. Blocked serpentine flow field with enhanced species transport and improved flow distribution for vanadium redox flow battery. **Journal of Energy Storage**, **35**: 102284.
33. Lu, M. Y., Deng, Y. M., Yang, W. W., Ye, M., Jiao, Y. H., Xu, Q., 2020. A novel rotary serpentine flow field with improved electrolyte penetration and species distribution for vanadium redox flow battery. **Electrochimica Acta**, **361**: 137089.
34. Zheng, Q., Zhang, H., Xing, F., Ma, X., Li, X., Ning, G., 2014. A three-dimensional model for thermal analysis in a vanadium flow battery. **Applied energy**, **113**, 1675-1685.
35. Al-Fetlawi, H., Shah, A. A., Walsh, F. C., 2009. Non-isothermal modelling of the all-vanadium redox flow battery. **Electrochimica Acta**, **55** (1): 78-89.
36. ALPHONSE, P. J., ELDEN, G., 2021. The Investigation Of Thermal Behavior In A Vanadium Redox Flow Battery During Charge And Discharge Processes. **Journal of Energy Storage**, **40**: 102770.
37. Gandomi, Y. A., Aaron, D. S., Zawodzinski, T. A., Mench, M. M., 2016. In situ potential distribution measurement and validated model for all-vanadium redox flow battery. **Journal of The Electrochemical Society**, **163** (1): A5188-A5201.
38. Oberbroeckling, K. J., Dunwoody, D. C., Minter, S. D., Leddy, J., 2002. Density of Nafion exchanged with transition metal complexes and tetramethyl ammonium, ferrous, and hydrogen ions: commercial and recast films. **Analytical chemistry**, **74** (18): 4794-4799.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : İlker KAYALI

Uyruğu : Türkiye (T.C)

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Erciyes Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği	2018
Lise	Aydınlıkevler Lisesi	2012

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2021-Halen	Kapadokya Üniversitesi Kalite ve Stratejik Planlama Daire Başkanlığı	Daire Personeli

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

1. Kayalı İ., Alphonse P. J., Taş M., Elden G., 2020, Numerical Study Investigating The Effect Of Channel Geometry On Performance In Vanadium Redox Flow Battery, *International Symposium on Electric Aviation and Autonomous Systems (ISEAS 2020)*, Kyiv, Ukraine, 22-24 Eylül 2020, 97-101.
2. Alphonse P. J., Taş M., Kayalı İ., Elden G., 2020, The Effects Of Electrode Porosity On The Heat Transfer In A Vanadium Redox Flow Battery, *International Symposium on Electric Aviation and Autonomous Systems (ISEAS 2020)*, Kyiv, Ukraine, 22-24 Eylül 2020, 102-105.

3. Taş M., Alphonse P. J., Kayalı İ., Elden G., 2020, Comparison Of Commercial Electrodes In Terms Of Mass And Charge Transports In A Of Vanadium Redox Flow Battery, *Electric Aviation and Autonomous Systems (ISEAS 2020)*, Kyiv, Ukraine, 22-24 Eylül 2020, 89- 92.
4. Kayalı, İ., Elden, G., (2021). A Study on Different Flow Channel Shapes in a Vanadium Redox Flow Battery with Serpentine Flow Field. **International Journal of Sustainable Aviation**, 7(4), 334-353.

