

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

**PEM YAKIT HÜCRESİ PERFORMANSI ÜZERİNE
ANİZOTROPİK ELEKTRİKSEL İLETKENLİK VE
DİRENÇ ETKİLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL
ARAŞTIRILMASI**

**Hazırlayan
Mert TAŞ**

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

Yüksek Lisans Tezi

**TEMMUZ 2018
KAYSERİ**

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

**PEM YAKIT HÜCRESİ PERFORMANSI ÜZERİNE
ANİZOTROPİK ELEKTRİKSEL İLETKENLİK VE
DİRENÇ ETKİLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL
ARAŞTIRILMASI**

(Yüksek Lisans Tezi)

**Hazırlayan
Mert TAŞ**

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

**Bu çalışma; Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından
FYL-2017-7235 kodlu proje ile desteklenmiştir.**

**TEMMUZ 2018
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 : Mert TAS

İmza :



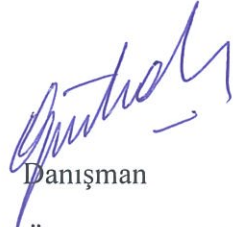
YÖNERGEYE UYGUNLUK

“Pem Yakıt Hücresi Performansı Üzerine Anizotropik Elektriksel İletkenlik ve Direnç Etkilerinin Deneysel ve Sayısal Araştırılması” adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ne uygun olarak hazırlanmıştır.



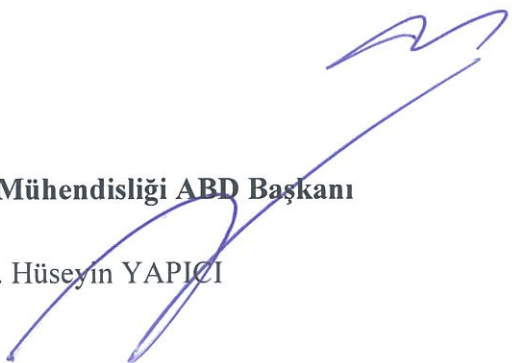
Tezi Hazırlayan

Mert TAŞ



Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Gülşah ELDEN



Enerji Sistemleri Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Hüseyin YAPICI

Dr. Öğr. Üyesi Gülşah ELDEN danışmanlığında Mert TAŞ tarafından hazırlanan “PEM Yakıt Hücresi Performansı Üzerine Anizotropik Elektriksel İletkenlik ve Direnç Etkilerinin Deneysel ve Sayısal Araştırılması” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında **yüksek lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

23 / 07 / 2018

JÜRİ:

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Gülşah ELDEN

Üye : Prof. Dr. Gamze GENÇ

Üye : Doç. Dr. Bora TİMURKUTLUK

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 14/08/2018.. tarih ve 2018/36-13..sayılı kararı ile onaylanmıştır.


14 / 08 / 2018..

Prof. Dr. Mehmet AKKURT

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Hazırladığım tez kapsamındaki çalışmalarımın yürütülmesi, yönlendirmesinde katkılarını ve bilgilerini esirgemeyen ve her zaman destek olan değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Gülşah ELDEN’e teşekkürlerimi sunarım.

Akademik çalışmalarım konusunda bilgilerini ve tecrübelerini paylaşan başta Prof. Dr. Hüseyin YAPICI hocam olmak üzere Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü’nün değerli hocalarına en derin teşekkürlerimi sunarım.

Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi’ne FYL-2017-7235 kodlu projemize sağladıkları finansal destek ve dolayısıyla çalışmalarımızın tamamlanmasına katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Son olarak, hayatımın her anında yanımda olan ve desteklerini esirgemeyen değerli eşime ve aileme teşekkürlerimi sunarım.

Mert TAŞ

Kayseri, 2018

PEM YAKIT HÜCRESİ PERFORMANSI ÜZERİNE ANİZOTROPİK ELEKTRİKSEL İLETKENLİK VE DİRENÇ ETKİLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL ARAŞTIRILMASI

Mert TAŞ

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Temmuz 2018
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Gülşah ELDEN

ÖZET

Bu tez çalışmasının amacı, yakıt hücresi çalışma parametrelerinden sıcaklık, bağıl nem ve sıkıştırma basıncının gaz difüzyon tabakası ve mikro-gözenekli gaz difüzyon tabakasının elektriksel iletkenlikleri üzerine etkilerini araştırmaktır. Bu amacı gerçekleştirmek için deneysel bir düzenek kurulmuş ve farklı sıcaklık (50 °C, 60 °C, 70 °C, 80 °C), bağıl nem (%70 BN, %80 BN, %90 BN, %100 BN) ve sıkıştırma basıncı (2 bar, 4 bar, 6 bar, 8 bar) değerleri için tabakalardaki anizotropik elektriksel iletkenlikler ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre sıcaklık ve sıkıştırma basıncı arttıkça, her iki difüzyon tabakasının düzlem normalindeki elektriksel iletkenliklerin arttığı ancak düzlem yüzeyindeki iletkenliklerin pek değişmediği görülmüştür. Bağıl nemin değişimi ise her iki difüzyon tabakası için düzlem yüzeyindeki iletkenlikleri daha fazla etkilemiştir. Ayrıca çalışmada elde edilen elektriksel iletkenlik değerleri, geliştirilen üç boyutlu sayısal modele entegre edilmiştir. Sayısal modelleme ile rib bölgelerindeki akım yoğunluğu, performans analizleri ve anot ile katot gaz difüzyon tabakalarındaki akım yoğunluğu dağılımları incelenmiştir. Hücre çalışma parametrelerinden sıcaklık, sabit bağıl nem ve sıkıştırma basıncı koşullarında artırıldığında, rib bölgelerindeki akım yoğunluğu, tersinmez ısı kayıpları ve hücre performansı artmıştır. Sabit sıcaklık ve sıkıştırma basıncı koşullarında bağıl nem değeri artırıldığında, rib bölgelerindeki akım yoğunluğu, tersinmez ısı kayıpları ve hücre performansı artmıştır. Sabit sıcaklık ve bağıl nem koşullarında sıkıştırma basıncı artırıldığında ise rib bölgelerindeki akım yoğunluğu, tersinmez ısı kayıpları ve hücre performansında kayda değer gelişme görülmemiştir.

Anahtar Kelimeler: PEM yakıt hücresi, gaz difüzyon tabakası, bağıl nem, sıcaklık, anizotropik direnç ölçümü, anizotropik üç boyutlu modelleme

**EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF ANISOTROPIC
ELECTRICAL CONDUCTIVITY AND RESISTANCE EFFECTS ON PEM
FUEL CELL PERFORMANCE**

Mert TAŞ

**Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
Master Thesis, July 2018
Supervisor: Dr. Gülşah ELDEN**

ABSTRACT

The purpose of this thesis is to investigate the effects of temperature, relative humidity and clamping pressure on the electrical conductivities of gas diffusion layer and micro-porous diffusion layer. In order to achieve this purpose, an experimental system was constructed and the anisotropic electrical conductivities of the diffusion layers were measured at different temperature (50°C, 60°C, 70°C, 80°C), relative humidity (%70 BN, %80 BN, %90 BN, %100 BN) and clamping pressure (2 bar, 4 bar, 6 bar, 8 bar). According to the obtained experimental results, as the operating temperature and the clamping pressure were increased, through-plane conductivities of both diffusion layers increased. But in-plane conductivities of these layers did not increase in a considerable amount. In-plane conductivities of both diffusion layers were significantly affected by the increment of relative humidity. Furthermore, the obtained electrical conductivity values were integrated into the three-dimensional numerical model. The fuel cell performance, current densities in the rib regions and current density distributions in anode and cathode gas diffusion layers were investigated by using the numerical model. As the operating temperature were increased under constant relative humidity and clamping pressure conditions, the current density at the rib region, irreversible heat losses and cell performance increased. When the relative humidity value was increased under constant temperature and clamping pressure conditions, the current density in the rib region, irreversible heat losses and cell performance increased. Moreover, as the clamping pressure was increased under constant temperature and relative humidity conditions, it was observed that no significant improvement in the current density, irreversible heat losses and cell performance.

Keywords: PEM fuel cell, gas diffusion layer, relative humidity, temperature, anisotropic resistance measurement, anisotropic-3D modeling

İÇİNDEKİLER

PEM YAKIT HÜCRESİ PERFORMANSI ÜZERİNE ANİZOTROPİK ELEKTRİKSEL İLETKENLİK VE DİRENÇ ETKİLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL ARAŞTIRILMASI	
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	iii
KABUL VE ONAY	iv
ÖNSÖZ	v
ÖZET.....	vi
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR VE SİMGELER.....	xi
TABLolar LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiii
GİRİŞ	1

1. BÖLÜM

HİDROJEN VE HİDROJEN ENERJİSİ

1.1. Hidrojen Elementinin Özellikleri ve Hidrojen Enerjisinin Tanımı	3
1.2. Hidrojen Enerjisinin Kullanım Alanları.....	4

2. BÖLÜM

YAKIT HÜCRELERİ

2.1. Yakıt Hücrelerinin Tarihi ve Genel Bilgiler	6
2.2. Yakıt Hücresi Çeşitleri	8
2.3. Pem Yakıt Hücreleri	10
2.3.1. Pem Yakıt Hücresinin Termodinamiği	10
2.3.2. Yakıt Hücresinin Polarizasyon Eğrisi ve Gerçekleşen Kayıplar	11
2.3.2.1. Aktivasyon Kayıpları	12
2.3.2.2. Ohmik Kayıpları.....	12

2.3.2.3. Konsantrasyon Kayıpları.....	12
2.3.2.4. Diğer Kayıplar	13
2.3.2.5. Tersinmez Kayıplar	13

3. BÖLÜM

LİTERATÜR ÖZETİ

3.1. Literatür Araştırması	14
3.2. Tezin Amacı ve Kapsamı	18

4. BÖLÜM

ELEKTRİKSEL DİRENÇ DEĞERLERİNİN DENEYSEL OLARAK BULUNMASI VE İLETKENLİKLERİN HESAPLANMASI

4.1. Deneysel Sistem	19
4.1.1. Numunelerin Hazırlanması	19
4.1.2. Deneysel Sistemin Elemanları	21
4.1.3. Direnç ve Elektriksel İletkenlik Değerlerinin Belirlenmesi.....	23
4.1.4. Uygun Akışkan Debisinin Bulunması	27
4.1.5. Simetrik Eksenlerde Elektriksel İletkenlik Değerleri	30
4.2. Elektriksel Direnç ve İletkenlik Değerlerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi ..	32
4.2.1. Gözenekli ve Mikro-Gözenekli GDT İçin Direnç Kontrolü	32
4.2.2. Doğrudan ve Dört Kademeli Sıkıştırma Şartlarında Elektriksel İletkenlik Ölçüm Sonuçları	33
4.3. Elektriksel İletkenlik Değerlerinin Çalışma Şartlarına Göre Deneysel Belirlenmesi.....	35
4.3.1. Gözenekli ve Mikro-Gözenekli Gaz Difüzyon Tabakası İletkenliklerinin Sabit Bağıl Nemde Sıcaklık ve Sıkıştırma Basıncına Göre Değişimi	36
4.3.2. Gözenekli ve Mikro-Gözenekli Gaz Difüzyon Tabakası İletkenliklerinin Sabit Sıcaklıkta Bağıl Neme Göre Değişimi.....	42

5. BÖLÜM

PEM TİPİ YAKIT HÜCRESİNİN ÜÇ BOYUTLU ANİZOTROPİK MODELLENMESİ

5.1. Sayısal Modelin Geometrisi ve Arayüzeyler	50
5.2. Matematiksel Model ve Sınır Şartları	52
5.3. Sayısal Modelin Deneysel Verilerle Doğrulanması	56
5.4. Sayısal Modelleme Çalışmaları Sonucunda Elde Edilen Sonuçlar	56
5.4.1. Gözenekli ve Mikro-Gözenekli GDT Kullanılan Pem Yakıt Hücre Modelleri İçin Performans Değerlendirmeleri.....	57
5.4.2. Gözenekli ve Mikro-Gözenekli GDT Kullanılan Pem Yakıt Hücre Modelleri İçin Rib Bölgelerindeki Akım Yoğunluğu Değerlendirmeleri ..	59
5.4.3. Gözenekli ve Mikro-Gözenekli GDT Kullanılan Pem Yakıt Hücre Modelleri İçin Tersinmez Isı Kayıplarının Değerlendirmeleri.....	62
5.4.4. Gözenekli ve Mikro-Gözenekli GDT Kullanılan Pem Yakıt Hücre Modelleri İçin Akım Yoğunluklarının Değerlendirilmesi.....	65
5.4.4.1. Gözenekli ve Mikro-Gözenekli GDT İçin Anot Kısmı Düzlem Yüzeyindeki Akım Yoğunluklarının Dağılımları.....	65
5.4.4.2. Gözenekli ve Mikro-Gözenekli GDT İçin Katot Kısmı Düzlem Yüzeyindeki Akım Yoğunluklarının Dağılımları.....	69
5.4.4.3. Gözenekli ve Mikro-Gözenekli GDT İçin Düzlem Normalindeki Akım Yoğunluklarının Dağılımları.....	73

6. BÖLÜM

SONUÇLAR	80
KAYNAKÇA	82
ÖZGEÇMİŞ.....	86

KISALTMALAR VE SİMGELER

<u>Kısaltma</u>	<u>Anlamı</u>	<u>Birim</u>
E	Gerilim	V
A	Alan	m ²
r	Direnç	Ohm
σ	İletkenlik	Sm ⁻¹
i	Akım Yoğunluğu	Acm ⁻²
Ø	Potansiyel	Volt
C	Konsantrasyon	-
BN	Bağıl Nem	-
T	Sıcaklık	°C
P	Basınç	bar
GDT	Gözenekli gaz difüzyon tabakası	-
MGDT	Mikro gözenekli gaz difüzyon tabakası	-

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 1.	Hidrojen, Benzin ve Metan Yakıtlarının Özellikleri.....	4
Tablo 2.	Membran türlerine göre sınıflandırılmış yakıt hücresi türleri.	8
Tablo 3.	Gaz difüzyon tabakalarının özellikleri	20
Tablo 4.	Deneysel çalışma parametreleri	27
Tablo 5.	GDT ve MGDТ'nin farklı sıkıştırma basınçları altında kalınlıkları	34
Tablo 6.	Model denklemleri	53
Tablo 7.	Sınır şartları	54
Tablo 8.	Matematiksel modellerde kullanılan parametreler	55

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.	PEM yakıt hücresi bileşenleri	7
Şekil 2.	Polarizasyon eğrisi.	12
Şekil 3.	GDT ve MGDТ taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.	20
Şekil 4.	Deneye hazırlanmış numunenin fotoğraf	21
Şekil 5.	Elektriksel direnç ölçüm hücresi	21
Şekil 6.	Pnömatik sıkıştırırmalı test sistemi.....	22
Şekil 7.	Yakıt hücresi test istasyonu.....	22
Şekil 8.	Versastat 3 galvanostat-potensiyostat	23
Şekil 9.	Anizotropik elektriksel direnç ölçümü için bağlantı yöntemleri; (a) Düzlem yüzeyinin X doğrultusunda bağlantıların tasarımı, (b) Düzlem yüzeyinin Y doğrultusunda bağlantıların tasarımı, (c) Düzlem normali (Z doğrultusu) bağlantıların tasarımı, (d) Düzlem yüzeyinde X doğrultusu için bağlantılar, (e) Düzlem yüzeyinde Y doğrultusu için bağlantılar, (f) Düzlem normali (Z doğrultusu) için bağlantılar	24
Şekil 10.	a) Elektriksel iletkenliklerin değerlendirilmesi için matris formu, b) 3D çizim ve ilgili eksenler	25
Şekil 11.	Deneyisel sistem iş akış şeması.....	26
Şekil 12.	GDT'nin (34 BA) debilere göre anizotropik elektriksel iletkenlik değişimi; a) XX, b) XY, c) XZ, d)YY, e) YZ, f) ZZ	28
Şekil 13.	MGDT'nin (34 BC) debilere göre anizotropik elektriksel iletkenlik değişimi; a) XX, b) XY, c) XZ, d)YY, e) YZ, f) ZZ	29
Şekil 14.	GDT (34 BA) için simetrik eksenlerde elektriksel iletkenlik değerleri; a) XY-YX eksen, b) XZ-ZX eksen, c) YZ-ZY eksen.....	30
Şekil 15.	MGDT için simetrik eksenlerde elektriksel iletkenlik değerleri; a) XY-YX eksen, b) XZ-ZX eksen, c) YZ-ZY eksen	31
Şekil 16.	Difüzyon tabakaları için deneysel doğrulama a) 34 BA (GDT) b) 34 BC (MGDT)	32
Şekil 17.	Sıkıştırma Uygulamaları a) Doğrudan sıkıştırma, b) Dört kademeli sıkıştırma	33
Şekil 18.	GDT ve MGDТ'ler için kademeli sıkıştırmayla ölçülen anizotropik elektriksel iletkenlik değerleri; a) XX, b) XY, c) YY, d) ZZ.....	34

Şekil 19.	Tek ve dört kademeli sıkıştırma koşullarında düzlem normalindeki elektriksel iletkenlik değerleri a) GDT (34 BA), b) MGD (34 BC)	35
Şekil 20.	Gözenekli Gaz Difüzyon Tabakası (34 BA) için XX doğrultusunda sabit bağıl nemde sıcaklık ve sıkıştırma basıncına göre iletkenlik değişimi; (a) %70 RH, (b) % 80 RH, (c) % 90 RH, (d) % 100 RH.....	36
Şekil 21.	Gözenekli Gaz Difüzyon Tabakası (34 BA) için YY doğrultusunda sabit bağıl nemde sıcaklık ve sıkıştırma basıncına göre iletkenlik değişimi; (a) %70 RH, (b) % 80 RH, (c) % 90 RH, (d) % 100 RH.....	37
Şekil 22.	Gözenekli Gaz Difüzyon Tabakası (34 BA) için ZZ doğrultusunda sabit bağıl nemde sıcaklık ve sıkıştırma basıncına göre iletkenlik değişimi; (a) %70 RH, (b) % 80 RH, (c) % 90 RH, (d) % 100 RH.....	38
Şekil 23.	MGD (34 BC) için XX doğrultusunda sabit bağıl nemde sıcaklık ve sıkıştırma basıncına göre iletkenlik değişimi; (a) %70 RH, (b) % 80 RH, (c) % 90 RH, (d) % 100 RH	39
Şekil 24.	MGD (34 BC) için YY doğrultusunda sabit bağıl nemde sıcaklık ve sıkıştırma basıncına göre iletkenlik değişimi; (a) %70 RH, (b) % 80 RH, (c) % 90 RH, (d) % 100 RH	40
Şekil 25.	MGD (34 BC) için ZZ doğrultusunda sabit bağıl nemde sıcaklık ve sıkıştırma basıncına göre iletkenlik değişimi; (a) %70 RH, (b) % 80 RH, (c) % 90 RH, (d) % 100 RH	41
Şekil 26.	Gözenekli Gaz Difüzyon Tabakası (34 BA) için XX doğrultusunda sabit sıcaklıkta bağıl neme göre iletkenlik değişimi; (a) 50°C, (b) 60°C, (c) 70°C, (d) 80°C	42
Şekil 27.	Gözenekli Gaz Difüzyon Tabakası (34 BA) için YY doğrultusunda sabit sıcaklıkta bağıl neme göre iletkenlik değişimi; (a) 50°C, (b) 60°C, (c) 70°C, (d) 80°C	43
Şekil 28.	Gözenekli Gaz Difüzyon Tabakası (34 BA) için ZZ doğrultusunda sabit sıcaklıkta bağıl neme göre iletkenlik değişimi; (a) 50°C, (b) 60°C, (c) 70°C, (d) 80°C	44
Şekil 29.	MGD (34 BC) için XX doğrultusunda sabit sıcaklıkta bağıl neme göre iletkenlik değişimi; (a) (a) 50°C, (b) 60°C, (c) 70°C, (d) 80°C	45

Şekil 30.	MGDT (34 BC) için YY doğrultusunda sabit sıcaklıkta bağıl nem ve sıkıştırma basıncına göre iletkenlik değişimi; (a) 50°C, (b) 60°C, (c) 70°C, (d) 80°C	46
Şekil 31.	MGDT (34 BC) için ZZ doğrultusunda sabit sıcaklıkta bağıl nem ve sıkıştırma basıncına göre iletkenlik değişimi; (a) 50°C, (b) 60°C, (c) 70°C, (d) 80°C	47
Şekil 32.	Sayısal modele ait görseller a) PEM yakıt hücresi 7 bileşenli model, b) PEM yakıt hücresi 9 bileşenli model c) Ağ yapısı	50
Şekil 33.	GDT için elektriksel özelliklerin ölçülmesinde kullanılan propların yerleşimi; (a) Anot kısmı rib bölgeleri, (b) Katot kısmı rib bölgeleri, (c) Anot kısmı GDT ve katalizör tabakanın sınır bölgesi, (d) Katot kısmı GDT ve katalizör tabakanın sınır bölgesi.....	51
Şekil 34.	MGDT için elektriksel özelliklerin ölçülmesinde kullanılan propların yerleşimi; (a) Anot kısmı rib bölgeleri, (b) Katot kısmı rib bölgeleri, (c) Anot kısmı MGDT ve katalizör tabakanın sınır bölgesi, (d) Katot kısmı MGDT ve katalizör tabakanın sınır bölgesi	51
Şekil 35.	GDT ve MGDT için elektrot akım yoğunluklarının gösteriminde kullanılan arayüzeylerin yerleşimi; (a) GDT anot kısmı düzlem yüzeyi, (b) GDT katot kısmı düzlem yüzeyi, (c) GDT düzlem normali, (d) MGDT anot kısmı düzlem yüzeyi, (e) MGDT katot kısmı düzlem yüzeyi, (f) MGDT düzlem normali.....	52
Şekil 36.	Hazırlanan modelin deneysel sonuçla doğrulanması	56
Şekil 37.	Performansın sabit sıcaklık (80°C) ve sıkıştırma basıncı (4 bar) koşullarında bağıl nem değişimine göre değerlendirilmesi; (a) GDT, (b) MGDT	57
Şekil 38.	Performansın sabit sıcaklık (80°C) ve bağıl nem (%100 BN) koşullarında sıkıştırma basıncı değişimine göre değerlendirilmesi; (a) GDT, (b) MGDT.....	58
Şekil 39.	Performansın sabit bağıl nem (%100 BN) ve sıkıştırma basıncı (4 bar) koşullarında sıcaklığa göre değerlendirilmesi; (a) GDT, (b) MGDT.....	59
Şekil 40.	Rib alanlarındaki akım yoğunluğunun sabit sıcaklık (80°C) ve sıkıştırma basıncı (4 bar) koşullarında bağıl neme göre değişimi; (a) GDT, (b) MGDT	60

- Şekil 41. Rib alanlarındaki akım yoğunluğunun sabit sıcaklık (80°C) ve bağıl nem (%100 BN) koşullarında sıkıştırma basıncına göre değişimi; (a) GDT, (b) MGDT 61
- Şekil 42. Rib alanlarındaki akım yoğunluğunun sabit bağıl nem (%100 BN) ve sıkıştırma basıncı (4 bar) koşullarında sıcaklığa göre değişimi; (a) GDT, (b) MGDT 61
- Şekil 43. Tersinmez ısı kaybının sabit sıcaklık (80°C) ve sıkıştırma basıncı (4 bar) koşullarında bağıl neme göre değişimi; I: GDT; (a) Anot, (b) Katot; II: MGDT; (a) Anot, (b) Katot 62
- Şekil 44. Tersinmez ısı kaybının sabit sıcaklık (80°C) ve bağıl nem (%100 BN) koşullarında sıkıştırma basıncına göre değişimi; I: GDT; (a) Anot, (b) Katot; II: MGDT; (a) Anot, (b) Katot 63
- Şekil 45. Tersinmez ısı kaybının sabit bağıl nem (%100 BN) ve sıkıştırma basıncı (4 bar) koşullarında sıcaklığa göre değişimi; I: GDT; (a) Anot, (b) Katot; II: MGDT; (a) Anot, (b) Katot 64
- Şekil 46. Anot kısmı düzlem yüzeyindeki akım yoğunluğunun sabit sıcaklık (80 °C) ve sıkıştırma basıncında (4 bar) bağıl neme göre değişimi; I: GDT; (a) %70 BN, (b) %80 BN, (c) %90 BN, (d) %100 BN; II: MGDT; (e) %70 BN, (f) %80 BN, (g) %90 BN, (h) %100 BN 66
- Şekil 47. Anot kısmı düzlem yüzeyindeki akım yoğunluğunun sabit sıcaklık (80 °C) ve bağıl nemde (%100 BN) sıkıştırma basıncına göre değişimi; I: GDT; (a) 2 bar, (b) 4 bar, (c) 6 bar, (d) 8 bar; II: MGDT; (a) 2 bar, (b) 4 bar, (c) 6 bar, (d) 8 bar 67
- Şekil 48. Anot kısmı düzlem yüzeyindeki akım yoğunluğunun sabit bağıl nem (%100 BN) ve sıkıştırma basıncında (4 bar) sıcaklığa göre değişimi; I: GDT; (a) 50°C (b) 60°C, (c) 70°C, (d) 80°C; II: MGDT; (a) 50°C (b) 60°C, (c) 70°C, (d) 80°C 68
- Şekil 49. Katot kısmı düzlem yüzeyindeki akım yoğunluğunun sabit sıcaklık (80 °C) ve sıkıştırma basıncında (4 bar) bağıl neme göre değişimi; I: GDT; (a) %70 BN, (b) %80 BN, (c) %90 BN, (d) %100 BN; II: MGDT; (e) %70 BN, (f) %80 BN, (g) %90 BN, (h) %100 BN 70
- Şekil 50. Katot kısmı düzlem yüzeyindeki akım yoğunluğunun sabit sıcaklık (80 °C) ve bağıl nemde (%100 BN) sıkıştırma basıncına göre değişimi; I:

	GDT; (a) 2 bar, (b) 4 bar, (c) 6 bar, (d) 8 bar; II: MGDT; (a) 2 bar, (b) 4 bar, (c) 6 bar, (d) 8 bar	71
Şekil 51.	Katot kısmı düzlem yüzeyindeki akım yoğunluğunun sabit bağıl nem (%100 BN) ve sıkıştırma basıncında (4 bar) sıcaklığa göre değişimi; I: GDT; (a) 50°C (b) 60°C, (c) 70°C, (d) 80°C; II: MGDT; (a) 50°C (b) 60°C, (c) 70°C, (d) 80°C.....	72
Şekil 52.	GDT için düzlem normalindeki akım yoğunluğunun sabit sıcaklık (80°C) ve sabit sıkıştırma basıncında (4 bar) bağıl nem değişimine göre incelenmesi; (a) %70 BN, (b) %80 BN, (c) %90 BN, (d) %100 BN.....	74
Şekil 53.	MGDT için düzlem normalindeki akım yoğunluğunun sabit sıcaklık (80°C) ve sabit sıkıştırma basıncında (4 bar) bağıl nem değişimine göre incelenmesi; (a) %70 BN, (b) %80 BN, (c) %90 BN, (d) %100 BN.....	75
Şekil 54.	GDT için düzlem normalindeki akım yoğunluğunun sabit sıcaklık (80°C) ve bağıl nem (%100 BN) koşullarında sıkıştırma basıncı değişimine göre incelenmesi; (a) 2 bar, (b) 4 bar, (c) 6 bar, (d) 8 bar	76
Şekil 55.	MGDT için düzlem normalindeki akım yoğunluğunun sabit sıcaklık (80°C) ve bağıl nem (%100 BN) koşullarında sıkıştırma basıncı değişimine göre incelenmesi; (a) 2 bar, (b) 4 bar, (c) 6 bar, (d) 8 bar	77
Şekil 56.	GDT için düzlem normalindeki akım yoğunluğunun sabit bağıl nem (%100 BN) ve sıkıştırma basıncı (4 bar) koşullarında sıcaklık değişimine göre incelenmesi; (a) 50°C, (b) 60°C, (c) 70°C, (d) 80°C	78
Şekil 57.	MGDT için düzlem normalindeki akım yoğunluğunun sabit bağıl nem (%100 BN) ve sıkıştırma basıncı (4 bar) koşullarında sıcaklık değişimine göre incelenmesi; (a) 50°C, (b) 60°C, (c) 70°C, (d) 80°C	79

GİRİŞ

Sanayi ve teknoloji gibi enerjinin yoğun kullanıldığı sektörlerin Türkiye ve Dünya'daki yükselişi sebebiyle fosil kökenli enerji kaynaklarının tüketim hızı giderek artmaktadır. Bilimsel ve saha araştırmaları gösteriyor ki fosil kökenli enerji kaynakları zamanla tükenecektir. Bu sebeple, enerji kaynaklarının verimli tüketilmesi, enerji tüketiminin yoğun olduğu sektörlerdeki cihazların iyileştirilmesi ve mevcut enerji kaynaklarına yenilerinin eklenmesi üzerine yoğun bir şekilde araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılmaktadır. Çalışmalar gösteriyor ki, rüzgar, güneş, dalga enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları ile hidrojen enerjisi gibi bir alternatif enerji kaynağının geliştirilmesi artan enerji ihtiyacına cevap verebilecektir.

Hidrojen yakıtının 1 birim kütlesinin enerjisi; 2.1 birim kütle doğal gaz, 2.8 birim kütle petrolün sahip olduğu enerjiye eşittir. Hidrojen elementi doğada saf halde bulunmayan bileşikler halinde bulunan bir elementtir. Bu durum hidrojene doğrudan erişebilme açısından sorun teşkil etmektedir. Ancak, hidrojenin üretilmesi üzerine yapılan çalışmalar ile birlikte bu sorun aşılmış olup, saf hidrojen üretilip, depolanabilmekte ve kullanılabilmektedir [1].

Hidrojenden enerji eldesi konusunda alevli ve alevsiz yanma gibi yöntemlerin kullanıldığı geniş bir uygulama alanı bulunmaktadır. Alevli yanmalı sistemler için içten yanmalı motorlar, alevsiz yanmalı sistemler için yakıt hücresi sistemleri örnek verilebilir. Bu tez çalışmasına da konu olan yakıt hücresi sistemleri, saf hidrojen ya da hidrokarbonlu (Metanol vb.) yakıtlar ile çalışabilmesi, hareketli parçasının olmaması ve verimlerinin yüksek olması gibi birçok avantaja sahiptir. Bu tür sistemlerin kurulum planlamasında fizibilite çalışmaları ve sayısal analizlerinin önemi büyüktür. Sayısal analizlerin amacı ise; kurgulanan iş senaryosunun sayısal yöntemler kullanılarak gerçek verilere en yakın sonuçları elde edebilmektir. Bu sayede kurulumu planlanan sistemin performansı gerçeğe en yakın şekilde tahmin edilecek ve hata payı düşürülecektir. Enerji alanında gerek bilimsel gerekse sektörel çalışmalarda, uygulama aşamasına

geçmeden önce tüm parametrelerin, olabildiğince gerçekçi değerler olmasına dikkat edilmelidir.

Bu tez çalışmasında, Polimer Elektrolit Membranlı (PEM) yakıt hücresi bileşenlerinden olan gözenekli ve mikro-gözenekli gaz difüzyon tabakalarda elektriksel direnç değerleri farklı çalışma sıcaklıkları (50°C, 60°C, 70°C, 80°C) , farklı bağıl nem koşulları (%70, %80, %90, %100) ve farklı sıkıştırma basınçlarında (2, 4, 6 ve 8 bar) düzlem üzerinde ve düzlem normalinde deneysel olarak ölçülmüştür. Bu ölçüm değerleri kullanılarak iletkenlik değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan iletkenlik değerleri, Comsol 4.2a yazılımı ile hazırlanmış sayısal modele entegre edilmiştir. Hazırlanan model ile birlikte elektriksel iletkenlik değerlerinin, hücre çalışma koşullarından olan bağıl nem, sıcaklık ve sıkıştırma basıncının hücrenin rib bölgelerindeki akım yoğunluğuna, tersinmez ısı kayıplarına ve performansına etkileri araştırılmıştır. Ayrıca yakıt hücresinin anot ve katot tarafları için gaz difüzyon tabakalarının düzlem yüzeyleri ile düzlem normalindeki akım yoğunluklarının dağılımları incelenmiştir.

1. BÖLÜM

HİDROJEN VE HİDROJEN ENERJİSİ

1.1. Hidrojen Elementinin Özellikleri ve Hidrojen Enerjisinin Tanımı

Hidrojen elementi periyodik cetvelin 1A grubunda bulunan tek ametal elementtir. Doğadaki en basit atom yapısına sahiptir. Bu yapı, atomun merkezindeki pozitif yüklü proton ve yüksüz nötrondan oluşmaktadır. Negatif yüklü elektron ise çekirdeğin etrafında dönmektedir.

Hidrojen elementi, 16. yüzyılda keşfedilmiş olup hidrojenin yanma özelliği 18. yüzyılda fark edilmiştir. Hidrojen elementi renksiz, kokusuz, zehirsiz ve havadan 14.4 kat daha hafiftir. Dünya’da saf halde bulunmayıp bileşikler halinde (su ve hidrokarbonlar) bulunmaktadır. Hidrojen gazı -253°C (-423°F veya 20K) sıcaklık mertebelerinde sıvı faza dönüştürülerek depolanabilmektedir. Sıvı fazdaki hidrojen ile gaz fazındaki hidrojen arasındaki hacim oranı 1/700 civarındadır. 1 kg hidrojen gazı, 2.1 kg doğal gaz, 2.8 kg petrolün sahip olduğu enerjiye sahiptir. Ayrıca üst ısı değeri 140.9 MJ/kg ve alt ısı değeri 120.7 MJ/kg olması itibariyle bilinen tüm yakıtlar içinde birim kütle başına en yüksek enerjiye sahip yakıttır [2]. Katalitik yanma sonucu enerji üretilen sistemlerde saf hidrojen yakıt olarak kullanıldığında ürün olarak su buharı, ısı ve elektrik enerjisi açığa çıkmaktadır. Bu ürünlerin dışında hiçbir karbon içerikli atık, sera etkisi ve kirlilik oluşturacak zararlı kimyasal gaz üretimi gerçekleşmemektedir [3].

Hidrojenden enerji üretimi sırasında gerçekleştirdiği reaksiyonlar sonucunda insan sağlığına ve çevreye olan zararlı etkisi yok denecek kadar azdır. Bununla birlikte hidrojen depolanıp, güvenli şekilde istenilen yere taşınabilmekte, mobil sistemler vasıtasıyla istenilen yerde enerji üretiminde kullanılabilir. Yakıt hücreleri elektrik üretiminde kullanılması ile alternatif ve temiz bir enerji kaynağı olarak dikkat

çekmektedir. Hidrojen ve diğer yakıtların bazı özelliklerinin kıyaslaması Tablo 1’de verilmektedir.

Tablo 1. Metan, Benzin ve Hidrojen Yakıtlarının Özellikleri

Özellikler	Metan	Benzin	Hidrojen
Yoğunluk, (kg/m ³)	0.65	4.4	0.084
Hava içindeki difüzyonu (cm ² /s)	0.16	0.05	0.61
Sabit basınçta özgül ısısı, (J.g/K)	2.22	1.2	14.89
Havada ateşlenme sınırı (%hacim)	5.3-15.0	1.0-7.6	4.0-75.0
Havada ateşlenme enerjisi (mJ)	0.29	0.24	0.02
Ateşlenme sıcaklığı (°C)	540	228-471	585
Havada alev sıcaklığı (°C)	1875	2197	2045
Patlama enerjisi	0.19	0.25	0.17
Alev yayılması (emissivitesi) (%)	25-33	34.42	17-25

1.2. Hidrojen Enerjisinin Kullanım Alanları

Hidrojenin kullanıldığı alanlardan bazıları metal işleme, gübre üretimi ve gıda sanayileridir. Ayrıca sıvı hidrojen NASA tarafından 1950’li yıllardan bu yana roket yakıtı olarak kullanılmaktadır. Yakıt hücreleri vasıtasıyla hidrojen yakıtından elektrik üretimi yapılabilmektedir. Yakıt hücreleri, bu özelliğiyle ilk kez NASA tarafından uzay araçlarının yönetimi için gereken gücü karşılamak amacıyla kullanılmıştır. Uçaklarda ilk kullanımı 1956 yılında B-57 Canberra deneme uçağında gerçekleştirilmiştir. Daha sonra (1988) Tupolev-155 deneme uçağında yakıt olarak hidrojen kullanmıştır.

Hidrojenden elde edilen elektrikle çalışan ilk tekne Duffy Boats firması tarafından üretilmiştir. Toplamda 6 kW gücünde yakıt hücresiyle desteklenmiş olan bu tekne yakın gelecekte ulaşımın su üzerinde yapıldığı her bölgede kullanılabilecektir [5].

Amerika Birleşik Devletleri’nde; 330 tanesi Kaliforniya eyaletinde olmak üzere yaklaşık 500 adet hidrojen yakıtlı araç bulunmaktadır. Bu araçlar genellikle toplu ulaşım araçlarında kullanılmakta ve enerji ihtiyaçları yakıt hücresi yığınlarından elde edilerek karşılanmaktadır [4].

Münih Havaalanında (Almanya) kullanılan otobüs ve otomobillerin enerjisi hidrojen enerjisiyle karşılanmaktadır. Ayrıca Neurenburg şehri yakınlarında hidrojen enerji sisteminin kurulduğu bir program yürütülmektedir. Solar-Wasserstoff-Bayern şirketi tarafından yine bu şehirde güneş enerjisinden hidrojen üretim tesisi, hidrojen depolama sistemi ve yakıt hücresi sistemleri kurulmuştur.

İzlanda'da hükümet, üniversiteler, çeşitli şirket ve fabrikalar, çok uluslu otomobil ve petrol firmaları ile şirketler birliği oluşturmuş ve ülkenin 2030 yılına kadar hidrojen enerjisine geçmesi planlanmıştır.

Yakıt hücresiyle çalışan ulaşım araçlarının geliştirilmesi, petrol tüketimini azaltacağı gibi, bu araçlar sebebiyle oluşan hava kirliliğini de minimum düzeye indirecektir. Ballard firması yakıt hücresi güç üniteli otobüs üretimini gerçekleştirmiştir. Ayrıca Ford, Toyota, BMW, Honda, General Motors gibi otomotiv firmaları da yakıt hücresi destekli otomobillerin ticari üretimi üzerine çalışmaktadırlar.

Tokyo Elektrik Şirketi (Tokyo Electric Company) tarafından Japonya'nın Rocco adasına kurulan 11 MW'lık elektrik santrali ile adanın elektrik ve ısı ihtiyacı karşılanmaktadır. Bu amaçla adaya yerleştirilen ve güçleri 50 ile 500 MW arasında değişen yüzlerce yakıt hücresi tesisi bulunmaktadır [5].

Amerika Birleşik Devletleri'nin eyaletlerinden olan Kaliforniya'da 200 konutun elektrik ve ısı ihtiyacını karşılamak için Siemens tarafından 250kW'lık gaz türbinleri ve yakıt hücrelerinden oluşan kojenerasyon sistemi kurulmuştur [5].

Ticari alandaki gelişmelere örnek olarak; yakıt hücresi üreticilerinden olan Ballard firması Alstom ve Ebara firmalarıyla işbirliğine girerek 250 kW elektriksel, 300 kW ısı güce sahip jeneratörleri geliştirmişlerdir.

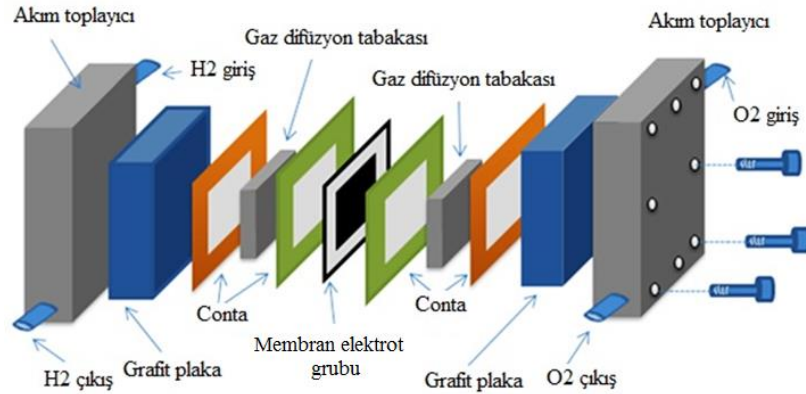
2. BÖLÜM

YAKIT HÜCRELERİ

2.1. Yakıt Hücrelerinin Tarihi ve Genel Bilgiler

Yakıt hücreleriyle ilgili çalışmalar ilk olarak Christian F. Shoenbein tarafından 1838 yılında başlatılmıştır. Bu başlangıç William Grove tarafından ilerletilerek 1839 yılında yakıt hücresinin ilk ürünü ortaya çıkarılmıştır. Devam eden yıllar boyunca bu alanda çok az çalışma olmasına rağmen, fizik-kimya alanında çalışan W.F. Ostwald yakıt hücresinin çalışma teorisini ortaya çıkaran çalışmalarıyla 1909 yılında Nobel ödülünü kazanmıştır [6]. Yakıt hücrelerinin geliştirilmesi üzerinden uzun bir süre geçtikten sonra yakıt hücrelerinin pratik uygulamaları görülmüştür. Francis T. Bacon, Birleşik Krallık'ın uzay çalışmalarında kullanılmak üzere 1932'de başladığı 5 kW gücünde yakıt hücresi yığını üzerine çalışmalarını 1952 yılında tamamlamıştır. Tarihteki ilk PEM yakıt hücresi General Electric firması tarafından Grubb ve Niedrach isimli bilim insanlarının çalışmaları sonucunda 1960'lı yıllarda üretilmiştir [7]. Bu yıllardan itibaren gerek ticari gerekse akademik çalışmalar halen devam etmektedir. Çalışmalar sonucunda, telefonların şarj ihtiyacından şehirlerin elektrik ihtiyacını karşılamaya kadar geniş bir güç yelpazesinde uygulama alanı oluşmuştur.

Geleneksel elektrik üretim süreçleri, birden fazla enerji dönüşüm aşamalarına sahiptir. Bu aşamalarda temel olarak yakıtın yanması sonucu sahip olduğu kimyasal enerjinin ısı enerjisine dönüşmesi, oluşan ısıнын iş akışkanına aktarılması ve mekanik cihazlar vasıtası ile mekanik enerjiye dönüşümü gerçekleştirilir. Mekanik enerji de jeneratörler yardımı ile elektrik enerjisine dönüşmektedir. Yakıt hücrelerinde elektrik üretimi ise hidrojen ve oksijenin elektrokimyasal reaksiyona girip katalitik yanma geçirmesi sonucunda yakıtların yapısındaki kimyasal enerjinin direkt olarak elektriğe dönüşmesiyle sağlanır. Geleneksel yöntemlere kıyasla daha az enerji dönüşüm basamağına sahip olan yakıt hücrelerinin enerji dönüşüm verimliliği daha yüksektir.



Şekil 1. PEM yakıt hücresi bileşenleri

Şekil 1’de gösterildiği üzere PEM yakıt hücreleri; bünyesinde akış kanalları barındıran ve sıkıştırma işlemini hücre bileşenlerine aktaran bipolar plakalar, akış kanallarından gönderilen reaktantların hücrenin aktif alanına yayılmasını sağlayan gaz difüzyon tabakaları, elektrokimyasal reaksiyonların gerçekleştiği katalizör tabakalar ve sahip olduğu iyonik iletkenlikle protonların transferini sağlayan membranlardan oluşur. Bu elemanlar simetrik şekilde dizilirler ve membran ile iki farklı bölgeye ayrılırlar. Bu bölgelerden reaktantın uygulandığı bölge anot, oksitleyicinin aktığı bölge katot olarak isimlendirilir. Anot bölgesinde hidrojenin yükseltgenme tepkimeleri gerçekleşirken, katot bölgesinde oksijenin indirgenme tepkimeleri gerçekleşmektedir.

Gaz difüzyon tabakaları, bipolar plakadaki gaz kanallarından aktarılan reaktantların katalizör tabakaya aktarılması ve reaksiyon sonucunda oluşan ürünlerin o bölgeden uzaklaştırılması için kullanılan elemanlardır. Gaz difüzyon tabakalarının kalınlıkları 200-400 μm aralığındadır. Gaz difüzyon tabakalarında elektron transferi yapıldığından elektriksel iletkenliğinin, ısı transferi yapıldığından ısı iletkenliğinin yüksek olması beklenir. Gaz difüzyon tabakalarının malzemesi grafit, karbon kumaş gibi karbon temelli malzemelerdir [15].

Katalizör tabakalar; grafit taban üzerinde çeşitli katkı oranlarında platin ya da paladyum elementi barındıran yakıt hücresi bileşenidir. Hidrojenin yükseltgenme ve oksijenin indirgenme reaksiyonları bu bileşenler üzerinde gerçekleşmektedir. İlgili reaksiyonlar sonucu oluşan iyonlar ve elektronlar bu plakalar üzerinde ilerlediğinden katalizör plakaların iyonik ve elektronik iletkenlik özelliklerinin yüksek olması gerekmektedir [15].

Membranlar; nafyon, polybenzimidazole, alkali metal gibi malzemelerden üretilmiş, yapı itibarıyla elektron geçişine karşı yüksek dirençli ve reaktant geçişlerine engel olacak şekilde küçük gözenekli yapıda olan yakıt hücresi bileşenidir. Yakıt hücresinin anot katalizör tabakasında gerçekleşen reaksiyonlar sonucunda oluşan H^+ membran içerisinden ilerleyerek katot katalizör tabakasına erişmesini sağlayacağından yüksek iyonik iletkenliğe sahip olması gerekir.

Bipolar plakalar, yakıt hücresi bileşenlerinin bir arada tutulmasını, ısının ve elektriğin iletilmesini, reaktantların hücre bileşenlerine taşınmasını ve ürünlerin hücreden uzaklaştırılmasını sağlar. Plakaların malzemesi, korozyona dayanıklı, yüksek ısı ve elektriksel iletkenliğe sahip malzemelerden seçilmelidir. Çelik ve grafit, plaka malzemesi olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır [15].

2.2. Yakıt Hücresi Çeşitleri

Yakıt hücreleri, kullanılan membran çeşitlerine göre sınıflara ayrılmaktadır. Kullanılan membran türleri farklı çalışma şartlarında optimum performans değerleri sergilemektedir. Yakıt hücrelerinin membran türleri ve optimum çalışma sıcaklıkları Tablo 2’de gösterilmektedir [6].

Tablo 2. Membran türlerine göre sınıflandırılmış yakıt hücresi türleri.

Yakıt Hücresi	Membran Malzemesi	Çalışma Sıcaklığı (°C)
Alkali Yakıt Hücresi	Su- potasyum hidroksit çözeltisi	60-250°C
Eriyik Karbonat Yakıt Hücresi	Gözenekli matris içinde eriyik alkali metal	600-800°C
Katı Oksit Yakıt Hücresi	Yttria (Y_2O_3) temelli zirconia (ZrO_2)	600-1000°C
Fosforik Asit Yakıt Hücresi	Gözenekli silikon karbit matrisi içinde fosforik asit çözeltisi	160-220°C
Polimer Membranlı Yakıt Hücresi	Esnek katı perflorosülfonik asit	30-100°C

Alkali yakıt hücrelerinde su ve potasyum hidroksit karışımıyla üretilen alkali ve sıvı elektrolitler kullanılır. Bu yakıt hücrelerinde OH^- iyonunun katot tarafından anot tarafına iletimi gerçekleştirilir. Alkali yakıt hücreleri için optimum çalışma sıcaklıkları

60-250°C aralığındadır. Bu yakıt hücresinin avantajları arasında düşük maliyetli elektrolit kullanımı (KOH), düşük polarizasyon kayıplarına bağlı olarak yüksek verimli olmaları ve yüksek sıcaklıklı uygulamalarda kullanılabilmesi gösterilebilir. Ancak, CO₂'ye toleransının olmaması, nem ve elektrolitteki bileşenlerin kaybının yönetilme ihtiyacı alkali yakıt hücrelerinin dezavantajlarından [8].

Eriyik karbonat yakıt hücrelerinde, elektrolit olarak gözenekli seramik matris içinde eriyik alkali metal karışımları kullanılmaktadır. Bu yakıt hücresinde CO₃²⁻ iyonu anot ve katottaki reaksiyonlar sonucunda oluşur ve elektrolit üzerinden katottan anoda doğru ilerler. Anotta üretilen CO₂ bileşiği ise katot tarafına iletilir. Bu yakıt hücreleri 650°C civarında optimum performans göstermektedir. Bu sıcaklık değerinin üzerinde, elektrolit bileşenlerinin bozunması ve korozyon artmaktadır. Seramik matrisin kırılgan olması sebebiyle anot ve katoda uygulanan basınçlar arasındaki farkın düşük olması gerekmektedir. Eriyik karbonat yakıt hücrelerinin CO₂ ve CO varlığına karşı dayanıklı olmaları sebebiyle yakıt çeşitliliği sunması, reaksiyon sonucunda oluşacak atık ısıların farklı amaçlarla kullanılabilmesi, ucuz katalizör ve metal malzemelerin kullanılabilmesi gibi avantajları vardır. Ancak, düşük güç yoğunluğu, reaksiyon başlangıç sürecinin uzun olması ve karbondioksit beslemesinin gerekliliği gibi dezavantajları bulunmaktadır [9].

Katı oksit yakıt hücrelerinde katı fazda seramik elektrolitler kullanılmaktadır. Çalışma sıcaklıkları 600-1000°C değerleri arasında değişmektedir. Bu yakıt hücresinde O²⁻ iyonu katot bölgesinden anot bölgesine transfer edilir. Reaksiyon ürünlerinden olan su, anot bölgesinde üretilmektedir. Nikel gibi ucuz metaller katalizör olarak kullanılabilir. Suyun anot bölgesinde üretilmesinin anot aktivasyon kayıplarını düşürmesi, reaksiyon sonucunda atık ısının farklı alanlarda değerlendirilebilmesi, elektrolitin katı olması sebebiyle reaksiyon sürecinde elektrolitte kayıp-eksilme yaşanmaması gibi avantajları vardır. Ancak, çalışma sıcaklığının yüksekliği, elektrolitin uygun çalışma sıcaklığına erişene kadar iletkenliğinin düşük kalması ve oluşan termal gerilmelerden dolayı bileşenlerin zarar görmesi gibi dezavantajları bulunmaktadır [10].

Fosforik asit yakıt hücreleri ticari uygulamalarda kullanılmak üzere 1960'lı yıllarda geliştirilmiş olup sıvı ve asidik elektrolit kullanılmaktadır. Elektrolit yapısı, gözenekli silikon karbit seramik matris içinde yüksek yoğunluklu fosforik asitten oluşmaktadır. Bu yakıt hücresi fosforik asit katkılı PEM yakıt hücrelerine yüksek oranda benzerlik

göstermektedir. Ancak çalışma sıcaklığının kısmen yüksekliği ve sıvı membran yapısı özellikleriyle ayrılmaktadır. Çalışma sıcaklığının yüksekliği sebebiyle buhar fazında olan su buharının yönetiminin kolaylığı, güvenli ve gelişmiş bir sistem olması gibi avantajları vardır. Buna karşın, güç yoğunluğunun otomotiv uygulamaları için uygun olmaması, katalizör olarak kullanılan platin elementinin katkı oranı polimer elektrolit membranlarla aynı olmasına rağmen güç yoğunluğu daha düşük olması gibi dezavantajları vardır [12].

PEM tipi yakıt hücrelerinde H^+ iyonu anot bölgesinde oluşur ve membran üzerinden katot bölgesine geçer. Uygun çalışma sıcaklıkları $30-100^{\circ}C$ aralığında değişen yakıt hücrelerinde katalizör olarak platin, paladyum gibi geçiş metalleri kullanılmaktadır. Çalışma sıcaklıklarının düşüklüğü, yüksek güç yoğunluğu gibi avantajlarıyla çok geniş uygulama alanlarına sahip olmasına rağmen katalizör olarak kullanılan platinin yüksek maliyeti, yakıttaki safsızlıklara karşı düşük toleransı gibi dezavantajları bulunmaktadır [13].

2.3. PEM Yakıt Hücreleri

2.3.1. PEM Yakıt Hücresinin Termodinamiği

Saf hidrojen yakıtlı yakıt hücrelerinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlar 2.1, 2.2 ve 2.3’de gösterildiği şekilde gerçekleşmektedir. Bu reaksiyonlardan görüldüğü üzere, hidrojen anot tarafından gönderilmekte ve anot katalizör tabakada yükseltgenme reaksiyonları gerçekleştirmektedir. Oksijen ise katot bölgesinden gönderilmekte indirgenme reaksiyonları geçirmektedir. Tüm elektrokimyasal tepkimelerin sonucunda ürün olarak elektrik, su ve atık ısı açığa çıkmaktadır.

Anotta gerçekleşen reaksiyon:



Katotta gerçekleşen reaksiyon:



Net reaksiyon



Gerçekleşen reaksiyonlar neticesinde bir yakıt hücresinde maksimum elde edilebilir iş şu şekilde tariflenmektedir.

$$E_{th} = \frac{\Delta H}{nF} \quad (2.4)$$

Entropi üretiminden dolayı maksimum enerji değerinin bir kısmı faydalı işe dönüştürülemez. Maksimum enerjinin entropi kaynaklı kayıpları çıkarıldıktan sonraki değeri Gibbs enerjisi (ΔG) olarak tanımlanır ve aşağıdaki denklemle hesaplanır:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2.5)$$

Bu denklemde ΔG Gibbs enerjisindeki değişimi, ΔH entalpi değişimini, T sıcaklığı, ΔS ise entropi değişimini tanımlar. Yakıt hücresinden elde edilecek gerçek elektrik işi Nernst gerilimi olarak bilinir ve aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$E^0 = \frac{\Delta G}{nF} \quad (2.6)$$

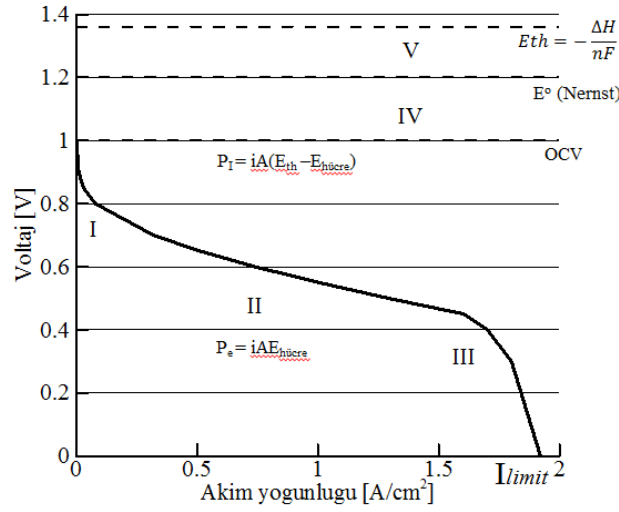
Bu denklemde, n ifadesi 1 mol H_2 'deki elektron sayısını, F ise Faraday sabitini temsil etmektedir. Yakıt hücresindeki açık devre voltajı ise aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$E(T, P) = \frac{-\Delta G^0(T)}{nF} + \frac{R_u T}{nF} \ln \left[\frac{a_{\text{H}_2} (a_{\text{O}_2})^{1/2}}{a_{\text{H}_2\text{O}}} \right] \quad (2.7)$$

R_u ifadesi universal gaz sabitini, a_{H_2} hidrojenin kısmi basıncını, a_{O_2} oksijenin kısmi basıncını ve $a_{\text{H}_2\text{O}}$ ise su buharının kısmi basıncını ifade etmektedir.

2.3.2. Yakıt Hücresinin Polarizasyon Eğrisi ve Gerçekleşen Kayıplar

Yakıt hücrelerinde performans değerlendirmeleri gerilim ve akım parametreleriyle oluşturulan polarizasyon eğrisi üzerinden yapılmaktadır. Bu eğrinin bir örneği Şekil 2'de gösterilmektedir. Polarizasyon eğrisinin 1. bölgesinde aktivasyon kayıpları, 2. bölgesinde ohmik kayıplar, 3. bölgesinde konsantrasyon kayıpları, 4. bölgesinde diğer kayıplar ve 5. bölgesinde tersinmezlik kayıpları dominanttır.



Şekil 2. Polarizasyon eğrisi.

2.3.2.1. Aktivasyon Kayıpları

Aktivasyon kayıpları, elektrokimyasal reaksiyonların başlaması ve katalizörlerin aktifleştirilmesi için harcanan enerjilerden dolayı oluşan kayıplardır. Aktivasyon kayıplarının etkisi, düşük akım yoğunluğunun görüldüğü 1. bölgede diğer kayıplara göre daha üstündür. Reaksiyon mekanizması, hücre çalışma koşulları, katalizör tipi ve yapısı, kirlilik ve kullanım süresi bu kayıp türünün değişimini etkileyen temel faktörlerdendir.

2.3.2.2. Ohmik Kayıpları

Ohmik kayıpların oluşumu yakıt hücresinin montajında oluşan temas dirençleri, iyon ve elektronların izledikleri yollarda karşılaştığı dirençlere bağlıdır. Polarizasyon eğrisinin her bölgesinde görülebilecek olan ohmik kayıplar 2. bölgesinde daha baskındır.

2.3.2.3. Konsantrasyon Kayıpları

Konsantrasyon kayıpları, reaktantların reaksiyon bölgelerindeki varlığının azalmasıyla gerçekleşmektedir. Konsantrasyondaki düşüşlerde, sıvı fazdaki ürünlerin gözenekleri tıkanması, kullanılan bileşenlerin difüzyon limitleri, azot gibi inert gazların reaktant transferlerini bloke etmesi ve kirlilik etkilidir. Polarizasyon eğrisinin 3. bölgesinde dominant olan bir kayıptır.

2.3.2.4. Diğer Kayıplar

Diğer kayıplar, kısa devre ve elektrolit üzerinden anot ve katot bölgeleri arasında gaz geçişiyle gerçekleşmektedir. Bu kayıpların önüne geçilebilmesi için daha az gözenekli veya farklı bir malzemeden üretilmiş elektrolit kullanımı, elektrolit, gaz difüzyon tabakaları ve katalizör tabakaların yapısının veya morfolojisinin değiştirilmesi gibi önlemler alınmalıdır [6].

2.3.2.5. Tersinmez Kayıplar

Tersinmez kayıplar, reaktantların sahip olduğu entropiden kaynaklanmaktadır. Bu kayıplar reaksiyonlardan açığa çıkan enerjinin tamamının elektriğe dönüşümüne engel olmaktadır.

3. BÖLÜM

LİTERATÜR ÖZETİ

3.1. Literatür Araştırması

PEM yakıt hücresi bileşenlerine ait yapısal ve fiziksel özelliklerinin araştırılması, teknolojinin gelişimiyle birlikte hız kazanmıştır. Geçirgenlik, ısı, iyonik ve elektriksel iletkenlik gibi özellikler yakıt hücrelerinde oluşan kayıpları etkilediği için yakıt hücresi modellemelerinde dikkat edilmesi gereken parametrelerdendir. Bileşenlerin karbon-fiber yapıda olması ve üretim yöntemlerindeki farklılıklardan dolayı fiber yapıların farklı yönlerde farklı yoğunluklarda olabilmeleri sebebiyle her ekseninde farklı iletkenlik değerleri görülmektedir. Bundan dolayıdır ki her doğrultuda iletkenlikleri bulabilmek ve her ekseninde doğru değerleri tayin edebilmek adına anizotropik iletkenlik ölçüm tekniği geliştirilmiştir.

Montgomery H.C. [16] farklı boyutlardaki amorf grafit numunelerin anizotropik elektriksel direnç ölçümleri üzerine metot geliştirmiştir. Numuneler farklı en-boy oranlarına sahip olmakla beraber voltaj ve akım bağlantıları farklı açılar noktasından yapılarak elektriksel iletkenliklerin açığa göre değişim de incelenmiştir.

Todd D. vd. [17] gözenekli difüzyon tabakalarının anizotropik elektriksel direnç değerlerinin bulunması üzerine çalışmışlardır. Anizotropik elektriksel direnç ölçümleri ise kare formda yerleştirilmiş proplar ile sağlanmıştır. Bu çalışmada ticari olarak edinilen gaz difüzyon tabakalarının sıkıştırma basıncına göre anizotropik elektriksel direnç değerlerinin değişimi incelenmiştir. Sıkıştırma basıncı arttıkça düzlem normalindeki elektriksel direnç değeri keskin şekilde düşmektedir. Dolayısıyla iletkenlik değeri artmaktadır.

Todd D. vd. [18] başka bir çalışmalarında ticari olarak elde edilen gaz difüzyon tabakalarının 0.5 ile 2 MPa aralığında döngüsel olarak sıkıştırılması durumunda düzlem

yüzeyi ve normalindeki elektriksel direnç değerlerinin değişimini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre ilk sıkıştırma döngüsünde ölçülen direnç değerleri devam eden döngülere göre oldukça yüksektir. İlk döngünün gerçekleşmesi sırasında direnç değerlerinin kayda değer şekilde düşmesi, gaz difüzyon tabaka kalınlığının sıkıştırma sebebiyle giderek azalmasının sonucu olduğu belirtilmiştir. Devam eden sıkıştırma döngülerinde ise tabakaların kalınlıklarında değişim olmamış ve elektriksel direnç değerlerinde önemsiz seviyelerde değişimler gerçekleşmiştir.

El-Kharouf vd. [19] çalışmalarında farklı ticari gaz difüzyon tabakalarının karakteristik özellikleri üzerine çalışmışlardır. Sonuçlara göre deneyleri yapılan ticari gaz difüzyon tabakalarının elektriksel dirençlilik değerleri $4.44 \times 10^{-5} \Omega m$ ile $5.51 \Omega m$ aralığında olduğu gözlemlenmiştir.

Mason vd. [20] sıkıştırma basıncının ohmik direnç ve gaz difüzyon tabakası üzerine etkileri incelemişlerdir. Sıkıştırma basıncının artışıyla birlikte tabaka kalınlıkları azalmış, bununla birlikte düzlem normalindeki direnç değerleri düşmüştür. Taramalı elektron mikroskopu analizlerine göre ise sıkıştırma işlemlerinden sonra tabakayı oluşturan karbon yapıları arasındaki boşluklar azalmış ve daha sıkı bir yapı elde edilmiştir.

Wilde vd. [21] yaptıkları çalışmada ticari gaz difüzyon tabakaları ve diğer hücre bileşenlerinin yapısal ve fiziksel özellikleri üzerine çalışmalarda bulunmuşlardır. Düzlem normalindeki elektriksel direnç değerlerinin sıkıştırma basıncına bağlı değişimi incelenmiş olup sıkıştırma basıncının artışıyla belirli değere kadar elektriksel direnç değerinin önemli şekilde düştüğü, devamında direnç değerlerinin çok fazla değişmediği ortaya konmuştur.

Ismail vd. [22] gaz difüzyon tabakaları üzerine mikro-gözenekli yapı kaplaması ve politetrafloroetilen (PTFE) uygulanmasının etkilerini incelemişlerdir. Elektriksel direnç ölçüm çalışmalarında lineer 4 proflu direnç ölçüm cihazı kullanılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre PTFE katkısı arttıkça elektriksel iletkenlik artmıştır. Mikro gözenekli yapının uygulanmasıyla kontak direncinin düştüğü gözlemlenmiştir.

Nitta vd. [23] homojen olmayan sıkıştırma basıncının gaz difüzyon tabakalarına uygulanması durumunda elektriksel direnç değerlerinin nasıl etkilendiği üzerine bir

araştırma yapmışlardır. Lineer dizilimli dört noktalı ölçüm sistemi kullanılarak yapılan deneyler sonucunda sıkıştırma basıncının artışıyla gaz difüzyon tabakalarının düzlem normalindeki elektriksel iletkenlik değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir.

Vikram vd. [24] gaz difüzyon tabakalarının elektriksel dirençlerini ve temas dirençlerini homojen olmayan sıkıştırma altında incelemişlerdir. Çalışmanın sonuçlarına göre sıkıştırma basıncı arttıkça, temas dirençlerinin ve alan dirençlerinin düştüğü gözlenmiştir.

Chang vd. [25] sıkıştırma basıncının elektriksel iletkenlik ve PEM tipi yakıt hücresinin performansı üzerine etkilerini incelemişlerdir. Sıkıştırma basıncı arttıkça düzlem normalindeki elektriksel iletkenlik değerleri ve yakıt hücresi performansı artmıştır.

Hamour vd. [26] sıkıştırma basıncı altında gaz difüzyon tabakalarının elektriksel iletkenlik değişimlerini araştırmışlardır. Elektriksel iletkenlik ölçümlerinde lineer dizilimli 4 proflu elektriksel iletkenlik ölçüm sistemi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre sıkıştırma basıncı arttıkça düzlem normalindeki elektriksel iletkenlik değerleri artış göstermiştir.

Zhou ve Liu [27] yaptıkları çalışmada anizotropik elektriksel iletkenlik değerlerinin 3 boyutlu PEM tipi yakıt hücresi modeli üzerine etkilerini parametrik yöntemle analiz etmişlerdir. Anizotropik elektriksel direnç etkilerinin incelenebilmesi için düzlem yüzeyi ve düzlem normali doğrultularında farklı elektriksel direnç değerleri kullanılmıştır. Bu iletkenlik değerlerinin yakıt hücresinin akım yoğunluğu dağılımı ve performansa etkileri üzerine çalışmışlardır. Oluşan performans eğrilerine göre iletkenlik değeri arttığında performans artmaktadır. Düzlem yüzeyindeki iletkenlik değeri sabit alındığında (300 Sm^{-1}) düzlem normalinde iletkenlik değerinin artışı performansı artırmaktadır.

Ismail vd. [28] yapmış olduğu bu çalışmada, serpantin kanal tipine sahip 3 boyutlu PEM yakıt hücresi modeli hazırlanmış olup elektriksel iletkenliklerin yakıt hücresi performansı üzerine etkilerini araştırmışlardır. Düzlem normalindeki elektriksel iletkenlik değeri arttıkça kanal ve rib bölgelerindeki akım yoğunlukları artmıştır. Düzlem yüzeyindeki elektriksel iletkenlikler arttırıldığında ise kanal ve rib bölgelerindeki akım yoğunlukları büyük değişim göstermemiştir.

Bapat ve Thynell [29] yaptıkları çalışmada iki boyutlu, iki fazlı akış modelinde anizotropik elektriksel direncin akım yoğunluğu ve sıcaklık dağılımına etkilerini incelemişlerdir. Direnç değerlerinin yükselmesi her iki ekseninde de akım yoğunluğu değerlerinin düşmesine sebep olmuştur. Lokal akım yoğunluğu, düzlem normalindeki elektriksel iletkenlik değerinin artışıyla azalmaktadır. Bu etki katalizör tabakanın gaz kanallarıyla direk temas ettiği bölgede keskin bir düşüşe sebep olmuştur. Düzlem yüzeyinde elektriksel iletkenliğin artışı, gaz kanalından akım toplayıcı kanallara geçiş bölgesinde kısmen artışa sebep olmaktadır.

Ju [30] gaz difüzyon tabakasındaki anizotropik ile izotropik yapıların yarattığı etkilerin farkını sayısal olarak incelemiştir. Üç boyutlu ve iki fazlı model hazırlanmış, rib ve kanal bölgelerinde akım yoğunlukları ile sıcaklık dağılımları incelenmiştir. Anizotropik varsayımıyla elde edilen sonuçlara göre rib bölgelerindeki akım yoğunluğu daha yüksek bulunmuştur.

Meng ve Wang [31] üç boyutlu tek fazlı PEM tipi yakıt hücresi modeli hazırlamışlardır. Hazırlanan model kapsamında elektriksel iletkenlik değişimlerinin düzlem yüzeyi ve düzlem normalindeki akım yoğunluklarına etkileri incelemiştir. Elde edilen sonuçlara göre düzlem normalindeki iletkenlik değerleri arttıkça akım yoğunluğu artarken düzlem yüzeyinde elektriksel iletkenlik değerleri arttıkça kanal bölgelerindeki akım yoğunlukları artmıştır. Akım yoğunlukları rib-kanal kesişim bölgesinde radikal şekilde düşmekle birlikte rib bölgelerinde azalarak devam etmektedir.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde; gaz difüzyon tabakalarındaki elektriksel iletkenliğin çalışma parametrelerine göre değişiminin incelenmediği görülmüştür. Ayrıca sayısal modellerde kullanılan iletkenlik değerlerinin parametrik ağırlıklı olduğu görülmüştür. Literatürden de görüldüğü üzere çalışma koşullarının elektriksel iletkenliğe etkileri üzerine bir çalışmaya rastlanmamıştır. Anizotropik elektriksel iletkenliğin çalışma şartlarına göre değişimini belirleyerek daha doğru bir modelleme yapmak tezin ana hedefidir. Bu hedef doğrultusunda, farklı bağıl nem (%70, 80, 90 ve 100), çalışma sıcaklığı (50, 60, 70 ve 80°C) ve sıkıştırma basıncı (2, 4, 6 ve 8 bar) şartlarında elektriksel direnç ölçümleri yapılmış, iletkenlikler hesaplanmış ve sayısal modele bu iletkenlikler entegre edilerek gerçeğe daha yakın model sonuçları elde edilmek istenmiştir.

3.2. Tezin Amacı ve Kapsamı

Tezin amacı, PEM yakıt hücresini oluşturan bileşenlerden olan gözenekli ve mikrogözenekli gaz difüzyon tabakasındaki elektriksel iletkenlikleri, farklı çalışma sıcaklıkları (50°C, 60°C, 70°C, 80°C), farklı bağıl nem koşullarına (%70, %80, %90, %100) ve farklı sıkıştırma basınçlarına (2, 4, 6 ve 8 bar) bağlı olarak düzlem doğrultusunda ve düzlem normalinde belirlemektir. İletkenlik değerleri, belirtilen koşullar altında numunenin farklı doğrultularında ölçülen direnç değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen iletkenlik değerleri, deneysel veri ile doğrulanmış üç boyutlu sayısal modele entegre edilmiştir. Hazırlanan bu model ile iletkenlik değerlerinin hücre performansı, rib bölgelerindeki akım yoğunluğu, tersinmez ısı kaybı üzerine etkileri analiz edilmiştir. Bu çalışmalara ek olarak hücrenin anot ve katot kısmı için difüzyon tabakalarının düzlem yüzeyi ve düzlem normali doğrultusundaki kesitlerde akım yoğunluklarını dağılımı incelenmiştir.

4. BÖLÜM

ELEKTRİKSEL DİRENÇ DEĞERLERİNİN DENEYSEL OLARAK BULUNMASI ve İLETKENLİKLERİN HESAPLANMASI

Tez çalışmasının bu bölümünde, gözenekli (GDT) ve mikro-gözenekli (MGDT) gaz difüzyon tabakası numunelerinin hazırlığı, deney sisteminin bileşenleri, deneyin iş akışı açıklanmıştır. Ayrıca, elektriksel direnç ölçüm deneylerinden alınan sonuçlar kullanılarak hesaplanan anizotropik elektriksel iletkenlikler hücre çalışma sıcaklığı, bağıl nem ve sıkıştırma basıncına bağlı olarak sunulmuştur. Tez çalışmasının amacı doğrultusunda hazırlanan numunelerin farklı sıcaklık, bağıl nem ve sıkıştırma basıncı koşulları altında anizotropik elektriksel iletkenlik davranışını ve bu davranışın yakıt hücresi performansında sebep oldukları değişimleri incelemektir. Bu amacı gerçekleştirmek için numuneler, direnç ölçüm hücresinin test alanına uygun boyutlarda kesilerek hazırlanmış ve direnç ölçüm hücresine montajı gerçekleştirilmiştir. Hücre, kompresör destekli sıkıştırma ünitesi ile istenilen basınca sıkıştırılmıştır. Yakıt hücresi test istasyonu ile sıcaklık, bağıl nem gibi parametreler numune üzerinde sağlanmış ve bu şartlarda anizotropik elektriksel direnç ölçümleri yapılarak elde edilen direnç sonuçlarından iletkenlik değerleri hesaplanmıştır.

4.1. Deneysel Sistem

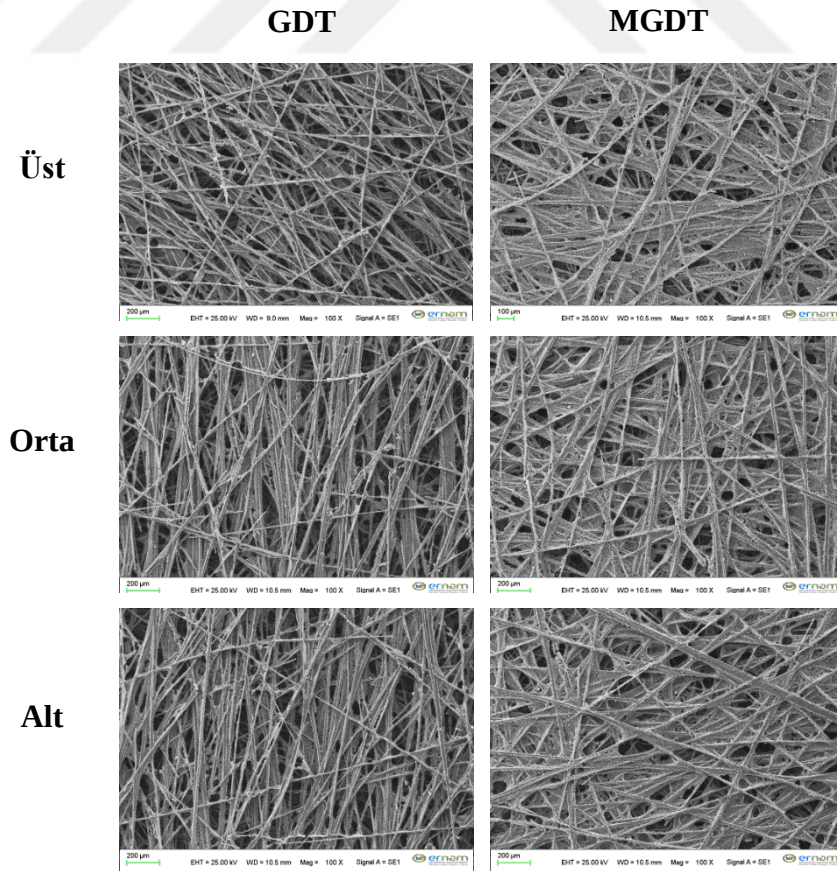
4.1.1. Numunelerin Hazırlanması

Farklı çalışma parametrelerinin gaz difüzyon tabakalarının elektriksel iletkenliği üzerine etkilerini incelemek üzere özellikleri Tablo 3’de verilmiş gözenekli (Sigracet SGL 34 BA) ve mikro-gözenekli (Sigracet SGL 34 BC) gaz difüzyon tabakaları kullanılmıştır. Gaz difüzyon tabakaları karbon fiber yapıdadır ve belirli bir doğrultu boyunca üretilmektedir. Bu doğrultunun tayin edilebilmesi ve numunelerin en iyi açıda kesilerek deneylere hazırlanabilmesi için gaz difüzyon tabakaların farklı bölgelerinden numuneler hazırlanarak taramalı elektron mikroskobu aracılığıyla mikroskobik görüntüleri

alınmıştır. GDT ve MGDТ için alınan görüntüler Şekil 3’de gösterilmiştir. Alınan görüntüler numunelerin tabakadan alındığı bölgelere ve gözenek yapısına göre gruplandırılmıştır. Kullanılan test hücresinin aktif alanına uygun olarak Şekil 4’de gösterildiği üzere kare formda ve $3 \times 3 \text{ cm}^2$ boyutlarında numuneler hazırlanmıştır.

Tablo 3. Gaz difüzyon tabakalarının özellikleri

Özellikler	Birim	GDT	MGDT
Kalınlık	μm	280	315
Alan Ağırlığı	g/m^2	86	140
Gözeneklilik	%	83	75
Hava geçirgenliği	$\frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^2 \text{s}}$	45	0.35
Elektrik Alan Direnci	$\text{m}\Omega\text{cm}^2$	< 11	< 14



Şekil 3. GDT ve MGDТ’nin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.

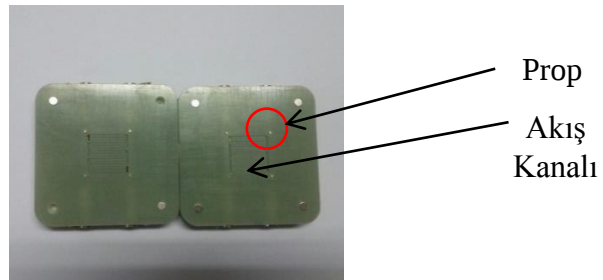


Şekil 4. Deneye hazırlanmış numunenin fotoğraf

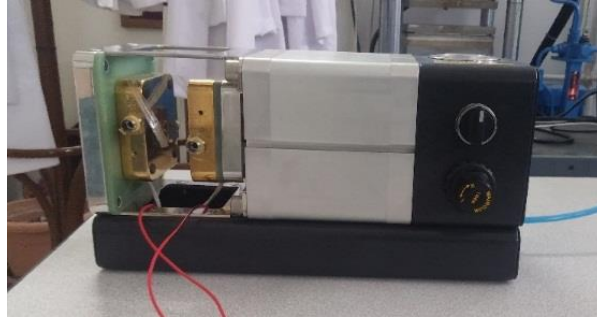
Şekil 3’de görüldüğü üzere GDT fiber yönünün ağırlıkla dikey doğrultudadır. MGDT için ise fiber yönü küçük açılarla değişmektedir ve bununla birlikte ağırlıkla dikey doğrultudadır. Ayrıca MGDT’nin GDT’ye göre daha düşük gözenekliliğe sahip olduğu görülmektedir. İletkenlik değerlerinin dengeli değişmesini sağlamak için her iki gaz difüzyon tabakası için kesim yönü çapraz olarak belirlenmiştir.

4.1.2. Deneysel Sistemin Elemanları

Numuneler, istenilen çalışma şartlarının sağlanabilmesi için uygun şekilde tasarlanmış kanal yapısına sahip olan direnç ölçüm hücresine yerleştirilmiştir. Şekil 5’de gösterilen elektriksel direnç ölçüm hücresi simetriktir ve yalıtkan malzemeden üretilmiştir. Hücre plakalarının her iki tarafında, numuneye temas eder konumda ve kare formda yerleştirilmiş dört adet altın kaplı yaylı prop bulunmaktadır. Propların kare formda yerleştirilmesi sayesinde farklı bağlantı kombinasyonları uygulanmış ve farklı doğrultularda elektriksel direnç ölçümleri yapılabilmektedir. Ayrıca ölçüm hücresinde istenilen bağıl nem koşulunun sağlanabilmesi için serpantin tip gaz akış kanalı mevcuttur. Serpantin kanal seçilmesinin sebebi hücre performans deneyini gerçekleştirdiğimiz test hücresindeki kanalların serpantin olmasıdır.

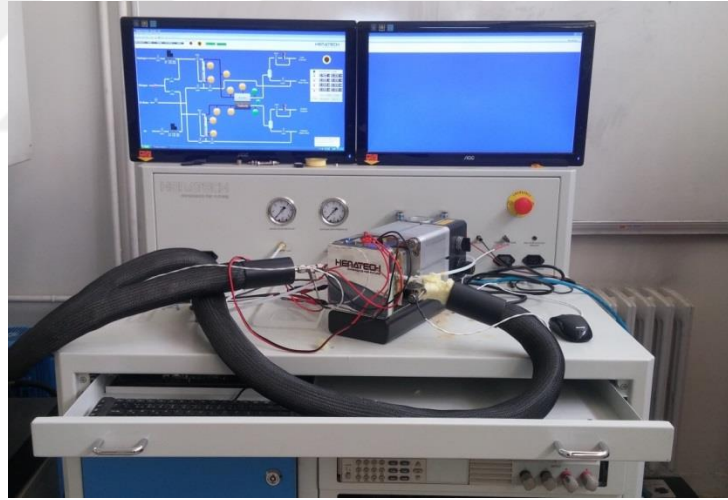


Şekil 5. Elektriksel direnç ölçüm hücresi



Şekil 6. Pnömatik sıkıştırırmalı test sistemi

Numunenin istenilen basınç değerlerinde üniform bir şekilde sıkıştırılabilmesi ve bu basınç değerlerinde stabilitesinin sağlanması amacıyla Şekil 6’da gösterilen kompresör destekli pnömatik sıkıştırırmalı sistem kullanılmıştır. Sıkıştırma ünitesi maksimum 8 bar basınca sıkıştırılmaktadır.



Şekil 7. Yakıt hücresi test istasyonu

Test hücresinin istenilen sıcaklığa ve bağıl neme getirilmesi ve ayrıca hücrenin sıcaklık kontrolünün yapılabilmesi için Şekil 7’de gösterilen yakıt hücresi test istasyonu kullanılmıştır. Deney çalışmalarında istenilen bağıl nem seviyesinin sağlanabilmesi amacıyla akışkan olarak azot gazı kullanılmıştır. Sistemde bulunan nemlendirme tankları yardımıyla azot gazı istenilen oranda nemlendirilerek test hücresine gönderilmiştir.



Şekil 8. Versastat 3 galvanostat-potensiyostat

Çalışma şartlarının sağlanmasının ardından elektriksel direnç ölçüm deneyleri Şekil 8’de gösterilen Versastat 3 potensiyostat-galvanostat cihazıyla yapılmıştır. Bu cihaz ile elektriksel direnç ölçüm deneylerinin yapılabildiği gibi korozyon, enerji depolama, sensör testleri de yapılabilmektedir [32].

4.1.3. Direnç ve Elektriksel İletkenlik Değerlerinin Belirlenmesi

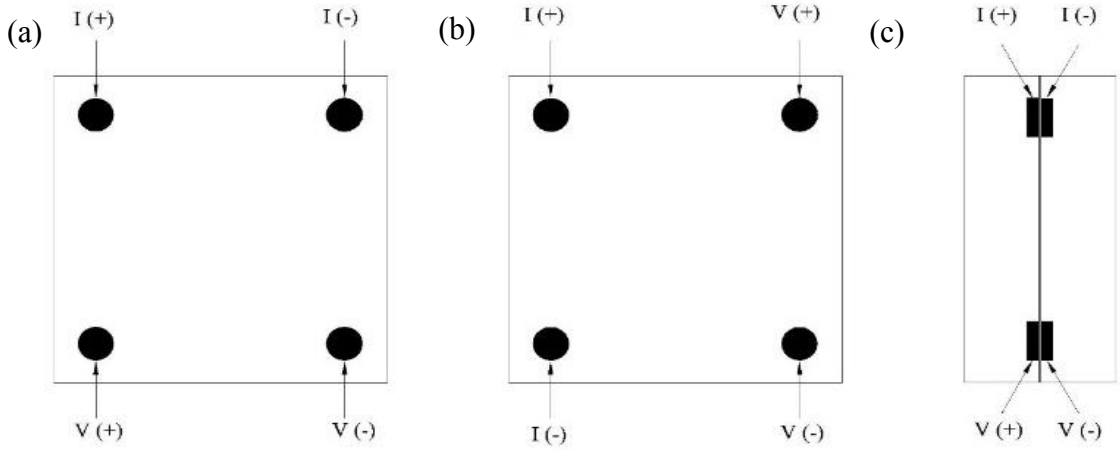
Elektriksel dirençler dört kutuplu prop metodu kullanılarak ölçülmüştür. Bu yöntemde akım kontrollü şekilde iki farklı proptan uygulanıp toplanırken, gerilim farklı iki proptan ölçülmektedir. Direnç değeri ise sistem arayüzünde Ohm Kanunu’na (Denklem 4.1) göre hesaplanıp çıktı olarak alınmaktadır.

$$V = I \cdot R \quad (4.1)$$

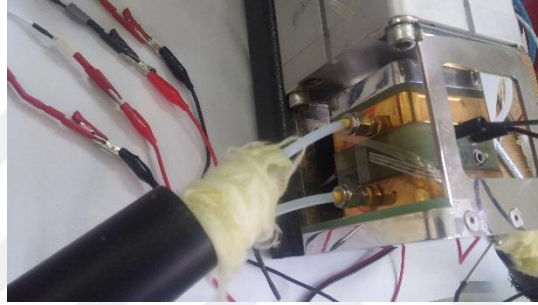
Elde edilen direnç değeri Denklem 4.2’de yerine yazılarak elektriksel iletkenlik değeri hesaplanmıştır.

$$\sigma = \frac{l}{RA} \quad (4.2)$$

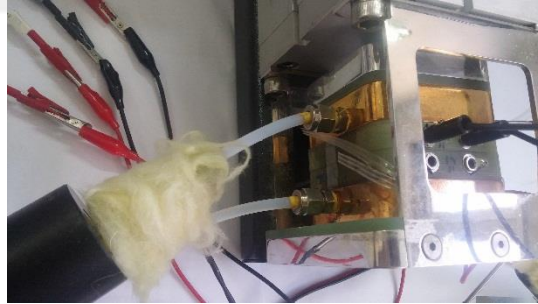
Bu denklemde, σ , elektriksel iletkenliği, R , direnç değerini, A , Elektron akışının gerçekleştiği kesit alanını, l , Elektron akışının gerçekleştiği doğrultunun kalınlığını temsil etmektedir.



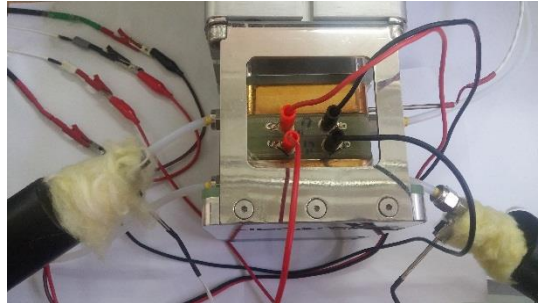
(d)



(e)



(f)



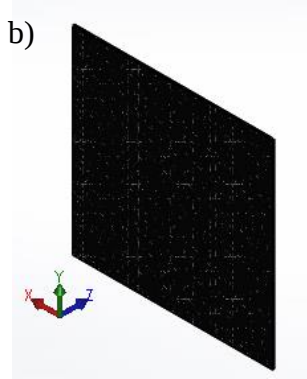
Şekil 9. Anizotropik elektriksel direnç ölçümü için bağlantı yöntemleri; (a) Düzlem yüzeyinin X doğrultusunda bağlantıların tasarımı, (b) Düzlem yüzeyinin Y doğrultusunda bağlantıların tasarımı, (c) Düzlem normali (Z doğrultusu) bağlantıların tasarımı, (d) Düzlem yüzeyinde X doğrultusu için bağlantılar, (e) Düzlem yüzeyinde Y doğrultusu için bağlantılar, (f) Düzlem normali (Z doğrultusu) için bağlantılar

Dört noktalı ölçüm yöntemine göre propların bağlantı noktalarının teorik ve sistem üzerinde bağlantı görselleri Şekil 9'da gösterilmiştir. Şekil 9.(a) ve 9.(d)'de numunenin düzlem yüzeyinin X doğrultusunda elektriksel direnç ölçüm bağlantıları görülmektedir. Bu bağlantıya göre I(+) probundan akım uygulanmış ve I(-) probunda toplanmıştır. Buna karşılık gerilim ölçüm propları akım uygulanan proplara paralel olarak konumlandırılmıştır. Şekil 9.(b) ve Şekil 9.(e) incelendiğinde numune düzleminin Y doğrultusunda elektriksel direnç ölçüm bağlantıları görülmektedir. Bu bağlantıya göre akım uygulama (I+) ve toplama proplarının (I-) dikey doğrultuda yerleştirildiği görülecektir. Gerilim uygulama ve toplama propları da (V+ ve V-) yine akım toplama proplarına paralel olarak konumlandırılmıştır. Şekil 9.(c) ve Şekil 9.(f)'de ise düzlem normalindeki elektriksel direnç ölçümünün yapılması için sağlanan bağlantı yapısı görülmektedir. Bu yöntemde, numunenin bir yüzeyindeki pinden akım uygulanırken diğer yüzeyindeki simetrik pin noktasından uygulanan akım toplanmıştır. Aynı şekilde farklı iki simetrik pin üzerinden ise gerilim ölçümü bağlantıları yapılmıştır. Bu yolla düzlem normalindeki elektriksel direnç değerleri ölçülmektedir.

a)

$$\begin{pmatrix} XX & XY & XZ \\ YX & YY & YZ \\ ZX & ZY & ZZ \end{pmatrix}$$

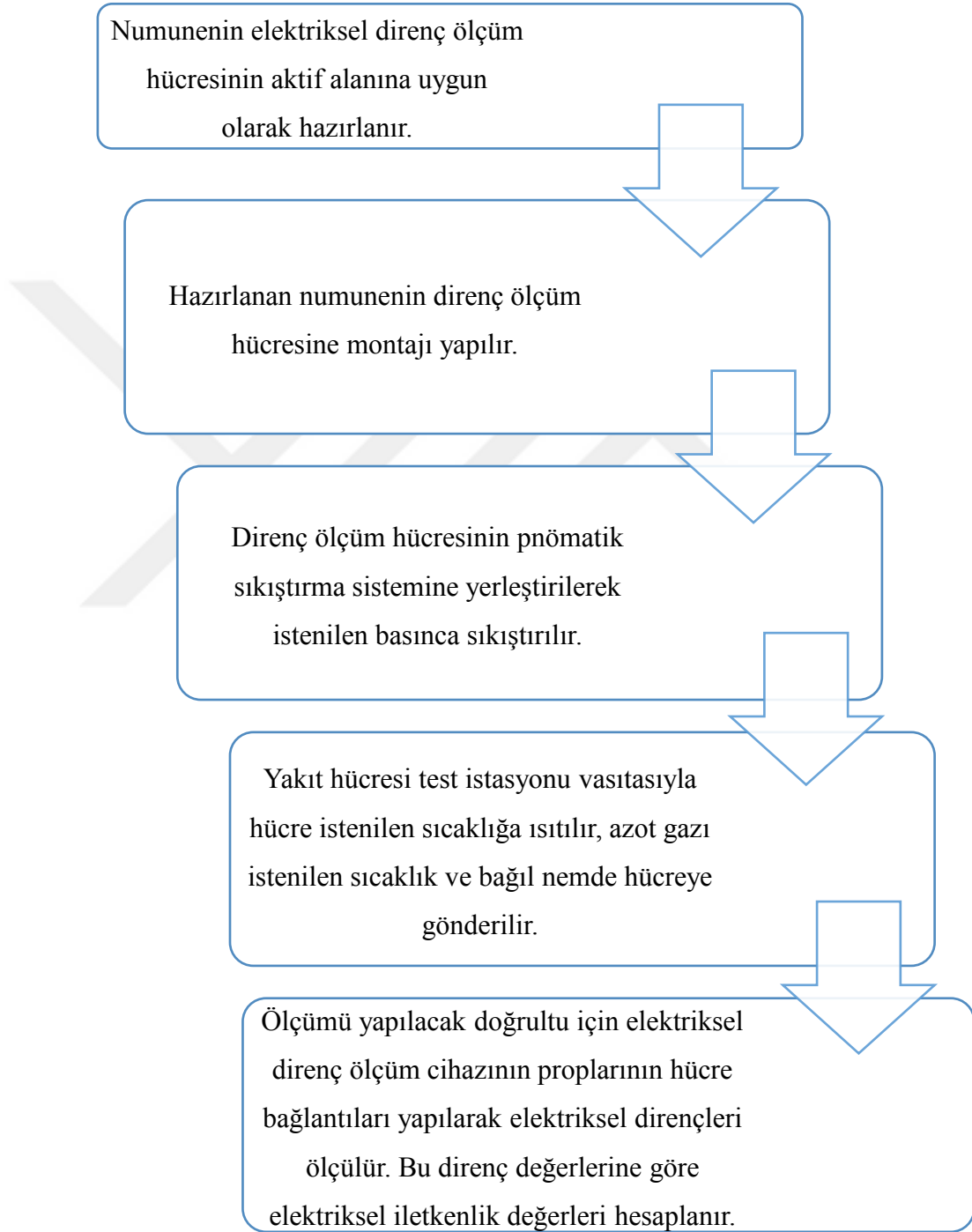
b)



Şekil 10. a) Elektriksel iletkenliklerin değerlendirilmesi için matris formu, b) 3D çizim ve ilgili eksenler

Farklı çalışma şartları altında ölçülen direnç değerlerinin ve elektriksel iletkenlik değerlerinin yorumlanabilmesi için Şekil 10'da gösterilen matris formatı ve ilgili eksenler kullanılmıştır. Bu format incelendiğinde x ve y bileşenleri numunenin düzlemini, z doğrultusu ise düzlem normalini temsil etmektedir. Bu doğrultuların farklı kombinasyonları ile ölçüm matrisinin diğer bileşenleri oluşturulmuştur. Her çalışma

şartı kombinasyonu için Şekil 10'da gösterilen matris formatı ve eksenler esas alınarak bu formattaki doğrultularda elektriksel direnç ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 11. Deneysel sistem iş akış şeması

Gaz difüzyon tabakası numunelerinin hazırlığı, hücre montajı, test şartlarının sağlanması, direnç ölçümlerinin yapılması ve arayüz kullanımını içeren deney akış şeması Şekil 11’de gösterilmiştir. Deneyin iş akışı, numunelerin test hücrelerine uygun boyutlarda kesilip hazırlanmasıyla başlamaktadır. Hazırlanan numunenin direnç ölçüm hücresine montajı tamamlanmakta ve sıkıştırma ünitesinde uygulanacak basınç değeri sağlanmaktadır. Ardından Tablo 4’de verilen çalışma parametreleri test istasyonu aracılığıyla uygulanarak elektriksel direnç ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

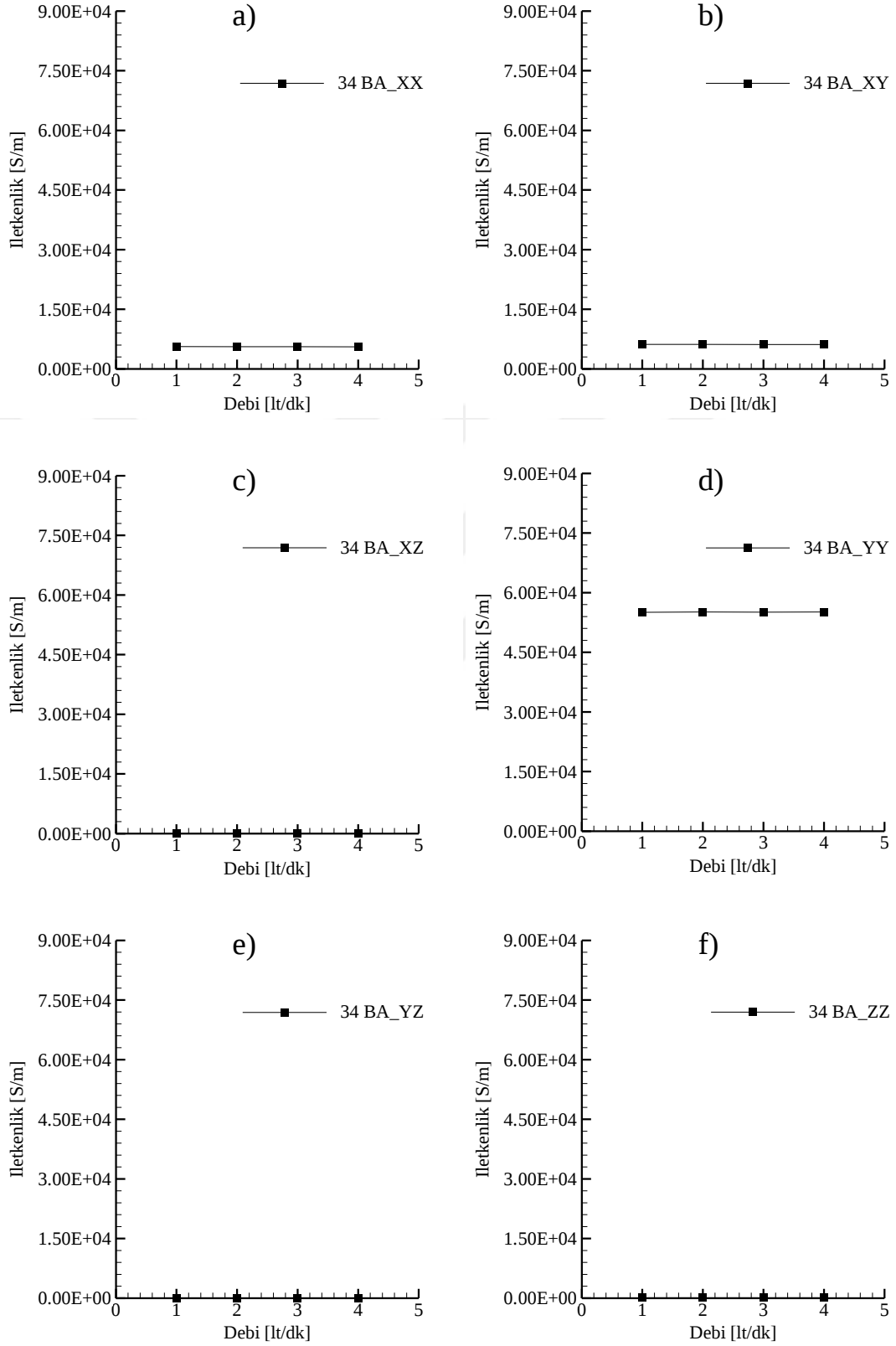
Tablo 4. Deneysel çalışma parametreleri

Sıcaklıklar	50°C, 60°C, 70°C, 80°C
Bağıl Nemler	%70, %80, %90, %100
Sıkıştırma Basınçları	2 bar, 4 bar, 6 bar, 8 bar

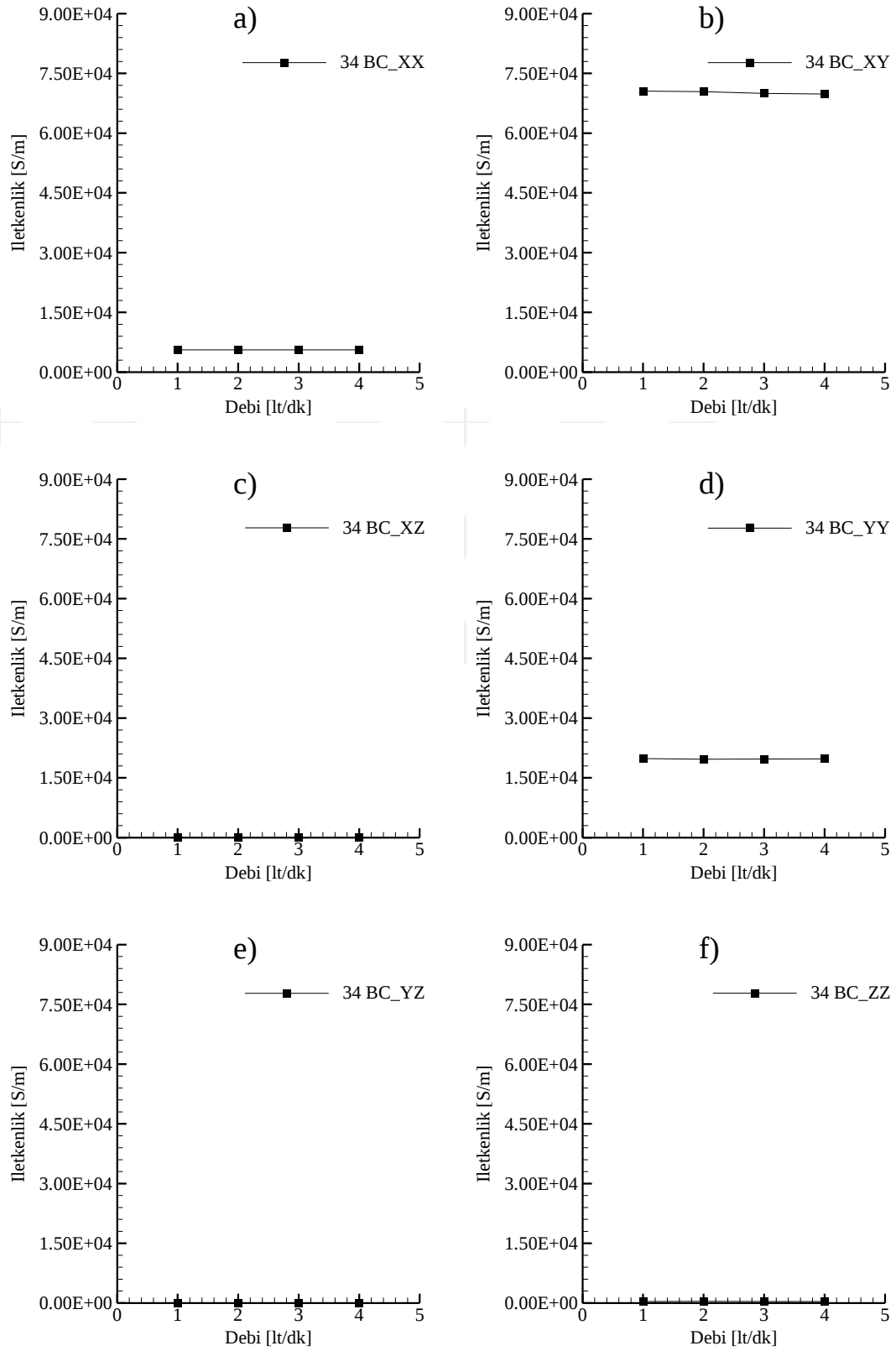
4.1.4. Uygun Akışkan Debisinin Bulunması

GDT ve MGDT’nin (sırasıyla 34 BA ve 34 BC) anizotropik elektriksel direnç ölçümünde deney şartlarından olan bağıl nem seviyesinin sağlanabilmesi için azot gazının nemlendirilerek belirli bir debiyle elektriksel direnç ölçüm hücresine gönderilmiştir. Optimum azot debisinin bulunabilmesi amacıyla azot gazının debisi dışındaki hücrenin sıcaklık, bağıl nem ve sıkıştırma basıncı sabit tutulmuştur. Arasına numune yerleştirilmiş direnç ölçüm hücresi plakaları, 4 bar basınca sıkıştırılmış ve azot gazına ısıtma işlemi uygulanmaksızın oda sıcaklığında (25 °C) gönderilmiştir. Debi değerlerinin (1 lt/dk, 2 lt/dk, 3 lt/dk ve 4 lt/dk) olduğu durumlar için GDT (34 BA) MGDT (34 BC) için ayrı ayrı elektriksel direnç değerleri ölçülmüştür.

Şekil 12 ve Şekil 13’de sırasıyla GDT ve MGDT için farklı debi değerlerinde elektriksel iletkenlik değerlerinin değişimleri gösterilmiştir. Ölçüm sonuçlarından görüleceği üzere, debinin elektriksel iletkenlik değerleri üzerinde kayda değer etkisi bulunmamaktadır.



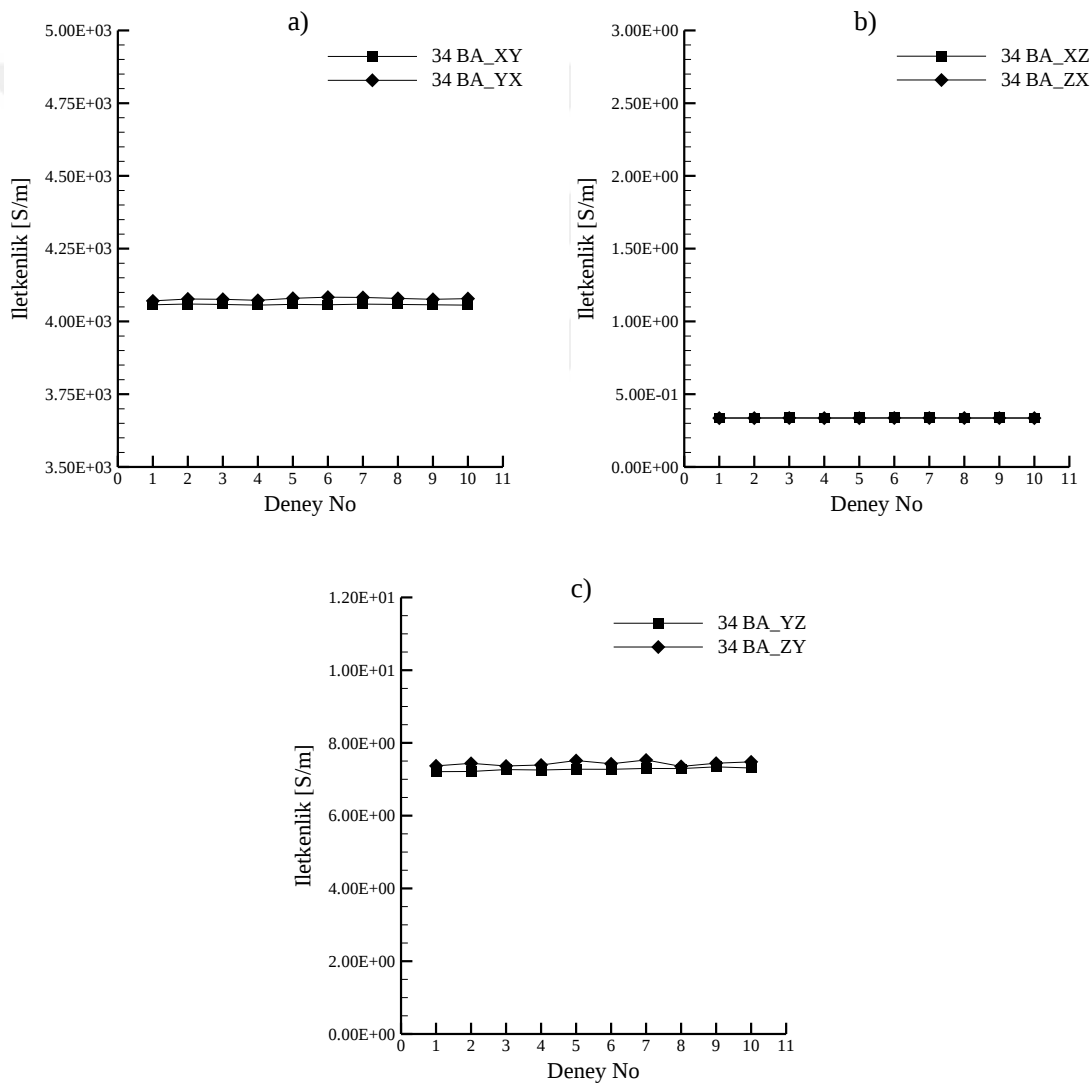
Şekil 12. GDT'nin (34 BA) debilere göre anizotropik elektriksel iletkenlik değişimi; a) XX, b) XY, c) XZ, d) YY, e) YZ, f) ZZ



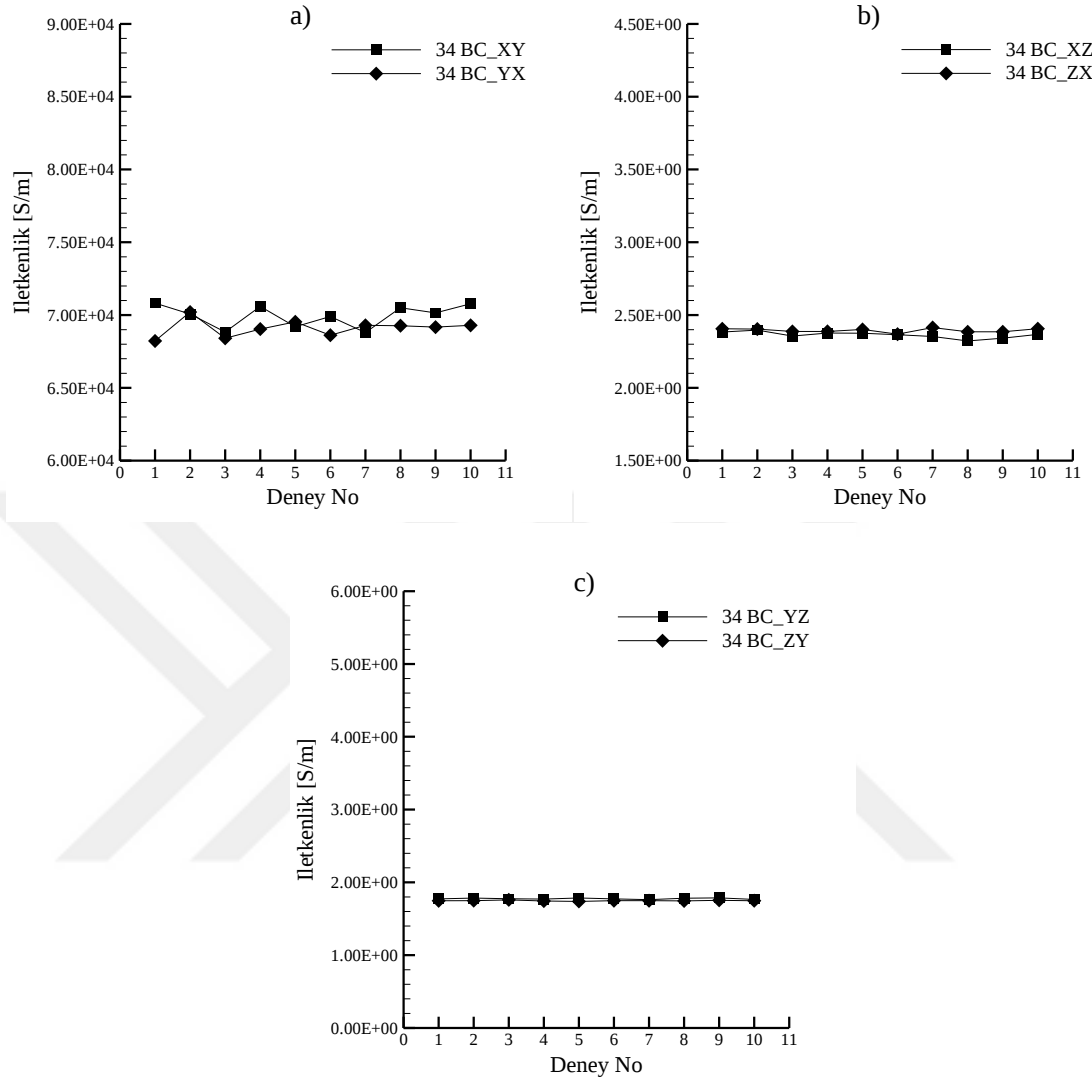
Şekil 13. MGDT'nin (34 BC) debilere göre anizotropik elektriksel iletkenlik değişimi;
a) XX, b) XY, c) XZ, d) YY, e) YZ, f) ZZ

4.1.5. Simetrik Eksenlerde Elektriksel İletkenlik Değerleri

Malzemelerin anizotropik yapıları, Şekil 10’da verilen matris formu gözönüne alınarak incelendiğinde, bazı iletkenlik değerlerinin (XY-YX, XZ-ZX ve YZ-ZY) birbirleriyle aynı ekseninde oldukları görülecektir. Aynı ekseninde olan numunelerin elektriksel iletkenlik değerleri incelenmiştir. GDT (34 BA) ve MGD (34 BC) için; %70 bağıl nem, 50°C sıcaklık ve azot gazının 2 lt/dk debiyle gönderildiği şartlar altında elektriksel direnç ölçüm deneyleri yapılmış ve iletkenlikler hesaplanarak kıyaslanmıştır.



Şekil 14. GDT (34 BA) için simetrik eksenlerde elektriksel iletkenlik değerleri; a) XY-YX eksen, b) XZ-ZX eksen, c) YZ-ZY eksen



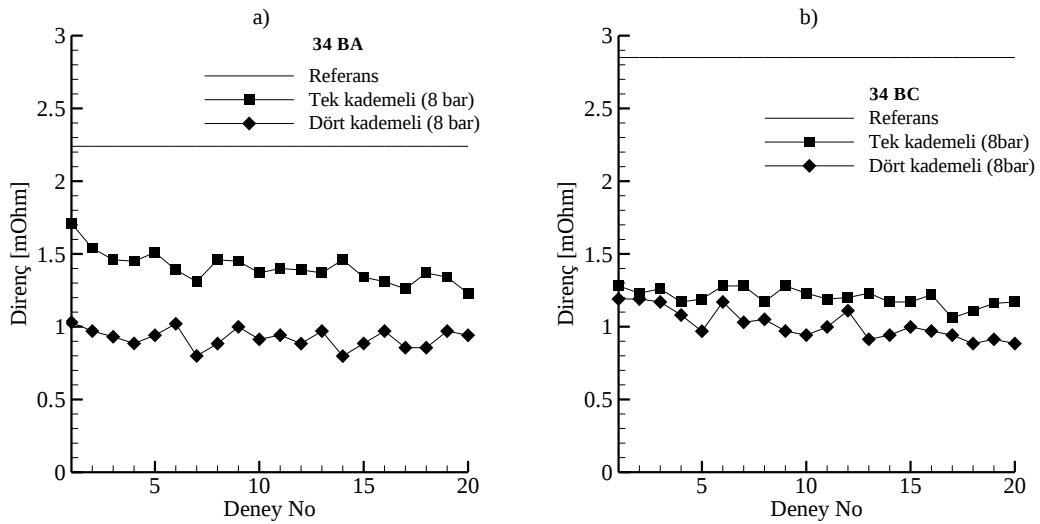
Şekil 15. MGDT için simetrik eksenlerde elektriksel iletkenlik değerleri; a) XY-YX eksen, b) XZ-ZX eksen, c) YZ-ZY eksen

Şekil 14 ve Şekil 15’de sırasıyla GDT ve MGDT için simetrik eksenlerdeki elektriksel iletkenlik değerlerinin değişim görülmektedir. Şekillerden de görüleceği üzere simetrik eksenler arasındaki iletkenlik değişimleri oldukça düşüktür. Bu sebeple, farklı çalışma şartları altında eksenlerden birisi için ölçüm yapıp simetriğindeki elektriksel iletkenliklere eşitlenmiştir.

4.2. Elektriksel Direnç ve İletkenlik Değerlerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi

4.2.1. Gözenekli ve Mikro-Gözenekli GDT için Direnç Kontrolü

Hazırlanan ölçüm sisteminin kontrolü için numunelerin direnç ölçüm sonuçları, teknik bilgi doküman verileriyle [33] kıyaslanmıştır. Teknik bilgi dokümanında numuneler 10 bar basınca sıkıştırılmıştır. Kontrol deneyleri ise laboratuvar imkânları dâhilinde 8 bar basınçta yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, tek kademede 8 bar basınca sıkıştırma ve kademeli olarak sıkıştırılıp (2,4,6 bar) son olarak 8 bar basınca sıkıştırma aşamasında alınan düzlem normalindeki elektriksel direnç ölçümlerinden oluşmaktadır. Referans değerler ise teknik bilgi dokümanında yer alan düzlem normalindeki elektriksel direnç değerlerini temsil etmektedir. Teknik bilgi dokümanında, GDT düzlem normalindeki alan direncinin $11 \text{ mOhm}\cdot\text{cm}^2$, MGDT düzlem normalindeki alan direncinin $14 \text{ mOhm}\cdot\text{cm}^2$ değerinin altında olması gerektiği belirtilmiştir. Bu değerler, kullanılan numunenin alanına (4.91 cm^2) bölündüğünde ise referans direnç değerlerinin GDT için 2.24 mOhm, MGDT için 2.85 mOhm olduğu hesaplanmıştır.



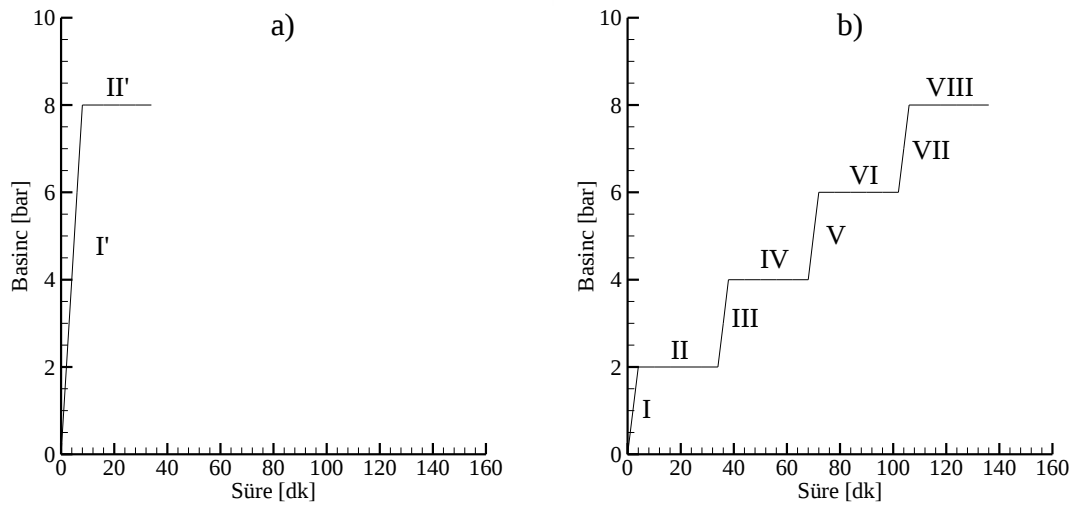
Şekil 16. Difüzyon tabakaları için deneysel doğrulama a) 34 BA (GDT) b) 34 BC (MGDT)

Şekil 16'da deneysel ölçüm sonuçlarının referans verileriyle kontrolü gösterilmiştir. Her iki gaz difüzyon tabakası için tek kademeli ve dört kademeli sıkıştırımayla 8 bar basınç uygulanan numunelerde ölçülen direnç değerlerinin referans direnç değerinden çok daha

düşük olduğu görülmektedir. Bu sonuçlarla birlikte tek kademeli ve dört kademeli sıkıştırma için elektriksel direnç ölçüm sisteminin kontrolü yapılmıştır.

4.2.2. Doğrudan ve Dört Kademeli Sıkıştırma Şartlarında Elektriksel İletkenlik Ölçüm Sonuçları

Bu bölümde, gaz difüzyon tabakalarına sıcaklık ve bağıl nem parametreleri uygulanmaksızın, sadece doğrudan ve kademeli sıkıştırma işlemlerinin elektriksel iletkenlik değerlerine etkisi incelenmiştir. Tek kademeli veya çok kademeli sıkıştırma işlemlerinin numuneleri oluşturan fiberlerin yapısını koruması veya bozulması üzerinde etkisi olabileceği düşünülmüş ve bu durum incelenmiştir. Tek kademeli sıkıştırma yönteminde, sıkıştırma basıncı birkaç dakika içinde istenilen basınca çıkmakta ve belirlenen süre dahilinde bu basınçta sabit tutulmuştur. Kademeli sıkıştırma yönteminde ise numune, belirlenen birkaç basınç kademesinde belirli süre aralıklarında tutulmuş nihai basınç değerine ulaşılmıştır.



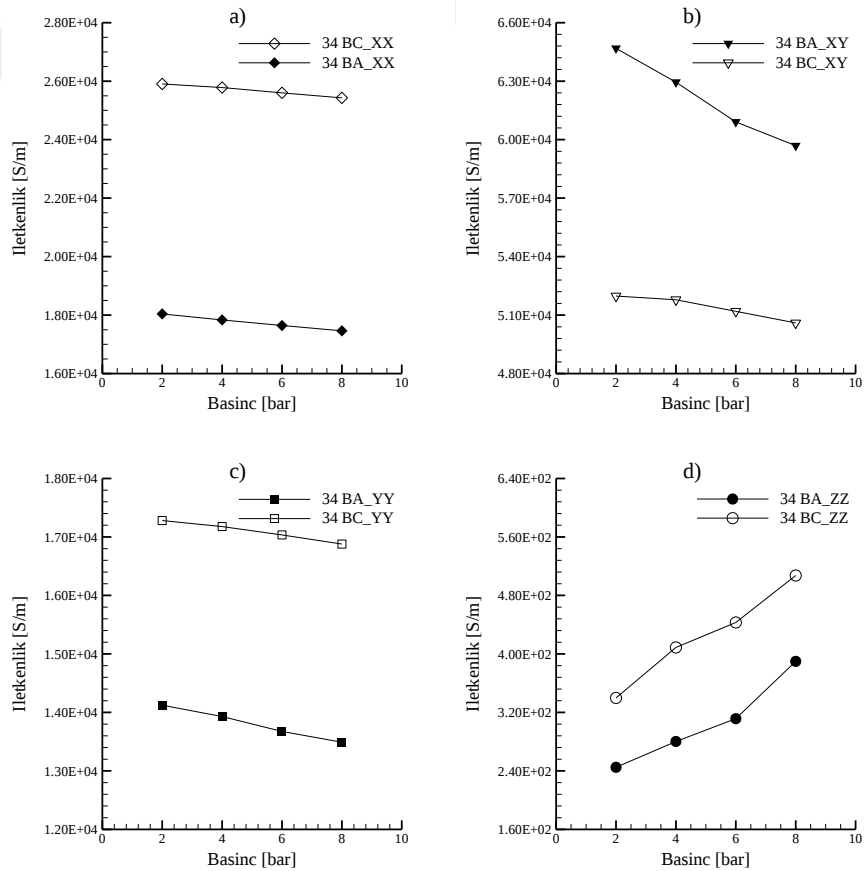
Şekil 17. Sıkıştırma Uygulamaları a) Doğrudan sıkıştırma, b) Dört kademeli sıkıştırma

Şekil 17’de deneyler sırasında doğrudan ve dört kademeli sıkıştırma işlemlerinde izlenen prosedür gösterilmiştir. Buna göre, doğrudan sıkıştırma işleminde, I’ numaralı bölgede gaz difüzyon tabakaları birkaç dakika içinde 8 bar basınca kadar sıkıştırılmış, II’ numaralı bölgede ise numune erişilen 8 bar basınçta 30 dk bekletilmiş arkasından elektriksel direnç ölçüm deneyleri yapılmıştır. Dört kademeli sıkıştırma basınçlarında

ise I, III, V ve VII numaralı bölgelerde sırasıyla 2, 4, 6 ve 8 bar basınçlara sıkıştırma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Sıkıştırma işlemleriyle ilgili bölgeler dışında kalan II, IV, VI, VIII numaralı bölgelerde numunenin yaklaşık 30 dk bu basınca maruz kalması sağlanmıştır. Numuneler farklı kademelerde sıkıştırıldıktan sonra alan ve kalınlığındaki değişimler ölçülmüştür. Yapılan ölçümler sonucunda numunelerin yüzey alanlarında değişim olmadığı ortaya konmuştur. Kalınlıklardaki değişimler ise Tablo 5’de gösterilmiş ve iletkenlik hesaplamalarında bu değerler kullanılmıştır.

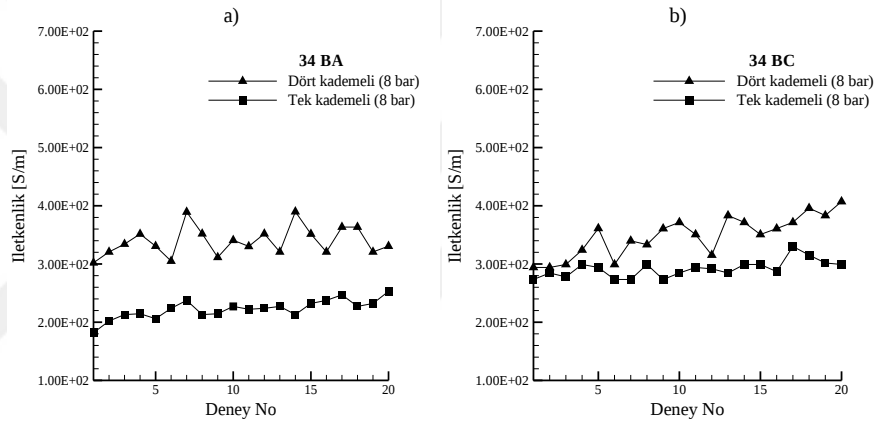
Tablo 5. GDT ve MGDТ’nin farklı sıkıştırma basınçları altında kalınlıkları

Numune	2 bar	4 bar	6 bar	8 bar
GDT	270 μm	267 μm	265 μm	263 μm
MGDT	320 μm	302 μm	296 μm	290 μm



Şekil 18. GDT ve MGDТ’ler için kademeli sıkıştırma ile ölçülen anizotropik elektriksel iletkenlik değerleri; a) XX, b) XY, c) YY, d) ZZ

Şekil 18’de görüldüğü üzere sıkıştırma basıncı kademeli olarak arttıkça GDT ve MGDT’ler için düzlem yüzeyi doğrultularında (XX, XY, YY) elektriksel iletkenlik düşmektedir. Sıkıştırma basıncındaki artışın düzlem yüzeyindeki fiberleri kırdığı ve bu durumun numunenin ilgili doğrultularda elektriksel iletkenliklerin düşüşüne sebep olduğu düşünülmüştür. Düzlem normali doğrultusunda (ZZ) ise sıkıştırma basıncı arttıkça her iki GDT için elektriksel iletkenlik yükselmektedir. Sıkıştırma basıncı arttıkça düzlem normali doğrultusunda komşu halde bulunan fiberlerin birbirine yaklaştığı ve elektronların daha kolay transfer edilebildiği dolayısıyla elektriksel iletkenliklerin arttığı düşünülmektedir.



Şekil 19. Tek ve dört kademeli sıkıştırma koşullarında düzlem normalindeki elektriksel iletkenlik değerleri a) GDT (34 BA), b) MGDT (34 BC)

Şekil 19’de GDT ve MGDT için tek ve dört kademeli sıkıştırma uygulandığı durumda düzlem normalindeki iletkenlik değerlerinin karşılaştırılması gösterilmiştir. Her iki GDT için dört kademeli sıkıştırma işlemi numunelerin elektriksel iletkenliklerini daha fazla yükseltmiştir. Bununla birlikte kademeli sıkıştırma işlemi etkisinin GDT’de daha yüksek olduğu görülmektedir. Çalışma şartlarına göre direnç ölçümleri yapılırken kademeli sıkıştırma referans alınmıştır.

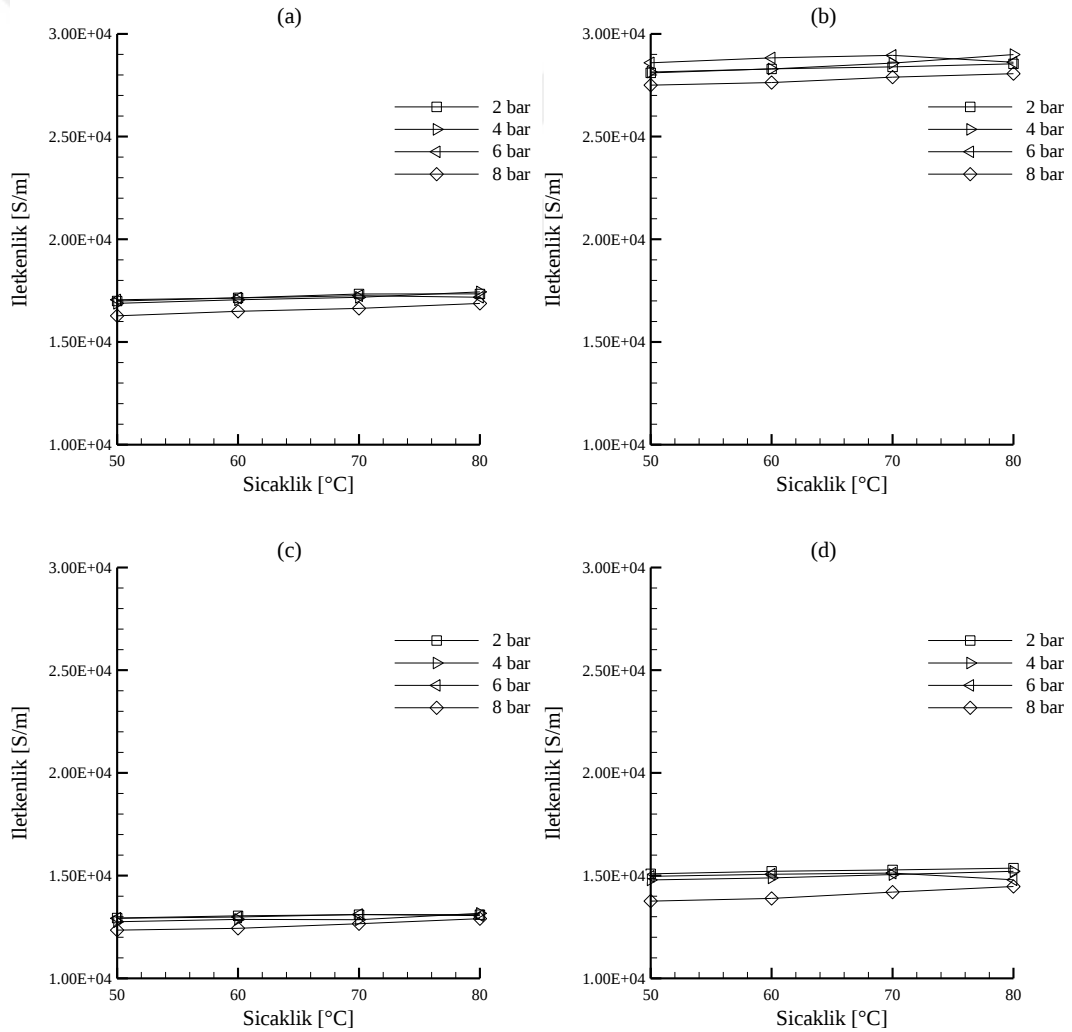
4.3. Elektriksel İletkenlik Değerlerinin Çalışma Şartlarına Göre Deneysel Belirlenmesi

GDT ve MGDT’lerin farklı çalışma koşullarında elektriksel iletkenlik değerlerinin belirlenebilmesi için deneysel çalışma yapılmıştır. İletkenlik ölçümlerinde, farklı sıcaklıklar (50°C, 60°C, 70°C, 80°C), farklı bağıl nem koşulları (%70, %80, %90,

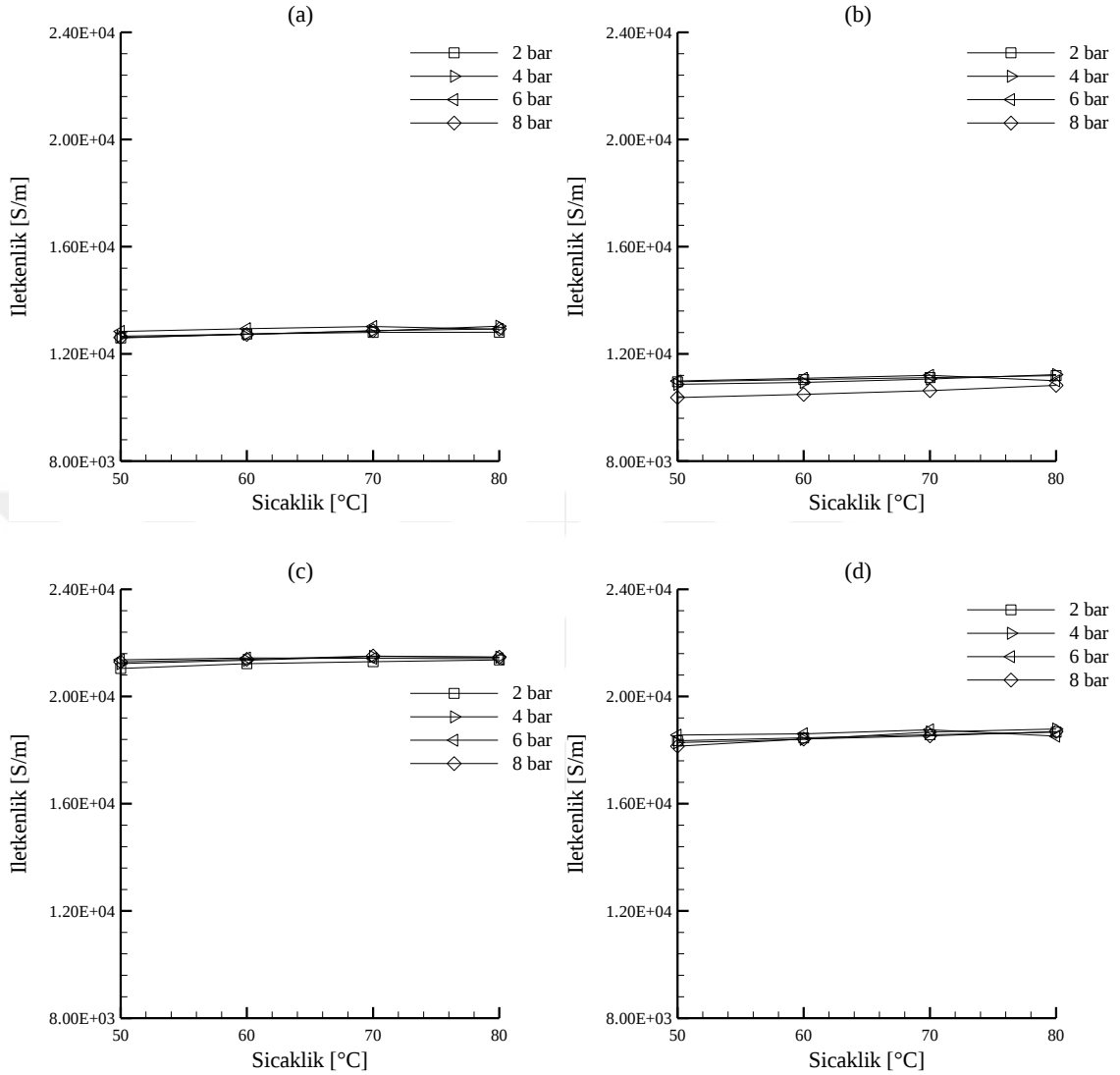
%100) ve farklı sıkıştırma basınçları (2, 4, 6 ve 8 bar) uygulanmıştır. Bu koşulların farklı kombinasyonlarıyla elde edilen sonuçlar bu başlık altında gösterilmiştir.

4.3.1. Gözenekli ve Mikro-Gözenekli Gaz Difüzyon Tabakası İletkenliklerinin Sabit Bağıl Nemde Sıcaklık ve Sıkıştırma Basıncına Göre Değişimi

Gözenekli (34 BA) ve mikro-gözenekli (34 BC) gaz difüzyon tabakalarının elektriksel iletkenlik değişimleri, sabit bağıl nem koşulunda sıcaklık ve sıkıştırma basıncının değişimine göre incelenmiştir. Şekil 20-25'deki grafikler belirtilen koşullar altında elektriksel iletkenlik değişimlerini göstermektedir.

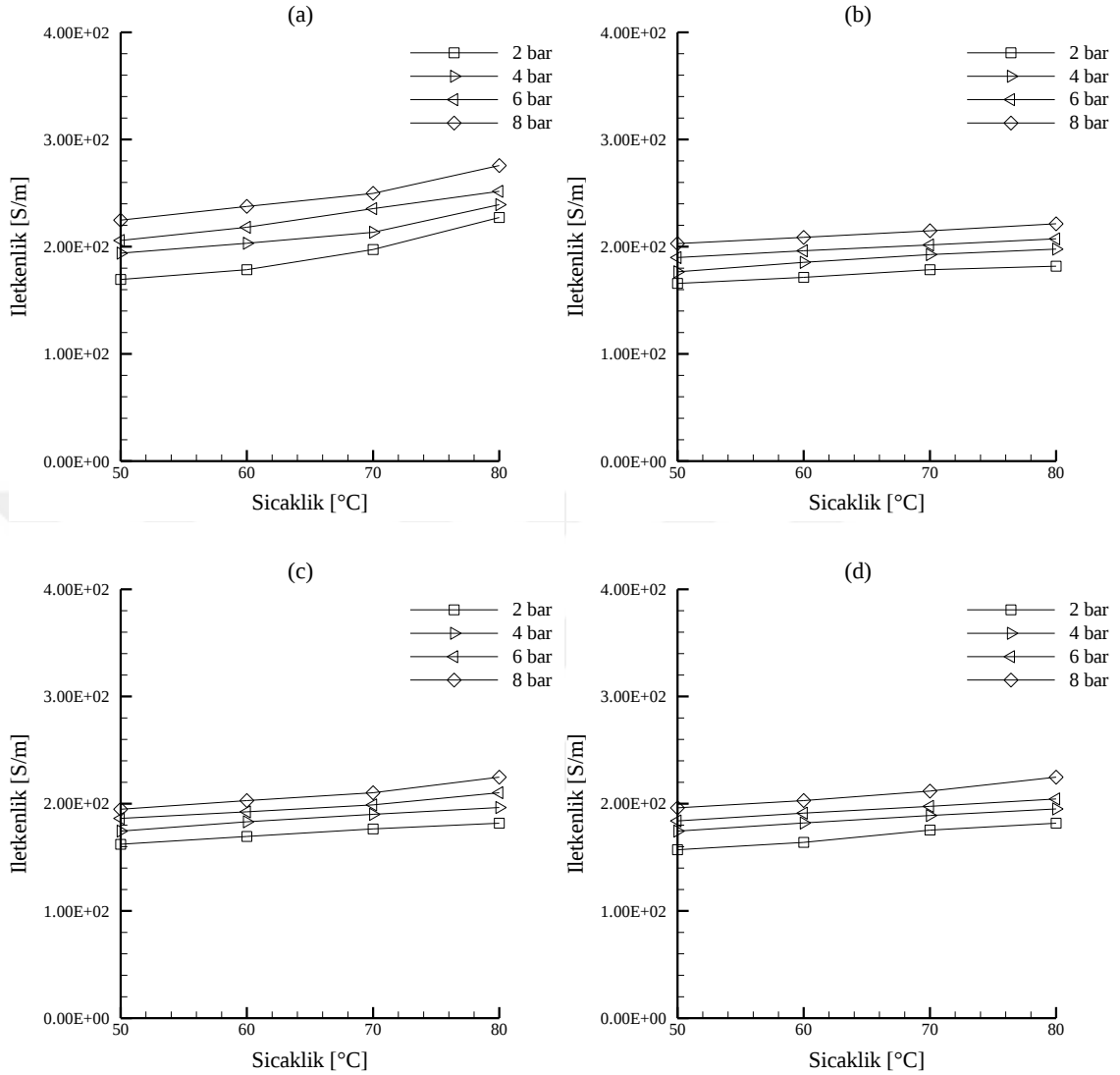


Şekil 20. Gözenekli Gaz Difüzyon Tabakası (34 BA) için XX doğrultusunda sabit bağıl nemde sıcaklık ve sıkıştırma basıncına göre iletkenlik değişimi; (a) %70 RH, (b) % 80 RH, (c) % 90 RH, (d) % 100 RH



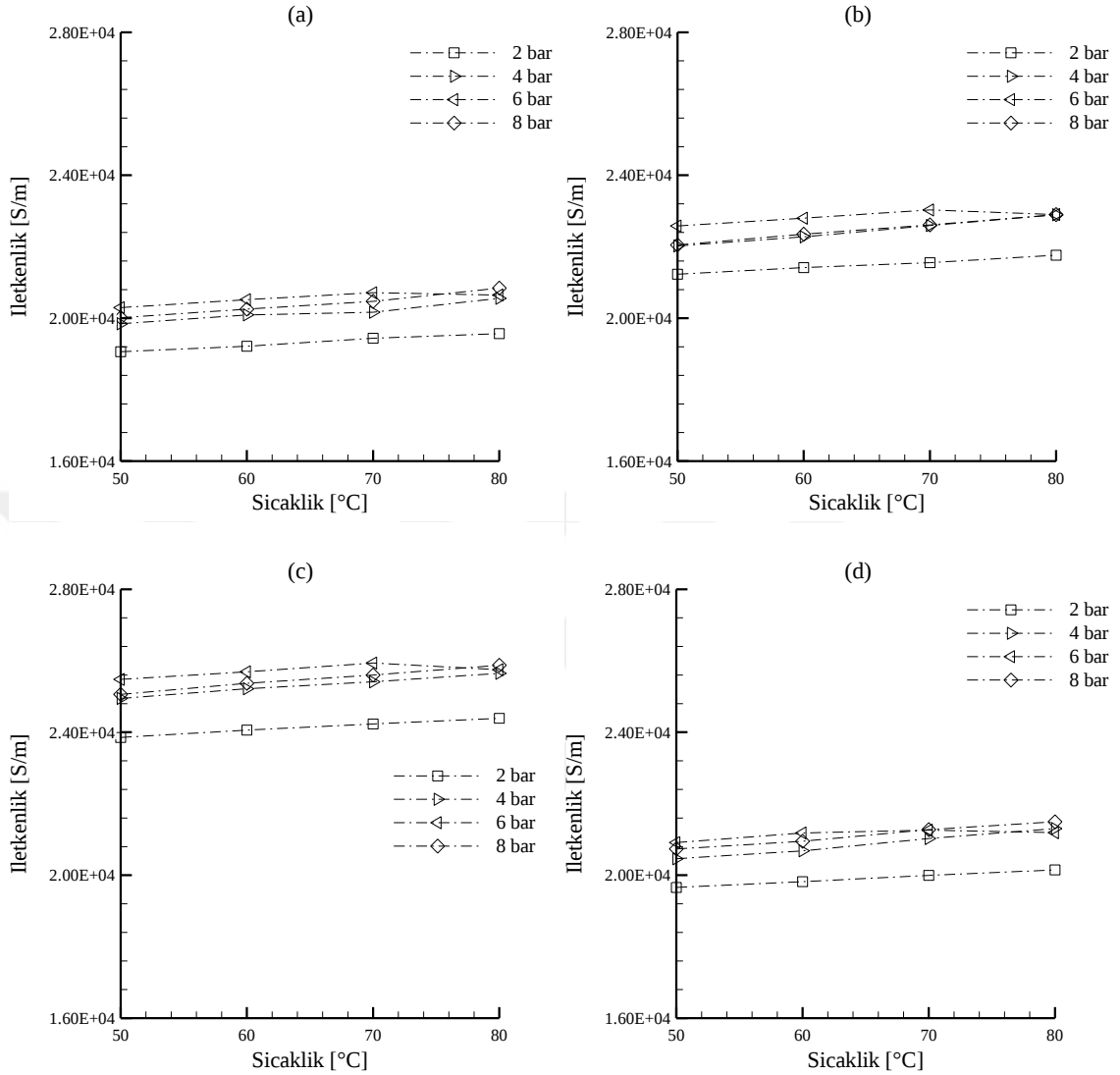
Şekil 21. Gözenekli Gaz Difüzyon Tabakası (34 BA) için YY doğrultusunda sabit bağıl nemde sıcaklık ve sıkıştırma basıncına göre iletkenlik değişimi; (a) %70 RH, (b) % 80 RH, (c) % 90 RH, (d) % 100 RH

GDT için düzlem yüzeyinin X ve Y doğrultusundaki elektriksel iletkenliklerin sabit bağıl nemde sıcaklık ve sıkıştırma basıncına göre değişimi sırasıyla Şekil 20 ve Şekil 21’de gösterilmiştir. Sıkıştırma basıncının düzlem yüzeyinin X ve Y doğrultularındaki iletkenlikleri üzerine çok düşük bir etkisinin olduğu görülmüştür. Bununla birlikte sıcaklık değeri arttıkça elektriksel iletkenlik değerlerinde minimal düzeyde artışlar gerçekleşmiştir. Bunun sebebi, ısınan fiberlerin içinden akan elektronların kinetik enerjilerinin artmasıdır.



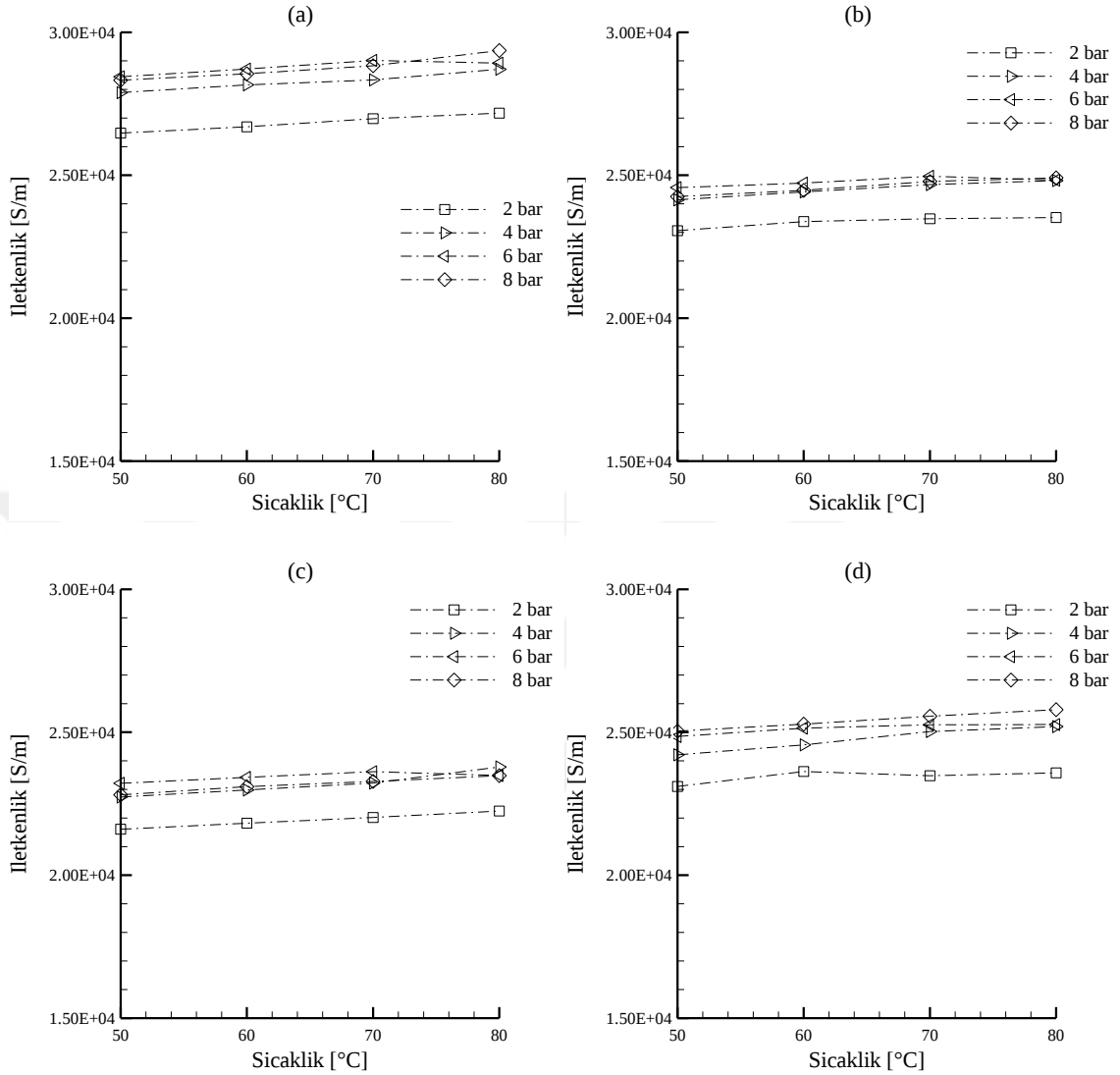
Şekil 22. Gözenekli Gaz Difüzyon Tabakası (34 BA) için ZZ doğrultusunda sabit bağıl nemde sıcaklık ve sıkıştırma basıncına göre iletkenlik değişimi; (a) %70 RH, (b) % 80 RH, (c) % 90 RH, (d) % 100 RH

Şekil 22’de GDT için düzlem normalinde iletkenliklerin sabit bağıl nemde sıcaklık ve sıkıştırma basıncına göre değişimi incelenmiştir. Sıkıştırma basıncının artışıyla GDT’deki fiberlerin birbirine yaklaşması ve kalınlığın azalması sonucunda elektronların izlediği yol kısalmakta ve iletkenlik artmaktadır. Sıcaklık arttıkça düzlem normalindeki elektriksel iletkenlikler artmaktadır. Bunun sebebi düzlem yüzeyinde olduğu gibi fiberlerin ısınması ve içinden akan elektronların kinetik enerjilerinin artmasıdır. Bu etkilerin altında en yüksek elektriksel iletkenlik değeri 275 Sm^{-1} ile %70 bağıl nem, 80°C ve 8 bar sıkıştırma basıncı koşullarında görülmüştür.



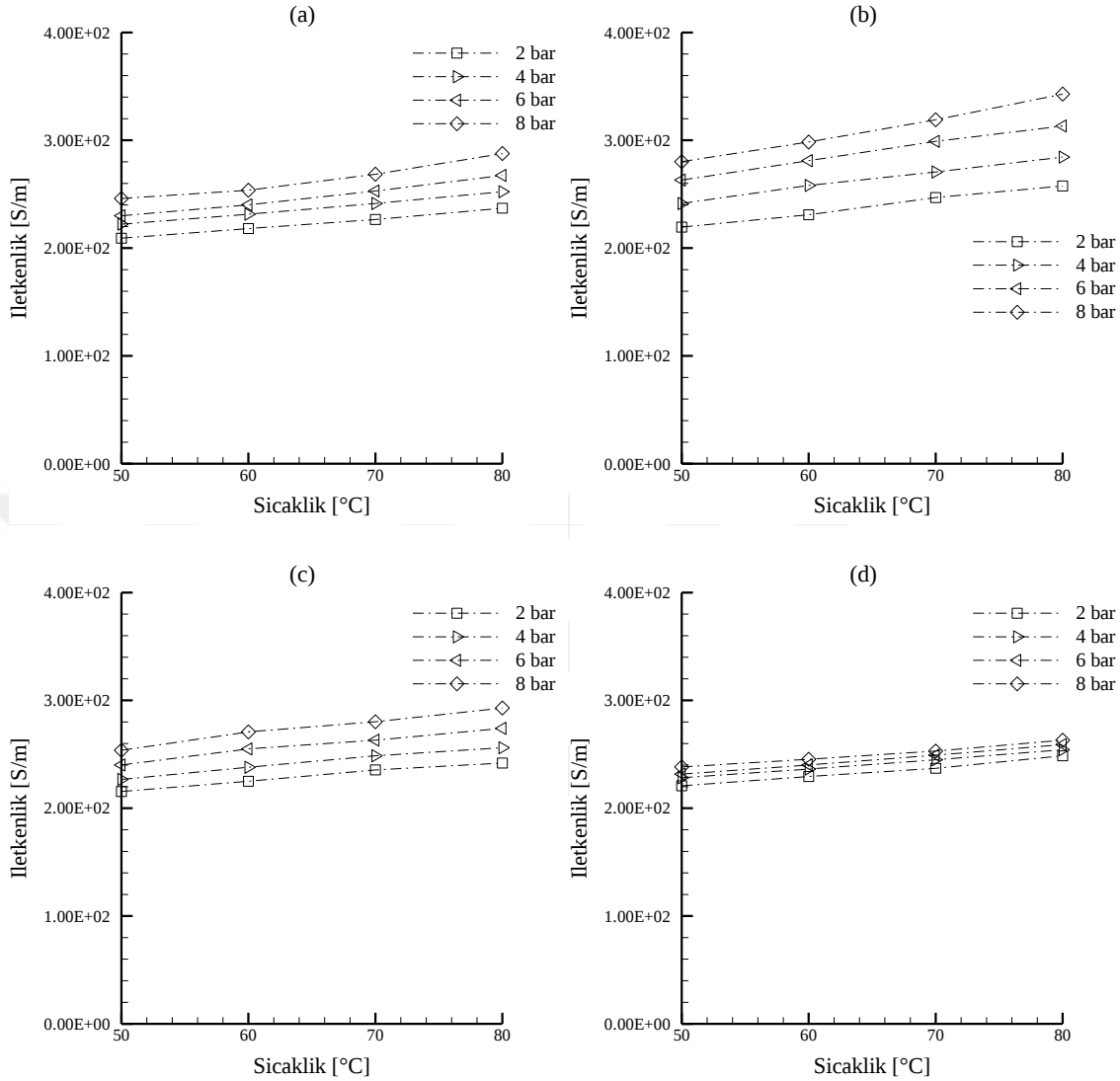
Şekil 23. MGD (34 BC) için XX doğrultusunda sabit bağıl nemde sıcaklık ve sıkıştırma basıncına göre iletkenlik değişimi; (a) %70 RH, (b) % 80 RH, (c) % 90 RH, (d) % 100 RH

MGD için düzlem yüzeyinin X doğrultusundaki iletkenliklerin sabit bağıl nemde sıcaklık ve sıkıştırma basıncına göre değişimi Şekil 23’de gösterilmiştir. GDT’de olduğu gibi MGD’de de sıcaklığın artışı elektriksel iletkenlikler düşük seviyede artırmıştır. Sıkıştırma basıncının etkisi incelendiğinde 2 bar’dan yüksek sıkıştırma basınçlarında (4,6 ve 8 bar) elektriksel iletkenliklerin düşük oranda değiştiği görülmektedir. En yüksek iletkenlik değeri %80 bağıl nem, 8 bar ve 80°C koşulunda $2.8 \cdot 10^4 \text{ Sm}^{-1}$ olarak ölçülmüştür.



Şekil 24. MGD (34 BC) için YY doğrultusunda sabit bağıl nemde sıcaklık ve sıkıştırma basıncına göre iletkenlik değişimi; (a) %70 RH, (b) %80 RH, (c) %90 RH, (d) %100 RH

Şekil 24’de MGD için düzlem yüzeyinin Y doğrultusundaki iletkenliklerin sabit bağıl nemde sıcaklık ve sıkıştırma basıncına göre değişimi incelenmiştir. Sabit sıcaklık ve bağıl nem koşullarında sıkıştırma basıncı 2 bar’dan 4 bar’a çıktığında iletkenlik düşük oranda artmışken bu basınç değerinden sonra kayda değer şekilde değişmemiştir. Sıcaklığın artmasıyla birlikte elektriksel iletkenlik her sıkıştırma basıncında kısmen artış göstermiştir.

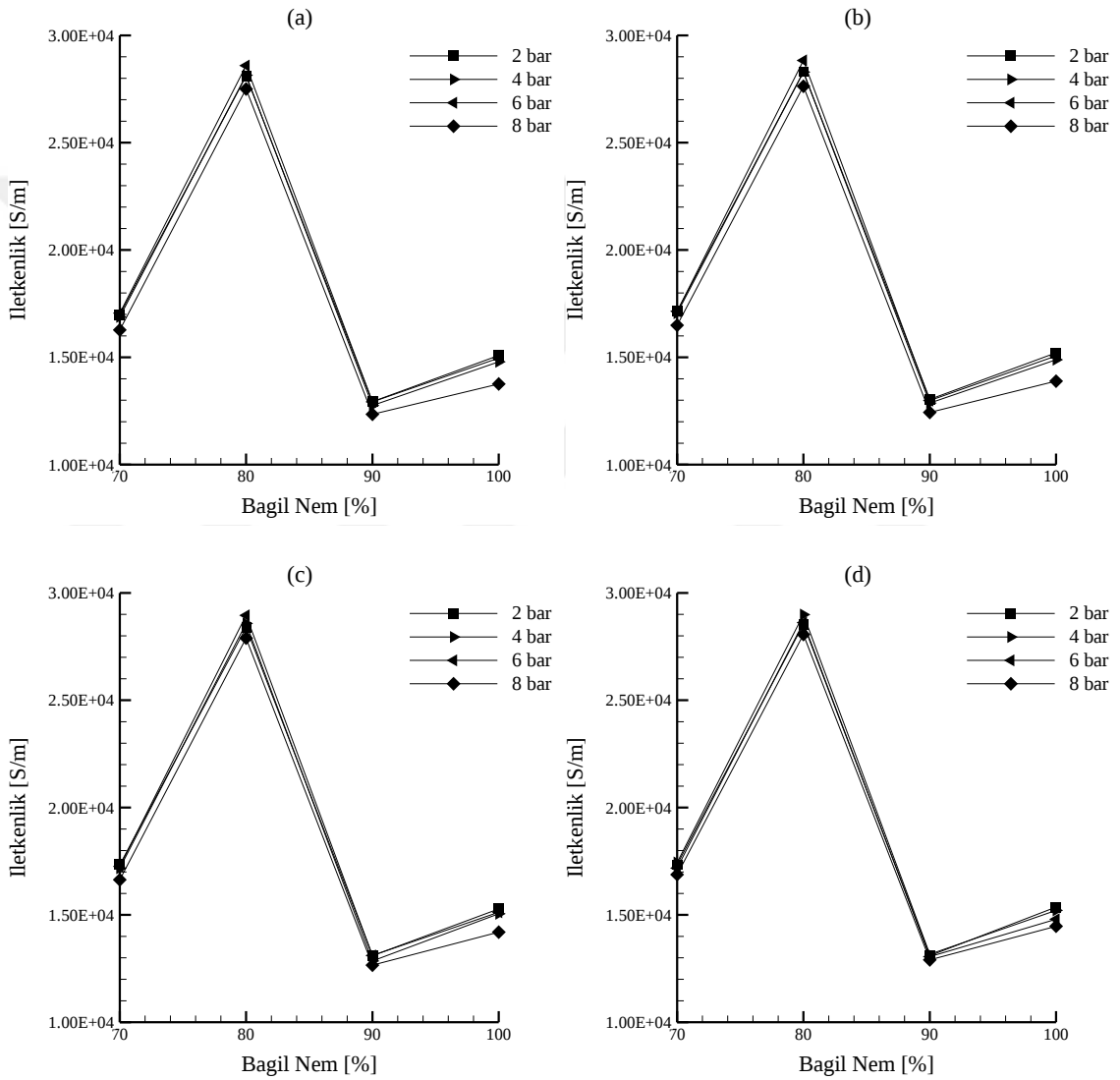


Şekil 25. MGDT (34 BC) için ZZ doğrultusunda sabit bağıl nemde sıcaklık ve sıkıştırma basıncına göre iletkenlik değişimi; (a) %70 RH, (b) % 80 RH, (c) % 90 RH, (d) % 100 RH

MGDT için düzlem normali doğrultusundaki iletkenliklerin sabit bağıl nemde sıcaklık ve sıkıştırma basıncına göre değişimi Şekil 25’de gösterilmiştir. Sıkıştırma basıncı arttıkça tüm sıcaklık ve bağıl nem koşullarında elektriksel iletkenlik artmıştır. GDT’de olduğu gibi MGDT’de de sıkıştırma basıncının artışı fiberleri birbirlerine yakınlıştırmış ve elektronların transferinde karşılaşacağı direnci düşmüştür. Sıcaklık arttıkça ısınan fiberlere temas eden elektronların kinetik enerjileri yükselmiş ve iletkenliklerinin artmıştır. MGDT’nin düzlem normalindeki iletkenlik değeri %80 bağıl nem, 80°C ve 8 bar koşullarında 343 Sm^{-1} olarak ölçülmüştür.

4.3.2. Gözenekli ve Mikro-Gözenekli Gaz Difüzyon Tabakası İletkenliklerinin Sabit Sıcaklıkta Bağlı Neme Göre Değişimi

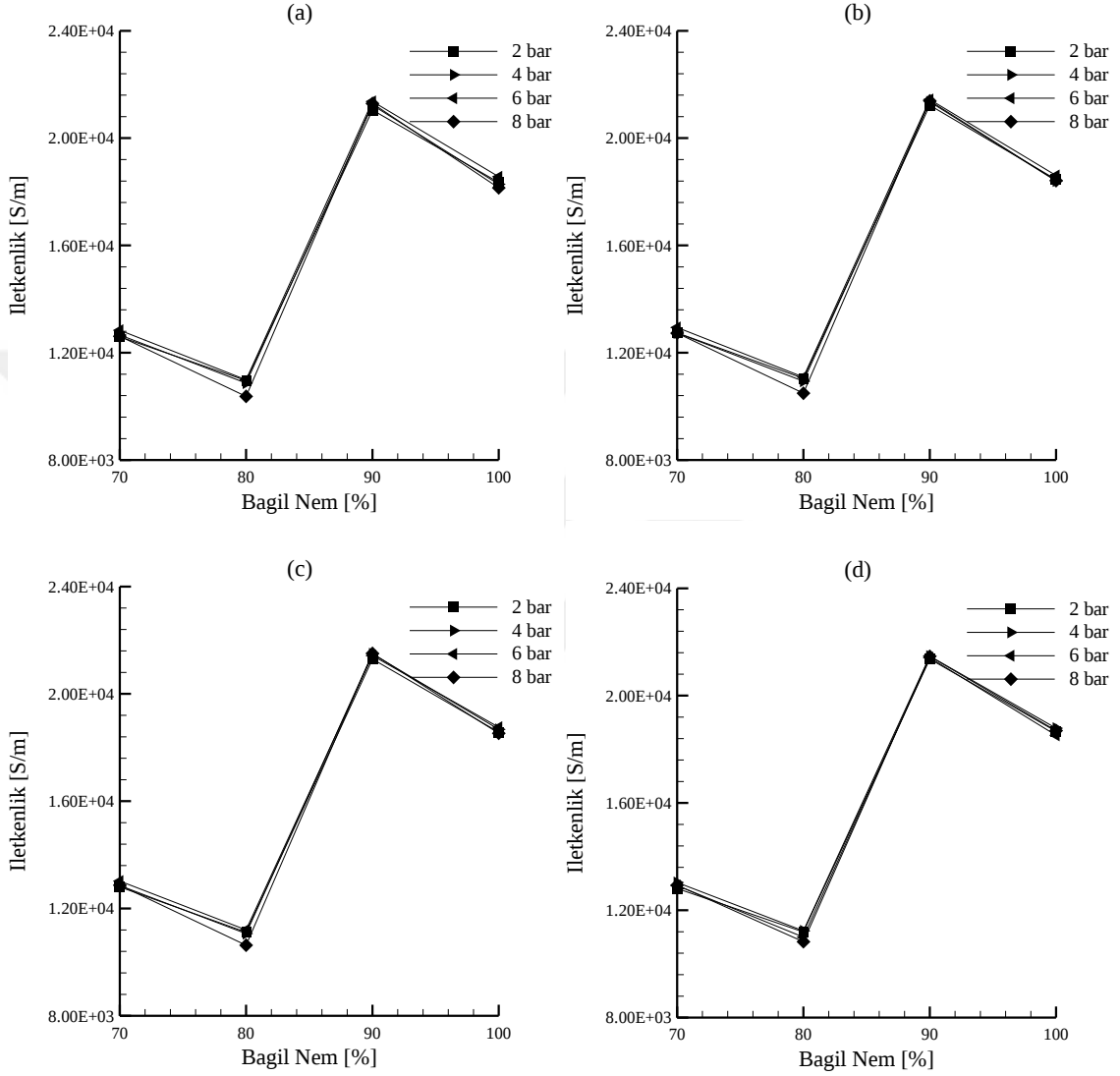
Gözenekli (34 BA) ve mikro-gözenekli (34 BC) gaz difüzyon tabakalarının elektriksel iletkenlik değişimleri, sabit sıcaklık koşulunda bağlı nem ve sıkıştırma basıncının değişimine göre incelenmiştir.



Şekil 26. Gözenekli Gaz Difüzyon Tabakası (34 BA) için XX doğrultusunda sabit sıcaklıkta bağlı neme göre iletkenlik değişimi; (a) 50°C, (b) 60°C, (c) 70°C, (d) 80°C

Şekil 26’de GDT için düzlem yüzeyinin X doğrultusundaki iletkenliklerin sabit sıcaklık koşulunda bağlı neme göre değişimi gösterilmiştir. Bağlı nemin elektriksel iletkenliği artırmasıyla GDT’yi oluşturan fiberlerin şişmesi ve deforme olmasıyla iletkenliğin

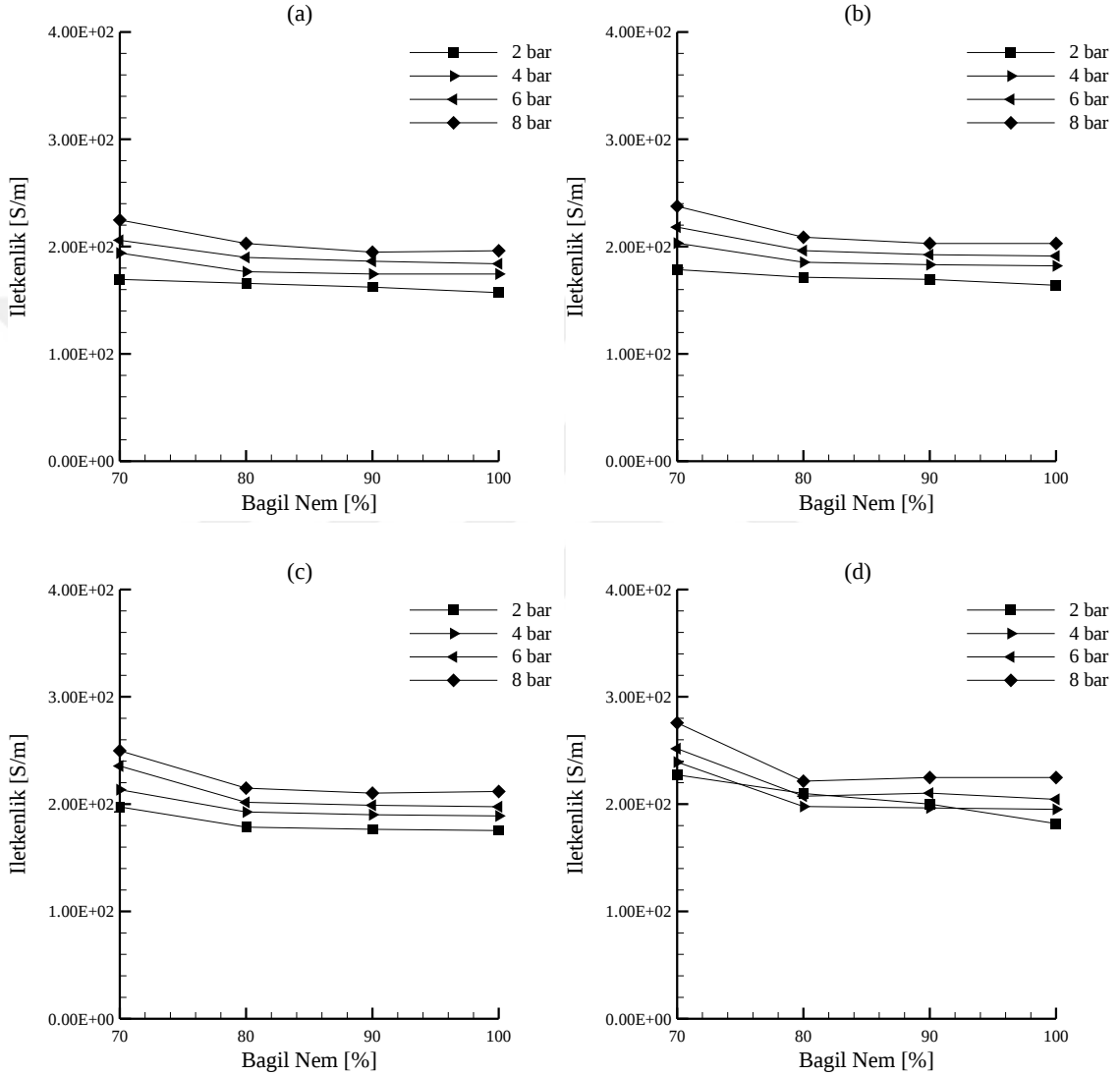
olumsuz etkilendiği düşünülmektedir. Tüm sabit sıcaklık koşulları için en yüksek iletkenlikler %80 BN koşulunda görülmüştür.



Şekil 27. Gözenekli Gaz Difüzyon Tabakası (34 BA) için YY doğrultusunda sabit sıcaklıkta bağıl neme göre iletkenlik değişimi; (a) 50°C, (b) 60°C, (c) 70°C, (d) 80°C

GDT için düzlem yüzeyinin Y doğrultusundaki iletkenliklerin sabit sıcaklık koşulunda bağıl neme göre değişimi Şekil 27’de gösterilmiştir. Bağıl nem seviyesi %70’den %80’e çıkarıldığında elektriksel iletkenlik düşmüş, %90’a çıkarıldığında ise her sıcaklık için en yüksek iletkenlik değerleri görülmüştür. Bağıl nem artışının fiberleri nemlendirmesi ve nemlenen fiberlerin elektron akışına karşı direncinin düşmesi beklenen durumdur. Ancak bağıl nem artışıyla birlikte fiberlerin şişmesi sonucunda elektronların karşılaştığı

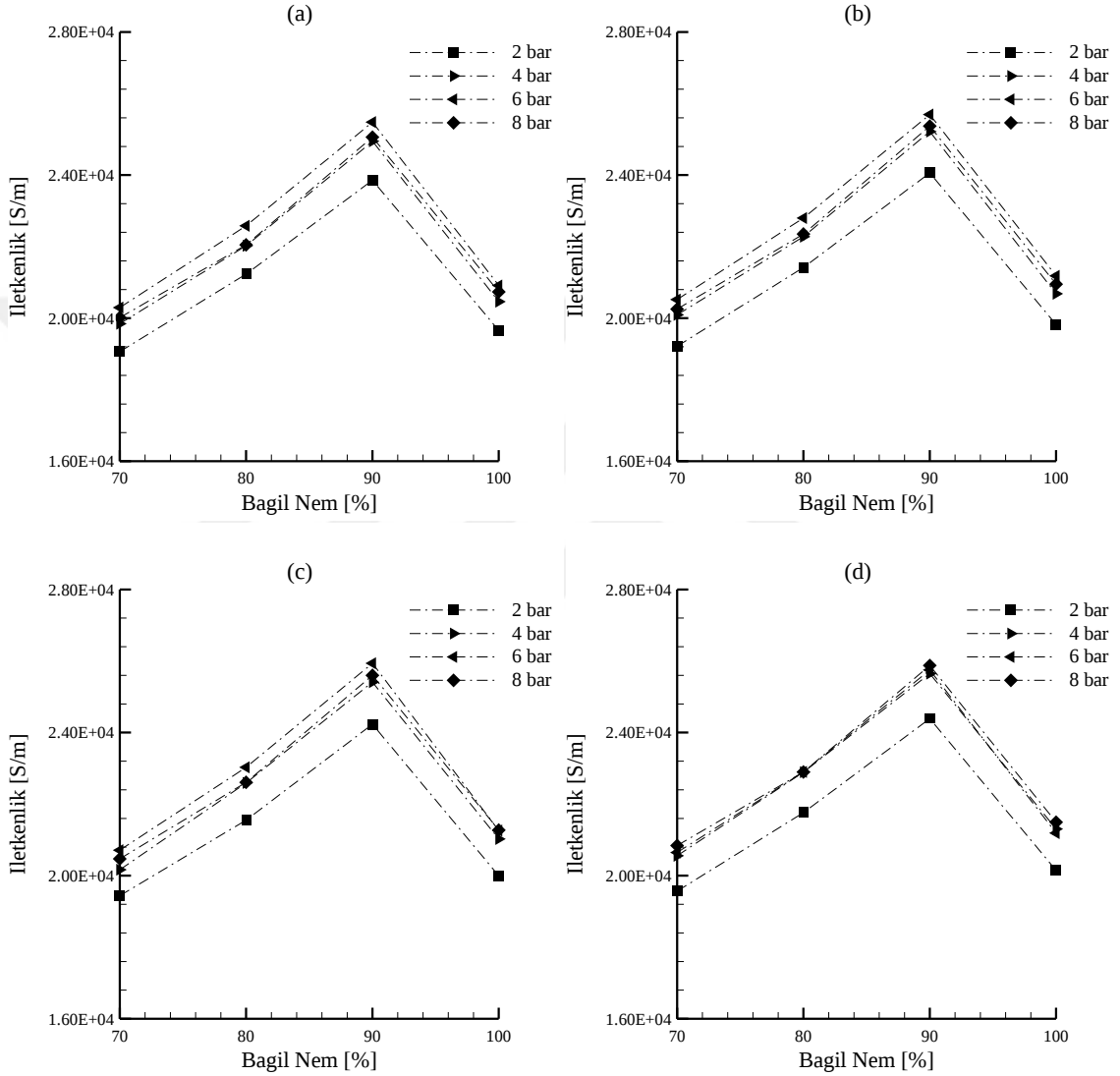
direnç değerleri artmıştır. Uygulanmış olan koşullar altında en yüksek iletkenlik değeri 80°C, %90 BN ve 8 bar sıkıştırma basıncında $2.1 \cdot 10^4 \text{ Sm}^{-1}$ olarak ölçülmüştür.



Şekil 28. Gözenekli Gaz Difüzyon Tabakası (34 BA) için ZZ doğrultusunda sabit sıcaklıkta bağıl neme göre iletkenlik değişimi; (a) 50°C, (b) 60°C, (c) 70°C, (d) 80°C

Şekil 28'de GDT için düzlem normali doğrultusundaki iletkenliklerin sabit sıcaklık koşulunda bağıl neme göre değişimi gösterilmiştir. Tüm sıcaklık değerleri için en yüksek iletkenlik değeri bağıl nemin %70, sıkıştırma basıncının 8 bar olduğu durumlarda görülmüştür. Bağıl nemin %80, %90 ve %100 olduğu durumlarda ise tüm sıcaklık koşullarında (50, 60, 70 ve 80°C) elektriksel iletkenliklerin büyük oranda

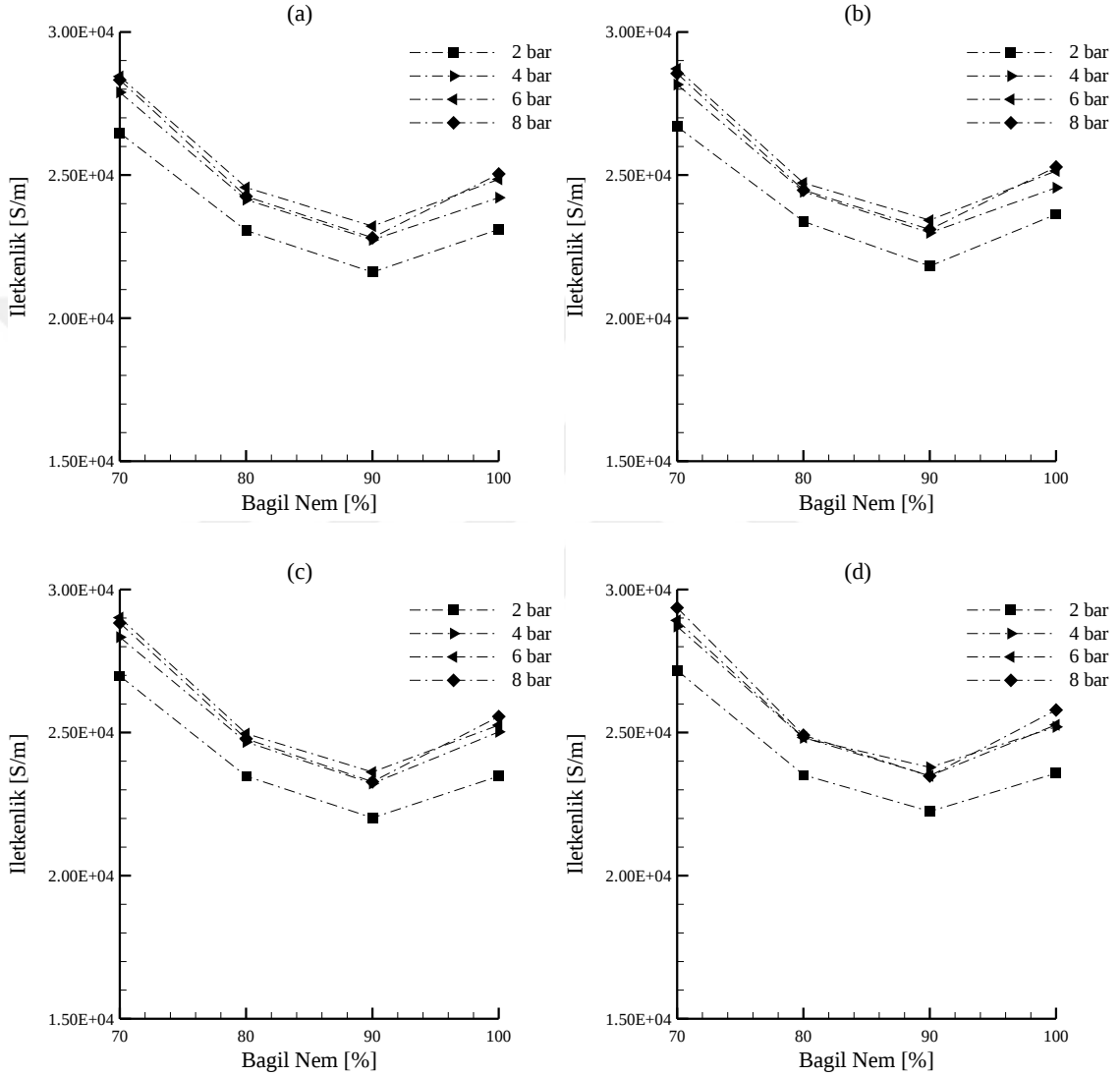
değişmemiştir. En düşük iletkenlik değeri 50°C, %100 BN ve 2 bar koşullarında 157 Sm^{-1} olarak ölçülmüştür. En yüksek iletkenlik değeri 80°C, %80 BN ve 8 bar koşullarında 275 Sm^{-1} olarak ölçülmüştür.



Şekil 29. MGDТ (34 BC) için XX doğrultusunda sabit sıcaklıkta bağıl neme göre iletkenlik değişimi; (a) 50°C, (b) 60°C, (c) 70°C, (d) 80°C

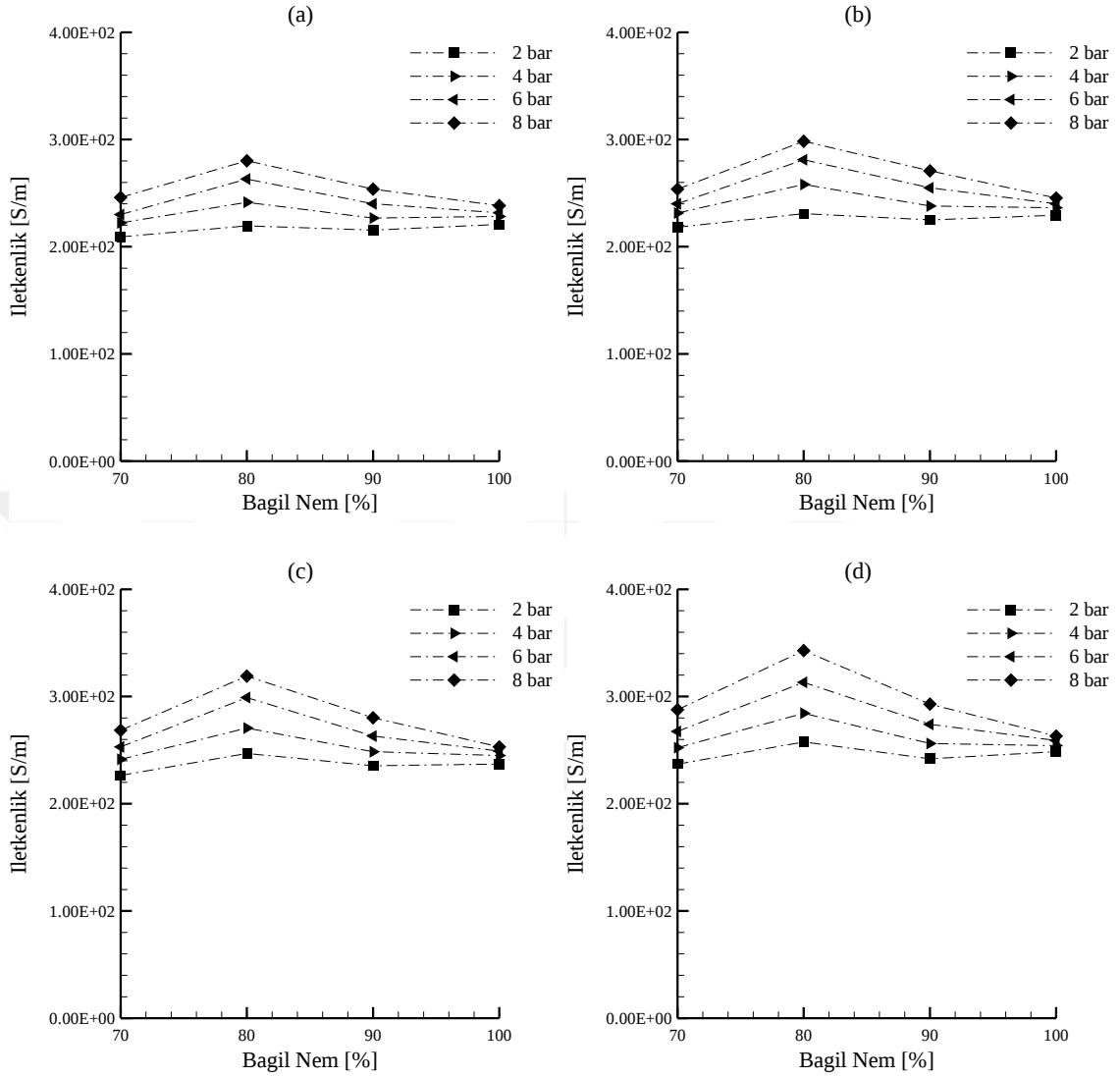
MGDТ için düzlem yüzeyinin X doğrultusundaki elektriksel iletkenliklerin sabit sıcaklık koşulunda bağıl neme göre değişimi Şekil 29'da gösterilmiştir. Bağıl nem, GDT'nin fiberlerinde de nemlenmeye sebep olacaktır. Nemli fiberler içinden akan elektronların ise düşen elektriksel direnç ile birlikte daha kolay transfer olacağı bilinmektedir. Ancak GDT'deki aşırı nemlenmenin karbon fiber yapıları şişirebileceği

veya morfolojik yapılarını bozabileceği unutulmamalıdır. Bağlı nem %70'den %90'a arttıkça bu doğrultudaki elektriksel iletkenlik değerleri yükselmiştir. Ardından deformasyonların oluşmasıyla %100 bağlı nemde elektriksel iletkenlikler düşmüştür.



Şekil 30. MGD (34 BC) için YY doğrultusunda sabit sıcaklıkta bağlı nem ve sıkıştırma basıncına göre iletkenlik değişimi; (a) 50°C, (b) 60°C, (c) 70°C, (d) 80°C

Şekil 30'de MGD için düzlem yüzeyinin Y doğrultusundaki iletkenliklerin sabit sıcaklık koşulunda bağlı neme göre değişimi incelenmiştir. Bu doğrultudaki en yüksek iletkenlik değerleri %70 bağlı nem değerinde gözlenmiştir. Ayrıca sıkıştırma basıncının artışıyla düzlem yüzeyindeki fiberlerin deformasyona uğradığı ve iletkenliklerin düştüğü görülmektedir.



Şekil 31. MGD (34 BC) için ZZ doğrultusunda sabit sıcaklıkta bağıl nem ve sıkıştırma basıncına göre iletkenlik değişimi; (a) 50°C, (b) 60°C, (c) 70°C, (d) 80°C

MGDT için düzlem yüzeyinin Z doğrultusundaki iletkenliklerin sabit sıcaklık koşulunda bağıl neme göre değişimi Şekil 31’de gösterilmiştir. Tüm sıcaklık değerleri için en yüksek elektriksel iletkenlik değeri %80 bağıl nem koşulunda görülmüştür. %70 bağıl nem değerinden %80’e çıkıldığında elektriksel iletkenliklerin arttığı, %90 ve %100 bağıl nem koşullarında ise kayda değer şekilde değişmediği gözlenmiştir. Bu durum GDT ve MGD’de de olduğu gibi bağıl nemin artışı belirli seviyeye kadar iletkenlikleri artırmış, daha sonrada fiberleri şişirip deforme olmasına sebep olarak iletkenliği olumsuz etkilemiştir.

GDT ve MGDТ için direnç ölçüm sonuçları incelendiğinde;

- Düzlem yüzeyindeki elektriksel iletkenliklerin, sıcaklık ve sıkıştırma basıncından kayda değer şekilde etkilenmedikleri görülmüştür. Ancak bağıl nemin düzlem yüzeyindeki elektriksel iletkenlikler üzerinde dominant davranış sergilediği ortaya çıkmıştır.
- Düzlem normalindeki elektriksel iletkenliklerin, sıcaklık ve sıkıştırma basıncının artışıyla doğrusal şekilde arttığı görülmüştür. Bağıl nem değişiminin düzlem normalindeki elektriksel iletkenlikleri önemli oranda etkilemediği görülmüştür.



5. BÖLÜM

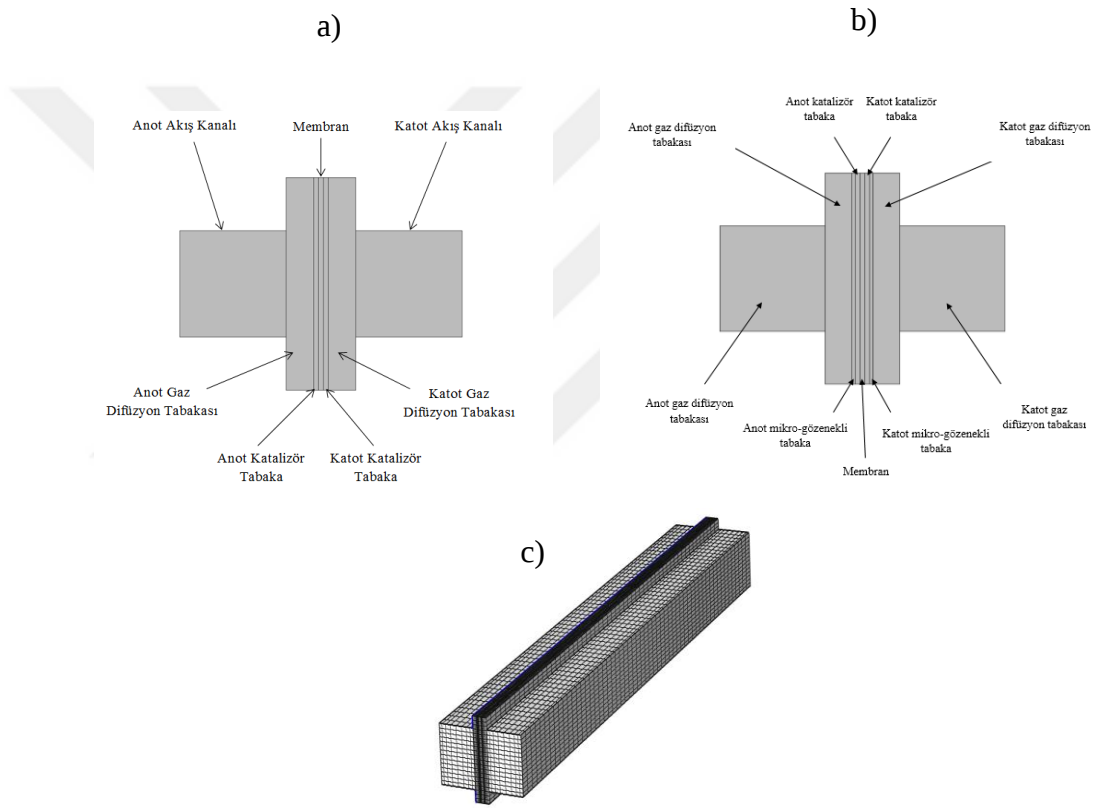
PEM TİPİ YAKIT HÜCRESİNİN ÜÇ BOYUTLU ANİZOTROPİK MODELLENMESİ

Matematiksel modelleme yöntemi, farklı mühendislik alanlarında performans, mukavemet, karakteristik özellikler gibi konularda sonuçlar veren çalışma yöntemidir. Matematiksel model çalışmaları, modelin doğruluğunun kanıtlanması için deneysel verilerle doğrulanması gerekmektedir. Doğrulanmış matematiksel model üzerinde yapılan analizler, deneysel çalışmalar gerektirmeyeceği için maliyet, zaman ve iş yükü kazancı sağlarlar. Ayrıca deneysel ortamda analizi sağlanamayan parametrelerle ilgili olarak sonuçlar ortaya koyabildiği için akademik ve ticari uygulama alanlarında kullanıcıya avantajlar sağlamaktadır. Matematiksel modelde kullanılan parametrelerin gerçeğe yakın olması ise model çalışmaları ile gerçekte elde edilecek veriler arasındaki tutarlılığı artıracaktır.

Bir önceki bölüm kapsamında, gözenekli ve mikro-gözenekli gaz difüzyon tabakalarına ait farklı çalışma koşullarında elektriksel dirençler ölçülmüş ve bu değerler kullanılarak elektriksel iletkenlikler hesaplanmıştır. Bu bölümde ise Comsol 4.2a yazılımı kullanılarak üç boyutlu PEM tipi yakıt hücresi için iki ayrı model hazırlanmıştır. İki ayrı modelin birbirinden farkı birinci model 7 farklı hesaplama alanından oluşurken ikincisi MGDT'nin de yer aldığı 9 farklı hesaplama alanından oluşmaktadır. Hesaplanan elektriksel iletkenlik değerleri modele entegre edilerek elektriksel iletkenliğin yakıt hücresinin performansı, rib bölgelerindeki akım yoğunluğu ve tersinmez ısı kayıpları üzerine etkileri araştırılmıştır. Ayrıca anot ve katot kısmı düzlem yüzeyleri ile düzlem normalindeki akım yoğunluğu dağılımları tanımlanan arayüzeyler aracılığıyla incelenmiştir.

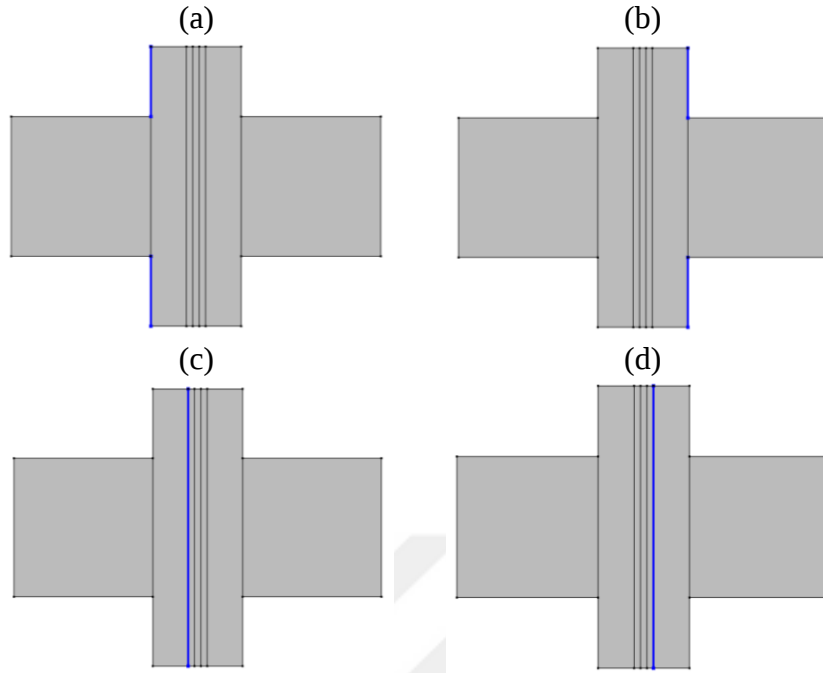
5.1. Sayısal Modelin Geometrisi ve Arayüzeyler

Sayısal modelleme çalışmalarında GDT ve MGDT için toplamda iki adet model hazırlanmıştır. Hazırlanan ilk model 7 farklı bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenler anot akış kanalı, anot gaz difüzyon tabakası, anot katalizör tabaka, membran, katot katalizör tabaka, katot gaz difüzyon tabakası, katot akış kanalıdır. Hazırlanan diğer modelde ise GDT ile katalizör tabaka arasına mikro-gözenekli tabakalar yerleştirilmiştir. Model bileşenleri ve ağ yapısı Şekil 32’de gösterilmiştir.

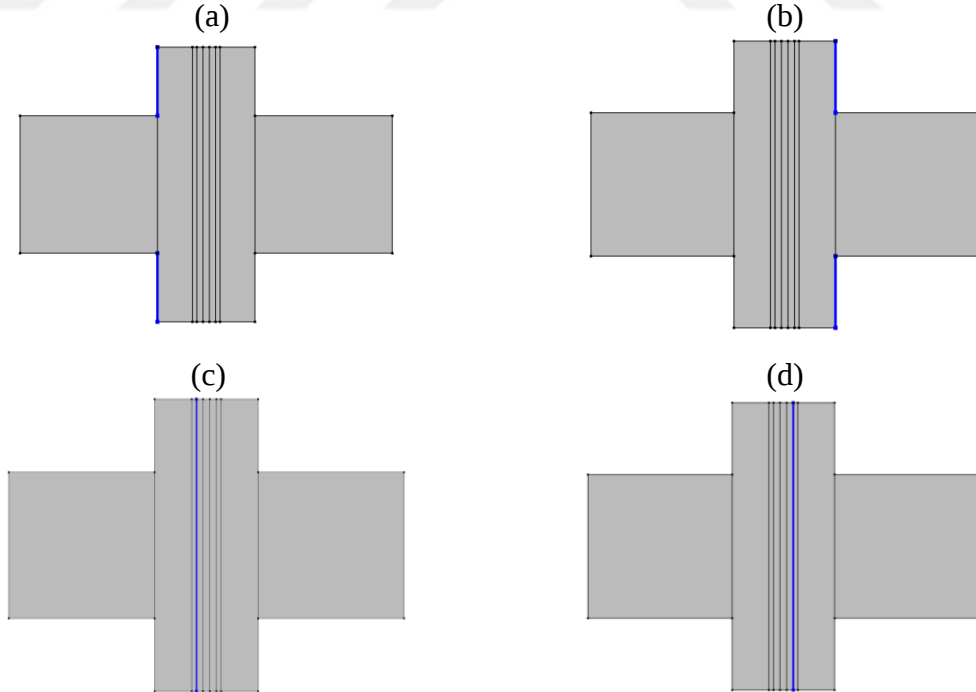


Şekil 32. Sayısal modele ait görseller a) PEM yakıt hücresi 7 bileşenli model, b) PEM yakıt hücresi 9 bileşenli model c) Ağ yapısı

Anot ve katot kısımlarının rib bölgelerindeki akım yoğunluğunun ölçülebilmesi tersinmez ısı kaybı gibi parametrelerin araştırılması ve performans verilerinin ölçülerek polarizasyon eğrilerinin oluşturulması için modelin farklı noktalarına problemler tanımlanmıştır. Tanımlanan bu problemler ve modeldeki konumları GDT için Şekil 33’de MGDT için Şekil 34’de gösterilmiştir.

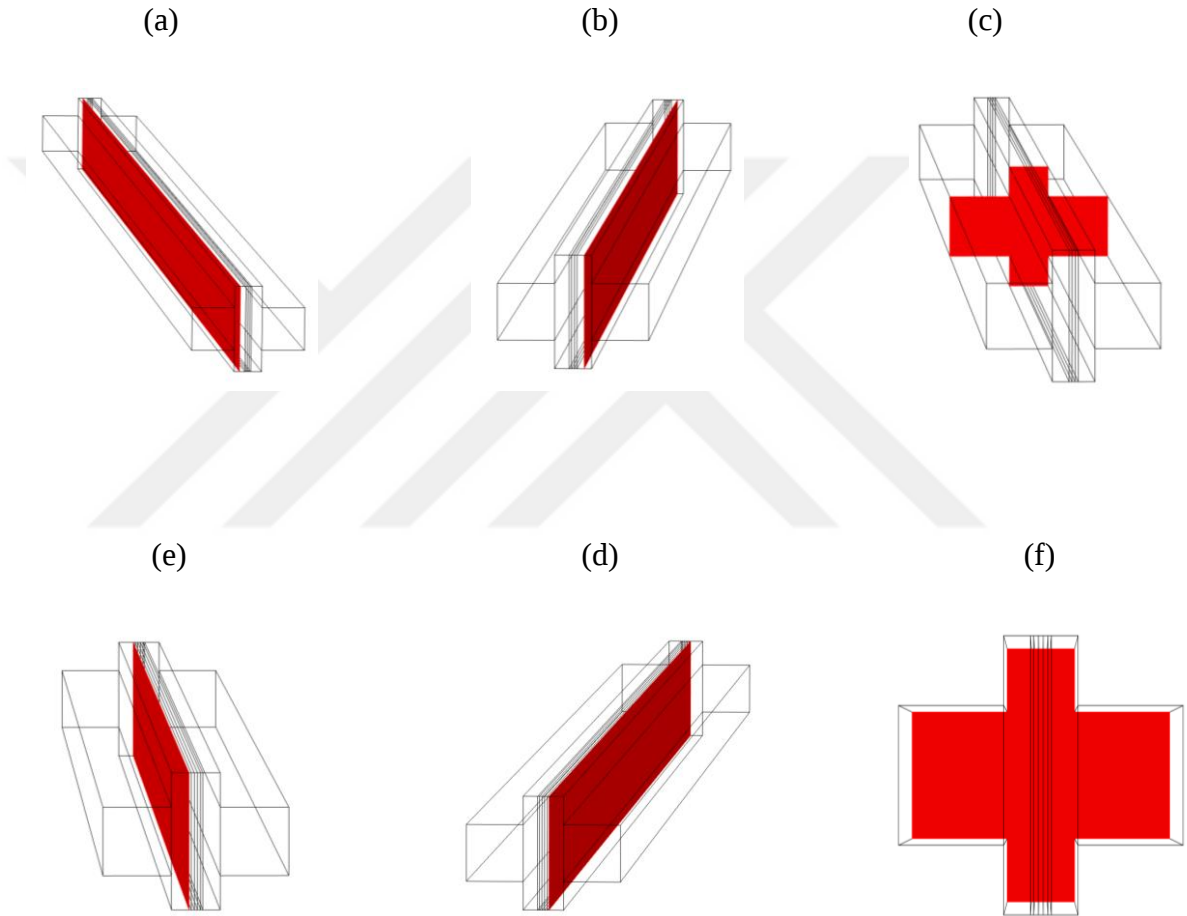


Şekil 33. GDT için elektriksel özelliklerin ölçülmesinde kullanılan propların yerleşimi; (a) Anot kısmı rib bölgeleri, (b) Katot kısmı rib bölgeleri, (c) Anot kısmı GDT ve katalizör tabakanın sınır bölgesi, (d) Katot kısmı GDT ve katalizör tabakanın sınır bölgesi



Şekil 34. MGDT için elektriksel özelliklerin ölçülmesinde kullanılan propların yerleşimi; (a) Anot kısmı rib bölgeleri, (b) Katot kısmı rib bölgeleri, (c) Anot kısmı MGDT ve katalizör tabakanın sınır bölgesi, (d) Katot kısmı MGDT ve katalizör tabakanın sınır bölgesi

Modelleme çalışmaları kapsamında GDT ve MGDТ'lerde anot kısmı düzlem yüzeyi, katot kısmı düzlem yüzeyi ve düzlem normalindeki akım yoğunluğunun gösterilebilmesi için arayüzeyler tanımlanmış ve kullanılmıştır. GDT ve MGDТ kullanılan modeller için düzlem normalindeki akım yoğunluğunun ölçümünde kullanılacak arayüzeyler GDT kalınlığının tam ortasına tanımlanmıştır. Bu arayüzeyler Şekil 35'de gösterilmiştir.



Şekil 35. GDT ve MGDТ için elektrot akım yoğunluklarının gösteriminde kullanılan arayüzeylerin yerleşimi; (a) GDT anot kısmı düzlem yüzeyi, (b) GDT katot kısmı düzlem yüzeyi, (c) GDT düzlem normali, (d) MGDТ anot kısmı düzlem yüzeyi, (e) MGDТ katot kısmı düzlem yüzeyi, (f) MGDТ düzlem normali

5.2. Matematiksel Model ve Sınır Şartları

Üç boyutlu sayısal model, çoklu hesaplama alanı yaklaşımıyla Tablo 6'da verilen eşitlikler kullanılarak oluşturulmuştur.

Tablo 6. Model denklemleri

Süreklilik Denklemi	$\nabla(\rho\vec{u}) = 0$
Navier Stokes Denklemi	$\nabla(\varepsilon\rho\vec{u}) = -\varepsilon\nabla P + \nabla^*(\varepsilon\mu^{\text{eff}}\nabla\vec{u})$
Darcy Denklemi	$\vec{u} = -\frac{k_p}{\mu}$
Stephan-Maxwell Denklemi	$\rho\vec{u}\nabla m_i = \nabla \left[\rho\varepsilon m_i \sum_{j=1}^N D_{ij} \left\{ \frac{M}{M_i} \left(\nabla m_i + m_i \frac{\nabla M}{M} \right) \right\} \right]$
Yüklerin Korunumu Denklemi	$\nabla \cdot (\sigma_i \cdot \nabla \phi_i) = 0$

Bu denklemlerde, u akışkan hızını, ρ akışkan yoğunluğunu, ∇P basınç gradyenini, μ akışkanın dinamik viskozitesini, k_p difüzyon tabakası geçirgenliğini, m_i türlerin kütle oranını, ε difüzyon tabakasının gözenekliliğini, D^{eff} efektif difüzyon katsayısını, M akışkanın ağırlığını, M_i molar ağırlığını, σ_i elektriksel veya proton iletkenliğini, ϕ_i faz potansiyelini göstermektedir.

Sayısal modellemelerde süreklilik, Navier Stokes ve Darcy denklemleri kanalda ve gözenekli ortamlarda akışkanın hareketini modellemek için, Stephan-Maxwell denklemi akışkandaki taneciklerin hareketini modellemek için ve yüklerin korunumu denklemi ise yüklü taneciklerin hareketini modellemek için kullanılmıştır.

Nafyon membranlarda proton iletkenliğinin hesaplanabilmesi için aşağıdaki denklemler kullanılmaktadır [34].

$$\sigma_m\left(\frac{S}{cm^2}\right) = \exp\left[1268\left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T}\right)\right](0.005193\lambda - 0.00326) \quad (5.1)$$

Bu denklemde σ_m ; membran iletkenliği, T ; hücre sıcaklığı, λ ; membranın su içeriğidir. Bu ifade ise bağıl nemin (a); $0 < a \leq 1$ olduğu durumlar için Denklem 5.2 de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\lambda = 0.043 + 17.81a - 39.85a^2 + 36a^3 \quad (5.2)$$

Akım yoğunluğu, Denklem 5.5’de gösterilen Butler-Volmer denkliği ile bulunabilir.

$$i_{hücre} = i_o \left(\frac{C_s}{C^*} \right)^\gamma \left[\exp \left(\frac{a_a F}{R_u T} \eta \right) - \exp \left(\frac{a_c F}{R_u T} \eta \right) \right] \quad (5.3)$$

Bu ifadede, T sıcaklığı, Ru universal gaz sabitini, F Faraday sabitini, a_i yük transfer katsayısını, i_o değişken akım yoğunluğunu, η anot ve katotta farklı olmak üzere aşırı gerilim değerlerini, C_s katalizör yüzeyindeki reaktant konsantrasyonunu, C^* standart sıcaklık ve basınç koşullarındaki reaktant konsantrasyonunu temsil etmektedir. Aşırı gerilim değeri anot ve katot için farklı değerler almaktadır. Hazırlanan model kapsamında bazı belirsizlerin giderilmesi ve modelin yalın hale getirilebilmesi için sürekli rejim, laminar akış, tek fazlı (gaz) akış, ideal gaz, membranın gaz geçirgenliğinin olmaması varsayımlarından yararlanılmıştır.

Model bünyesinde kullanılan sınır şartları Tablo 7’de, matematiksel modellemeye kullanılan parametreler Tablo 8’de gösterilmiştir.

Tablo 7. Sınır şartları

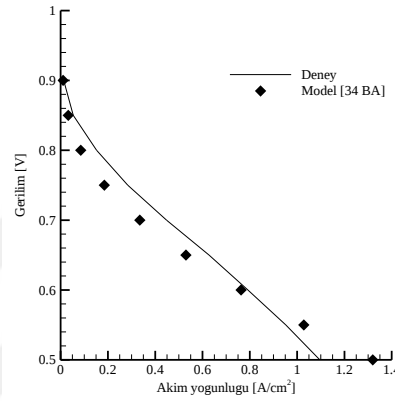
$U_{g,anot} = U_{a,in} = \frac{i_a \cdot A_{MEA} \cdot X_{H_2} \cdot R_u \cdot T}{2FAP_A A_{gc}}, U_{g,katot} = U_{c,in} = \frac{i_c \cdot A_{MEA} \cdot X_{O_2} \cdot R_u \cdot T}{2FAP_C A_{gc}}$
$C_{H_2,anot} = C_{H_2,a}; C_{O_2,katot} = C_{O_2,c}; C_{H_2O,anot} = C_{H_2O,a}; C_{H_2O,katot} = C_{H_2O,k}$
$\partial \frac{\phi_e}{\partial n} = 0, \partial \frac{\phi_s}{\partial n} = 0, \phi_s = 0, \phi_s = V_{oc},$
$P = P_{ref}, P = P_{a,c}, \frac{\partial P}{\partial n} = 0$

Tablo 8. Matematiksel modellerde kullanılan parametreler

Parametreler	Semboller	Değerler
Kanal derinliği	L	0.02[m]
Kanal yüksekliği	H_ch	1e-3[m]
Kanal genişliği	W_ch	0.78e-3[m]
Rib genişliği	W_rib	0.90e-3[m]
GDL genişliği	H_gdl	380e-6[m]
Katalizör tabaka kalınlığı	H_electrode	50e-6[m]
Membran kalınlığı	H_membrane	100e-6[m]
GDT gözenekliliği	eps_gdl	0.83
GDT geçirgenliği	kappa_gdl	4e-12[m ²]
MGDT gözenekliliği	eps_mpl	0.75
MGDT geçirgenliği	kappa_mpl	2.3e-12[m ²]
Katalizör tabaka gözenekliliği	eps_cl	0.4
Katalizör tabaka geçirgenliği	kappa_cl	8e-13[m ²]
H ₂ 'nin girişte kütle oranı (anot)	wH2_in	0.743
H ₂ O'nun kütle oranı (katot)	wH2O_in	0.023
O ₂ 'nin girişte kütle oranı (katot)	wO2_in	0.228
Anot giriş hızı	U_in_anode	0.2[m/s]
Katot giriş hızı	U_in_cathode	0.5[m/s]
Anot viskozite	mu_anode	1.19e-5[Pa*s]
Katot viskozite	mu_cathode	2.46e-5[Pa*s]
Hidrojen molar ağırlığı	MH2	0.002[kg/mol]
Azot molar ağırlığı	MN2	0.028[kg/mol]
Su molar ağırlığı	MH2O	0.018[kg/mol]
Oksijen molar ağırlığı	MO2	0.032[kg/mol]
H ₂ -H ₂ O Difüzyon katsayısı	D_H2_H2O	$9.15e-5 * (T/307.1[K])^{1.75}$ [m ² /s]
N ₂ -H ₂ O Diffuzyon katsayısı	D_N2_H2O	$2.56e-5 * (T/307.15[K])^{1.75}$ [m ² /s]
O ₂ -N ₂ Diffuzyon katsayısı	D_O2_N2	$2.2e-5 * (T/293.2[K])^{1.75}$ [m ² /s]
O ₂ -H ₂ O Diffuzyon katsayısı	D_O2_H2O	$2.82e-5 * (T/308.1[K])^{1.75}$ [m ² /s]
Referans basınç	p_ref	101e3[Pa]
Oksijen referans konsantrasyonu	cO2_ref	40.88[mol/m ³]
Hidrojen referans konsantrasyonu	cH2_ref	40.88[mol/m ³]

5.3. Sayısal Modelin Deneysel Verilerle Doğrulanması

Comsol 4.2.a yazılımı kullanılarak hazırlanan üç boyutlu PEM yakıt hücresi modeli deneysel veri ile doğrulanmıştır. Deneysel veri 80°C çalışma sıcaklığı ve %100 bağıl nem koşullarında PEM yakıt hücresi kullanılarak elde edilmiştir. Aynı çalışma şartları sayısal modele uygulanmış ve Şekil 36'da gösterilen eğriler oluşturulmuştur. Şekilden de görüldüğü üzere sayısal model deneysel verilerle örtüşmektedir.



Şekil 36. Hazırlanan modelin deneysel sonuçla doğrulanması

5.4. Sayısal Modelleme Çalışmaları Sonucunda Elde Edilen Sonuçlar

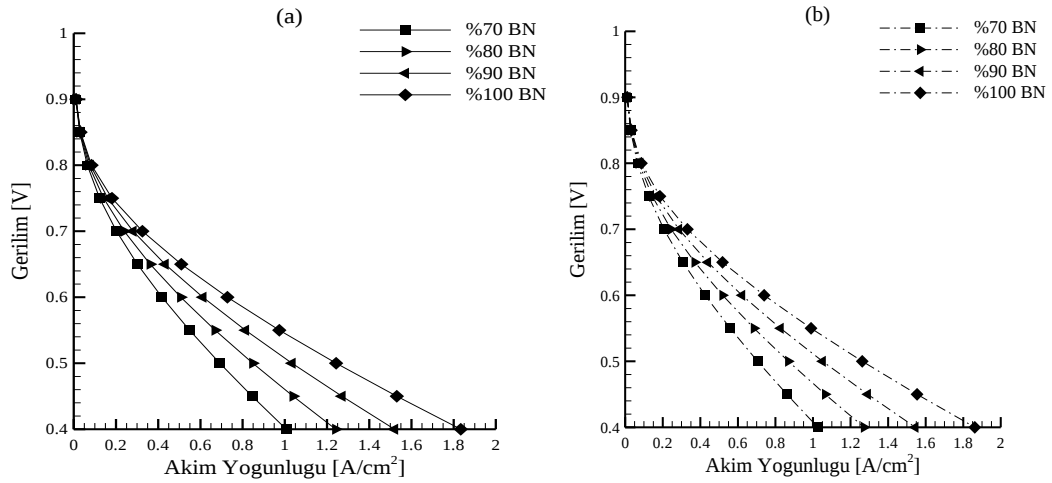
Deneysel çalışmalarda GDT ve MGDT'ler üzerinde farklı sıcaklıklar (50 °C, 60 °C, 70 °C, 80 °C), farklı bağıl nem değerleri (%70 BN, %80 BN, %90 BN, %100 BN) ve farklı sıkıştırma basıncı değerleri (2 bar, 4 bar, 6 bar, 8 bar) uygulanmıştır. Bu koşullar altında difüzyon tabakaların elektriksel direnç değerleri belirlenerek elektriksel iletkenlik değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan iletkenlik değerleri modellere ayrı ayrı entegre edilerek hücrenin performansı, rib bölgelerindeki akım yoğunluğu, tersinmez ısı kayıplarının nasıl değiştiği araştırılmıştır. Ayrıca anot ve katot kısımlarında düzlem yüzeyi üzerinde ve düzlem normalinde hazırlanan arayüzeylerle akım yoğunluğu dağılımı incelenmiştir.

Sayısal modellemeye entegre edilecek elektriksel iletkenlikler seçilirken iki parametre sabit tutulup diğer parametrenin değişimine göre belirlenmiştir. Bu doğrultuda GDT ve MGDT kullanılan modeller için geçerli olmak üzere sıcaklık 80°C ve sıkıştırma basıncı 4 bar koşulunda sabit tutulurken bağıl nem değişiminin etkileri incelenmiştir. Sıcaklık 80 °C'de bağıl nem %100 değerinde sabit tutulurken de sıkıştırma basıncındaki

değişimin etkileri araştırılmıştır. Ayrıca bağıl nem %%100, sıkıştırma basıncı 4 bar değerinde sabit tutulurken sıcaklığın değişimi araştırılmıştır.

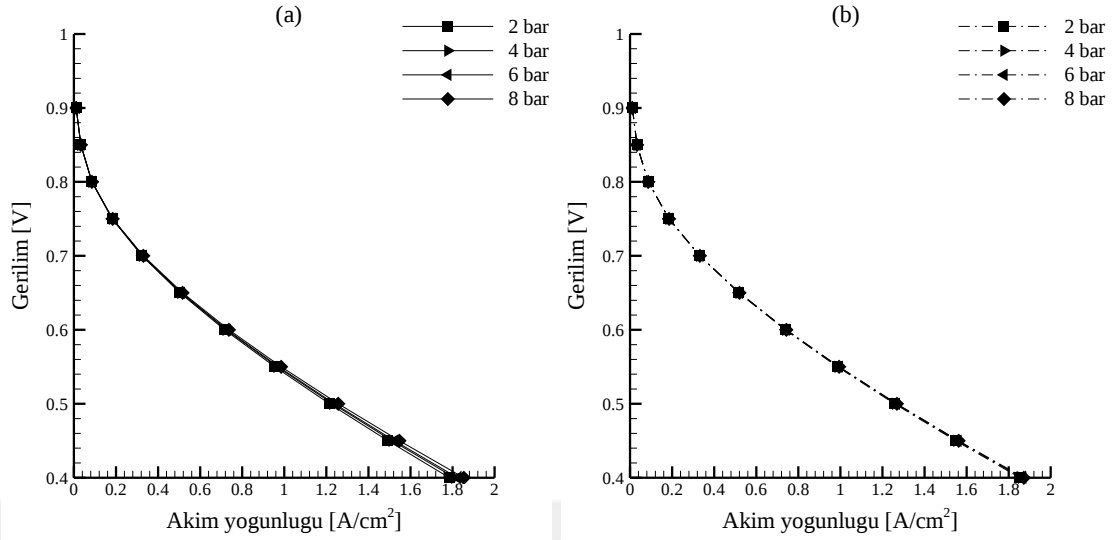
5.4.1. Gözenekli ve Mikro-gözenekli GDT kullanılan PEM Yakıt Hücresi Modelleri için Performans Değerlendirmeleri

Yakıt hücresinin sıcaklık, bağıl nem ve sıkıştırma basıncı gibi çalışma şartlarının farklı kombinasyonlarının uygulandığı koşullardaki performans değişimi araştırılmıştır. GDT ve MGD'T'ler için hazırlanan modelleme çalışmalarının sonuçları Şekil 37 ile 39 arasında gösterilmiştir



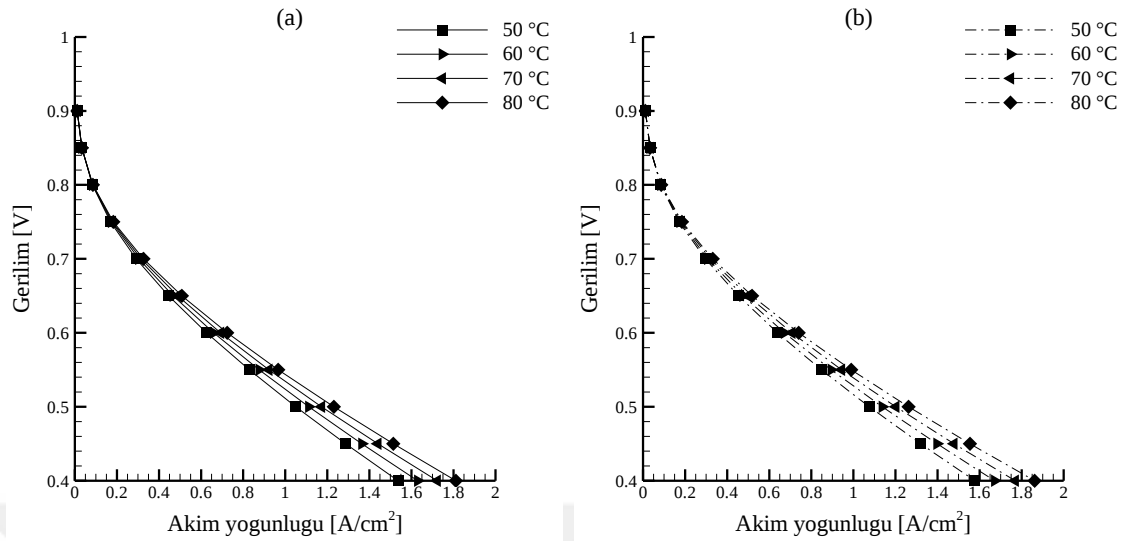
Şekil 37. Performansın sabit sıcaklık (80°C) ve sıkıştırma basıncı (4 bar) koşullarında bağıl nem değişimine göre değerlendirilmesi; (a) GDT, (b) MGD'T

GDT ve MGD'T için sabit sıcaklık (80 °C) ve sıkıştırma basıncı (4 bar) altında bağıl nem değişiminin performansa etkileri Şekil 37’de gösterilmiştir. Deneysel sonuçlara göre hem GDT hem de MGD'T için elektriksel iletkenlikler bağıl nemnin artışından doğrusal olmayan şekilde etkilenmiştir. Bununla birlikte daha dominant parametre olan membranın iyonik iletkenliği bağıl nem değerinin artışıyla artmakta ve dolayısıyla her iki difüzyon tabakasında da yakıt hücresi performansını artırmaktadır. MGD'T kullanılan sayısal model GDT kullanılan ile karşılaştırıldığında kısmen daha yüksek performans sergilediği görülmüştür.



Şekil 38. Performansın sabit sıcaklık (80°C) ve bağıl nem (%100 BN) koşullarında sıkıştırma basıncı değişimine göre değerlendirilmesi; (a) GDT, (b) MGDT

Şekil 38’de difüzyon bakaları için sabit sıcaklık (80 °C) ve bağıl nem (%100 BN) koşullarında sıkıştırma basıncı değişiminin performansa etkileri gösterilmiştir. Yapılan deneylerden görüldüğü üzere sıkıştırma basıncı arttıkça düzlem yüzeyindeki iletkenlikler genel olarak düşmekte, düzlem normalindeki iletkenlikler artmaktadır. Elde edilen iletkenlikler çok büyük, oluşan dirençlerin küçük olması ohmik kayıpları önemli ölçüde etkilememektedir. Bu sebepten dolayıdır ki sıkıştırma basıncının artışı hücre performansında çok az bir değişikliğe sebep olmuştur. Sıkıştırma basıncındaki artış GDT ve MGDT kullanılan modeller arasında belirgin bir fark yaratmamıştır. Bununla birlikte en yüksek akım yoğunluklarının GDT ve MGDT için 100 BN, 80 °C, 8 bar sıkıştırma basıncı koşullarında ve 0.4 V gerilim değerinde sırasıyla $1.85 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$, $1.87 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ olduğu görülmüştür.

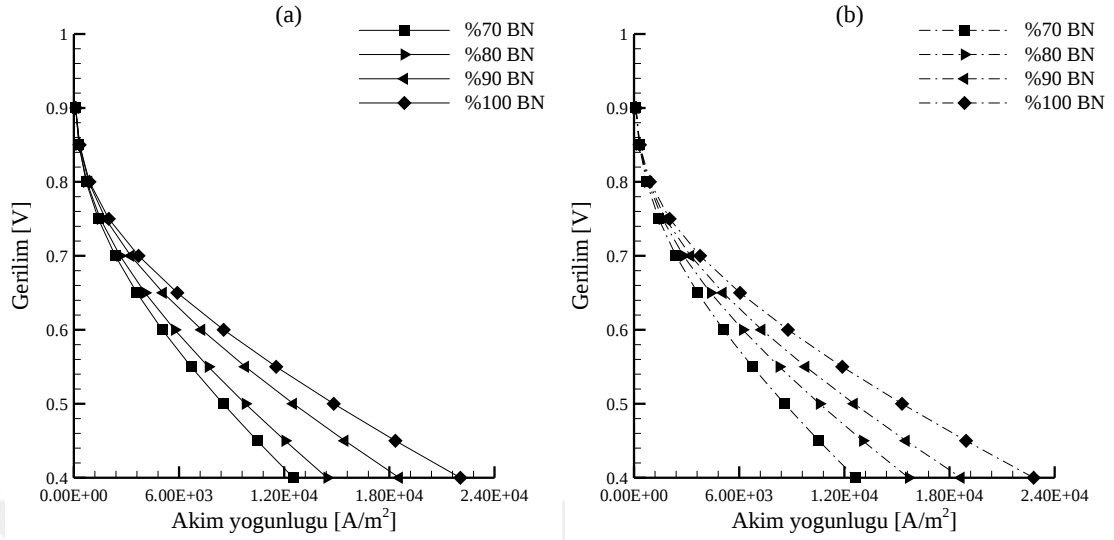


Şekil 39. Performansın sabit bağıl nem (%100 BN) ve sıkıştırma basıncı (4 bar) koşullarında sıcaklığa göre değerlendirilmesi; (a) GDT, (b) MGD

GDT ve MGD için sabit bağıl nem (%100 BN) ve sıkıştırma basıncı (4 bar) altında sıcaklık değişiminin performansa etkileri Şekil 39’da gösterilmiştir. Deney sonuçlarından da görüleceği üzere elektriksel iletkenlikler sıcaklık artışıyla her yönde artış göstermektedir. Bu durumda hücre içerisinde elektrik direncinden kaynaklanan ohmik kayıpları azaltmakta ve hücre performansı artmaktadır. Ayrıca sıcaklık artışı aktivasyon kayıplarını azaltmakta ve proton transferini artırmaktadır. Bu etkiler sonucunda şekilden de görüldüğü üzere sıcaklığın artışı her iki difüzyon tabakasının kullanıldığı durumda hücre performansını artırmıştır.

5.4.2. Gözenekli ve Mikro-gözenekli GDT kullanılan PEM Yakıt Hücre Modelleri için Rib Bölgelerindeki Akım Yoğunluğu Değerlendirmeleri

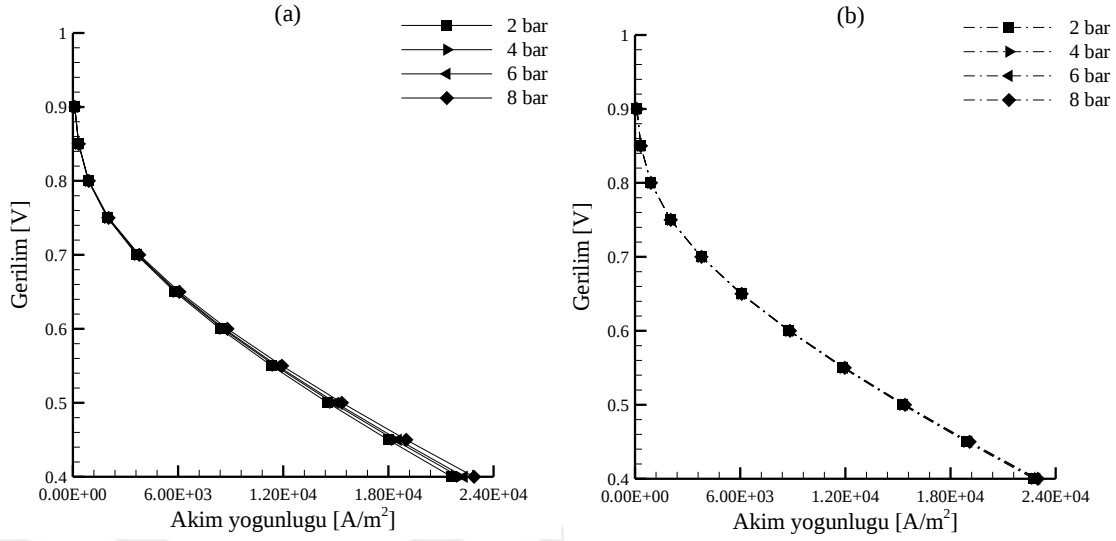
Yakıt hücresinin sıcaklık, bağıl nem ve sıkıştırma basıncı gibi çalışma şartlarının farklı kombinasyonlarının uygulandığı koşullardaki rib bölgelerindeki akım yoğunluğu değişimi incelenmiştir. Rib bölgelerindeki akım yoğunluklarının ölçülebilmesi için Şekil 33 ve 34’de gösterilen proplar kullanılmıştır. GDT ve MGD’ler için hazırlanan modelleme çalışmalarının sonuçları Şekil 40 ile 42 arasında gösterilmiştir.



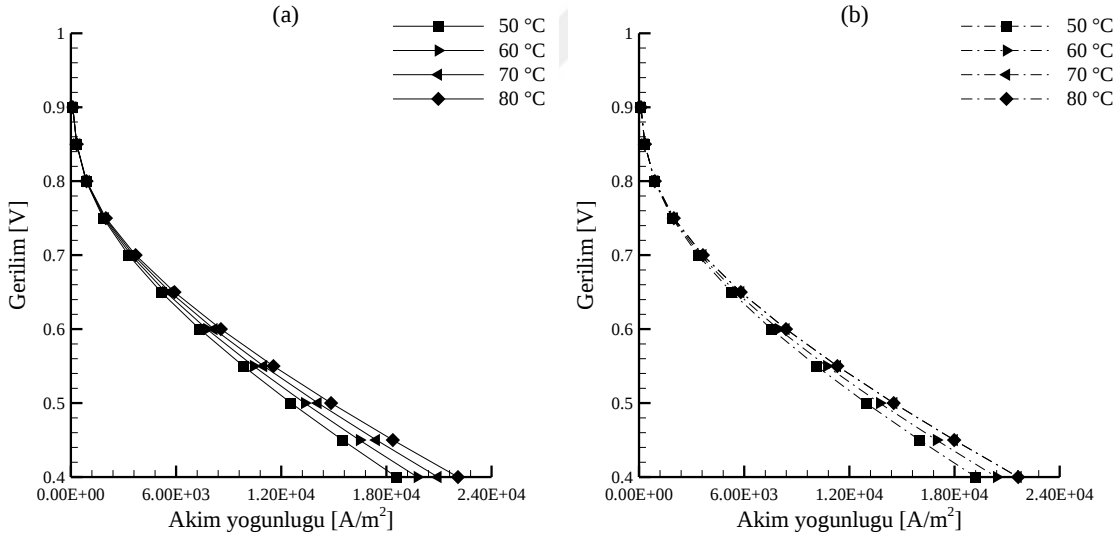
Şekil 40. Rib alanlarındaki akım yoğunluğunun sabit sıcaklık (80°C) ve sıkıştırma basıncı (4 bar) koşullarında bağıl neme göre değişimi; (a) GDT, (b) MGD

Şekil 40'de GDT ve MGD için sabit sıcaklık (80°C) ve sabit sıkıştırma basıncı (4 bar) koşulları altında bağıl nem değişiminin rib bölgelerindeki akım yoğunluğunun değişimine etkileri değerlendirilmiştir. Bağıl nem artışı membrandaki pozitif yüklü iyon transferini artırmaktadır. Çünkü nasyon membranlarda iyon transferi büyük bir ölçüde bağıl nemden etkilenmektedir. İyon transferinin artışıyla birlikte elektron transferi de artmakta ve rib bölgelerindeki akım yoğunlukları her iki difüzyon tabakası için de artmaktadır. Rib bölgelerindeki akım yoğunlukları $1.2 \cdot 10^4 \text{ A/m}^2$ ile $2.4 \cdot 10^4 \text{ A/m}^2$ arasında değişmekle birlikte MGD için daha yüksektir.

Şekil 41'de GDT ve MGD için sabit sıcaklık (80 °C) ve bağıl nem (%100 BN) koşulları altında sıkıştırma basıncı değişiminin rib bölgelerindeki akım yoğunluğuna etkileri incelenmiştir. Sıkıştırma basıncının etkisiyle elektriksel iletkenlik düzlem yüzeyinde azalırken düzlem normalinde arttığı deneysel olarak gösterilmiştir. Bu artış ve azalışlar çok büyük değişimlere sebep olmadığı için rib bölgelerindeki akım yoğunluklarını çok fazla etkilemediği görülmektedir.



Şekil 41. Rib alanlarındaki akım yoğunluğunun sabit sıcaklık (80°C) ve bağıl nem (%100 BN) koşullarında sıkıştırma basıncına göre değişimi; (a) GDT, (b) MGDT

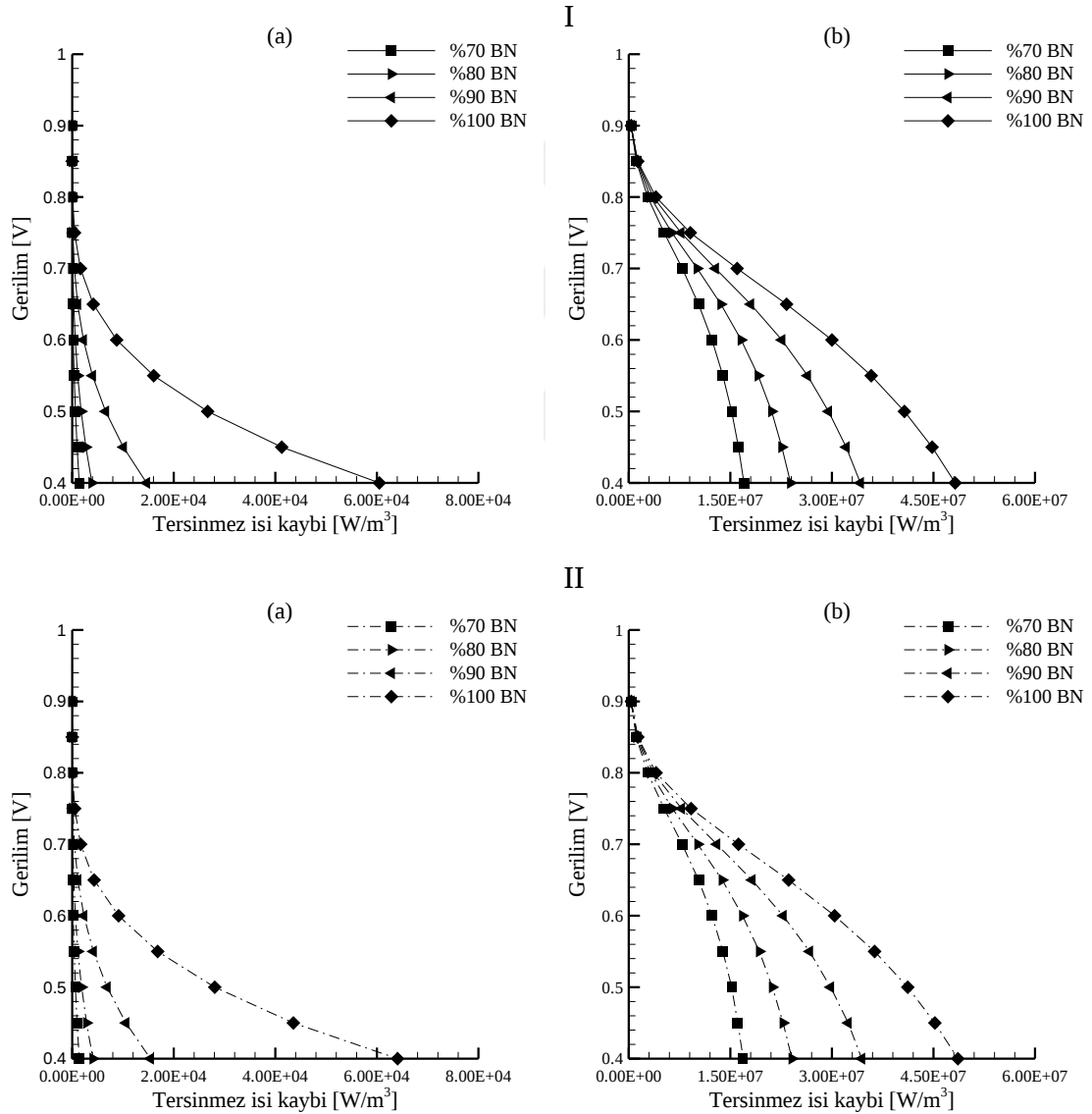


Şekil 42. Rib alanlarındaki akım yoğunluğunun sabit bağıl nem (%100 BN) ve sıkıştırma basıncı (4 bar) koşullarında sıcaklığa göre değişimi; (a) GDT, (b) MGDT

GDT ve MGDT için sabit bağıl nem (%100 BN) ve sıkıştırma basıncı (4 bar) altında sıcaklık değişiminin rib bölgelerindeki akım yoğunluğuna etkileri Şekil 42’de gösterilmiştir. Hücre çalışma sıcaklıklarının artışı reaksiyon kinetiğini, ohmik dirençleri ve reaktantların difüzyonunu genel olarak olumlu etkilediği için çalışma sıcaklığının artışı rib bölgelerindeki akım yoğunluklarını olumlu yönde etkilediği görülmektedir.

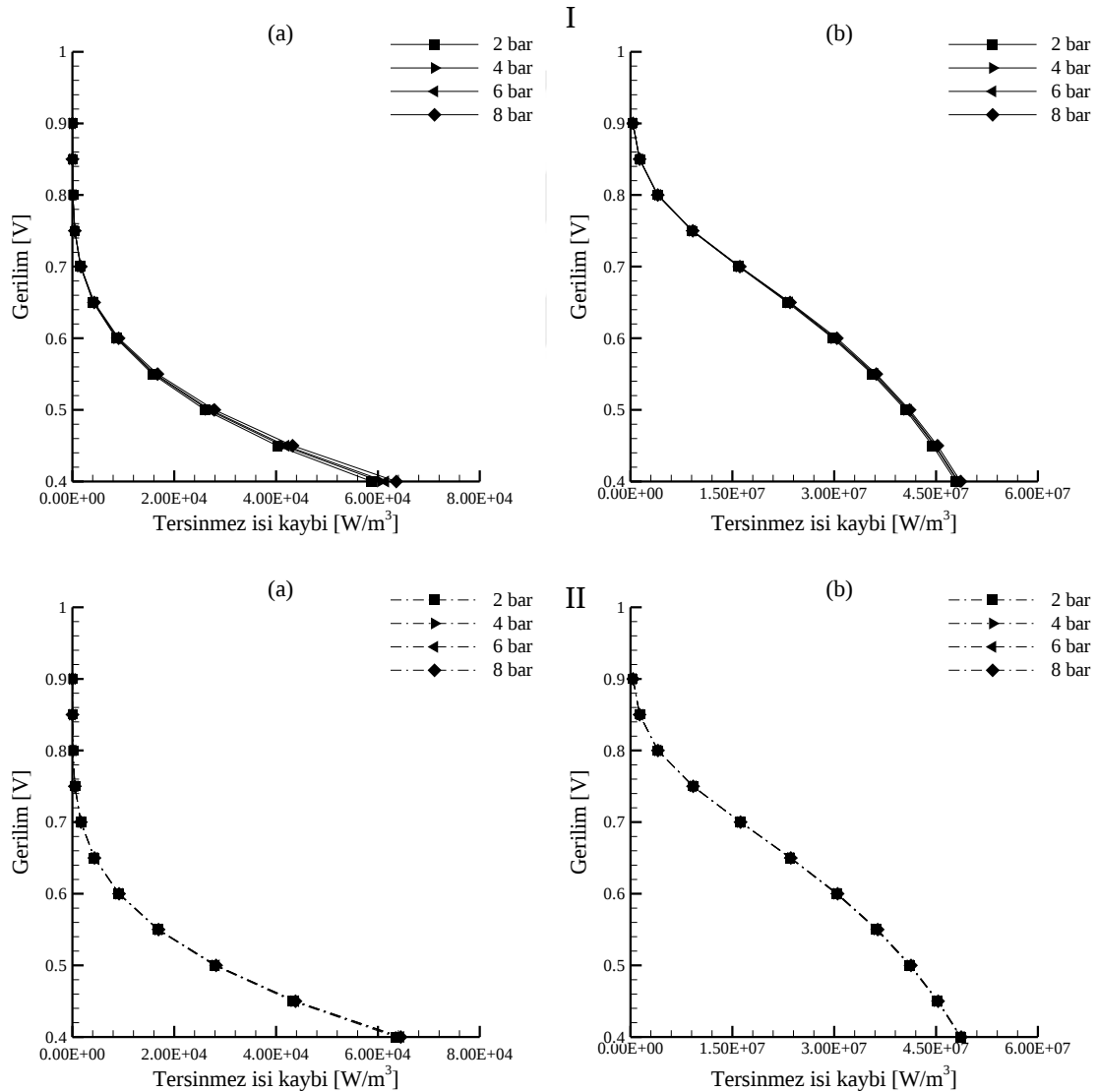
5.4.3. Gözenekli ve Mikro-gözenekli GDT kullanılan PEM Yakıt Hücre Modelleri için Tersinmez Isı Kayıplarının Değerlendirmeleri

Gözenekli ve mikro-gözenekli difüzyon tabakalarda anot ve katot kısmı için sıcaklık, bağıl nem ve sıkıştırma basıncı gibi çalışma şartlarının farklı kombinasyonlarının tersinmez ısı kayıplarına etkileri incelenmiştir. Modelleme çalışmalarından elde edilen sonuçlar Şekil 43 ile 45 arasında gösterilmiştir.



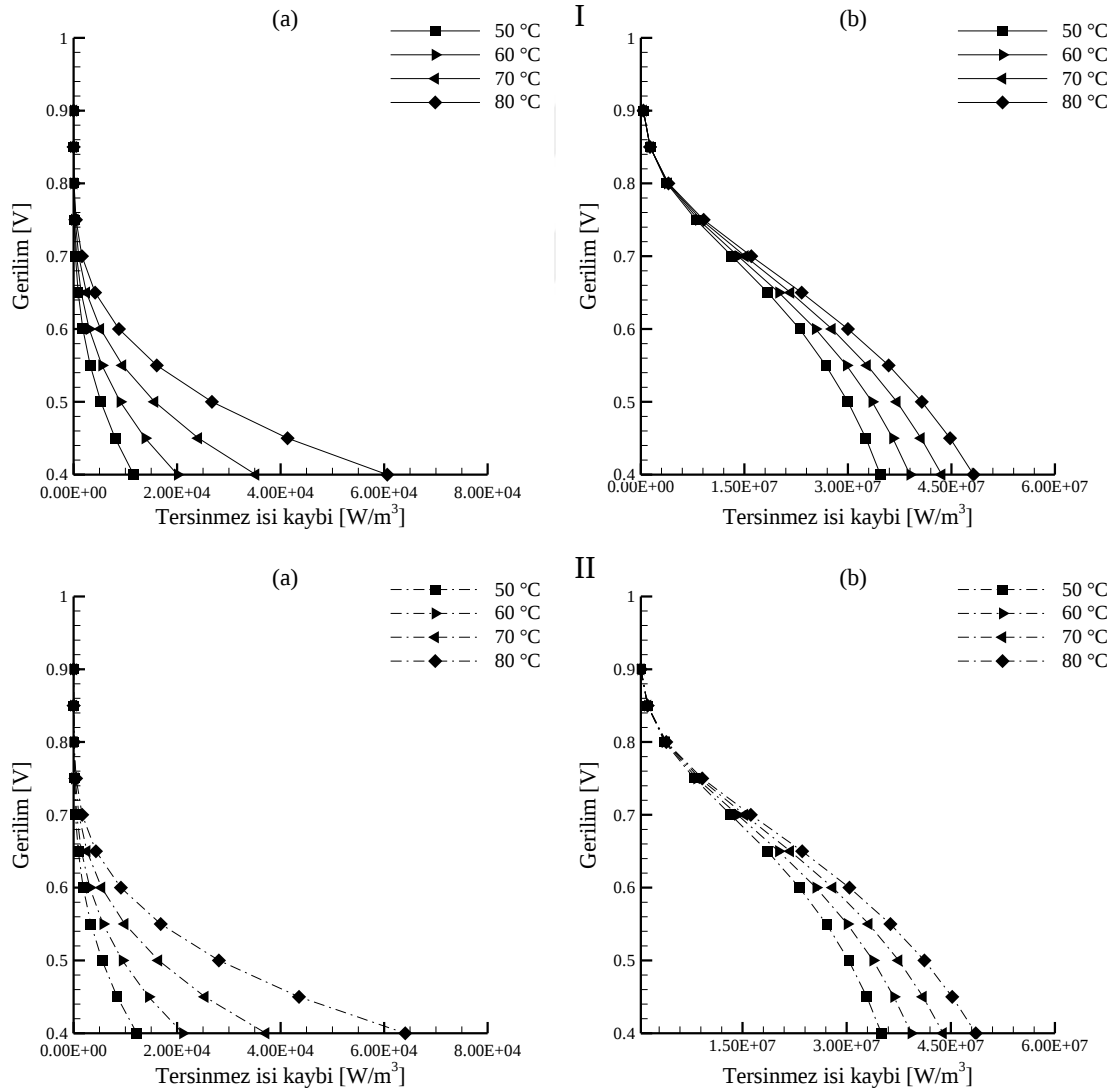
Şekil 43. Tersinmez ısı kaybının sabit sıcaklık (80°C) ve sıkıştırma basıncı (4 bar) koşullarında bağıl neme göre değişimi; I: GDT; (a) Anot, (b) Katot; II: MGDT; (a) Anot, (b) Katot

Şekil 43’de GDT ve MGDT için sabit sıcaklık (80 °C) sabit sıkıştırma basıncı (4 bar) koşullarında bağıl nem değişiminin anot ve katot kısımlarındaki tersinmez ısı kaybına etkileri incelenmiştir. Artan nem ile birlikte elektriksel ve iyonik iletkenlikler arttığından yakıt hücresinin performansı da artmıştır. Yakıt hücresinin anot ve katot kısımlarındaki reaksiyonlar arttıkça ürün olarak oluşan ısı miktarı da artmaktadır. Katot bölgesindeki reaksiyon daha yoğun ve karmaşık olduğundan o bölgelerdeki ısı kaybı anot tarafına göre daha yüksek olmuştur. GDT ve MGDT kullanılan durumdaki sonuçlar kıyaslandığında ise çok büyük bir fark olmadığı görülmektedir.



Şekil 44. Tersinmez ısı kaybının sabit sıcaklık (80°C) ve bağıl nem (%100 BN) koşullarında sıkıştırma basıncına göre değişimi; I: GDT; (a) Anot, (b) Katot; II: MGDT; (a) Anot, (b) Katot

Şekil 44’de GDT ve MGDT için sabit sıcaklık (80°C) ve (%100 BN) koşullarında sıkıştırma basıncı değişiminin anot ve katot kısımlarındaki tersinmez ısı kaybına etkileri incelenmiştir. Hem GDT hem de MGDT için artan sıkıştırma basıncıyla elektriksel iletkenlik değerleri düzlem yüzeyinde azalırken, düzlem normalinde artmaktadır. Ancak değişen elektriksel iletkenliklerin hem GDT hem de MGDT için tersinmez ısı kaybını çok düşük oranda etkilediği görülmektedir. Katot bölgesindeki tersinmez ısı kayıpları anot bölgesinden yaklaşık 2000 kat daha fazla olmasına rağmen GDT ve MGDT kullanılan model sonuçları incelendiğinde tersinmez ısı kayıpları arasında kaydadeğer bir fark görülmemektedir.



Şekil 45. Tersinmez ısı kaybının sabit bağıl nem (%100 BN) ve sıkıştırma basıncı (4 bar) koşullarında sıcaklığa göre değişimi; I: GDT; (a) Anot, (b) Katot; II: MGDT; (a) Anot, (b) Katot

GDT ve MGDT için sabit bağıl nem (%100 BN) ve sabit sıkıştırma basıncı (4 bar) koşullarında sıcaklık değişiminin anot ve katot kısımlarındaki tersinmez ısı kaybına etkileri Şekil 45’de gösterilmiştir. Sıcaklık arttıkça GDT’lerin tüm doğrultularındaki elektriksel iletkenlik değerleri genel olarak olumlu etkilenmektedir. Sıcaklığın artışı, tüm doğrultulardaki elektriksel iletkenlikleri artıracak ve gerçekleşen reaksiyonları hızlandıracığından tersinmez ısı kayıplarının artışına sebep olmaktadır.

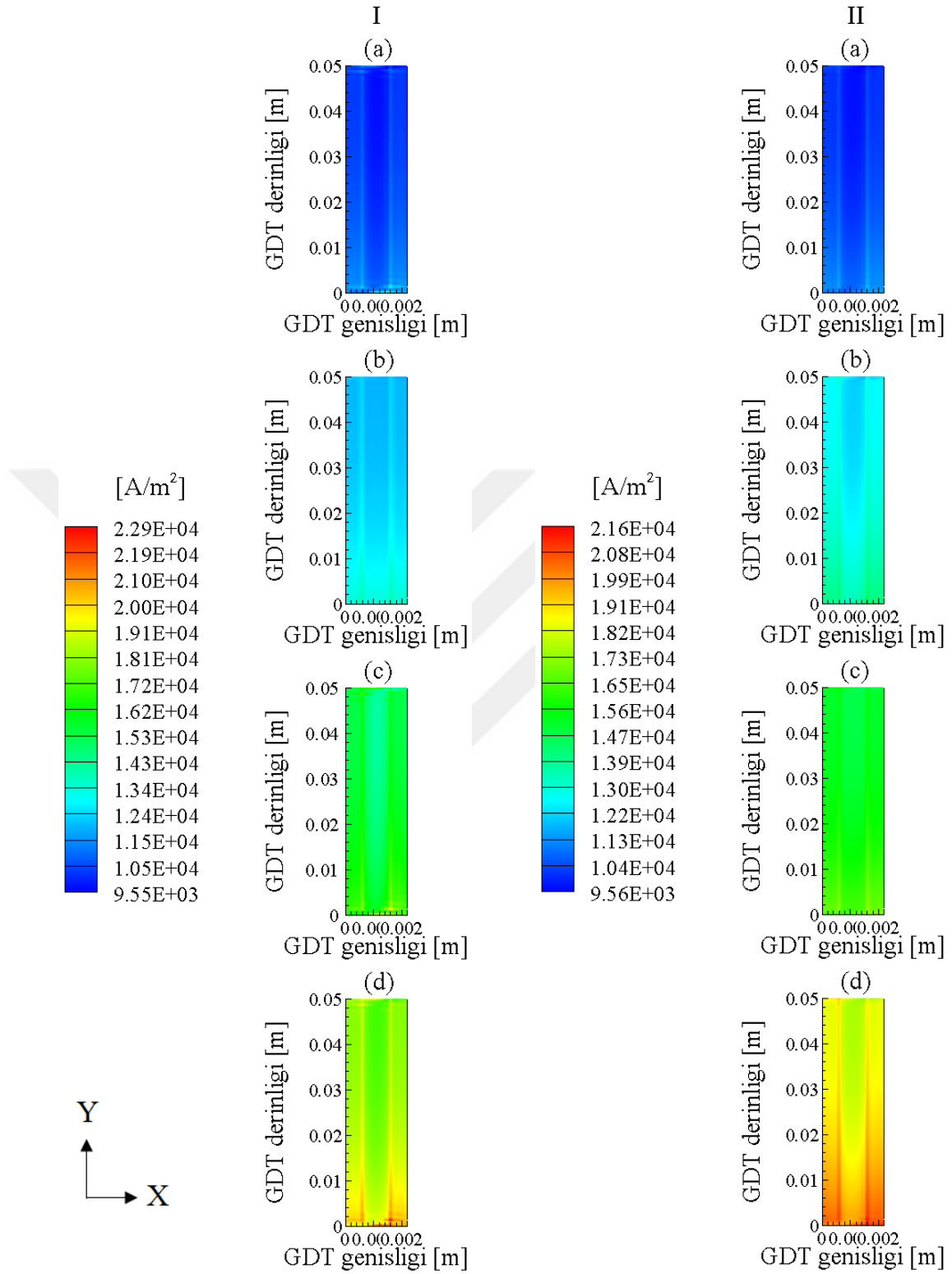
5.4.4. Gözenekli ve Mikro-gözenekli GDT kullanılan PEM Yakıt Hücresi Modelleri için Akım Yoğunluklarının Değerlendirilmesi

Gözenekli GDT ve mikro-gözenekli GDT’lerin elektriksel iletkenlik özellikleri farklı sıcaklıklar (50 °C, 60 °C, 70 °C, 80 °C), farklı bağıl nem değerleri (%70 BN, %80 BN, %90 BN, %100 BN) ve farklı sıkıştırma basıncı değerleri (2 bar, 4 bar, 6 bar, 8 bar) koşullarına göre belirlenmiştir.

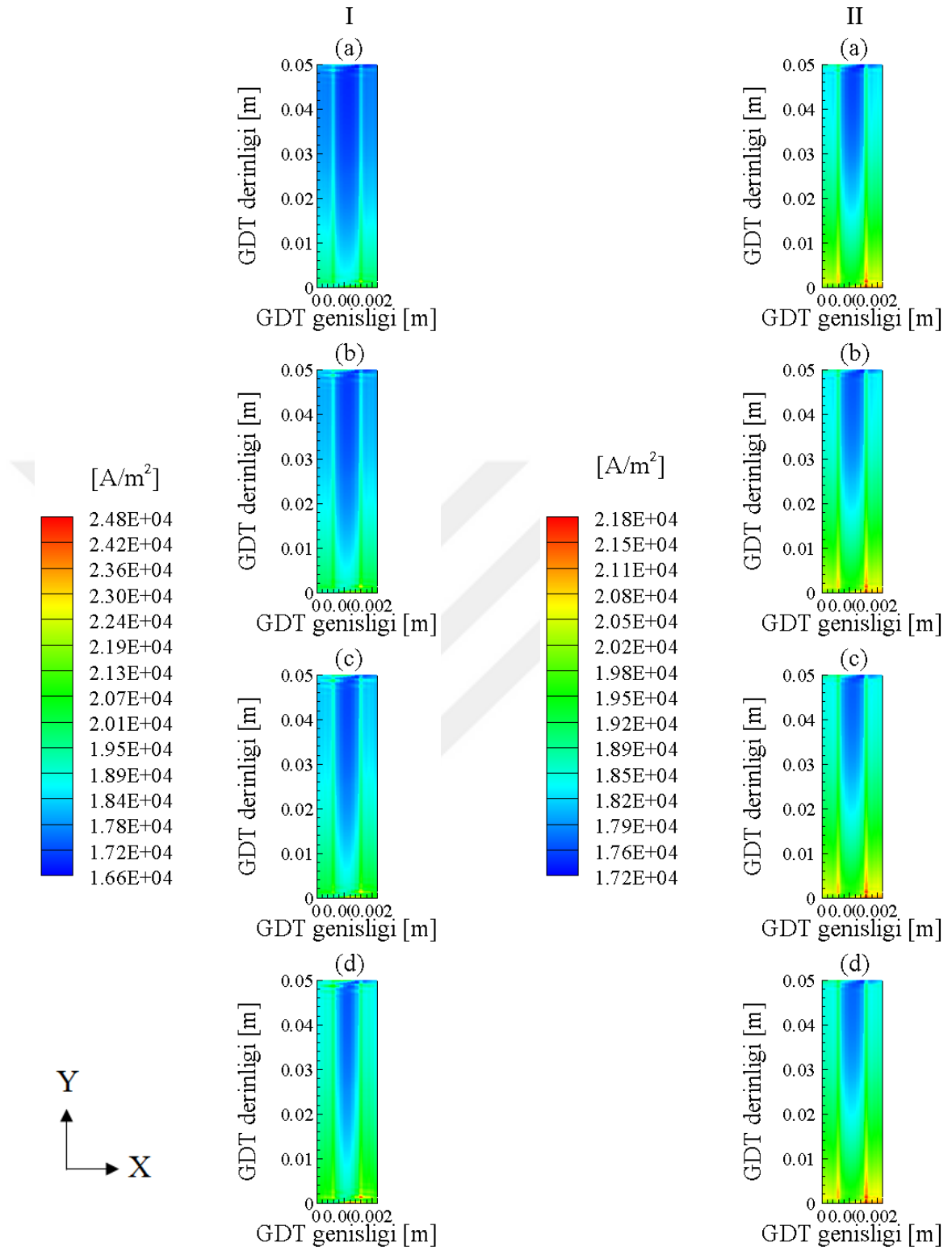
Bu başlıkta ise, belirtilen çalışma koşullarına göre hazırlanan modellerin anot ve katot kısımlarındaki düzlem yüzeyi ve düzlem normalindeki akım yoğunluğu dağılımları incelenmiştir. Bu çalışma gaz difüzyon tabakalarının yüzey düzlemlerinde ve düzlem normallerinde tamamlanan arayüzeylerle gerçekleştirilmiştir.

5.4.4.1. Gözenekli ve Mikro-gözenekli GDT için Anot Kısmı Düzlem Yüzeyindeki Akım Yoğunluklarının Dağılımları

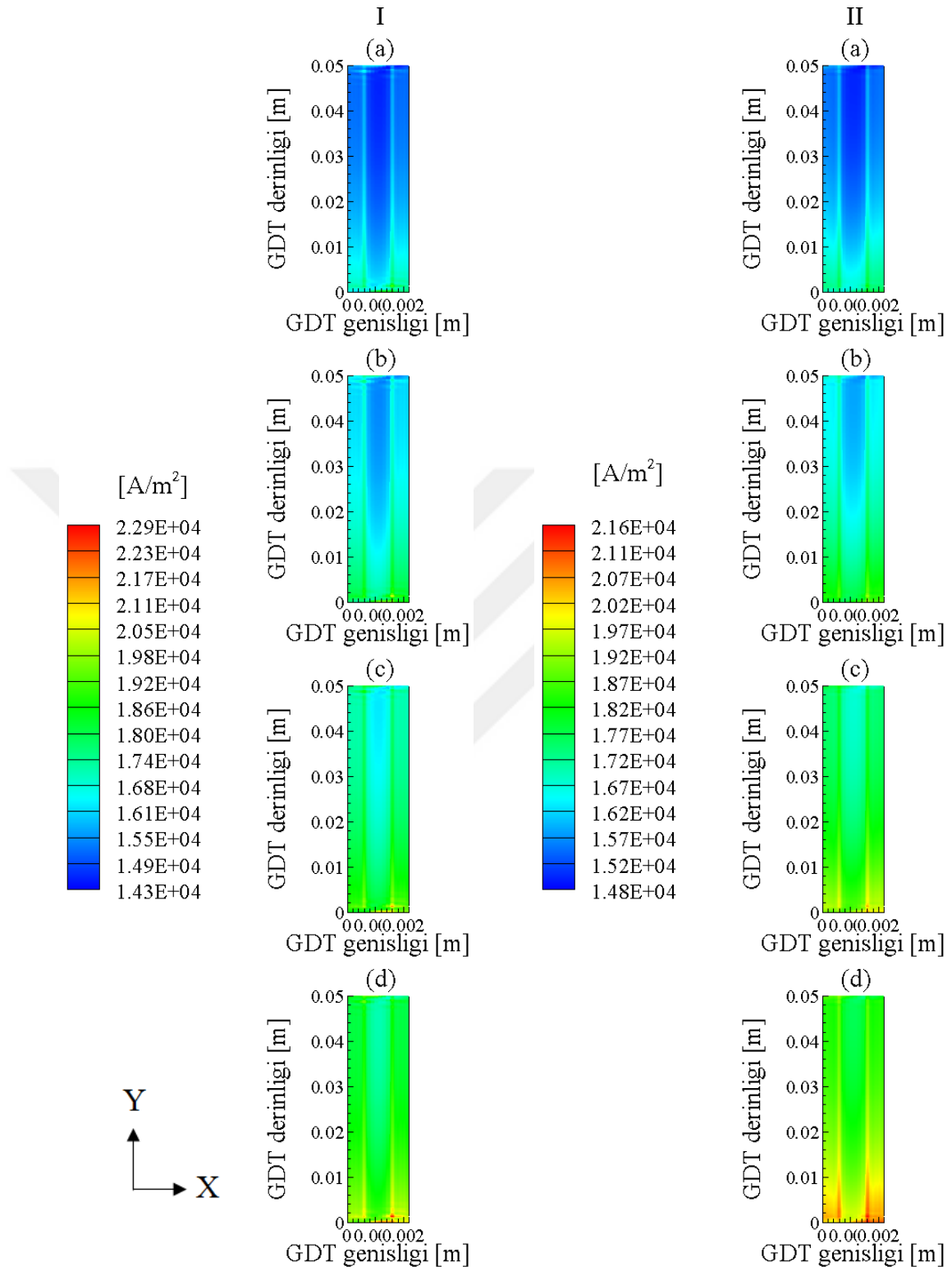
Şekil 35.a, 35.f’de gösterilen anot ve katot düzlem yüzeyleri ve düzlem normalindeki arayüzeyler kullanılarak belirlenen çalışma koşulları altındaki akım yoğunluğu dağılımı çalışmaları yapılmıştır. Farklı sıcaklık, bağıl nem ve sıkıştırma basıncı koşullarının kombinasyonlarına göre anot kısmı düzlem yüzeyindeki akım yoğunluklarının dağılımları Şekil 46-48 arasında gösterilmiştir.



Şekil 46. Anot kısmı düzlem yüzeyindeki akım yoğunluğunun sabit sıcaklık (80 °C) ve sıkıştırma basıncında (4 bar) bağlı neme göre değişimi; I: GDT; (a) %70 BN, (b) %80 BN, (c) %90 BN, (d) %100 BN; II: MGD; (e) %70 BN, (f) %80 BN, (g) %90 BN, (h) %100 BN



Şekil 47. Anot kısmı düzlem yüzeyindeki akım yoğunluğunun sabit sıcaklık (80 °C) ve bağıl nemde (%100 BN) sıkıştırma basıncına göre değişimi; I: GDT; (a) 2 bar, (b) 4 bar, (c) 6 bar, (d) 8 bar; II: MGD; (a) 2 bar, (b) 4 bar, (c) 6 bar, (d) 8 bar



Şekil 48. Anot kısmı düzlem yüzeyindeki akım yoğunluğunun sabit bağıl nem (%100 BN) ve sıkıştırma basıncında (4 bar) sıcaklığa göre değişimi; I: GDT; (a) 50°C (b) 60°C, (c) 70°C, (d) 80°C; II: MGDT; (a) 50°C (b) 60°C, (c) 70°C, (d) 80°C

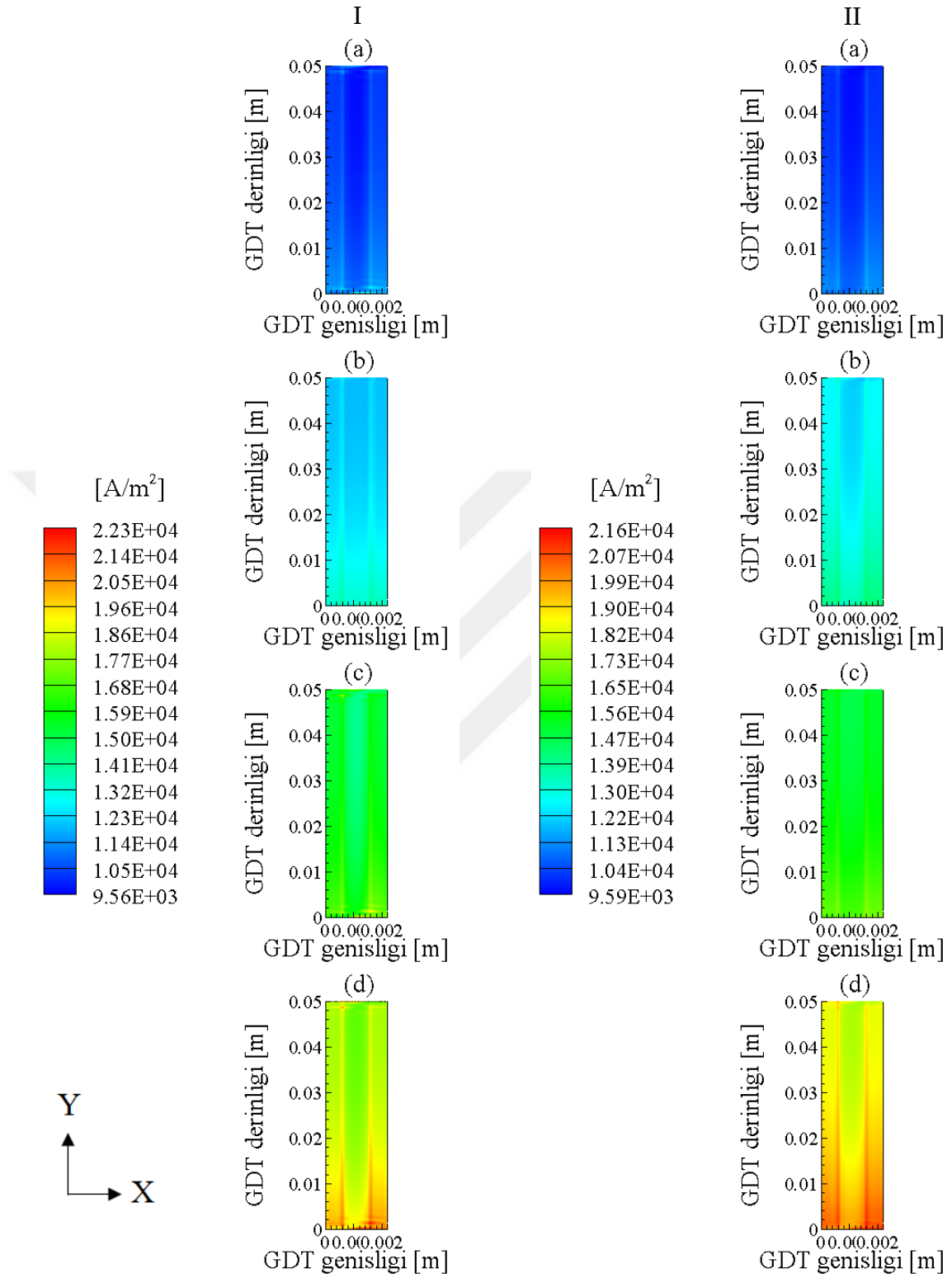
Şekil 46’da GDT ve MGDТ kullanılan modellerin anot kısmı düzlem yüzeylerindeki akım yoğunluklarının sabit sıcaklık (80 °C) ve sıkıştırma basıncında (4 bar) bağıl neme göre değişimi gösterilmektedir. Bağıl nem değerleri arttıkça hem GDT hem de MGDТ için akım yoğunluğu değerleri artmaktadır. Bilindiği üzere, anot ve katot kısımlarının katalizör tabakalarında gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda elektronlar oluşmaktadır. Bağıl nemin artışıyla birlikte bu reaksiyonlar artmakta ve dolayısıyla oluşan elektronlar artmaktadır. Bağıl nemin artışı GDT ve MGDТ’de akım yoğunluklarının artışına sebep olmaktadır. En yüksek akım yoğunluğunun GDT kullanılan durumda %100 BN, 80°C koşulunda $2.29 \cdot 10^4 \text{ Am}^{-2}$ olduğu görülmüştür.

GDT ve MGDТ’nin anot düzlem yüzeyleri için sabit sıcaklık (80°C) ve sabit bağıl nem (%100 BN) koşullarında sıkıştırma basıncının değişiminin akım yoğunluğu dağılımlarına etkisi Şekil 47’de gösterilmiştir. Sıkıştırma basıncı arttıkça hem GDT hem de MGDТ’de akım yoğunlukları artmıştır. İncelenmiş olan bu koşulda sıcaklık ve bağıl nem sabit kaldığından, hücrede meydana gelen akım yoğunluğu dağılımlarında tek etken elektriksel iletkenlik değerleridir. Deneysel sonuçlarda gördüğümüz üzere sıkıştırma basıncı arttıkça elektriksel iletkenlikler minimal artış göstermiştir. Bu da akım yoğunluğu dağılımlarında etkisini göstermiştir.

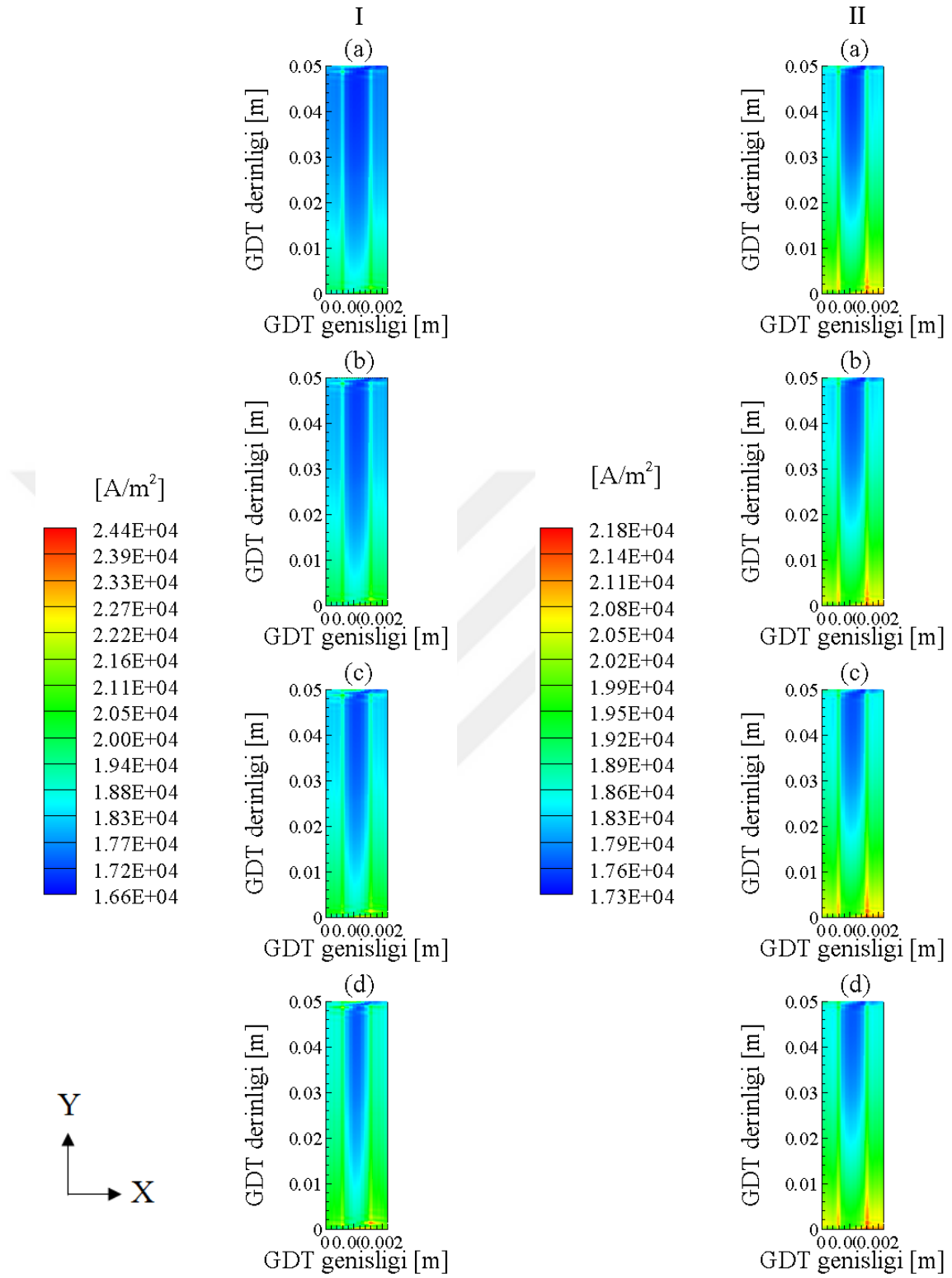
GDT ve MGDТ için sabit bağıl nem (%100 BN) ve sıkıştırma basıncında (4 bar) sıcaklık değişiminin anot kısmı düzlem yüzeyindeki akım yoğunluğunun dağılımına etkisi Şekil 48’de gösterilmektedir. Deneysel verilere göre sıcaklık arttıkça elektriksel iletkenlik değerleri düzlem yüzeyinde kısmen de olsa artış göstermektedir. Ayrıca sıcaklık artışı hücre içinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonları hızlandıracağından hücre performansı da artacaktır. Performans arttıkça katalizör tabakalarda gerçekleşen yükseltgenme ve indirgenme reaksiyonları sonucunda transfer olacak elektronların miktarı artmaktadır. Dolayısıyla sıcaklık artışıyla her iki difüzyon tabakasında da akım yoğunluklarının arttığı görülmektedir.

5.4.4.2. Gözenekli ve Mikro-gözenekli GDT için Katot Kısmı Düzlem Yüzeyindeki Akım Yoğunluklarının Dağılımları

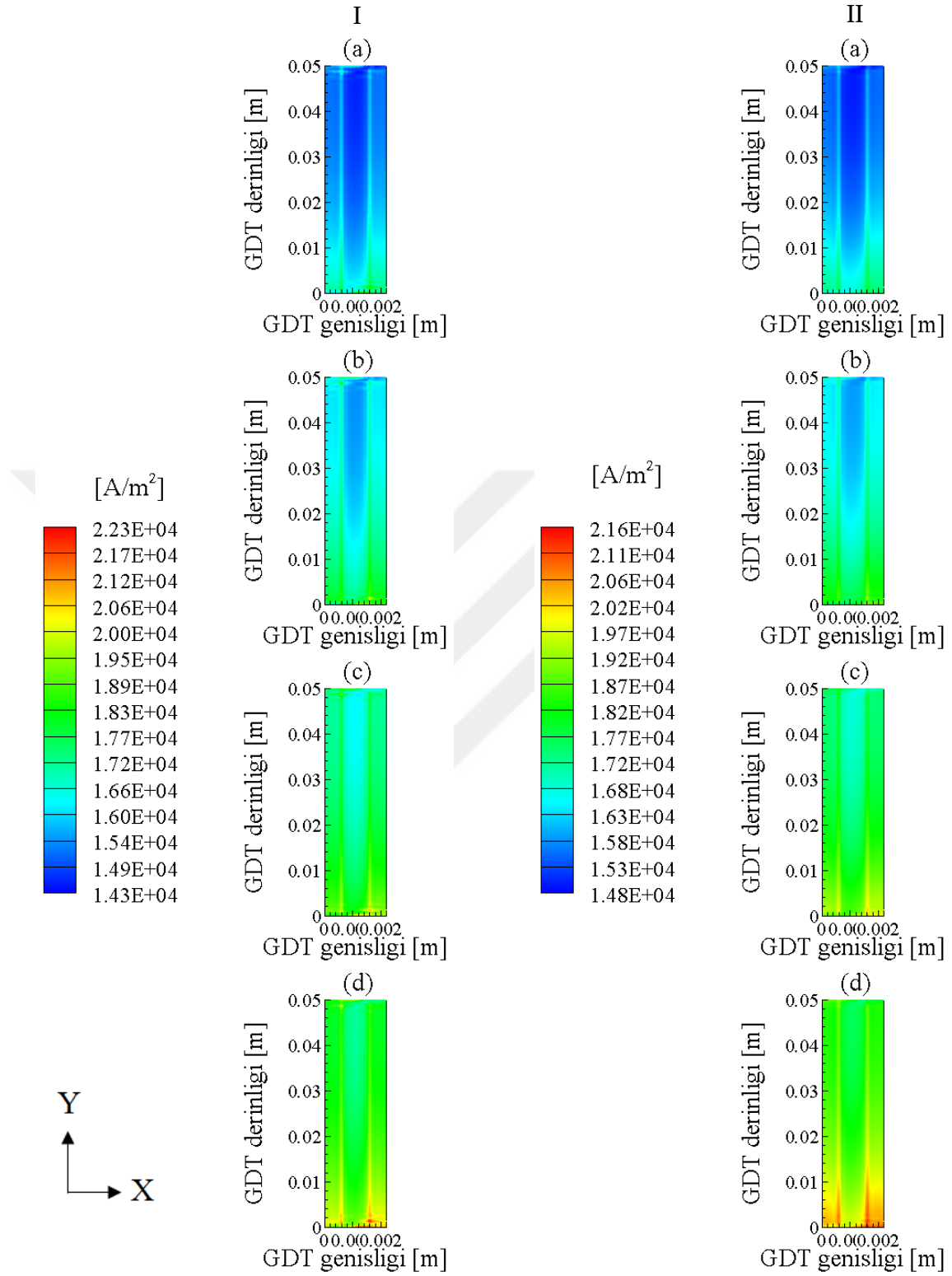
Farklı sıcaklık, bağıl nem ve sıkıştırma basıncı koşullarının kombinasyonlarına göre katot kısmı düzlem yüzeyindeki akım yoğunluklarının dağılımları Şekil 49-51 arasında gösterilmiştir.



Şekil 49. Katot kısmı düzlem yüzeyindeki akım yoğunluğunun sabit sıcaklık ($80\text{ }^{\circ}\text{C}$) ve sıkıştırma basıncında (4 bar) bağıl neme göre değişimi; I: GDT; (a) %70 BN, (b) %80 BN, (c) %90 BN, (d) %100 BN; II: MGDT; (e) %70 BN, (f) %80 BN, (g) %90 BN, (h) %100 BN



Şekil 50. Katot kısmı düzlem yüzeyindeki akım yoğunluğunun sabit sıcaklık (80 °C) ve bağıl nemde (%100 BN) sıkıştırma basıncına göre değişimi; I: GDT; (a) 2 bar, (b) 4 bar, (c) 6 bar, (d) 8 bar; II: MGD; (a) 2 bar, (b) 4 bar, (c) 6 bar, (d) 8 bar



Şekil 51. Katot kısmı düzlem yüzeyindeki akım yoğunluğunun sabit bağıl nem (%100 BN) ve sıkıştırma basıncında (4 bar) sıcaklığa göre değişimi; I: GDT; (a) 50°C (b) 60°C, (c) 70°C, (d) 80°C; II: MGDT; (a) 50°C (b) 60°C, (c) 70°C, (d) 80°C

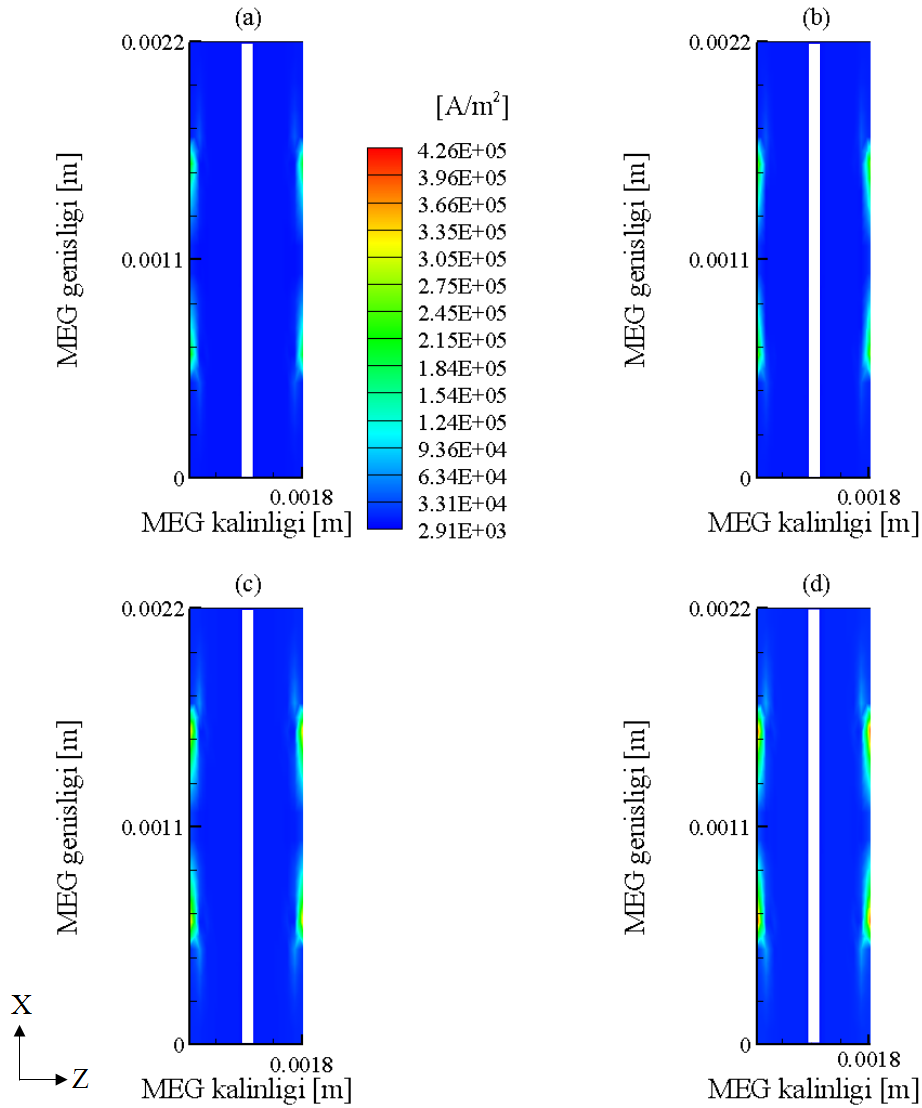
GDT ve MGDТ kullanılan modellerin katot kısmı düzlem yüzeylerindeki akım yoğunluklarının sabit sıcaklık (80 °C) ve sıkıştırma basıncında (4 bar) bağıl nem değişimine göre dağılımı Şekil 49’da gösterilmiştir. Bağıl nemin artışıyla birlikte her iki difüzyon tabakasının katot düzlem yüzeyindeki akım yoğunlukları artmaktadır. Bunun sebebi bağıl nemin artışıyla membranın iyonik iletkenliğinin artması ve gerçekleşen reaksiyonların artmasıyla transfer edilecek elektronların artmasıdır. En yüksek akım yoğunluğunun GDT kullanılan durumda %100 BN, 80°C koşulunda $2.23 \cdot 10^4 \text{ Am}^{-2}$ olduğu görülmüştür. Bununla birlikte aynı koşullarda anot kısmı düzlem yüzeyinde olduğu gibi katot düzlem yüzeyinde de kanal girişlerinde akım yoğunlukları çıkışlarına göre daha yüksektir.

Şekil 50’de GDT ve MGDТ’nin anot düzlem yüzeyleri için sabit sıcaklık (80°C) ve sabit bağıl nem (%100 BN) koşullarında sıkıştırma basıncının değişiminin akım yoğunluğu dağılımlarına etkisi gösterilmiştir. Sıkıştırma basıncı arttıkça hem GDT hem de MGDТ’de akım yoğunlukları artmıştır. Bunun sebebi sıkıştırma basıncının artışıyla hem GDT hem de MGDТ’de kısmen artış gösteren elektriksel iletkenliklerdir.

Şekil 51’de GDT ve MGDТ için sabit bağıl nem (%100 BN) ve sıkıştırma basıncında (4 bar) sıcaklık değişiminin anot kısmı düzlem yüzeyindeki akım yoğunluğunun dağılımına etkisi gösterilmektedir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre GDT ve MGDТ’nin her doğrultusunda geçerli olmak üzere sıcaklık arttıkça elektriksel iletkenlik değerleri artış göstermektedir. Ayrıca sıcaklık artışı hücre içinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonları hızlandıracığından hücre performansı da artacaktır. Katalizör tabakalarda gerçekleşen yükseltgenme ve indirgenme reaksiyonları sonucunda transfer olacak elektronların miktarı artmaktadır. Bu sebepten dolayıdır ki sıcaklığın artması her iki difüzyon tabakasında da akım yoğunluklarını artırmıştır.

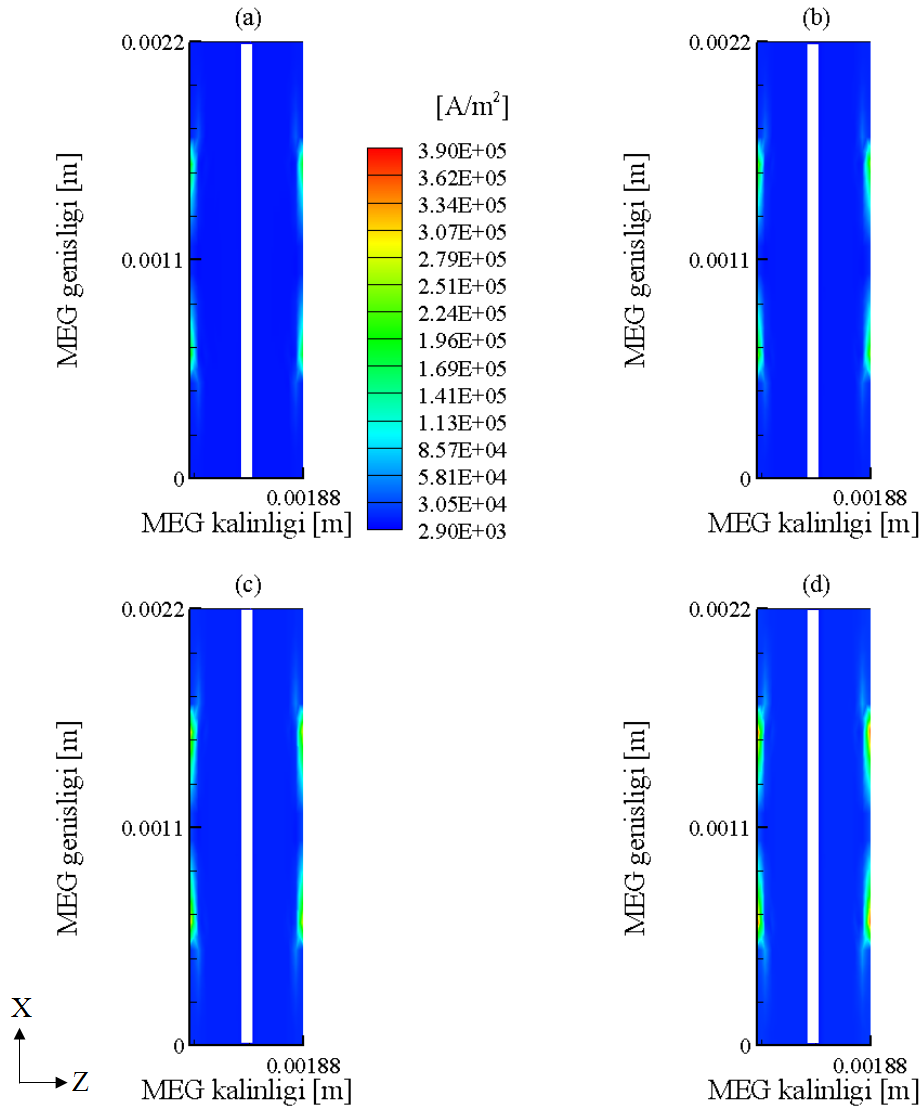
5.4.4.3. Gözenekli ve Mikro-gözenekli GDT için Düzlem Normalindeki Akım Yoğunluklarının Dağılımları

Farklı çalışma koşulu kombinasyonlarında GDT ve MGDТ kullanılan modeller için düzlem normalindeki akım yoğunluğu dağılımları bu başlık altında incelenmiştir. Modelleme çalışmalarında kullanılan arayüzeyler Şekil 35.(c) ve Şekil 35.(f)’de gösterilmiştir.



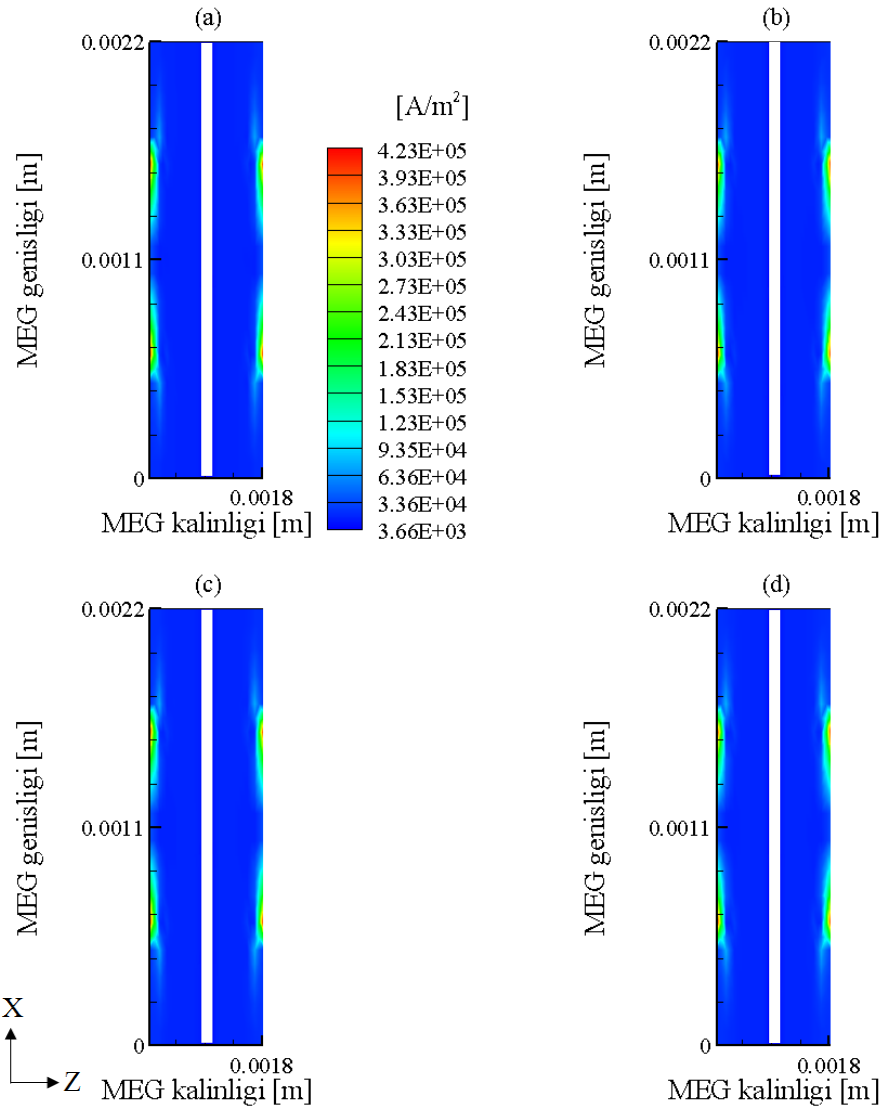
Şekil 52. GDT için düzlem normalindeki akım yoğunluğunun sabit sıcaklık ($80^{\circ}C$) ve sabit sıkıştırma basıncında (4 bar) bağıl nem değişimine göre incelenmesi;
(a) %70 BN, (b) %80 BN, (c) %90 BN, (d) %100 BN

GDT için sabit sıcaklık ($80^{\circ}C$) ve sıkıştırma basıncında (4 bar) bağıl nem değişiminin düzlem normalindeki akım yoğunluğu dağılımına etkisi Şekil 52’de gösterilmektedir. Bağıl nem değerleri artarken, rib bölgelerindeki akım yoğunluğu ve akım yoğunluğunun etki ettiği alan artmaktadır. Hücrenin anot ve katot kısımları kendi arasında karşılaştırıldığında, katot kısmındaki akım yoğunluklarının daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca katalizör tabaka ve GDT’de akım yoğunluğu homojen iken rib bölgelerinde bu durum değişmekte ve akım yoğunluğu artmaktadır.



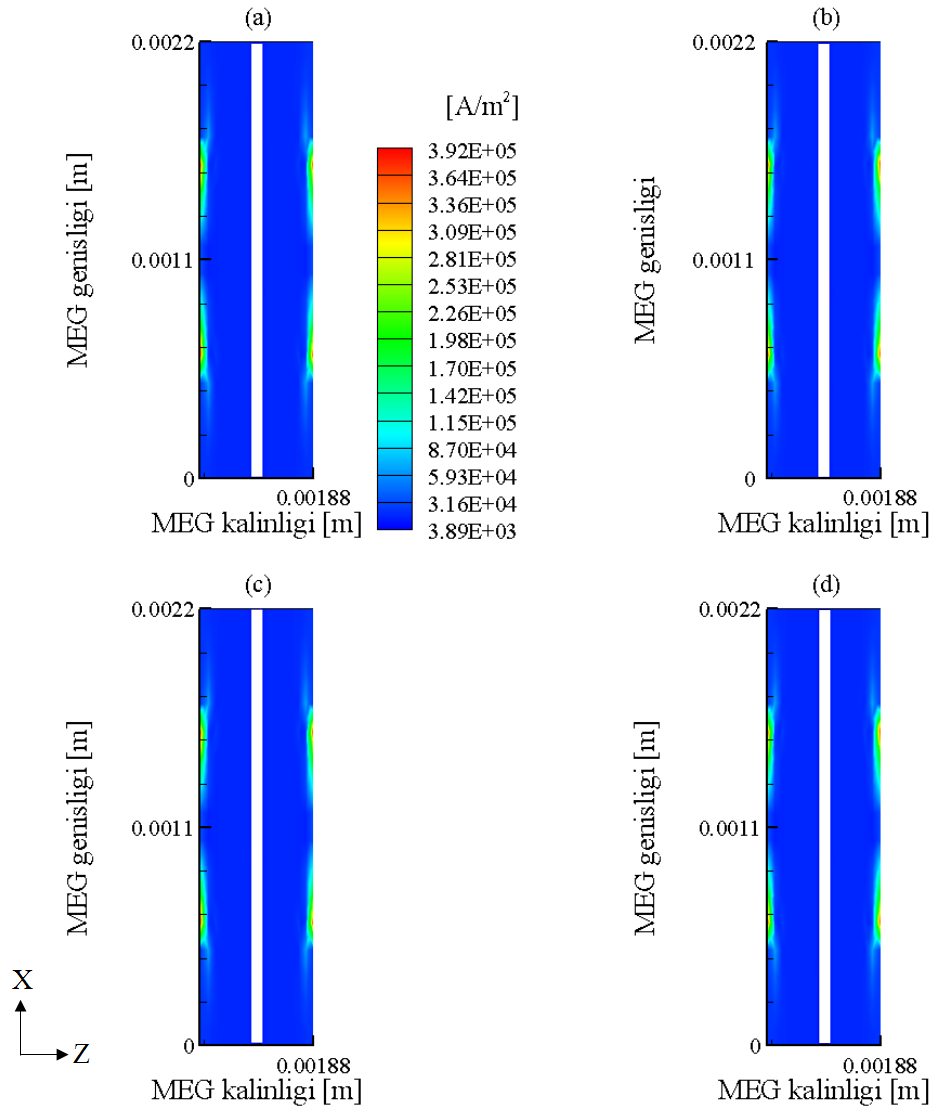
Şekil 53. MGDТ için düzlem normalindeki akım yoğunluğunun sabit sıcaklık (80°C) ve sabit sıkıştırma basıncında (4 bar) bağıl nem değişimine göre incelenmesi;
(a) %70 BN, (b) %80 BN, (c) %90 BN, (d) %100 BN

Şekil 53’de MGDТ için sabit sıcaklık (80°C) ve sıkıştırma basıncında (4 bar) bağıl nem değişiminin düzlem normalindeki akım yoğunluğu dağılımına etkisi incelenmiştir. Aynı koşullarda anot ve katot rib bölgeleri incelendiğinde ise katot rib bölgelerindeki akım yoğunluğunun etki alanı ve akım yoğunluğu değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Bununla birlikte aynı koşullarda GDT’nin kullanıldığı model sonuçlarıyla karşılaştırıldığında akım yoğunlukları daha düşüktür.



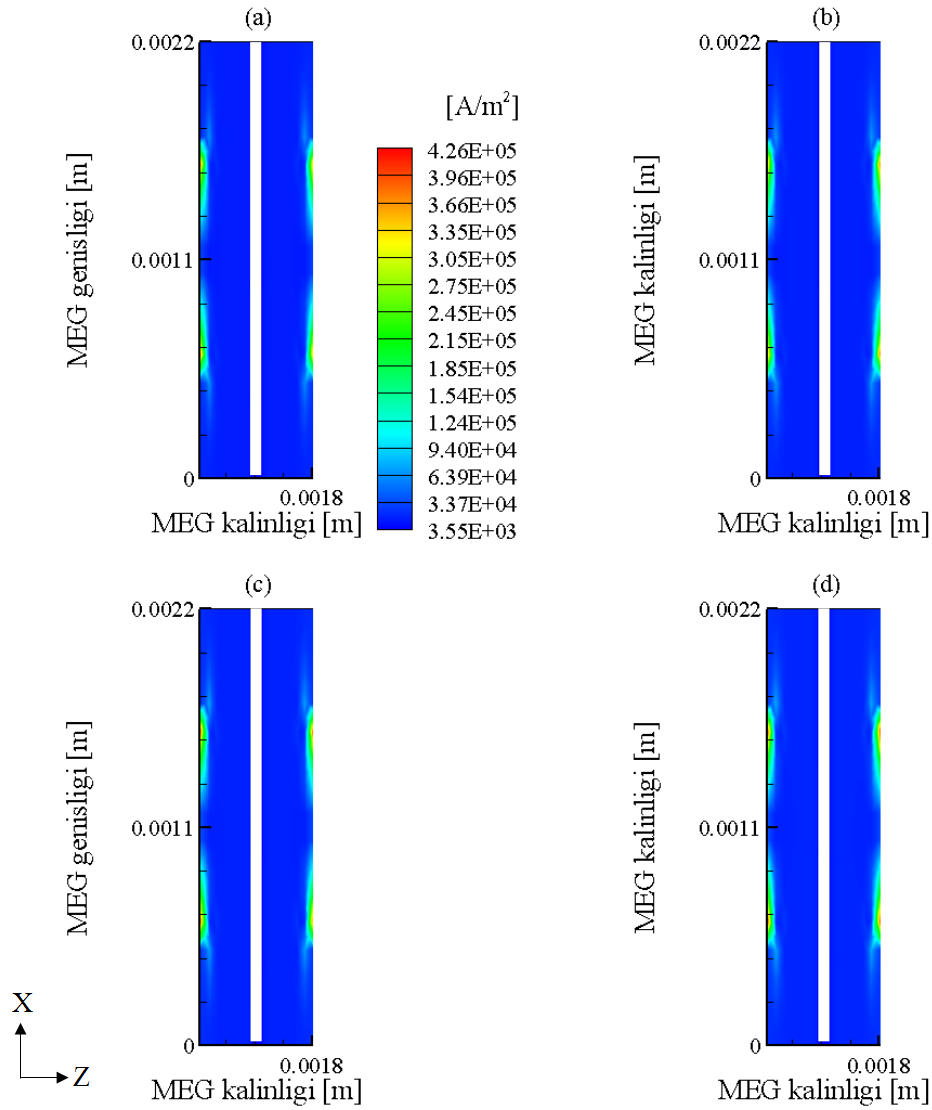
Şekil 54. GDT için düzlem normalindeki akım yoğunluğunun sabit sıcaklık (80°C) ve bağıl nem (%100 BN) koşullarında sıkıştırma basıncı değişimine göre incelenmesi; (a) 2 bar, (b) 4 bar, (c) 6 bar, (d) 8 bar

GDT için sabit sıcaklık (80°C) ve bağıl nemde (%100 BN) sıkıştırma basıncı değişiminin düzlem normalindeki akım yoğunluğu dağılımına etkisi Şekil 54’de verilmiştir. Sıcaklık ve bağıl nem sabit olduğundan yalnızca elektriksel iletkenlik değerlerindeki değişim elektrokimyasal reaksiyonlara etki göstermektedir. Anot ve katot rib bölgelerindeki akım yoğunluğunun değişimi, sıkıştırma basıncının artışıyla paralel olarak düşük seviyede gerçekleşmektedir. Ancak aynı koşullar altındaki anot ve katot rib bölgeleri değerlendirildiğinde katot bölgesindeki akım yoğunluğunun etki alanının daha geniş ve değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir.



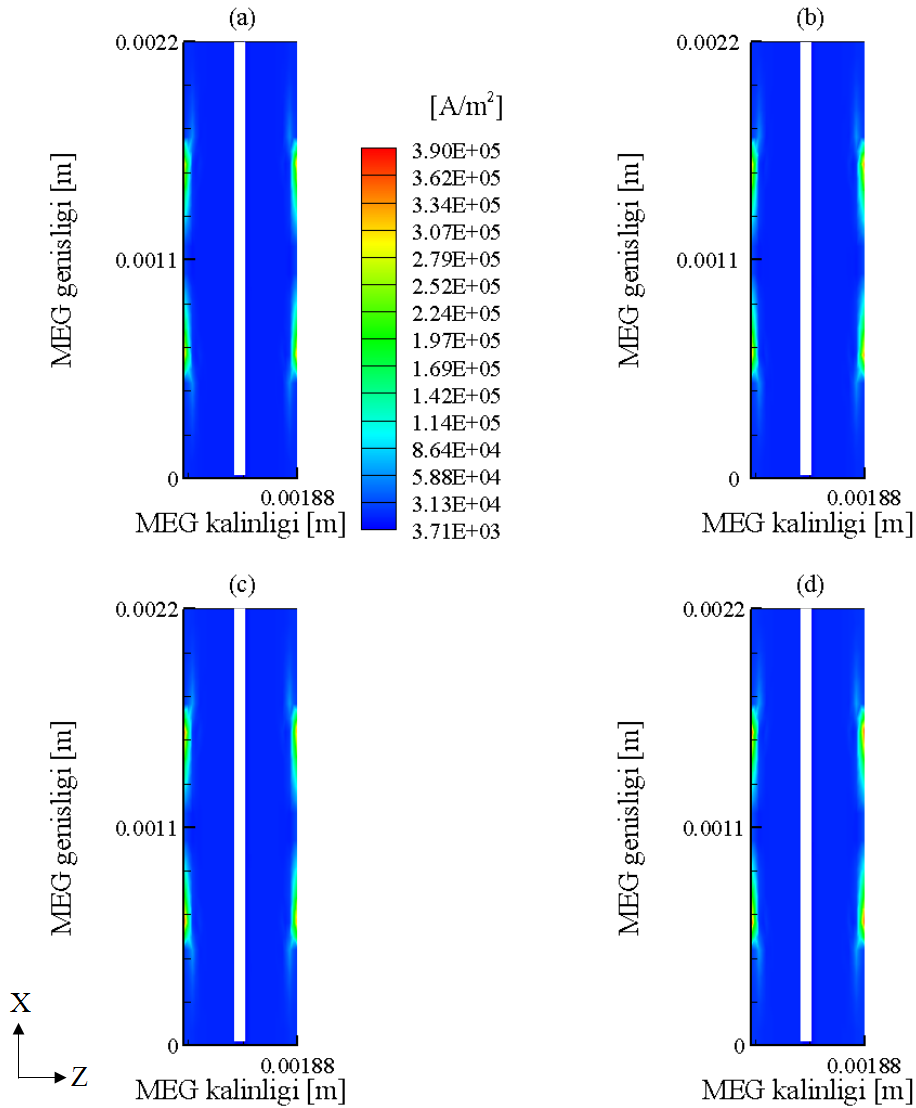
Şekil 55. MGDT için düzlem normalindeki akım yoğunluğunun sabit sıcaklık (80°C) ve bağıl nem (%100 BN) koşullarında sıkıştırma basıncı değişimine göre incelenmesi;
(a) 2 bar, (b) 4 bar, (c) 6 bar, (d) 8 bar

Şekil 55’de MGDT için sabit sıcaklık (80°C) ve bağıl nemde (%100 BN) sıkıştırma basıncı değişiminin düzlem normalindeki akım yoğunluğu dağılımına etkisi gösterilmiştir. Anot ve katot kısımları ayrı ayrı incelendiğinde sıkıştırma basıncının artışıyla birlikte akım yoğunluklarının minimal düzeyde değiştiği görülmektedir. Aynı koşullar altında anot ve katot kısımlarındaki rib alanları incelendiğinde katot rib bölgelerindeki akım yoğunluğunun daha yüksek olduğu görülmektedir. Bununla birlikte aynı koşullar altında GDT ve MGDT kıyaslandığında en yüksek akım yoğunlukları sırasıyla $4.23 \cdot 10^5 \text{ A/m}^2$ ve $3.92 \cdot 10^5 \text{ A/m}^2$ olarak ölçülmüştür.



Şekil 56. GDT için düzlem normalindeki akım yoğunluğunun sabit bağıl nem (%100 BN) ve sıkıştırma basıncı (4 bar) koşullarında sıcaklık değişimine göre incelenmesi; (a) 50°C, (b) 60°C, (c) 70°C, (d) 80°C

GDT için sabit bağıl nem (%100 BN) ve sıkıştırma basıncında (4 bar) sıcaklığın değişiminin düzlem normalindeki akım yoğunluğu dağılımına etkisi Şekil 56'da incelenmiştir. Artan sıcaklık koşullarında anot ve katot rib bölgelerindeki akım yoğunluklarının arttığı gözlenmektedir. Akım yoğunluklarının yoğunlaştığı alan ise sıcaklığın artışıyla birlikte artmaktadır. En yüksek akım yoğunluğunun %100 BN, 4 bar ve 80°C koşulları altında yaklaşık $4.26 \cdot 10^5$ A/m² olduğu görülmektedir.



Şekil 57. MGDТ için düzlem normalindeki akım yoğunluğunun sabit bağıl nem (%100 BN) ve sıkıştırma basıncı (4 bar) koşullarında sıcaklık değişimine göre incelenmesi; (a) 50°C, (b) 60°C, (c) 70°C, (d) 80°C

Şekil 57’de MGDТ için sabit bağıl nem (%100 BN) ve sıkıştırma basıncında (4 bar) sıcaklığın değişiminin düzlem normalindeki akım yoğunluğu dağılımına etkisi incelenmiştir. Anot ve katot rib bölgeleri sıcaklığın artışı yönünde ayrı ayrı incelendiğinde akım yoğunluklarının arttığı, etki alanlarının büyüdüğü görülmektedir. Elektronların kanal bölgesinde iletilebileceği bir ortamla karşılaşmadığından kanal ve riblerin kesiştiği bölgeye transfer olmakta ve bu bölgelerde akım yoğunluğu oluşturmaktadır. Bununla birlikte MGDТ’deki en yüksek akım yoğunluğu $3.9 \cdot 10^5 \text{ A/m}^2$ olarak %100 BN, 4 bar ve 80°C koşullarında ölçülmüştür.

6. BÖLÜM

SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, sıcaklık (50 °C, 60 °C, 70 °C, 80 °C) bağıl nem (%70, %80, %90, %100) ve sıkıştırma basıncının (2 bar, 4 bar, 6 bar, 8 bar) PEM tipi yakıt hücresi bileşenlerinden olan gözenekli ve mikro-gözenekli gaz difüzyon tabakalarının anizotropik elektriksel iletkenlik değerleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, sıcaklığın artışıyla ısınan karbon-fiber yapılarının içinden akan elektronların kinetik enerjilerinin arttığı ve dolayısıyla daha kolay transfer olduğu, yani her iki difüzyon tabakasının tüm doğrultularındaki iletkenliklerinin arttığı görülmüştür. Sıcaklık artışının etkisi düzlem yüzeyindeki iletkenlikler için minimal iken, düzlem normalindeki iletkenliklerde dominanttır. Sıkıştırma basıncının artışı düzlem normalindeki elektriksel iletkenlik değerleri fiberlerin birbirine yaklaşarak direnci düşürmesi dolayısıyla iletkenliğin arttığı görülmüştür. Düzlem yüzeyinde ise sıkıştırma basıncı arttıkça karbon-fiber yapıların kırılarak direnci artırdığı ve iletkenliği düşürdüğü ortaya konmuştur. Bağıl nem değişimi incelendiğinde ise doğrusal bir etkinin söz konusu olmadığı görülmekle birlikte bağıl nemin düzlem yüzeyinde düzlem normaline göre daha fazla etki gösterdiği gözlenmiştir. Ayrıca bu tez çalışmasında deneysel olarak belirlenmiş anizotropik elektriksel iletkenlik değerleri, deneysel veriyle doğrulanmış üç boyutlu matematiksel modele entegre edilmiştir. Matematiksel modelleme ile rib bölgelerindeki akım yoğunluğu, tersinmez ısı kayıpları ve performans analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, bağıl nem ve sıcaklık koşullarının bahsedilen parametreler üzerinde sıkıştırma basıncına göre daha büyük etkiye sahip olduğu gözlenmiştir.

Gaz difüzyon tabakalarının anot ve katot düzlem yüzeyleri üzerinde ve düzlem normalindeki analizleri sonucunda ise akış kanallarının giriş bölgelerinde akım yoğunluğunun yüksek olduğu, çıkış bölgesine yaklaştıkça akım yoğunluğunun düştüğü her iki difüzyon tabakasında da ortaya konmuştur. Akım yoğunluğunun düzlem

normalindeki dağılımı incelendiğinde diğer koşullar sabit tutularak bağıl nem değeri %70 değerinden %100 değerine ilerledikçe rib bölgelerindeki akım yoğunluğu artmaktadır. Aynı şekilde sıcaklık değeri 50 °C değerinden 80 °C değerine ilerledikçe benzer şekilde rib bölgelerindeki akım yoğunluğu artmıştır. Sabit bağıl nem ve sabit sıcaklık koşullarında sıkıştırma basıncı artırıldığında kanal girişinde akım yoğunluğu yüksek iken, çıkış bölgesine ilerledikçe düşmektedir.

Gözenekli tabakaları oluşturan karbon-fiber yapının karakteristik özellikleri sıcaklık, bağıl nem ve sıkıştırma basıncı gibi uygulama koşullarından etkilenmektedir. Ayrıca tabakanın farklı bölgelerinde farklı akım yoğunlukları, farklı sıcaklık dağılımları göstereceği de açıktır. Bu noktada anizotropik yapı kontrollü şekilde uygulanarak fiber yapıların sıklığı düzenlenebilir. Bu sayede uygulamada karşılaşılan gözenekli tabakaların belirli bir bölgesinin hızla deforme olması durumundan kaçınılmış olarak malzemenin kullanım ömrü artırılabilir.

Tez kapsamında elde edilen sonuçlar kullanılarak aşağıdaki çalışmalar yapılmıştır:

Tezden Yapılan Uluslararası Bildiriler ve Hazırlanan Makaleler

1. Elden, G., Taş, M., 2017. Numerical investigation of anisotropic electrical conductivity effects in proton exchange membrane fuel cell, 216-216. *4th International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering (ICCESN 2017)*, 4-8 Ekim 2017, Antalya, 871.
2. Taş, M., Elden, G., 2018. Investigation of the effect of single stage and four-stage clamping pressure on electrical resistance of GDL, x-x. *3rd International Hydrogen Technologies Congress (IHTEC-2018)*, 15-18 Mart 2018, ANTALYA, XX.

KAYNAKÇA

1. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (Web sayfası: <http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Hidrojen-Enerjisi>) (Erişim tarihi: 17.01.2018)
2. İbrahimoglu, İ., 2008. Hidrojenli Enerji Üreteçleri. Nobel Yayın Dağıtım-ANKARA, 195.
3. Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü. (Web sayfası: http://www.yegm.gov.tr/teknoloji/h_enerjisi.aspx) (Erişim tarihi: 02.05.2018)
4. U.S. Energy Information Administration. (Web sayfası: https://www.eia.gov/energyexplained/index.cfm?page=hydrogen_use),(Erişim tarihi: 03.02.2018)
5. Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü. (Web sayfası: http://www.yegm.gov.tr/teknoloji/h_teknolojisi.aspx), (Erişim tarihi: 01.05.2018)
6. Mench, M. M. 2008. Fuel Cell Engines. Wiley – USA. 515.
7. Barbir, F. 2013. Pem Fuel Cells Theory and Practice. Elsevier, USA. 518.
8. Strasser, K., 2003. System design and applications, 775-788. *In: Handbook of Fuel Cells—Fundamentals, Technology and Applications*, Vol. 4, W. Vielstich, A. Lamm, and H. A. Gasteiger., Wiley, New York.
9. Farooque, M., Ghezel-Ayagh, H., 2003. System design, 942-968. *In: Handbook of Fuel Cells—Fundamentals, Technology and Applications*, Vol. 4, W. Vielstich, A. Lamm, and H.A. Gasteiger, Eds., Wiley, New York.
10. Holtappels, P., Stimming, U., 2003. Solid oxide fuel cells, 335-354. *In: Handbook of Fuel Cells—Fundamentals, Technology and Applications*, Vol. 1, W. Vielstich, A. Lamm, and H. A. Gasteiger, Eds., Wiley, New York.

11. King, J. M., Kunz, H. R., 2003. Phosphoric Acid Electrolyte Fuel Cells, 287-300. *In: Handbook of Fuel Cells—Fundamentals, Technology and Applications*, Vol. 1, W. Vielstich, A. Lamm, and H. A. Gasteiger, Eds., Wiley, New York.
12. Yamamoto, O., 2003. Low Temperature Electrolytes and Catalysts, 1002-1014. *In: Handbook of Fuel Cells—Fundamentals, Technology and Applications*, Vol. 4, W. Vielstich, A. Lamm, and H. A. Gasteiger, Eds., Wiley, New York.
13. King, J. M., Kunz, H. R., 2003. Phosphoric Acid Electrolyte Fuel Cells, 287-300. *In: Handbook of Fuel Cells—Fundamentals, Technology and Applications*, Vol. 1, W. Vielstich, A. Lamm, and H. A. Gasteiger, Eds., Wiley, New York.
14. Mathias, M. F., Roth, J., Fleming, J., Lehnert, W., 2003. Diffusion Media Materials and Characterization, 517-537. *In: Handbook of Fuel Cells—Fundamentals, Technology and Applications*, Vol. 3, W. Vielstich, A. Lamm, and H. A. Gasteiger, Eds., Wiley, New York.
15. Qi, Z., 2013. Proton Exchange Membrane Fuel Cells: CRC Press, Çin.
16. Montgomery, H. C., 1971. Method for measuring electrical resistivity of anisotropic materials. **Journal of Applied Physics**, **42**(7): 2971–2975.
17. Todd, D., Schwager, M., Merida, W., 2014. Three-dimensional anisotropic electrical resistivity of pem fuel cell transport layers as functions of compressive strain. **Journal of the Electrochemical Society**, **162**(3): F265–F272.
18. Todd, D., Bennett, S., Merida, W., 2016. Anisotropic electrical resistance of proton exchange membrane fuel cell transport layers as a function of cyclic strain. **International Journal of Hydrogen Energy**, **41**(14), 6029–6035.
19. El-kharouf, A., Mason, T.J., Brett, D.J.L., Pollet, B.G., 2012. Ex-situ characterisation of gas diffusion layers for proton exchange membrane fuel cells. **Journal of Power Sources**, **218**(C), 393-404.
20. Mason, T. J., Millichamp, J., Neville, T. P., El-Kharouf, A., Pollet, B. G., & Brett, D. J. L., 2012. Effect of clamping pressure on ohmic resistance and compression of

- gas diffusion layers for polymer electrolyte fuel cells. **Journal of Power Sources**, **219**, 52–59.
21. Wilde, P. M., Mändle, M., Murata, M., & Berg, N., 2004. Structural and physical properties of GDL and GDL/BPP combinations and their influence on PEMFC performance. **Fuel Cells**, **4**(3), 180–184.
 22. Ismail, M. S., Damjanovic, T., Ingham, D. B., Pourkashanian, M., & Westwood, A., 2010. Effect of polytetrafluoroethylene-treatment and microporous layer-coating on the electrical conductivity of gas diffusion layers used in proton exchange membrane fuel cells. **Journal of Power Sources**, **195**(9), 2700–2708.
 23. Nitta, I., Hottinen, T., Himanen, O., Mikkola, M., 2007. Inhomogeneous compression of PEMFC gas diffusion layer Part I . Experimental. **Journal of Power Sources**, **171**, 26–36.
 24. Vikram, A., Chowdhury, P. R., Phillips, R. K., & Hoorfar, M. 2016., Measurement of effective bulk and contact resistance of gas diffusion layer under inhomogeneous compression e Part I: Electrical conductivity. **Journal of Power Sources**, **320**, 274–285.
 25. Chang, W. R., Hwang, J. J., Weng, F. B., & Chan, S. H. 2007., Effect of clamping pressure on the performance of a PEM fuel cell, **Journal of Power Sources**, **166**, 149–154.
 26. Hamour, M., Grandidier, J. C., Ouibrahim, A., & Martemianov, S., (2015). Electrical conductivity of PEMFC under loading. **Journal of Power Sources**, **289**, 160–167.
 27. Zhou, T., & Liu, H., 2006. Effects of the electrical resistances of the GDL in a PEM fuel cell. **Journal of Power Sources**, **161**(1), 444–453.
 28. Ismail, M. S., Hughes, K. J., Ingham, D. B., Ma, L., Pourkashanian, M., 2012. Effects of anisotropic permeability and electrical conductivity of gas diffusion layers on the performance of proton exchange membrane fuel cells. **Applied Energy**, **95**, 50–63.

29. Bapat, C. J., Thynell, S. T., 2008. Effect of anisotropic electrical resistivity of gas diffusion layers (GDLs) on current density and temperature distribution in a Polymer Electrolyte Membrane (PEM) fuel cell. **Journal of Power Sources**, **185**(1), 428–432.
30. Ju, H., (2009). Investigation of the effects of the anisotropy of gas-diffusion layers on heat and water transport in polymer electrolyte fuel cells. **Journal of Power Sources**, **191**, 259–268.
31. Meng, H., Wang, C., 2004. Electron transport in PEFCs. **Journal of the Electrochemical Society**, 358–367.
32. Ametek Scientific Instruments, (Web sayfası: <https://www.ameteksi.com/products/potentiostats/single-channel/versastat-series/versastat-3>), (Erişim tarihi: 01.06.2017)
33. Sigracet GDL 34 BA&BC datasheet, (Web sayfası: http://www.fuelcellstore.com/spec-sheets/SGL-GDL_34-35.pdf), (Erişim tarihi: 04.04.2017)
34. Springer T.E, Zawodzinski T.A., Gottesfeld S., 1993. Polymer Electrolyte Fuel Cell Model, **Journal of Electrochemical Society** **138**(8), pp. 2334–2342.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Mert TAŞ
Uyruğu: Türkiye (T.C)
Doğum Tarihi ve Yeri: 19.02.1992 - Çorum
Medeni Durum: Evli
e-mail: merttas35@gmail.com
Yazışma Adresi: Mevlana Mah. Taslak Sokak Havacılar Sitesi No:6 Daire:37
 Talas/KAYSERİ

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Erciyes Üniversitesi Enerji Sistemleri Müh.	2018
Lisans	Erciyes Üniversitesi Enerji Sistemleri Müh.	2015
Lise	Cihat Kora Anadolu Lisesi, İzmir	2010

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2015-Halen	ERÜ / Mühendislik Fakültesi	Araştırma Görevlisi
2012-2015	ERÜ / Mühendislik Fakültesi	Proje Asistanlığı
2011-2012	ERÜ / Güzel Sanatlar Fakültesi	Bölüm Sekreterliği

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

1. Kaya, M. F., Demir, N., Albawabiji, M. S., Tas, M. (2017). Investigation of alkaline water electrolysis performance for different cost effective electrodes under magnetic field. **International Journal of Hydrogen Energy**, 42, 17583-17592
2. Elden, G., Taş, M., 2017. Numerical investigation of anisotropic electrical conductivity effects in proton exchange membrane fuel cell, 216-216. *4th International*

Conference on Computational and Experimental Science and Engineering (ICCESSEN 2017), 4-8 Ekim 2017, Antalya/TÜRKİYE, 871.

3. Taş, M., Çelik, M., Elden, G., 2017. The deformation analysis of H₃PO₄ doped PBI based membrane electrode assemblies, 120-123. *1st International Conference on Energy Systems Engineering (ICESE 2018)*, 2-4 Kasım 2017, Karabük/TÜRKİYE, 606.

4. Taş, M., Elden, G., 2018. Investigation of the effect of single stage and four-stage clamping pressure on electrical resistance of GDL, x-x. *3rd International Hydrogen Technologies Congress (IHTEC-2018)*, 15-18 Mart 2018, Antalya/TÜRKİYE, XX.

5. Taş, M., Yıldırım, C., Elden, G., 2018. Numerical investigation of backpressure and flow channel characterization effects in PEM fuel cell, x-x. *16th International Conference on Clean Energy (ICCE-2018)*, 9-11 Mayıs 2018, KKTC, XX.