



**T.C.
OSMANIYE KORKUT ATA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

Barış KAVASOĞULLARI

**MEMBRAN TABANLI SIVI DESİKANT
HAVA NEM ALMA SİSTEMLERİNİN
İNCELENMESİ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

OSMANIYE – 2020

**T.C.
OSMANİYE KORKUT ATA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
DOKTORA TEZİ**

**MEMBRAN TABANLI SIVI DESİKANT HAVA NEM
ALMA SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ**



Barış KAVASOĞULLARI

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**OSMANİYE
ARALIK-2020**

TEZ ONAYI

MEMBRAN TABANLI SIVI DESİKANT HAVA NEM ALMA SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ

Barış KAVASOĞULLARI tarafından Doç. Dr. Ertuğrul CİHAN danışmanlığında Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği** Anabilim Dalı'nda hazırlanan bu çalışma aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından oy birliği/çokluğu ile **Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Ertuğrul CİHAN
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, OKÜ

.....

İkinci Danışman: Doç. Dr. Hasan DEMİR
Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, OKÜ

.....

Üye: Prof. Dr. Beşir ŞAHİN
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, ÇÜ

.....

Üye: Prof. Dr. Mehmet BİLGİLİ
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, ÇÜ

.....

Üye: Doç. Dr. Şaban ÜNAL
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, OKÜ

.....

Üye: Doç. Dr. Nehir TOKGÖZ
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, OKÜ

.....

Yukarıdaki jüri kararı Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih ve /..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Doç. Dr. Tugay AYAŞAN
Enstitü Müdürü, **Fen Bilimleri Enstitüsü**

.....

Bu Çalışma OKÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Tarafından Desteklenmiştir.

Proje No: OKÜBAP-2018-PT3-013

Bu tezde kullanılan özgün bilgiler, şekil, çizelge ve fotoğraflardan kaynak göstermeden alıntı yapmak 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu hükümlerine tabidir.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, bu çalışma sonucunda elde edilmeyen her türlü bilgi ve ifade için ilgili kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını ve bu tezin Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Barış KAVASOĞULLARI



ÖZET

MEMBRAN TABANLI SIVI DESİKANT HAVA NEM ALMA SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ

Bariş KAVASOĞULLARI
Doktora, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Ertuğrul CİHAN

Aralık 2020, 195 sayfa

Bu doktora tezi çalışmasında, bazı membran tabanlı hava nem alma sistemlerinin modellemesi ve analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada öncelikle, membranlar ve literatürde sıklıkla karşılaşılan membranlı nem alma sistemleri hakkında özet bilgilere yer verilmiştir. Daha sonra, farklı tipte membranlı nem alma sistemlerinin, COMSOL Multiphysics ve MATLAB yazılımlarından faydalanılarak, farklı akışkanlar için kütle transferi analizi yapılmıştır. Ayrıca, literatürde daha önce çalışılmamış boru-tipi nem alma sisteminin bu çalışma kapsamında tasarımı, deneysel ve kuramsal olarak incelemesi gerçekleştirilmiştir. Söz konusu sistemin farklı akışkan ve akış tipleri için yapılan analizlerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak, kütle transferi katsayısı için tasarımsal parametrelere bağlı eşitlikler sunulmuştur. Çalışmada son olarak, boru-tipi membranlı sıvı desikant nem alma sistemi temel alınarak modellenen, membranlı boru demeti sıvı desikant nem alma sisteminin farklı tip tasarımlar için nem alma performansı incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Membran, Sıvı Desikant, Nem Alma

ABSTRACT

THE INVESTIGATION OF MEMBRANE-BASED LIQUID DESICCANT AIR DEHUMIDIFICATION SYSTEMS

Bariş KAVASOĞULLARI
PhD, Department of Mechanical Engineering
Supervisor: Assoc. Prof.Dr Ertuğrul CİHAN

December 2020, 195 pages

In this PhD thesis, modelling and analysis of several membrane-based air dehumidification systems have been performed. In the study, firstly, brief information about membranes and membrane dehumidification systems, frequently encountered in the literature, have been given. Then, the mass transfer analysis of different types of membrane dehumidification systems using different fluids have been carried out by utilizing COMSOL Multiphysics and MATLAB softwares. Moreover, the design, theoretical and experimental investigations of the tubular membrane-based dehumidification system, which has not previously been studied in the literature, have been performed in the scope of this study. Using the results obtained from the analysis of the system for different fluids and flow types, equations related to the design parameters have been presented for the mass transfer coefficient. In the final chapter of the study, the dehumidification performance of the membrane tube bundle liquid desiccant dehumidification system, which was modeled based on the tubular membrane-based dehumidification system, has been investigated for different types of designs.

Key Words: Membrane, Liquid Desiccant, Air Dehumidification

Mustafa KAVASOĞULLARI'na....

TEŞEKKÜR

Doktora tez konumun belirlenerek tez çalışmamın yürütülmesini üstlenen, çalışmalarım süresince değerli bilgi ve tecrübeleriyle katkılarını esirgemeyen danışman hocalarım Sayın Doç. Dr. Ertuğrul CİHAN'a ve Sayın Doç. Dr. Hasan DEMİR'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tez çalışmam süresince sağladıkları katkılardan ötürü, tez izleme komitesinde bulunan, Sayın Prof. Dr. Mehmet BİLGİLİ ve Sayın Doç. Dr. Şaban ÜNAL hocalarıma da teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince bana sürekli destek olan, hiçbir zaman ilgisini esirgemeyen sevgili eşim Aysel KAVASOĞULLARI'na ve bana sevinç kaynağı olan canım oğlum Mustafa KAVASOĞULLARI'na da teşekkür ederim. Ayrıca çalışmalarım boyunca bana destek olan bölümümdeki diğer hocalarıma ve iş arkadaşlarıma da teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAYI.....	i
TEZ BİLDİRİMİ.....	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT.....	iv
İTHAF SAYFASI	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
SİMGELER ve KISALTMALAR	xviii
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	3
3. MEMBRAN TEKNOLOJİSİ VE UYGULAMALARI.....	7
3.1. Membran.....	7
3.1.1. Polimer Membranlar.....	10
3.1.2. Zeolit Membranlar	11
3.1.3. Karışım Matrisli Membranlar	12
3.1.4. Destekli Sıvı Membranlar	13
3.2. Membran Tabanlı Sıvı Desikant Nem Alma Sistemleri	14
4. MEMBRANLI KÜBİK NEM ALMA SİSTEMİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ.....	18
4.1. Sistemin Sonlu Farklar Yöntemiyle Analizi	24
4.2. Hesaplama Sonuçları	28
5. MEMBRANLI BORU TİPİ NEM ALMA SİSTEMİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ	34
5.1. Sistemin Modellenmesi	34
5.2. Sistemin Sonlu Farklar Yöntemiyle Modellenmesi.....	38
5.2.1. Sınır Şartları.....	45
5.2.2. Sistemde Laminar Akışta Hız Profillerinin Bulunması	48
5.3. Sistem Performansının Hesaplanması.....	50
5.3.1. Paralel Akış.....	54
5.3.2. Karşıt Akış.....	68
5.4. Sonuç	79

6.	MEMBRANLI KÜBİK SIVI DESİKANT NEM ALMA SİSTEMİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ.....	81
6.1.	Giriş	81
6.2.	Sistemin Modellenmesi	81
6.3.	Hesaplama Sonuçları	84
6.4.	Sonuç	93
7.	MEMBRANLI BORU TİPİ SIVI DESİKANT NEM ALMA SİSTEMİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ.....	95
7.1.	Giriş	95
7.2.	Sistemin Modellenmesi	95
7.2.1.	Sınır Şartları.....	103
7.2.2.	Çözüm Yöntemi.....	104
7.2.3.	Analiz Doğrulaması.....	105
7.3.	Bulgular ve Tartışma	107
7.3.1.	Paralel Akış.....	108
7.3.2.	Karşıt Akış.....	112
7.4.	Sonuç	119
8.	MEMBRANLI BORU-TİPİ SIVI DESİKANT NEM ALMA SİSTEMİNİN DENEYSEL DOĞRULAMASI.....	120
8.1.	Giriş	120
8.2.	Deney Düzenekinin Modellenmesi ve Deneysel Analiz.....	120
8.2.1.	Deney Düzenekinde Kullanılan Membranlar ve Difüzyon Katsayıları	125
8.2.2.	Deneysel Prosedür ve Matematiksel Modelleme.....	130
8.2.3.	Bulgular ve Tartışma	135
8.2.3.1.	Suni Kılıf ile Elde Edilen Sonuçlar.....	136
8.2.3.2.	Tyvek® Solid ile Elde Edilen Sonuçlar.....	139
8.3.	Sistemin COMSOL Yazılımında Modellenmesi	143
8.3.1.	Sınır Şartları.....	146
8.3.2.	Çözüm Yöntemi.....	148
8.3.3.	Deneysel Doğrulama	149
8.3.4.	Bulgular ve Tartışma	150
8.4.	Sonuç	156
9.	MEMBRANLI BORU DEMETİ SIVI DESİKANT NEM ALMA SİSTEMİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ.....	158
9.1.	Giriş	158
9.2.	Sistemin Modellenmesi	158
9.3.	Sistem Performansının Hesaplanması.....	161
9.3.1.	Sınır Şartları.....	163

9.3.2.	Çözüm Yöntemi.....	165
9.4.	Bulgular ve Tartışma	167
9.5.	Sonuç	175
10.	ÇALIŞMA SONUÇLARI.....	176
KAYNAKLAR		178
ÖZGEÇMİŞ		183
EKLER.....		186
A.	Düşey Silindirik Boruda Hız Profiline Bulunması	186
B.	Halka Kesitli Kanalda Hız Profiline Bulunması.....	188
C.	Sıvı Pompası Karakteristik Eğrileri ve Teknik Özellikleri	193
D.	Hava Fanı Teknik Özellikleri	195



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Bazı polimer membranların su buharı geçirgenlik ve su buharı ve azot gazı seçicilik değerleri.....	11
Çizelge 4.1. Hesaplama da kullanılan parametrelerin giriş değerleri	29
Çizelge 5.1. Analiz parametreleri değerleri	51
Çizelge 6.1. LiCl-su çözeltisi için buhar basıncı sabitleri.....	83
Çizelge 6.2. Hesaplama parametreleri değerleri	84
Çizelge 7.1. LiCl-su çözeltisi için buhar basıncı sabitleri.....	99
Çizelge 7.2. LiCl-su ve saf su için yoğunluk sabitleri	100
Çizelge 7.3. LiCl-su çözeltisi için viskozite sabitleri.....	101
Çizelge 7.4. Hesaplamalarda kullanılan diğer parametreler	108
Çizelge 7.5. Paralel akışta farklı Sc sayılarında Re sayısına ve L/D oranına bağlı elde edilen denklemler	110
Çizelge 7.6. Karşıt akışta farklı Sc sayılarında Re sayısına ve L/D oranına bağlı elde edilen denklemler	115
Çizelge 8.1. Sensörlerin ölçüm aralıkları ve hassasiyetleri.....	124
Çizelge 8.2. Difüzyon deneyi parametreleri	129
Çizelge 8.3. LiCl-su çözeltisi için buhar basıncı sabitleri.....	134
Çizelge 8.4. Deneysel parametreler	135
Çizelge 8.5. Belirlenen Re sayılarına karşılık gelen ortalama hava hızları	148
Çizelge 8.6. Sayısal analizde kullanılan hesaplama parametreleri	148
Çizelge 9.1. LiCl-su çözeltisi için buhar basıncı sabitleri.....	165
Çizelge 9.2. COMSOL yazılımında belirlenen hesaplama parametreleri.....	166

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Yoğun membranda ayırma işlemi.....	7
Şekil 3.2. Gözenekli membranda ayırma işlemi	8
Şekil 3.3. PSF yapıdaki membranın kesit görünümü (FE-SEM).....	9
Şekil 3.4. EVOH yapıdaki membranın kesit görünümü (FE-SEM).....	9
Şekil 3.5. Diyaliz işleminde kullanılan homojen ve heterojen membranların kesit görünümü	10
Şekil 3.6. Zeolit membranların kesit yapısı	12
Şekil 3.7. Karışım matrisli membran yapısı: a) Simetrik membran, b) asimetrik membran.....	13
Şekil 3.8. Destekli sıvı membran yapısı (F: Besleme fazı, E: Sıvı membran, R: Alıcı faz).....	13
Şekil 3.9. Paralel-plaka tipi membranlı sıvı desikant nem alma sistemi.....	14
Şekil 3.10. Membranlı sıvı desikant nem alma sistemi: a) LAMEE nem alma birimi, b) sistemin şematik görünümü	15
Şekil 3.11. Çapraz akışlı paralel-plaka tipi membranlı sistemin kesit yapısı.....	16
Şekil 3.12. Yüzey-boru tipi membranlı SDNA sistemi a) yüzey-boru yapısı, b) membranlı silindirik kesit	17
Şekil 3.13. Eliptik kanallı membranlı sıvı desikant nem alma sistemi	17
Şekil 4.1. Modellenen membranlı kübik nem alma sisteminin teknik resmi	18
Şekil 4.2. Kübik membranlı sistemin x-yönünde doğrusal gösterimi.....	22
Şekil 4.3. Sonlu farklar analizi için oluşturulan noktasal model.....	24
Şekil 4.4. COMSOL yazılımında oluşturulan üç boyutlu model	29
Şekil 4.5. Sistemin COMSOL yazılımında oluşturulan ağ (mesh) modeli	30
Şekil 4.6. $t=0$ anında COMSOL yazılımında sistemdeki konsantrasyon değişimi....	31
Şekil 4.7. Sistemdeki konsantrasyon değişimi a) $t=1$, b) $t=10$	31
Şekil 4.8. $t=50$ için sistemdeki konsantrasyon değişimi	32
Şekil 4.9. COMSOL ve MATLAB yazılımlarında x-yönünde konsantrasyon değişimi	33
Şekil 4.10. COMSOL ve MATLAB yazılımlarında toplam kütle akılarının zamanla değişimi	33
Şekil 5.1. Membranlı silindirik nem alma sistemi teknik resmi	34

Şekil 5.2. Membranlı silindirik sistemin boyutsuz koordinatlarda gösterimi	39
Şekil 5.3. $l = m = n = \zeta = 4$ için sistemin örnek noktasal gösterimi	41
Şekil 5.4. COMSOL yazılımında oluşturulan 2-boyutlu model ($L/D = 16$).....	52
Şekil 5.5. 2-boyutlu geometrinin $r = 0$ eksenine etrafında döndürülmesiyle oluşan 3- boyutlu model ($L/D = 16$).....	52
Şekil 5.6. Hesaplamalar için COMSOL yazılımında oluşturulan ağ (mesh) modeli .	53
Şekil 5.7. $t = 0$ anında sistemdeki konsantrasyon değerleri (COMSOL)	54
Şekil 5.8. Paralel akış tipinde akışkanların sistemdeki hareket yönü	55
Şekil 5.9. Paralel akışta kuru hava tarafı z-yönündeki hız dağılımı ($Re = 250$).....	55
Şekil 5.10. Paralel akışta nemli hava tarafı z-yönündeki hız dağılımı ($Re = 250$) ..	56
Şekil 5.11. Paralel akışta sistemde z-yönündeki hız dağılımının 3-boyutlu modelde gösterimi ($Re = 250$)	57
Şekil 5.12. Paralel akışta COMSOL ve MATLAB yazılımlarında çıkış konsantrasyonunun r-koordinatı ile değişimi ($Re = 250, L/D = 16$)	57
Şekil 5.13. Paralel akışta COMSOL ve MATLAB yazılımlarında hava tarafı çıkış konsantrasyonunun zamanla değişimi ($Re = 250, L/D = 16$)	58
Şekil 5.14. Paralel akışta çıkış konsantrasyonunun Re sayısı ile değişimi ($L/D = 16$)	59
Şekil 5.15. Paralel akışta çıkış konsantrasyonunun L/D ile değişimi ($Re = 2000$) .	60
Şekil 5.16. Paralel akışta bağıl nem değerleri değişiminin 2-boyutlu yüzey üzerinde gösterimi a) $t = 0$, b) $t = 1$ ve c) $t = 2$	61
Şekil 5.17. Paralel akışta nemli hava tarafı ortalama Sh sayısının Re sayısı ile değişimi	61
Şekil 5.18. Paralel akışta nemli hava tarafı ortalama Sh sayısının L/D oranı ile değişimi	62
Şekil 5.19. Paralel akışta kuru hava tarafı ortalama Sh sayısının Re sayısı ile değişimi	63
Şekil 5.20. Paralel akışta kuru hava tarafı ortalama Sh sayısının L/D oranı ile değişimi	63
Şekil 5.21. σ_a değerlerinin belirlenen Re sayılarında L/D oranıyla değişimi	65
Şekil 5.22. A değerlerinin Re sayısı ile değişimi	65
Şekil 5.23. Paralel akışta nemli hava tarafı için eşitlik (5.93) ile elde edilen ortalama Sh sayılarının COMSOL yazılımıyla karşılaştırılması ($Re = 250$)	66

Şekil 5.24. Paralel akışta kuru hava tarafı için eşitlik (5.94) ile elde edilen ortalama Sh sayılarının COMSOL yazılımıyla karşılaştırılması ($Re = 250$)	67
Şekil 5.25. Karşıt akış tipinde akışkanların sistemdeki hareket yönü.....	68
Şekil 5.26. Karşıt akışta kuru hava tarafı z-yönünde hız dağılımı ($Re = 250$)	69
Şekil 5.27. Karşıt akışta nemli hava tarafı z-yönünde hız dağılımı ($Re = 250$)	69
Şekil 5.28. Karşıt akışta sistemde z-yönündeki hız dağılımının 3-boyutlu modelde gösterimi ($Re = 250$)	70
Şekil 5.29. Karşıt akışta COMSOL ve MATLAB yazılımlarında $z = L/2$ 'de konsantrasyonunun r-koordinatı ile değişimi ($Re = 250, L/D = 16$)	71
Şekil 5.30. Karşıt akışta nemli hava tarafı çıkış konsantrasyonunun Re sayısı ile değişimi ($L/D = 16$)	72
Şekil 5.31. Karşıt akışta çıkış konsantrasyonunun L/D ile değişimi ($Re = 2000$) ..	72
Şekil 5.32. Karşıt akışta bağıl nem değerleri değişiminin 2-boyutlu yüzey üzerinde gösterimi a) $t = 0$, b) $t = 1$ ve c) $t = 2$	73
Şekil 5.33. Karşıt akışta nemli hava tarafı ortalama Sh sayısının Re sayısı ile değişimi	74
Şekil 5.34. Karşıt akışta nemli hava tarafı ortalama Sh sayısının L/D oranıyla değişimi	74
Şekil 5.35. Karşıt akışta kuru hava tarafı ortalama Sh sayısının Re sayısı ile değişimi	75
Şekil 5.36. Karşıt akışta kuru hava tarafı ortalama Sh sayısının L/D oranıyla değişimi	76
Şekil 5.37. Karşıt akışta nemli hava tarafı için eşitlik (5.95) ile elde edilen ortalama Sh sayılarının COMSOL yazılımıyla karşılaştırılması ($Re = 250$)	77
Şekil 5.38. Karşıt akışta kuru hava tarafı için eşitlik (5.96) ile elde edilen ortalama Sh sayılarının COMSOL yazılımıyla karşılaştırılması ($Re = 250$).....	78
Şekil 5.39. Paralel ve karşıt akışta nemli hava tarafı ortalama Sh sayılarının Re sayısı ile değişimi ($L/D = 16$).....	78
Şekil 5.40. Paralel ve karşıt akışta kuru hava tarafı ortalama Sh sayılarının Re sayısı ile değişimi ($L/D = 16$).....	79
Şekil 6.1. Modellenen membranlı kübik sıvı desikant nem alma sisteminin teknik resmi.....	81
Şekil 6.2. COMSOL yazılımında elde edilen 3-boyutlu model.....	85

Şekil 6.3. Hesaplamalar için COMSOL yazılımında oluşturulan ağ (mesh) yapısı...	85
Şekil 6.4. $t = 0$ anında COMSOL yazılımında hava ve membran tabakaları su buharı konsantrasyonları	86
Şekil 6.5. Sistemde hava ve membran tabakalarında su buharı konsantrasyonunun bazı t değerleri için değişimi a) $t = 10$, b) $t = 50$, c) $t = 100$, d) $t = 200$	87
Şekil 6.6. Sistemde bazı t değerleri için hava ve membran tarafı su buharı konsantrasyonu değişimi.....	88
Şekil 6.7. $t = 0$ anında COMSOL yazılımında sıvı desikant konsantrasyonu	88
Şekil 6.8. Sistemde sıvı desikant tabakasında çözelti konsantrasyonunun bazı t değerleri için değişimi a) $t = 10$, b) $t = 50$, c) $t = 100$, d) $t = 200$	89
Şekil 6.9. Sistemde bazı t değerleri için sıvı desikant çözeltisi konsantrasyonu değişimi.....	90
Şekil 6.10. Sıvı desikant çözeltisi konsantrasyonunun zamanla değişiminin her iki yöntem için karşılaştırılması	91
Şekil 6.11. İki yöntemle elde edilen sonuçlar arasındaki bağıl hata değerleri.....	91
Şekil 6.12. $t = 0$ anında COMSOL yazılımında hava tabakasının bağıl nem durumu	92
Şekil 6.13. Sistemde hava tabakasında bağıl nem değerlerinin bazı t değerleri için değişimi a) $t = 10$, b) $t = 50$, c) $t = 100$, d) $t = 200$	93
Şekil 7.1. Modellenen membranlı silindirik sıvı desikant nem alma sisteminin teknik resmi.....	95
Şekil 7.2. Sistemde su buharı geçişinin COMSOL yazılımındaki ve şematik görünümü	97
Şekil 7.3. COMSOL yazılımında oluşturulan $L/D = 4$ için ağ (mesh yapısı) a) ağ dağılımı, b) Sh sayısı için ağ bağımsızlığı analizi ($Re = 250$).....	105
Şekil 7.4. COMSOL yazılımında elde edilen hava çıkış nem oranı değerlerinin literatürdeki bir çalışmayla karşılaştırılması	106
Şekil 7.5. COMSOL ve MATLAB yazılımlarında hava çıkış konsantrasyon değerleri	107
Şekil 7.6. Paralel akışta farklı Re sayılarında Sh sayısının L/D ile değişimi ($Sc = 0,68$).....	108
Şekil 7.7. Paralel akışta kütle transferi eşitliğindeki katsayıların farklı Sc sayılarında Re sayısı ile değişimi a) C katsayısı, b) m katsayısı	109

Şekil 7.8. Paralel akışta Re sayısı katsayılarının Sc sayısı ile değişimi.....	110
Şekil 7.9. Paralel akışta kütle transferi için elde edilen denklemin farklı konsantrasyon değerleri için doğrulanması.....	111
Şekil 7.10. Paralel akışta farklı Re sayılarında nem alma veriminin L/D oranıyla değişimi.....	112
Şekil 7.11. Karşıt akışta farklı Re sayılarında Sh sayısının L/D ile değişimi ($Sc = 0,68$).....	113
Şekil 7.12. Karşıt akışta farklı Sc sayılarında Sh_{∞} değerlerinin Re sayısı ile değişimi.....	114
Şekil 7.13. Karşıt akışta kütle transferi eşitliğindeki katsayıların farklı Sc sayılarında Re sayısı ile değişimi a) C katsayısı, b) m katsayısı	115
Şekil 7.14. Karşıt akışta Re sayısı katsayılarının Sc sayısı ile değişimi	116
Şekil 7.15. Karşıt akışta kütle transferi için elde edilen denklemin farklı konsantrasyon değerleri için doğrulanması.....	117
Şekil 7.16. Karşıt akışta farklı Re sayılarında nem alma veriminin L/D oranıyla değişimi.....	118
Şekil 7.17. Paralel ve karşıt akışta Sh sayılarının ve nem alma verimlerinin karşılaştırılması ($Sc = 0,68$, $Re = 250$).....	118
Şekil 8.1. Deney düzeneği ve şematik gösterimi	121
Şekil 8.2. Membranın hava kanalı içerisinde PPRC boruya sabitlenmesi	122
Şekil 8.3. Sıvı pompası	123
Şekil 8.4. Hava fanı	123
Şekil 8.5. AC-DC dönüştürücü ve DC sürücü	124
Şekil 8.6. Deney düzeneğinde kullanılan membranlar: a) Tyvek® Solid, b) suni kılıf	125
Şekil 8.7. Su buharı difüzyon ölçüm deney düzeneği.....	127
Şekil 8.8. Su buharı difüzyon ünitesi kesit görünümü	127
Şekil 8.9. Suni kılıf için logaritmik basınç oranı değerlerinin zamanla değişimi	130
Şekil 8.10. Tyvek® Solid için logaritmik basınç oranı değerlerinin zamanla değişimi	130
Şekil 8.11. Hava kanalında hava ve desikant akımları.....	132
Şekil 8.12. $Re=200$ için deneylerde belirli bir anda psikrometrik diyagramda havadaki nem değişimi.....	136

Şekil 8.13. Suni kılıfla $Re=200$ 'de elde edilen termal kamera görüntüleri: a) Sadece hava, b) 21. dk, c) 31.dk ve d) 32.dk.....	137
Şekil 8.14. Suni kılıfla $Re=400$ 'de elde edilen termal kamera görüntüleri: a) Sadece hava, b) 14. dk, c) 62.dk ve d) 62.dk.....	138
Şekil 8.15. Suni kılıf deneylerinde havanın giriş/çıkış bağıl nem değerleri	138
Şekil 8.16. Suni kılıf deneylerinde sistemin nem alma verimi değerleri	139
Şekil 8.17. Tyvek® Solid ile $Re=200$ 'de elde edilen termal kamera görüntüleri a) Sadece hava, b) 3. dk, c) 15. dk, d) 26. dk, e) 36. dk ve f) 46. dk.....	140
Şekil 8.18. Tyvek® Solid ile $Re=400$ 'de elde edilen termal kamera görüntüleri a) Sadece hava, b) 5. dk, c) 16. dk, d) 25. dk, e) 38. dk ve f) 48. dk.....	141
Şekil 8.19. Tyvek® Solid deneylerinde havanın sisteme giriş/çıkış bağıl nem değerleri.....	142
Şekil 8.20. Tyvek® Solid deneylerinde sistemin nem alma verimi değerleri	142
Şekil 8.21. COMSOL yazılımında akış ve kütle transferi modellemesi	144
Şekil 8.22. Ağ (mesh) hassasiyeti analizi ($L/D=10$)	149
Şekil 8.23. Deneysel çalışmada ve COMSOL'da elde edilen verim değerlerinin karşılaştırılması	150
Şekil 8.24. Sh sayılarının farklı Re sayılarında L/D oranıyla değişimi	151
Şekil 8.25. a) Sh_{∞} ve b) C katsayılarının farklı Sc sayılarında Re sayısı ile değişimi	152
Şekil 8.26. a) m katsayısının Re sayısı ile değişimi, b) n katsayısının Sc ile değişimi	153
Şekil 8.27. Eşitlikle ve COMSOL ile elde edilen Sh sayılarının karşılaştırılması...	154
Şekil 8.28. Sistemde farklı Re sayılarında nem alma veriminin L/D ile değişimi...	154
Şekil 8.29. Hava giriş sıcaklığının sıcaklık dağılımına etkisi: a) 298 K, b) 300 K, c) 303 K, d) 308 K ve e) 313 K.....	155
Şekil 8.30. Hava giriş sıcaklığının çözelti ve hava konsantrasyonuna etkisi: a) 298 K, b) 300 K, c) 303 K, d) 308 K ve e) 313 K	156
Şekil 9.1. Sıralı tip membranlı boru demeti sistemi.....	158
Şekil 9.2. Sıralı tip sistemde belirlenen hesaplama alanı	159
Şekil 9.3. Saptırmalı tip membranlı boru demeti sistemi.....	160
Şekil 9.4. Saptırmalı tip sistemde belirlenen hesaplama alanı	160
Şekil 9.5. Sıralı tip sistem için örnek ağ (mesh) yapısı.....	167

Şekil 9.6. Sıralı ve saptırmalı membranlı boru demeti sistemlerinde hız dağılımları ve akım çizgileri a-c) hız dağılımları, b-d) akım çizgileri	169
Şekil 9.7. Sıralı tip sistemde farklı boru sayılarında hava su buharı konsantrasyonu dağılımı a) $n=1$, b) $n=5$ ve c) $n=10$	170
Şekil 9.8. Sıralı tip sistemde S_T 'nin hava konsantrasyon dağılımına etkisi a) $S_T=S_L$, b) $S_T=2 \cdot S_L$ ve c) $S_T=4 \cdot S_L$	170
Şekil 9.9. Sıralı tip sistemde farklı S_T ve Re sayılarında hava çıkış konsantrasyonunun boru sayısı ile değişimi a) $S_T=S_L$, b) $S_T=2 \cdot S_L$ ve c) $S_T=4 \cdot S_L$...	172
Şekil 9.10. Sıralı tip sistemde farklı S_T ve Re sayılarında nem alma veriminin boru sayısı ile değişimi a) $S_T=S_L$, b) $S_T=2 \cdot S_L$ ve c) $S_T=4 \cdot S_L$	173
Şekil 9.11. Saptırmalı tip sistemde farklı Re sayılarında hava çıkış konsantrasyonunun boru sayısı ile değişimi	174
Şekil 9.12. Saptırmalı tip sistemde farklı Re sayılarında nem alma veriminin boru sayısı ile değişimi.....	174
Şekil A.1. Düşey silindirik boru kesiti	186
Şekil B.1. Halka kesitli kanal akışında hız profilinin ve kayma gerilmelerinin oluşumu	189
Şekil C.1. Sıvı pompası teknik resmi	193
Şekil C.2. Sıvı pompası performans eğrileri	194
Şekil D.1. Hava fanı teknik özellikleri.....	195

SİMGELER ve KISALTMALAR

a	Uzunluk	(m)
A	Antonie parametresi	(Pa)
A _s	Yüzey alanı	(m ²)
B	Antonie parametresi	(Pa K)
c	Konsantrasyon	(mol m ⁻³)
C	(Antonie parametresi), (konsantrasyon)	(K), (mol m ⁻³)
c _p	Özgül ısı	(J kg ⁻¹ K ⁻¹)
d _e	Nemli hava kanalı eşdeğer çapı	(m)
d _s	Kuru hava kanalı eşdeğer çapı	(m)
D	Çap, membran çapı	(m)
D _d	Hava kanalı çapı	(m)
D _h	Havada su buharı difüzyon katsayısı	(m ² s ⁻¹)
D _m	Membranda su buharı difüzyon katsayısı	(m ² s ⁻¹)
D _s	Sıvı desikantta su buharı difüzyon katsayısı	(m ² s ⁻¹)
h	Sonlu fark adım aralığı	(-)
h _d	Seyrelme farkı entalpisi	(J kg ⁻¹)
f	Kütle akısı değişkeni	(mol m ⁻² s ⁻¹)
f _{ln}	Logaritmik boyutsuz basınç oranı	(-)
i	Sonlu fark yatay koordinat	(-)
j	Sonlu fark dikey koordinat	(-)
k	Sonlu fark boylamsal koordinat	(-)
k _a	su buharının havadaki kütle transferi hızı	(m s ⁻¹)
k _s	su buharının desikanttaki kütle transferi hızı	(m s ⁻¹)
l	Bölme sayısı	(-)
L	boy, uzunluk	(m)
m	Bölme sayısı	(-)
m _{LiCl}	LiCl kütlesi	(kg)
m _{su}	Su kütlesi	(kg)
M	Hız profili değişkeni	(-)
M _A	Suyun molar kütlesi	(kg mol ⁻¹)
n	Bölme sayısı	(-)

N	Kütle akısı	(mol m ⁻² s ⁻¹)
P	Basınç	(Pa)
q _s	Sıvı desikanttan yayılan ısı	(W m ⁻²)
r	Radyal mesafe	(m)
R	Evrensel gaz sabiti	(J mol ⁻¹ K ⁻¹)
R ₁	Desikant kanalı yarıçapı	(m)
R ₂	Membran yarıçapı	(m)
R ₃	Hava kanalı yarıçapı	(m)
Re	Reynolds sayısı	(-)
S _L	Boru demeti sisteminde yatay mesafe	(m)
S _T	Boru demeti sisteminde dikey mesafe	(m)
SBG	Su buharı geçirgenliği	(mol Pa ⁻¹ m ⁻¹ s ⁻¹)
Sc	Schmidt sayısı	(-)
Sh	Sherwood sayısı	(-)
t	Zaman	(s)
T	Mutlak sıcaklık	(K)
T _c	Kritik Sıcaklık	(K)
V	Hız	(m s ⁻¹)
W	Genişlik	(m)
x	Kartezyen koordinatlarda yatay mesafe	(m)
y	Kartezyen koordinatlarda dikey mesafe	(m)
z	Boylamsal mesafe	(m)
α	Çözelti için buhar basıncı değişkeni	(-)
β	Çözelti için buhar basıncı değişkeni	(-)
α _d	Difüzyon katsayısı oranı (membran/hava)	(-)
β _d	Difüzyon katsayısı oranı (desikant/hava)	(-)
γ	Boyutsuz uzunluk	(-)
δ	(Boyutsuz uzunluk), (membran kalınlığı)	(-), (m)
Δ	Fark, değişim	(-)
Δt	Zaman için sonlu fark adım aralığı	(-)
ε	Boyutsuz uzunluk	(-)
ζ	Bölme sayısı	(-)
η	Verim	(%)

θ	(Boyutsuz değişken), (açısal mesafe)	(-), (m)
κ	çözelti için buhar basıncı değişkeni	(-)
κ_r	Yarıçap oranı	(-)
λ	Isı iletim katsayısı	(W m ⁻¹ K ⁻¹)
μ	(Boyutsuz değişken), (dinamik viskozite)	(-/Pa s)
ν	Kinematik viskozite	(m ² s ⁻¹)
ξ	Sıvı desikant konsantrasyonu	(kg kg ⁻¹)
$\pi_{0,1,...}$	Desikant için buhar basıncı sabitleri	(-)
ρ	Yoğunluk	(kg m ⁻³)
σ_a	Sh sayısı eşitliğinde Re ve L/D oranının bir fonksiyonu	(-)
ϕ	Bağıl nem	(%)
ψ	Boyutsuz uzunluk	(-)
ω	(Boyutsuz değişken), (nem oranı)	(-), (kg kg ⁻¹)

Alt İndisler

1, 2, ...	Durum numarası
1m	Sıvı desikant-membran arayüzü
2m	Membran-hava arayüzü
des	Sıvı desikant içindeki su buharı
h	Hava, hava tarafı
h,g	Hava giriş
h,	Hava ıkış
m	Membran
max	Maksimum
ort,h	Hava ortalama
ort,s	Sıvı desikant ortalama
r	Radyal koordinat
s	Sıvı desikant, sıvı desikant tarafı
sat	Doyma
s,	Sıvı desikant çıkış
s,g	Sıvı desikant giriş
z	Boylamsal koordinat

Üst İndisler

* Boyutsuz sayı



1. GİRİŞ

Sıcak ve nemli iklimlerde özellikle yaz aylarında, klimalarda tüketilen enerjinin büyük bir kısmı, nem alma işlemlerinde kullanılmaktadır. Konvansiyonel iklimlendirme ve geleneksel soğutma sistemleri ozon tabakasına verdikleri büyük zararlarla ve küresel ısınmadaki önemli rolleriyle göze çarpmaktadırlar. Bu sebeple yeni geliştirilecek iklimlendirme sistemlerinin ozon tabakasını ve birincil enerji kaynaklarını koruyucu nitelikte olması gerekmektedir. Günümüzde iklimlendirme sistemleriyle ilgili araştırmalar, daha çevreci ve güneş enerjisi ve atık ısı gibi alternatif enerji kaynaklarıyla çalışabilen iklimlendirme sistemleri üzerinde yoğunlaşmaktadır. Sıvı desikant nem alma sistemleri, güneş enerjisi, jeotermal enerji veya endüstriyel proseslerden kaynaklanan atık ısı gibi yenilenebilir ve sürdürülebilir termal enerji kaynaklarından faydalanabildikleri için çevre dostu sistemlerdir. Dahası, bu tip sistemlerin iklimlendirme sistemleriyle beraber kullanılarak gizli ısı yükünün önerilen sıvı desikant sistemleriyle duyulur ısı yükünün iklimlendirme sistemleriyle giderilmesi durumunda, alış-veriş merkezi, konferans salonu ve hastane gibi kalabalık mekanlarda elektrik enerjisi tüketimi %25-35 azaltılabilecektir [1-4]. Bu tip sistemlerin en önemli dezavantajı ise sıvı desikant nem alma sistemlerinde, sıvı desikant çözeltisinin havayla doğrudan teması sebebiyle havaya tuz taşınımı ve hava-desikant temas yüzeyinin az olmasıdır [5].

İklimlendirme uygulamalarında, yukarıda sözü geçen olumsuzlukların üstesinden gelinebilmesi için membranlı sıvı desikant nem alma sistemleri kullanılmaya başlanmıştır. Membran, yarı-geçirgen özelliğinden dolayı, havayla desikant çözeltisini ayırarak havada bulunan su buharının çözeltiye geçmesine izin verirken çözeltinin havaya karışmasını engellemektedir. Bu şekilde hem sıvı desikant nem alma sistemlerinin sunduğu yüksek enerji tasarrufu ve yüksek iç hava kalitesi gibi avantajlardan faydalanılabilecek hem de yukarıda sözü geçen olumsuzlukların önüne geçilebilecektir.

Bu doktora tezi kapsamında öncelikle membran teknolojisinin ve literatürde karşılaşılan membran tabanlı nem alma sistemlerinin incelemesi yapılacaktır. Daha sonra, COMSOL ve MATLAB yazılımlarından faydalanılarak paralel-plaka tipi

membranlı nem alma sisteminin temelini oluşturan membranlı kübik nem alma sisteminin kuramsal analizleri ve bu çalışma kapsamında ilk defa sunulacak olan membranlı boru-tipi nem alma sisteminin kuramsal ve deneysel analizleri gerçekleştirilecektir. Membranlı boru-tipi sıvı desikant nem alma sistemiyle elde edilen bulgular kullanılarak, sistemde farklı akışkan ve akış tipleri için pratik eşitlikler önerilecektir. Çalışmada son olarak membranlı boru-tipi sıvı desikant nem alma sistemi temel alınarak membranlı boru demeti sıvı desikant nem alma sisteminin modellemesi ve farklı sistem tasarımlarında performans incelemesi yapılacaktır.



2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Membranlı sıvı desikant nem alma sistemleri, ısı ve kütle transferinin eş zamanlı gerçekleştiği karmaşık yapılardır. Bu tip sistemlerde gerçekleşen kütle transferi alınan nem miktarına doğrudan etki ettiğinden araştırmacılar en çok bu konuya yoğunlaşmıştır. Membranlı sıvı desikant nem alma sistemlerinde paralel-plaka, eliptik ve silindirik olmak üzere iki tip tasarım öne çıkmaktadır.

Abdel-Salam [6] doktora tezi çalışmasında paralel-plaka tipi membranlı sıvı desikant nem alma sistemini modelleyip ısı ve kütle transferi analizini yapmıştır. Çalışmada, sistem performansının en çok transfer ünitesi sayısından (NTU), çözelti-hava ısı kapasite oranından ve hava giriş sıcaklık ve bağıl neminden etkilendiğini ortaya koymuştur.

Huang vd. [7] sıvı desikant nem alma sistemi için geliştirdikleri delikli fiber membran demetindeki kütle taşınımını incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada membran olarak değiştirilmiş PVF (polivinil florür) kullanmışlar ve elde ettikleri sayısal analiz sonuçlarını yaptıkları deneylerle doğrulamışlardır. Çalışma sonucunda, kütle ve ısı transferini belirleyen Sherwood ve Nusselt sayılarının kademeli sıralamada düz sıralamaya göre daha büyük olduğunu göstermişlerdir.

Huang vd. [8] bir başka çalışmada nem alma sisteminde boru demetinde kullanılan membran için şeklin (silindirik veya eliptik) etkisini incelemişlerdir. Sonuçlar, eliptik membranda kütle ve ısı transferinin daha kötü olduğunu göstermiştir.

Huang ve Yang [9] ise membranlı sıvı desikant nem alma sisteminde akış tipinin kütle ve ısı transferine etkisini araştırmışlardır. Yapılan çalışmada eliptik fiber boyunca gerçekleşen hava akımında Reynolds sayısının artmasının Nusselt ve Sherwood sayılarını arttırdığını belirtmişlerdir.

Zhang vd. [10] kabuk-boru tipi membran kontaktöründe hava akış tipinin etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, Reynolds sayısının 35'ten büyük olduğu durumlarda

Çapraz akışta karşıt akışa göre Nusselt ve Sherwood sayısının daha büyük olduğunu ve hava tarafı basınç düşümünün çapraz akışta daha az olduğunu ortaya koymuşlardır.

Abdel-Salam vd. [11-12], TRNSYS simülasyon programını kullanarak membranlı sıvı desikant iklimlendirme sistemini performans analizini yapmışlardır. Sistemin tasarım durumundaki performans katsayısı (COP) 0,68 olarak hesaplanmış, farklı iklim, çalışma ve tasarım koşullarında havanın duyulur ısı oranı değerleri ise 0,3 ve 0,5 arasında değişmiştir.

Ouyong ve Zhang [13] ise eğik hava akımının fiber membranlı sıvı nem alma sisteminde kütle ve ısı transferine etkisini araştırmışlardır. Sonuçlar, çeşitli eğim açıları için kademeli sıralanmış boru demetlerinde, düzgün sıralanmış boru demetlerine göre, basınç düşümünün daha yüksek, ısı ve kütle transferinin ise daha iyi olduğunu göstermiştir.

Keniar vd. [14], nem kontrolü ve enerji tasarrufu için güneş enerjisi ile rejenere edilen membranlı sıvı desikant nem alma sistemi üzerinde çalışmışlardır.

Das ve Jain [15],  apraz akışlı membranlı sıvı desikant sisteminde membran karakteristiklerinin, kontaktör tasarımının, akışkan hızlarının, ortam koşullarının ve sıvı desikant konsantrasyonunun sistem performansına etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda sistem performansının önemli derecede membran karakteristiklerine, özellikle gözenekliliğine, gözenek çapına ve membran kalınlığına bağlı olduğunu belirlemişlerdir.

Namwar vd. [16], karşıt-çapraz akışlı membranlı sıvı-hava enerji değiştiricide geçici sayısal sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Sonuçlar, sistem etkinliğinin, transfer  nitesi sayısı (NTU) ve ısıl kapasite hızları oranları (  zelti/hava) ile arttığını göstermiştir.

Huang vd. [17] ise diğer bir çalışmada paralel plakalı membranlı sıvı desikant nem alma sisteminde farklı en boy (membran) oranlarında Sherwood ve Nusselt sayılarının değişimini incelemişlerdir.

Moghaddam [18] doktora tezi çalışmasında, küçük ve tam ölçekli membranlı sıvı-hava enerji değiştiricileri deneysel ve teorik olarak incelemiştir. Yaptığı çalışmada sistemde kütle transferini etkileyen en önemli unsurların hava hızı, hava giriş nem oranı, desikant çözeltisi giriş sıcaklığı, konsantrasyonu ve debisi olduğunu belirlemiştir.

Huang vd. [19] çalışmalarında, içten soğutmalı membranlı paralel-plaka tipi içten soğutmalı sıvı desikant nem alma sistemini tasarlayıp deneysel ve sayısal analizini yapmışlardır. Sistemde öncelikle enerji, momentum ve kütle taşınım denklemleri oluşturulmuş, daha sonra bu denklemler sonlu hacim yöntemiyle çözülmüştür. Analiz sonucunda elde edilen Nusselt ve Sherwood sayıları deneylerde elde edilen verilerle karşılaştırılarak doğrulaması yapılmıştır. Çalışma sonucunda, Nusselt ve Sherwood sayıları adyabatik sisteme göre %2-3 daha küçük bulunmuştur.

Huang ve Yang [20], hava nemlendirme işlemi için tasarladıkları eliptik yüzey-boru tipi membranlı sistemin ısı transferi performansını literatürdeki çalışmalara göre %0,15-26 daha düşük bulmuşlardır.

Min ve Su [21], paralel-plaka tipi membranlı sistemle yaptıkları çalışmada, membran özelliklerinin (nem yayılımı, ısı iletim, nem soğurma sabiti, maksimum nem tutma kapasitesi) sistemin duyulur, gizli ve entalpi etkinliklerine etkisini incelemişlerdir. Yapılan sayısal hesaplamalar sonucunda, duyulur etkinliğin membran özelliklerinden fazla etkilenmediği fakat gizli ve entalpi etkinliklerinin membran özelliklerinden daha fazla etkilendiği belirlenmiştir.

Sabek vd. [22] ise paralel-plaka tipi membranlı sıvı desikant nem alma sisteminde hava ve desikant özelliklerinin sistem performansına etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, optimum hava (0,5 m/s) ve desikant hızlarının (<0,1 m/s) ısı ve kütle transferi miktarlarını ve duyulur, gizli ve toplam etkinlikleri arttırdığını belirlemişlerdir. Ayrıca, hava giriş nem oranının ve desikantın içerdiği su miktarının artmasının sistemde kütle transferini arttırdığını tespit etmişlerdir.

Zhang [23] silindirik membranlı SDNA (sıvı desikant nem alma) sisteminin analizinde analitik yaklaşımı kullanmıştır. Sistemde hava kütleli debisinin duyulur, gizli

etkinliklere ve kütle ve ısı transferini belirleyen boyutsuz parametrelere (toplam Lewis sayısı ve transfer birimi sayısı) etkisi incelenmiştir. Yapılan analitik hesaplamalar daha sonra deneysel olarak doğrulanmıştır. Çalışma sonucunda duyulur ve gizli etkinliklerin ve transfer birimi sayısının hava debisiyle azaldığı, toplam Lewis sayısının ise arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca kütle ve ısı transferi için en önemli parametrenin transfer birimi sayısı (NTU) olduğu ortaya konulmuştur.

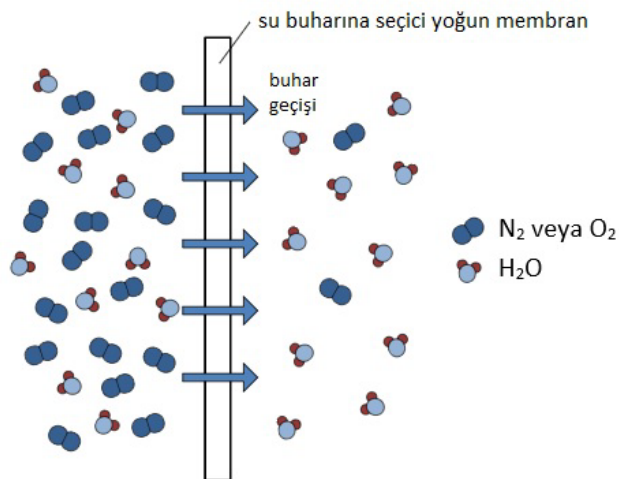


3. MEMBRAN TEKNOLOJİSİ VE UYGULAMALARI

3.1. Membran

Membranlar, seçici bir şekilde ayırmanın ve taşınmanın gerçekleştiği yarı geçirgen bariyer olarak tanımlanmaktadır. Ayırma işlemi membranın hem kimyasal hem de fiziksel özelliğine bağlı olup, basınç farkı, yoğunlaşma (kimyasal potansiyel) farkı, elektriksel potansiyel farkı, konsantrasyon farkı ve sıcaklık farkının biri veya birkaçı ile oluşturulan sürücü kuvvetle gerçekleşmektedir. Ayırma işlemi gözenekli membranlarda boyut, şekil ve yük ayırımına göre, yoğun membranlarda ise sorpsiyon ve difüzyon modeline göre kontrol edilmektedir [24].

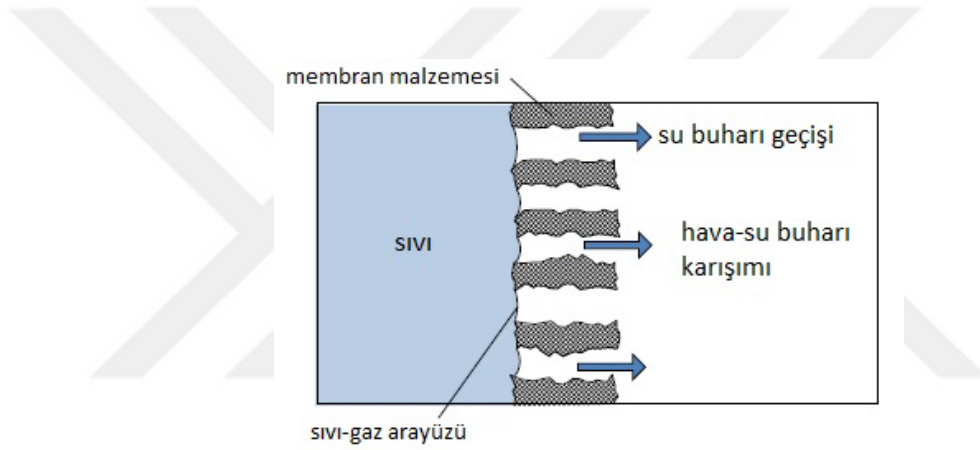
Membranlar, bir önceki paragrafta belirtildiği gibi, gözenek boyutlarına göre, yoğun ve gözenekli membranlar olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Tipik olarak, yoğun membranların gözenekleri 0,1 nm mertebesinde boyutlandırılmışken, gözenekli membranların gözenek boyutu ise 0,1 μm civarındadır. Yoğun membranlarda bir molekül, polimer yüzeyine adsorbe olur, konsantrasyon gradyanı nedeniyle yığın polimerden yayılır ve daha sonra diğer yüzeyden desorbe olur. Yoğun membranlarda ayırma işlemi Şekil 3.1'deki örnekte verilmiştir. Örnekteki sistem, havadaki su buharı moleküllerinin havadan ayrılması amacıyla modellenmiştir [25].



Şekil 3.1. Yoğun membranda ayırma işlemi

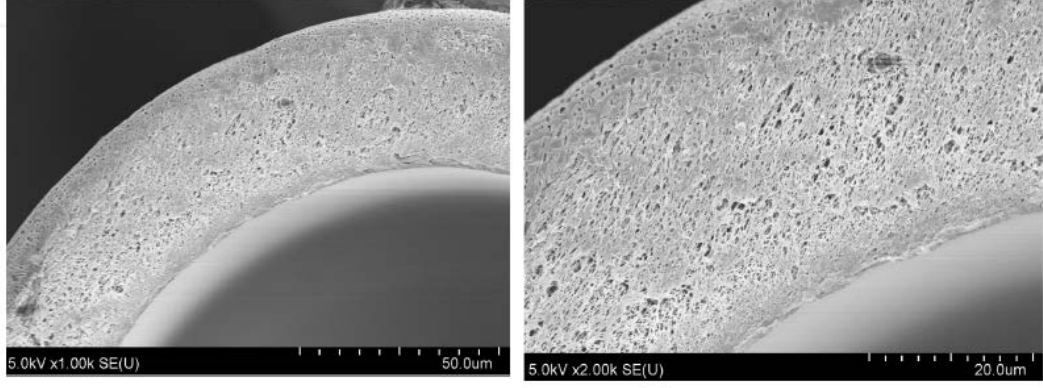
Yoğun membranlar pratikte, havadaki oksijenin azottan ayrılması, yanma gazlarından karbondioksitin ayrılması ve havadaki su buharının ayrılması gibi gaz ayırma işlemlerinde kullanılmaktadır [25].

Gözenekli membranlar ise, sıvı/gaz teması gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu membranlarda ayırma işlemi, su buharının katı polimer matrisi yerine geniş gözenek boşluklarında yayılmasıyla gerçekleşir. Yoğun membranlardan farklı olarak, membran malzemesinin hidrofobik olmasından ötürü, su molekülleri birbirlerini katı malzemeden daha fazla çekmektedirler. Bu olay, yüzey gerilimi oluşturarak sıvının gözeneklere girmesini engeller ve membran yüzeyinde sıvı/gaz arayüzü oluşturur. Gözenekli membranlarda ayırma işlemi Şekil 3.2’de gösterilmiştir [25].

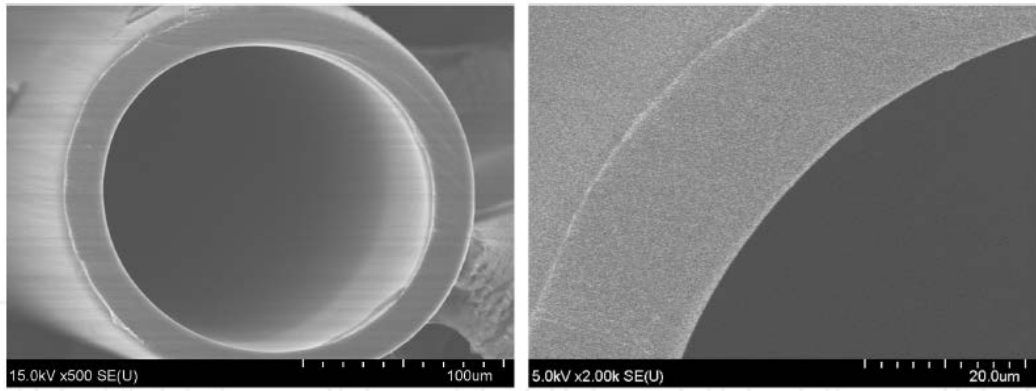


Şekil 3.2. Gözenekli membranda ayırma işlemi

Bazı kaynaklarda membranlar, içerdikleri gözeneklerin dağılımına göre de gruplandırılmıştır. Buna göre membranlar, simetrik (homojen) ve asimetrik (heterojen) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Kan diyalizi işleminde yaygın olarak kullanılan polisülfon (PSF) yapıdaki asimetrik membranın ve EVOH (Etilen vinil alkol ko-polimer) yapıdaki simetrik membranın alan emisyonlu elektron mikroskopundaki (FE-SEM) görüntüleri sırasıyla Şekil 3.3 ve 3.4’te verilmiştir [26].

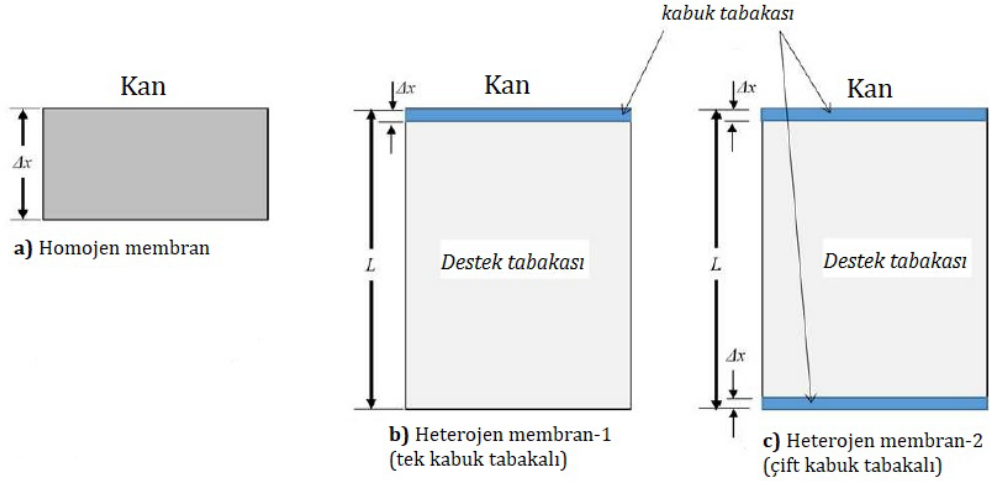


Şekil 3.3. PSF yapıdaki membranin kesit görünümü (FE-SEM)



Şekil 3.4. EVOH yapıdaki membranin kesit görünümü (FE-SEM)

EVOH yapıdaki membran, Şekil 3.4’te de görülebileceği gibi, fiziki olarak bütünüyle yoğun bir yapıda olup membranın tamamı su ve çözünen madde direncine sahiptir. Bu sebeple bu tip membranlar, “simetrik (homojen) membran” olarak adlandırılmaktadır. Buna karşın asimetrik (heterojen) olan PSF yapıdaki membranın yoğunluğu (Şekil 3.3), radyal yönde içteki kabuk tabakasından dışa doğru azalmaktadır. Yoğunluğun azaldığı kısım, su ve çözünen madde direnci açısından zayıf olup “destek tabakası” (membrana mekanik dayanım sağlar) adını almaktadır. Özetle, asimetrik membranlar, su ve çözünen madde direnci sağlayan kabuk tabakası ve membrana mekanik dayanım sağlayan destek tabakası olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Bazı heterojen membranlarda içte ve dışta olmak üzere iki kabuk tabakası bulunmaktadır. Homojen ve heterojen membranların kesit yapısı Şekil 3.5’te daha iyi görülebilmektedir [26].



Şekil 3.5. Diyaliz işleminde kullanılan homojen ve heterojen membranların kesit görünümü

Su buharı ayırma işlemlerinde kullanılan membranlar ise, imal edildikleri malzemelere göre dört gruba ayrılmaktadır. Bunlar polimer, zeolit, karışım matrisli ve destekli sıvı membranlar [27] olup bunlardan ileriki bölümlerde ayrıntılı olarak söz edilmiştir.

3.1.1. Polimer Membranlar

Polimer membranlar, hatasız, ucuz ve fiziksel olarak güçlü olmalarından ötürü su buharı ayırma işlemlerinde en çok tercih edilen membranlardır. Bu membranlar arasında, hidrofilik özelliğin sudaki çözünmeyi arttırmasından ötürü, selüloz asetat (CA), iyonik polimerler, polivinilalkol (PVA), polisülfon (PSF) ve poliakrilonitrat gibi hidrofilik (suyu seven) organik membranlar daha sıklıkla tercih edilmektedir. Dolayısıyla bu membranlarda su buharı molekülleri, diğer gazlardan daha hızlı yayılacaktır [27]. Bazı polimer membranların 30 °C sıcaklıkta su buharı geçirgenlik ve su ve azot gazı seçicilik değerleri Çizelge 3.1’de verilmiştir [28].

Çizelge 3.1’de üçüncü sütunda yer alan geçirgenlik değerleri “Barrer” birimi ile verilmiş olup söz konusu birimin SI birim sistemindeki karşılığı [$\text{m}^2/(\text{s} \cdot \text{Pa})$] dördüncü sütunda yer almaktadır. Genel olarak ikili gaz karışımlarında, membranın seçiciliği arttıkça geçirgenliği azalmaktadır. Fakat bu durum, su buharının bulunduğu ikili gaz karışımlarında geçerli olmamaktadır. Bu tip durumlarda, membran için, yüksek geçirgenliğe yüksek seçicilik eşlik etmektedir [28].

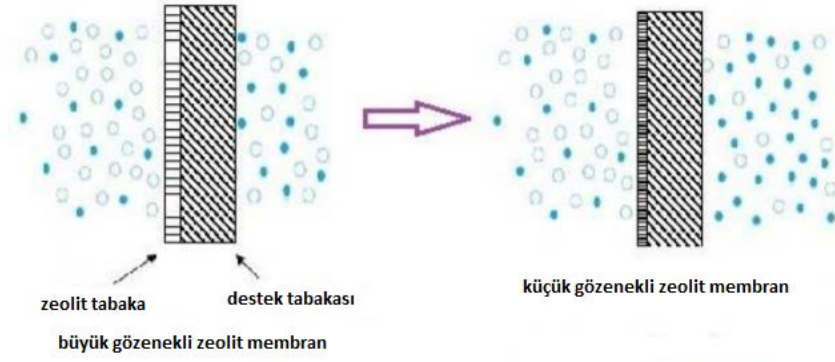
Çizelge 3.1. Bazı polimer membranların su buharı geçirgenlik ve su buharı ve azot gazı seçicilik değerleri

Polimer	Kısaltma	H ₂ O geçirgenliği [Barrer*]	H ₂ O geçirgenliği [m ² /(s·Pa)]	Seçicilik [H ₂ O/N ₂]
Etil selüloz	EC	20000	1,5001E-13	6061
Selüloz asetat	CA	6000	4,5003E-14	24000
Doğal kauçuk	NR	2600	1,95013E-14	299
1000 _{PEO} 56 _{PBT} 44	PEO-PBT	85500	6,41293E-13	40500
Poliakrilonitril	PAN	300	2,25015E-15	1875000
Polyamid 6	PA-6	275	2,06264E-15	11000
Polikarbonat	PC	1400	1,05007E-14	4667
Polidimetilsiloksan	PDMS	40000	3,0002E-13	143
Polietersülfon	PES	2620	1,96513E-14	10480
Polietilen	PE	12	9,0006E-17	6
Poliimid	PI	640	4,80032E-15	5333333
Polifenilenoksit	PPO	4060	3,0452E-14	1068
Polipropilen	PP	68	5,10034E-16	227
Polisitren	PS	970	7,27549E-15	388
Polisülfon	PSF	2000	1,5001E-14	8000
Polivinilalkol	PVA	19	1,4251E-16	33333
Polivinilklorür	PVC	275	2,06264E-15	12500
Sülfolanmış polieteter eter keton	SPEEK	61000	4,57531E-13	10166667
Sülfolanmış polietetersülfon	SPES	15000	1,12508E-13	214286

*1 Barrer = $7,5005 \cdot 10^{-18} [m^2/(s \cdot Pa)]$ [29]

3.1.2. Zeolit Membranlar

Zeolit membranlar, buhar ayırma işlemlerinde kullanılan inorganik membranlardan biridir. Kimyasal ve termal olarak dengeli olmalarının yanında, düzenli, moleküler boyutta gözenekli inorganik iç yapıya sahip olmalarından ötürü daha iyi ayırma performansı sağlarlar. Bu membranlarda gözenekler, alüminyum, oksijen ve silikon ile sodyum, potasyum ve magnezyum gibi toprak-alkali metallerden oluşmaktadır [28]. Zeolit membranların kesiti Şekil 3.6'da verilmiştir [30].

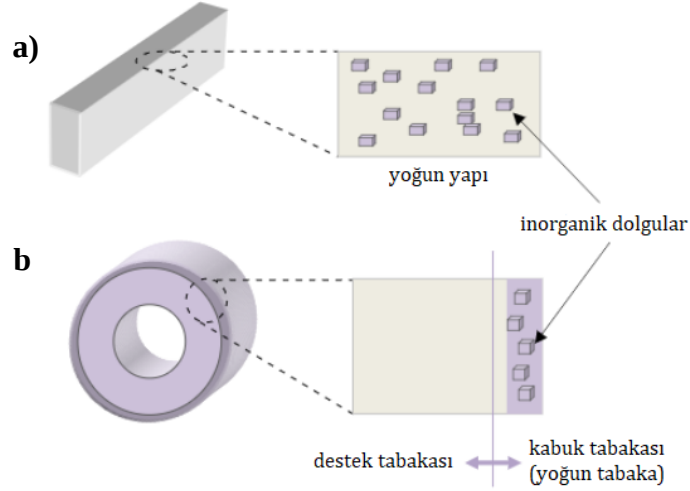


Şekil 3.6. Zeolit membranların kesit yapısı

Zeolit membranlar, Şekil 3.6’da görülebileceği gibi, zeolit tabakasından ve buna destek olan gözenekli destek tabakasından (alüminyum veya paslanmaz çelik) oluşmaktadır. Bu membranların en önemli dezavantajlarından biri ise zeolit yapıda kendiliğinden oluşan kristaller arası gözeneklerin, molekül ayırma verimini düşürmesidir [30].

3.1.3. Karışım Matrisli Membranlar

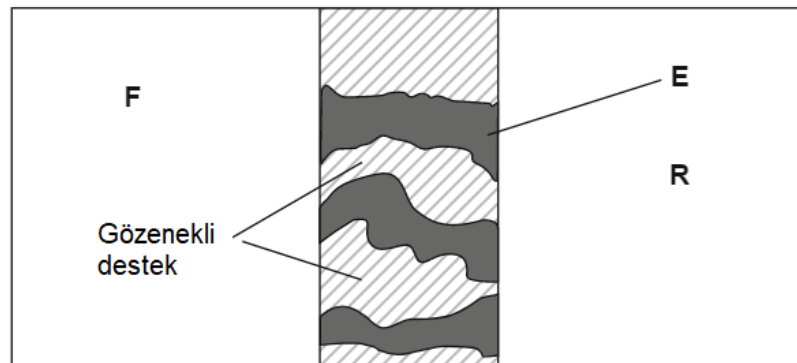
Karışım matrisli membranlar, polimer membranla zeolit membranın karışımından meydana gelmektedir. İnorganik zeolitlerin, genellikle, organik polimerlere kıyasla daha seçici olması, karışım matrisli membranların seçiciliğini önemli ölçüde arttırmaktadır. Buna ek olarak bu membranlar, daha iyi yeniden üretilebilirliğe, daha kolay ve ucuz imalat sürecine, daha iyi taşıma ve daha yüksek kimyasal ve ısıl kararlılığa sahiptirler [30]. Karışım matrisli membranın yapısı Şekil 3.7’de gösterilmiştir [31].



Şekil 3.7. Karışım matrisli membran yapısı: a) Simetrik membran, b) asimetrik membran

3.1.4. Destekli Sıvı Membranlar

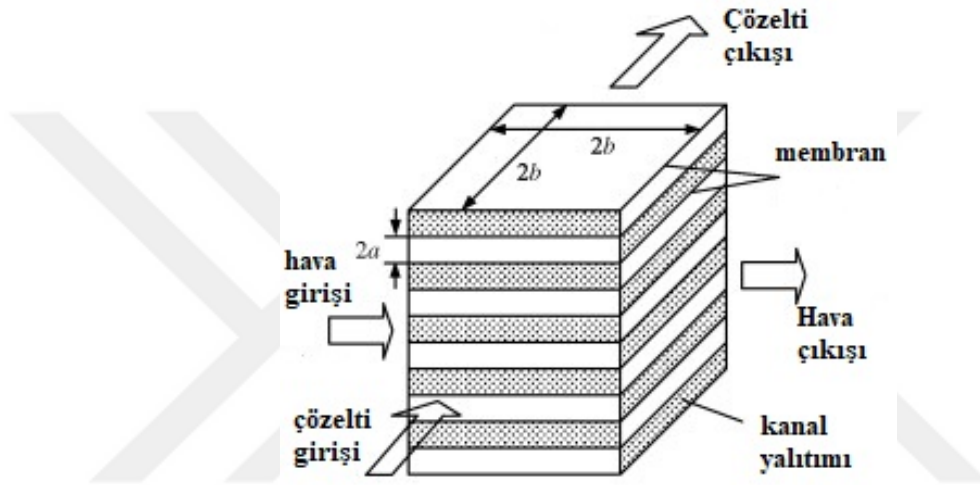
Destekli sıvı membranlar, sıvı fazın (membran sıvısı), polimer veya inorganik gözeneklerde kılcal kuvvetlerle tutulmasıyla oluşturulan üç fazlı membran sistemlerinden biridir [32]. Bu sistemde membranın bir tarafından besleme fazı (ayırma işlemine tabi tutulan akışkan) geçerken diğer tarafından alıcı faz geçmektedir. Membran fazı genellikle hidrofobik malzemeden oluştuğundan, membran ile besleme fazı arasında, ara-yüz oluşturması amacıyla, ayrılacak maddeye seçici bir taşıyıcı ajan ilave edilir [33]. Destekli sıvı membranların yapısı Şekil 3.8’de gösterilmiştir [34].



Şekil 3.8. Destekli sıvı membran yapısı (F: Besleme fazı, E: Sıvı membran, R: Alıcı faz)

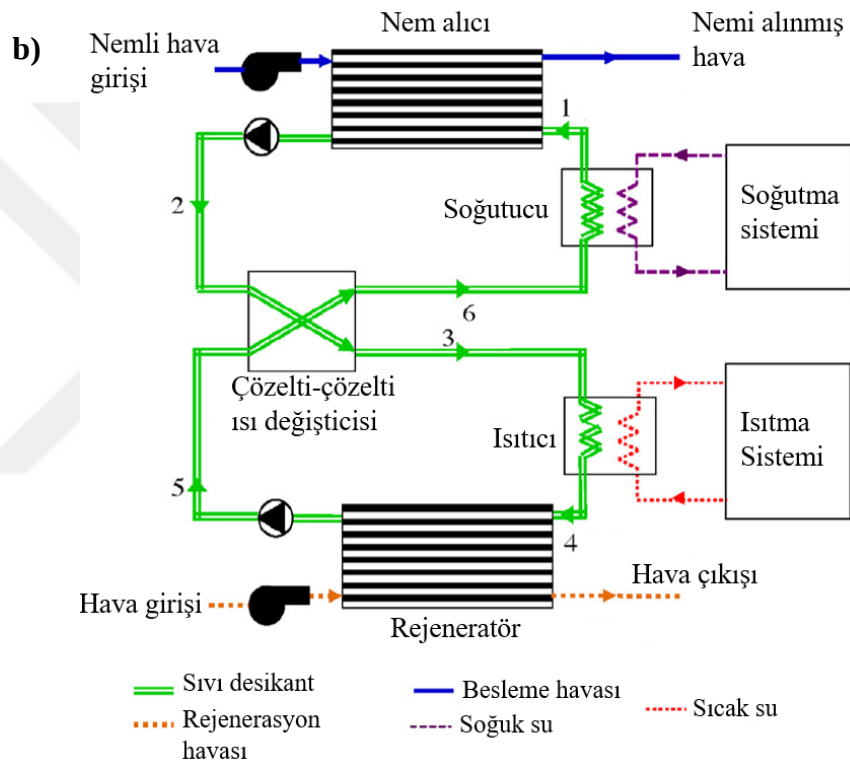
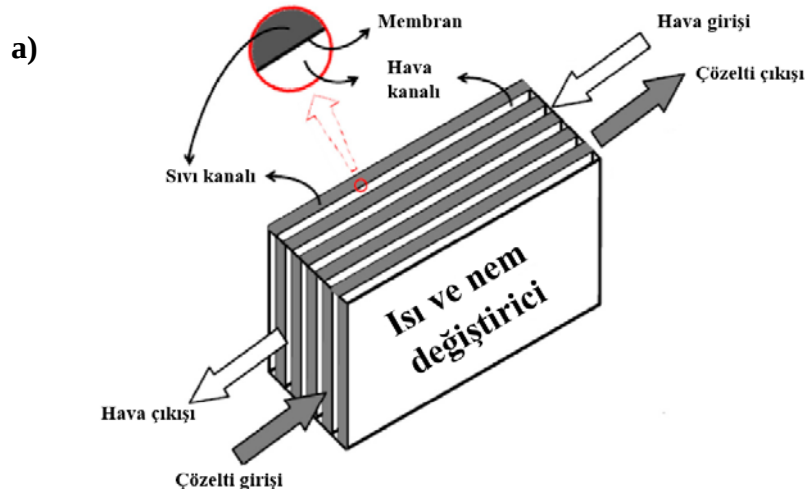
3.2. Membran Tabanlı Sıvı Desikant Nem Alma Sistemleri

Membranlı sıvı desikant nem alma sistemlerinde, 2. bölümde söz edildiği gibi, paralel-plakalı, yüzey-boru (silindirik veya eliptik) olmak üzere iki tip tasarım öne çıkmaktadır. Bunlardan paralel-plaka tipi membranlı sıvı desikant nem alma sistemi Şekil 3.9’de şematik olarak gösterilmiştir [17]. Şekil 3.9’da da görülebildiği gibi paralel-plaka tipi sistem, dikdörtgen şeklindeki membranların üst üste yerleştirilmesiyle oluşturulmaktadır.



Şekil 3.9. Paralel-plaka tipi membranlı sıvı desikant nem alma sistemi

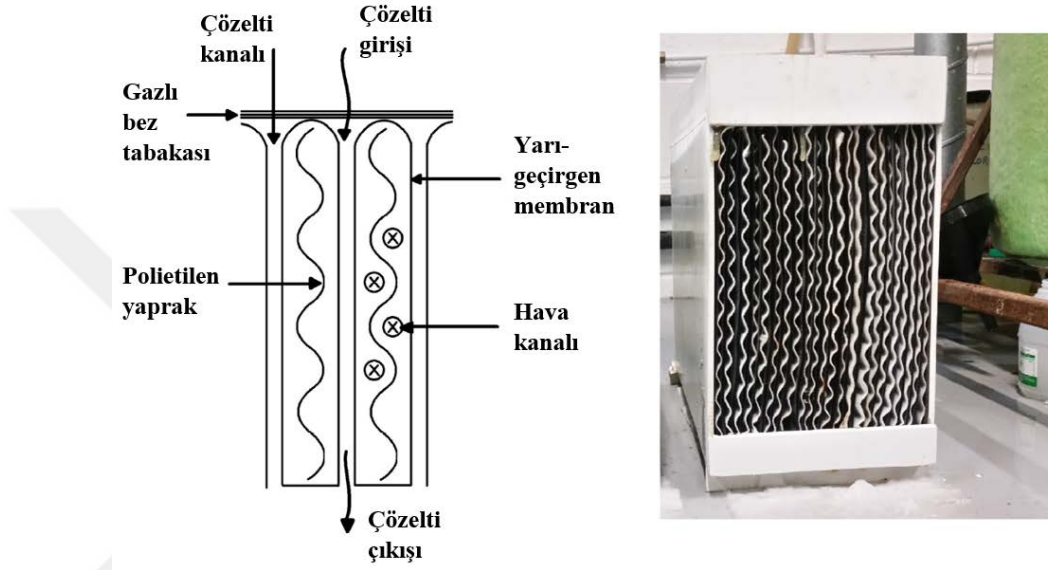
Paralel-plaka tipi sistem, literatürde farklı yapılar da tasarlanmış olup en çok kullanılan örneklerinden biri “LAMEE (Liquid to air energy exchanger)-sıvı-hava enerji değıştircileri” olarak bilinen membran tabanlı nem alma birimleridir [6, 11-12, 16, 18, 35-37]. Burada membranlar, plakalı ısı değıştirciler gibi, art arda yerleştirilerek hava ile sıvı desikant akışkanları birbirinden ayrılmaktadır. LAMEE nem alma biriminin ve membranlı sıvı desikant nem alma sisteminin şematik görünümü Şekil 3.10’da verilmiştir [12].



Şekil 3.10. Membranlı sıvı desikant nem alma sistemi: a) LAMEE nem alma birimi, b) sistemin şematik görünümü

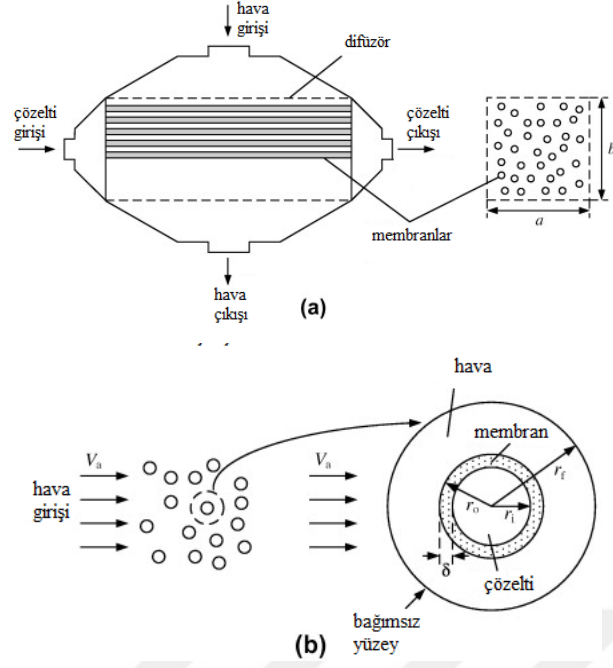
Şekil 3.10’da görülen nem alma sisteminde LAMEE yapısındaki membranlı nem alma birimleri, karşıt akışa göre tasarlanmış olup hem nem alıcı hem de rejeneratör olarak kullanılmıştır. Sistemde membranlı nem alıcı derişik çözelti ile havadan bir miktar nem alırken, rejeneratörde seyreltik hale gelen çözelti rejenere edilmektedir. Isıtma ve soğutma sistemlerine bağılı ısı değıştircilerle de çözeltinin nem alıcıya ve rejeneratöre girmeden önce sıcaklığı ayarlanmaktadır.

Paralel-plaka tipi membranlı nem alma birimleri bazı çalışmalarda, Şekil 3.11'deki gibi çapraz akışa göre de tasarlanmıştır [38-39]. Burada hava nem alma birimi boyunca aksel yönde akarken çözelti yukarıdan aşağıya doğru akmaktadır. Çözeltinin kanallara eşit şekilde dağılabilmesi için nem alma biriminin üst kısmına gazlı bez tabakası yerleştirilmiştir. Ayrıca hava kanalları dalgalı polietilen yapraklarla desteklenmiştir.



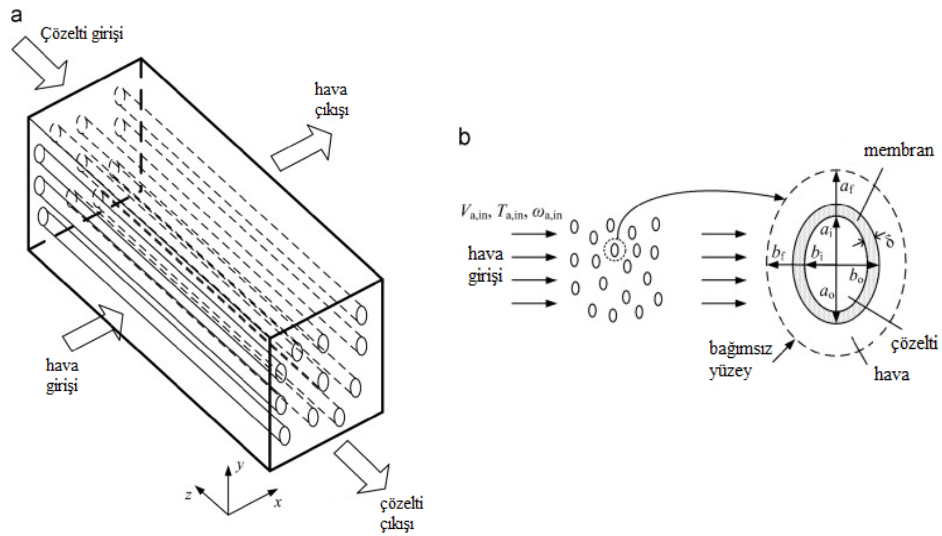
Şekil 3.11. Çapraz akışlı paralel-plaka tipi membranlı sistemin kesit yapısı

Yüzey-boru tipi membranlı sıvı desikant nem alma sistemi ise Şekil 3.12'de gösterilmiştir [10]. Burada, Şekil 3.12b'deki gibi, silindirik membranlı nem alma birimleri oluşturularak Şekil 3.12a'da görülen yüzey-boru tipi kontaktöre yerleştirilmiştir. Silindirik membranlı birimlerde en içteki silindirden çözelti geçerken dıştaki bağımsız yüzeyden hava akımı sağlanmaktadır. Hava ile çözeltiyi birbirinden ayırmak ve temas yüzeyini sağlamak için iki akışkan arasına silindirik membran yerleştirilmiştir.



Şekil 3.12. Yüzey-boru tipi membranlı SDNA sistemi a) yüzey-boru yapısı, b) membranlı silindirik kesit

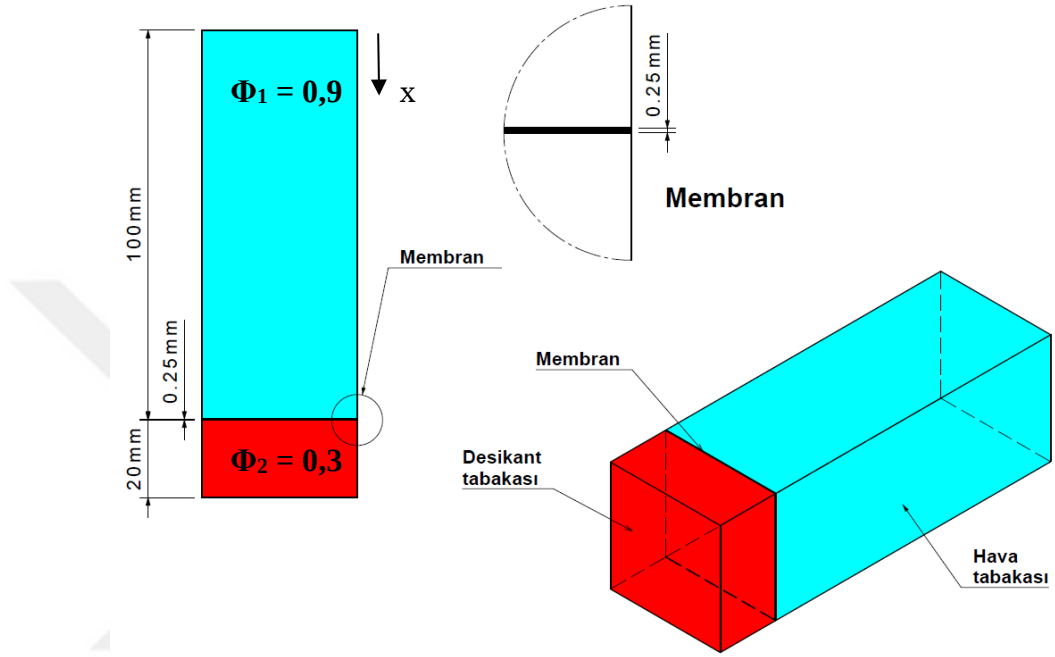
Literatürde çoğu çalışmada, yüzey-boru tipi sistemlerde membranlı borular silindirik olmasına karşın bazı çalışmalarda eliptik borular da kullanılmıştır. Eliptik membranlı sistem Şekil 3.13'te gösterilmiş olup burada eliptik membranlı borular dikdörtgen kesitli kanala yerleştirilmiştir [9]. Boruda en içteki elipsten çözelti akımı sağlanırken, dıştaki bağımsız yüzeyden hava geçmektedir. Nem alma işleminin gerçekleştirilebilmesi için çözelti ve hava yüzeyleri arasında membran yerleştirilmiştir.



Şekil 3.13. Eliptik kanallı membranlı sıvı desikant nem alma sistemi

4. MEMBRANLI KÜBİK NEM ALMA SİSTEMİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ

Yapılmış olan ilk analiz için membranlı kübik sıvı desikant nem alma sistemi modellenmiştir. Oluşturulan modelin teknik resmi Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Modellenen membranlı kübik nem alma sisteminin teknik resmi

Oluşturulan modelde kırmızı renk ile gösterilen bölümde kalınlığı 20 mm ve bağıl nemi $\Phi_2 = 0,3$ olan hava bulunmaktadır. Turkuaz renkli tabakada ise kalınlığı 100 mm ve bağıl nemi $\Phi_1 = 0,9$ olan nemli hava bulunmaktadır. Nemli hava ve kuru hava tabakaları arasında kalınlığı 0,25 mm olan membran yerleştirilmiştir. Sistemde nemli hava ve kuru hava durağan halde olup kütle transferi zamana bağlı olarak sadece x-yönünde gerçekleşmektedir. Akışkanlar durağan halde olduklarından konveksiyonla kütle transferi yoktur.

Sistemde hava tarafı için, zamana bağlı x-yönünde kütle iletim denklemi eşitlik (4.1)’de verilmiştir:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_h \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (4.1)$$

Burada D_h havanın difüzyon katsayısını (m^2/s), c konsantrasyonu (mol/m^3), t zamanı (s) ve x ise x-yönündeki mesafeyi (m) ifade etmektedir. Bu denklemde c , t ve x değişkenleri boyutsuzlaştırılabilir. c 'yi boyutsuzlaştırmak için eşitlik (4.2) kullanılmıştır:

$$C^* = \frac{c - C_s}{C_h - C_s} \quad (4.2)$$

Burada C^* boyutsuz konsantrasyonu, C_s sıvı desikant konsantrasyonunu ve C_h havadaki su buharı konsantrasyonunu temsil etmektedir. x 'i boyutsuzlaştırmak için aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır.

$$x^* = \frac{x}{a} \quad (4.3)$$

Eşitlik (4.3)'te x^* boyutsuz mesafeyi, a ise toplam malzeme uzunluğunu (m) ifade etmektedir. Toplam malzeme uzunluğu hava, membran ve sıvı desikant tabakası kalınlıkları toplamı olup eşitlik (4.4) ile hesaplanabilir:

$$a = a_h + a_m + a_s \quad (4.4)$$

Burada a_h hava tabakasının kalınlığı (m), a_m membran kalınlığı (m) ve a_s sıvı desikant tabakası kalınlığıdır (m). t 'yi boyutsuzlaştırmak için eşitlik (4.2) göz önüne alınıp, $\Delta c = C_h - C_s$ olarak kabul edilirse, eşitlik (4.2), $\Delta c \cdot C^* = c - C_s$ halini alacaktır. Burada her iki tarafın iki kere kısmi diferansiyeli alınırsa eşitlik (4.5) elde edilecektir.

$$\Delta c \cdot \partial^2 C^* = \partial^2 c \quad (4.5)$$

Eşitlik (4.5), eşitlik (4.3) kullanılarak eşitlik (4.1)'de yerine yazılır ve gerekli matematiksel işlemler yapılırsa boyutsuz zaman değişkeni eşitlik (4.6)'daki gibi elde edilir:

$$t^* = \frac{D_h \cdot t}{a^2} \quad (4.6)$$

Tüm değişkenler boyutsuz olduktan sonra hava tarafı için genel kütle iletim denklemi eşitlik (4.7)'ye dönüşecektir:

$$\frac{\partial C^*}{\partial t^*} = \frac{\partial^2 C^*}{\partial x^{*2}} \quad (4.7)$$

Membran tarafı için x-yönünde zamana bağlı kütle iletim denklemi eşitlik (4.8)'de ifade edilmiştir:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_m \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (4.8)$$

Burada D_m , membranın difüzyon katsayısıdır (m^2/s). Yine burada c , x ve t değişkenleri boyutsuzlaştırılabilir. c 'yi boyutsuzlaştırmak için hava tarafı denkleminde kullanılan adımlar tekrarlanabilir. Bu yüzden eşitlik (4.8)'de c yerine doğrudan boyutsuz C^* değişkeni yazılabilir. Buna ek olarak, eşitlik (4.8)'deki ifadenin sağ tarafının paydası, toplam malzeme uzunluğunun karesi (a^2) ile çarpılıp bölünürse aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$\frac{\partial C^*}{\partial t} = D_m \cdot \frac{\partial^2 C^*}{\frac{a^2 \cdot \partial x^2}{a^2}} \quad (4.9)$$

Eşitlik (4.3), eşitlik (4.9)'da yerine konulursa x değişkeni boyutsuzlaştırılmış olacaktır. Denklemin her iki tarafı a^2 ile çarpılır, denklemin her iki tarafı D_m 'ye bölünür ve denklemin sol tarafı D_h ile çarpılıp bölünürse eşitlik (4.10)'daki ifade elde edilir:

$$\frac{\frac{\partial C^*}{\partial t \cdot D_m \cdot D_h}}{D_m \cdot a^2} = \frac{\partial^2 C^*}{\partial x^{*2}} \quad (4.10)$$

Bu denklem de eşitlik (4.6)'da yerine konulup gerekli matematiksel işlemler uygulanırsa eşitlik (4.11) elde edilir:

$$\frac{\partial C^*}{\partial t^*} = \alpha_d \cdot \frac{\partial^2 C^*}{\partial x^{*2}} \quad (4.11)$$

Burada α , membranin difüzyon katsayısının havanın difüzyon katsayısına oranı olup eşitlik (4.12) ile hesaplanabilir.

$$\alpha_d = \frac{D_m}{D_h} \quad (4.12)$$

Sıvı desikant tarafı için x-yönünde zamana bağlı kütle iletim denklemi eşitlik (4.13)'te verilmiştir:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_s \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (4.13)$$

Burada D_s sıvı desikantın difüzyon katsayısıdır (m^2/s). Membran tarafı için uygulanan adımlar desikant tarafı kütle iletim denklemi için de uygulanırsa eşitlik (4.13) boyutsuz parametrelerle aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$\frac{\partial C^*}{\partial t^*} = \beta_d \cdot \frac{\partial^2 C^*}{\partial x^{*2}} \quad (4.14)$$

Burada β , sıvı desikantın difüzyon katsayısının havanın difüzyon katsayısına oranı olup eşitlik (4.15) ile tarif edilmiştir:

$$\beta_d = \frac{D_s}{D_h} \quad (4.15)$$

Sistemin doğrusal gösterimi ve sınır şartları Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Sistem yalıtılmış olarak kabul edildiğinden uç noktalarda kütle geçişinin olmadığı yani konsantrasyon değişiminin sıfır olduğu kabul edilmiştir. A ve B noktaları sırasıyla

hava-membran ve membran-sıvı desikant ara yüzleri olup bu noktalardaki kütle akıları birbirine eşittir. A noktası için ara yüz sınır şartı eşitlik (4.16) ile tarif edilmiştir.



Şekil 4.2. Kübik membranlı sistemin x-yönünde doğrusal gösterimi

$$-D_h \cdot \frac{\partial c}{\partial x} = -D_m \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \quad (4.16)$$

Burada eşitlik (4.12) hatırlanır ve denklem boyutsuz hale dönüştürülürse eşitlik (4.17) elde edilebilir:

$$\frac{\partial C^*}{\partial x^*} = \alpha_d \cdot \frac{\partial C^*}{\partial x^*} \quad (4.17)$$

Eşitlik (4.17)'nin sol tarafı havanın, sağ tarafı ise membranın A noktasındaki konsantrasyon değişimidir. B noktası için ara yüz sınır şartı ise eşitlik (4.18) ile ifade edilmiştir:

$$-D_m \cdot \frac{\partial c}{\partial x} = -D_s \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \quad (4.18)$$

Eşitlik (4.18)'de, eşitlik (4.12) ve (4.15) hatırlanarak, sağ ve sol taraf D_h 'ye bölünüp denklem yine boyutsuz hale dönüştürülürse aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\frac{\partial C^*}{\partial x^*} = \frac{\beta_d}{\alpha_d} \cdot \frac{\partial C^*}{\partial x^*} \quad (4.19)$$

Eşitlik (4.19)'un sağ tarafı membranın, sol tarafı ise sıvı desikantın B noktasındaki konsantrasyon değişimini göstermektedir. Sistemde havadaki, membrandaki ve sıvı desikanttaki kütle akıları sırasıyla eşitlik (4.20), (4.21) ve (4.22) ile tanımlanmıştır:

$$N_h = -D_h \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \quad (4.20)$$

$$N_m = -D_m \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \quad (4.21)$$

$$N_s = -D_s \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \quad (4.22)$$

Gerekli matematiksel işlemler yapılırsa hava, membran ve sıvı desikant için kütle akısı denklemleri sırasıyla eşitlik (4.23), (4.24) ve (4.25)'teki gibi elde edilebilir.

$$N_h = f_1 \cdot \frac{\partial C^*}{\partial x^*} \quad (4.23)$$

$$N_m = f_2 \cdot \frac{\partial C^*}{\partial x^*} \quad (4.24)$$

$$N_s = f_3 \cdot \frac{\partial C^*}{\partial x^*} \quad (4.25)$$

Burada f_1 , f_2 ve f_3 değerleri aşağıdaki eşitliklerle hesaplanmıştır:

$$f_1 = \frac{-D_h \cdot \Delta c}{a} \quad (4.26)$$

$$f_2 = \frac{-D_m \cdot \Delta c}{a} \quad (4.27)$$

$$f_3 = \frac{-D_s \cdot \Delta c}{a} \quad (4.28)$$

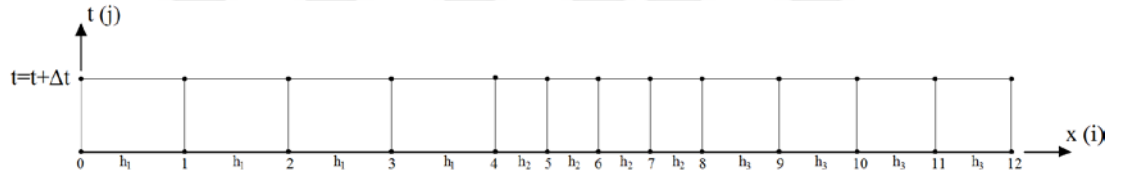
4.1. Sistemin Sonlu Farklar Yöntemiyle Analizi

Sistemin sonlu farklar analizi için oluşturulan örnek noktasal model Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Modelde yatay eksen (x) i ile, zaman (t) ise j ile ifade edilmiştir. Sistemde hesaplamalarda sonlu farklar adım aralıkları hava tarafı için h_1 , membran tarafı için h_2 ve sıvı desikant tarafı için h_3 olarak belirlenmiştir. h_1 , h_2 ve h_3 aşağıdaki eşitlikler kullanılarak bulunacaktır:

$$h_1 = \frac{\gamma}{l} \quad (4.29)$$

$$h_2 = \frac{\varepsilon - \gamma}{m} \quad (4.30)$$

$$h_3 = \frac{1 - \varepsilon}{n} \quad (4.31)$$



Şekil 4.3. Sonlu farklar analizi için oluşturulan noktasal model

Yukarıdaki denklemlerde l , m ve n sırasıyla hava, membran ve sıvı desikant tabakaları için bölme sayıları olup, örnek model için $l = 4$, $m = 4$ ve $n = 4$ olduğu Şekil 4.3'te görülebilmektedir. γ ve ε ise boyutsuz uzunluklar olup sırasıyla eşitlik (4.32) ve (4.33) kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\gamma = \frac{a_h}{a} \quad (4.32)$$

$$\varepsilon = \frac{a_h + a_m}{a} \quad (4.33)$$

Hava tarafı için kütle iletim denklemi boyutsuz olarak eşitlik (4.7) ile tarif edilmiştir. Söz konusu denklemde sol tarafın derecesinin bir, sağ tarafın derecesinin ise iki olduğu

görülebilmektedir. Denklemin sol tarafı ileriye doğru, sağ tarafı ise merkezi sonlu farklar ifadesi ile yazılırsa aşağıdaki denklem elde edilecektir:

$$\frac{C^*(i, j) - C^*(i, j - 1)}{\Delta t} = \frac{C^*(i - 1, j) - 2C^*(i, j) + C^*(i + 1, j)}{h_1^2} \quad (4.34)$$

Eşitlik (4.34)'te Δt zaman için sonlu fark adım aralığını temsil etmektedir. Burada denklem düzenlenirse eşitlik (4.35) elde edilebilir:

$$C^*(i - 1, j) - \left(2 + \frac{h_1^2}{\Delta t}\right) \cdot C^*(i, j) + C^*(i + 1, j) = -\frac{h_1^2}{\Delta t} C^*(i, j - 1) \quad (4.35)$$

Denklem (4.35)'te $-(2 + \frac{h_1^2}{\Delta t})$ ifadesi yerine θ_1 ve $-\frac{h_1^2}{\Delta t}$ ifadesi yerine μ_1 yazılırsa hava tarafı için aşağıdaki eşitlik bulunabilir:

$$C^*(i - 1, j) + \theta_1 C^*(i, j) + C^*(i + 1, j) = \mu_1 C^*(i, j) \quad (4.36)$$

Membran tarafı için genel kütle iletim denklemi boyutsuz olarak eşitlik (3.11) ile ifade edilmiştir. Eşitlik (4.11)'de sol taraf birinci, sağ taraf ise ikinci dereceden kısmi diferansiyel olduğundan sonlu farklar eşitliği aşağıdaki denklemdeki gibi yazılabilir:

$$\frac{C^*(i, j) - C^*(i, j - 1)}{\Delta t} = \alpha_d \cdot \frac{C^*(i - 1, j) - 2C^*(i, j) + C^*(i + 1, j)}{h_2^2} \quad (4.37)$$

Denklem (4.37) aşağıdaki gibi düzenlenebilir:

$$C^*(i - 1, j) - 2C^*(i, j) + C^*(i + 1, j) = \frac{h_2^2}{\alpha_d \Delta t} [C^*(i, j) - C^*(i, j - 1)] \quad (4.38)$$

Denklem (4.38)'de matematiksel işlemler yapıp $-(2 + \frac{h_2^2}{\alpha_d \Delta t})$ yerine θ_2 ve $-\frac{h_2^2}{\alpha_d \Delta t}$ yerine μ_2 yazılırsa membran tarafı için aşağıdaki genel eşitlik bulunur:

$$C^*(i-1, j) + \theta_2 \cdot C^*(i, j) + C^*(i+1, j) = \mu_2 \cdot C^*(i, j-1) \quad (4.39)$$

Benzer şekilde sıvı desikant tarafı için yazılan boyutsuz genel kütle iletim denkleminde (eşitlik 4.14) eşitliğin sol tarafı birinci dereceden, sağ tarafı ise ikinci dereceden kısmi diferansiyel denklemdir. O halde söz konusu denklem sonlu farklar yöntemiyle eşitlik (4.40)'taki gibi yazılabilecektir:

$$\frac{C^*(i, j) - C^*(i, j-1)}{\Delta t} = \beta_d \cdot \frac{C^*(i-1, j) - 2C^*(i, j) + C^*(i+1, j)}{h_3^2} \quad (4.40)$$

Membran tarafı sonlu farklar denkleminde uygulanan matematiksel işlemler yukarıdaki denkleme de uygulanır ve $-\left(2 + \frac{h_3^2}{\beta_d \Delta t}\right)$ yerine θ_3 , $-\frac{h_3^2}{\beta_d \Delta t}$ yerine μ_3 ifadesi yazılırsa eşitlik aşağıdaki şekli alacaktır:

$$C^*(i-1, j) + \theta_3 \cdot C^*(i, j) + C^*(i+1, j) = \mu_3 \cdot C^*(i, j-1) \quad (4.41)$$

Yukarıda elde edilen denklemlerin çözülebilmesi için sınır şartları gerekmektedir. Söz konusu sınır şartları aşağıdaki gibi yazılabilir:

- $x^* = 0$ için $\frac{\partial C^*}{\partial x^*} = 0$ olacaktır. Buradan aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$C^*(i, j) = C^*(i+1, j) \quad (4.42)$$

- $x^* = 1$ için yine $\frac{\partial C^*}{\partial x^*} = 0$ olacaktır. Buradan aşağıdaki eşitlik elde edilebilir:

$$C^*(i, j) = C^*(i-1, j) \quad (4.43)$$

- $x^* = \gamma$ için $\frac{\partial C^*}{\partial x^*} \Big|_{hava} = \alpha_d \cdot \frac{\partial C^*}{\partial x^*} \Big|_{membran}$ olacaktır. Bu denklem sonlu farklar yöntemine göre yazılırsa eşitlik (4.44) elde edilir:

$$\frac{C^*(i, j) - C^*(i-1, j)}{h_1} = \alpha_d \cdot \frac{C^*(i+1, j) - C^*(i, j)}{h_2} \quad (4.44)$$

Eşitlik (4.44)'te çarpma işlemi yapıp bilinmeyen değişkenler denklemin sol tarafına yazılırsa eşitlik (4.45) elde edilir:

$$C^*(i-1, j) - (1 + \omega_1) \cdot C^*(i, j) + \omega_1 \cdot C^*(i+1, j) = 0 \quad (4.45)$$

Burada ω_1 ifadesi aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmıştır:

$$\omega_1 = \frac{\alpha_d \cdot h_1}{h_2} \quad (4.46)$$

- $x^* = \varepsilon$ için $\left. \frac{\partial C^*}{\partial x^*} \right|_{membran} = \frac{D_s}{D_m} \cdot \left. \frac{\partial C^*}{\partial x^*} \right|_{desikant}$ olur. Bu ifade de sonlu farklar yöntemine göre yazılırsa aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$\frac{C^*(i, j) - C^*(i-1, j)}{h_2} = \frac{D_s}{D_m} \cdot \frac{C^*(i+1, j) - C^*(i, j)}{h_3} \quad (4.47)$$

Yukarıdaki denklemde de çarpma işlemi yapılır ve bilinmeyen değişkenler eşitliğinin sol tarafına yazılırsa eşitlik (4.48) elde edilir:

$$C^*(i-1, j) - (1 + \omega_2) \cdot C^*(i, j) + \omega_2 \cdot C^*(i+1, j) = 0 \quad (4.48)$$

Eşitlik (4.48)'deki ω_2 değeri eşitlik (4.49) kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\omega_2 = \frac{D_s h_1}{D_m h_2} \quad (4.49)$$

Sistemde hesaplamalar yapılırken kullanılacak başlangıç değerleri ($t = 0$) ise aşağıda verilmiştir:

- Hava için; $C^* = 1$,
- Sıvı desikant için $C^* = 0$ ve
- Membran için $C^* = \frac{-C_s}{C_h - C_s}$ olacaktır. Buradaki C_h ve C_s değerleri aşağıdaki eşitliklerle hesaplanacaktır:

$$C_h = \frac{\varphi \cdot P_{sat}}{R \cdot T} \quad (4.50)$$

$$C_s = \frac{P_{des}}{R \cdot T} \quad (4.51)$$

Burada φ havanın bağıl nemi, P_{sat} havanın doyma basıncı (kPa), R evrensel gaz sabiti (8,314 kJ/(kmol.K)), T mutlak sıcaklık (K) ve P_{des} sıvı desikant içindeki buharın kısmi basıncıdır (kPa).

Yukarıda modellenen denklemler hava ile sıvı desikant çözeltileri için yazılmıştır. Bu denklemlerde $D_s = D_h$ dönüşümü yapılarak aynı denklemler nemli hava ve kuru hava için yapılan analizde kullanılmıştır. Bu sebeple kuru hava için başlangıç şartları belirlenirken eşitlik (4.51) kullanılmayıp eşitlik (4.50)'de $\varphi = \varphi_2$ yerine konularak C_s değeri hesaplanmıştır. P_{sat} değeri ise Antonie denkleminde bulunmuştur [40]:

$$P_{sat} = e^{A - \frac{B}{T+C}} \quad (4.52)$$

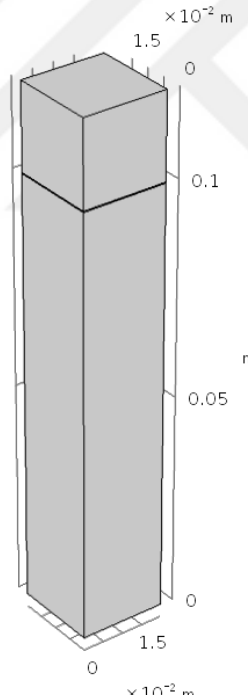
Bu denklemde $A = 16,3872$, $B = 3885,7$ ve $C = 230,17$ olup nemli hava için Antonie parametreleridir. T ise 313 K olarak alınmıştır.

4.2. Hesaplama Sonuçları

Sistemin öncelikle COMSOL yazılımı kullanılarak analizi yapılmış daha sonra hesapların doğrulaması için MATLAB yazılımında sonlu farklar yöntemi kullanılarak çözümlenmesi yapılmıştır. Çözümlemede kullanılan giriş değerleri Çizelge 4.1'de özetlenmiştir. COMSOL yazılımında çalışma tipi olarak “Transport of Diluted Species (tds)” seçilmiş olup yazılımda oluşturulan üç boyutlu model Şekil 4.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Hesaplama da kullanılan parametrelerin giriş değeri

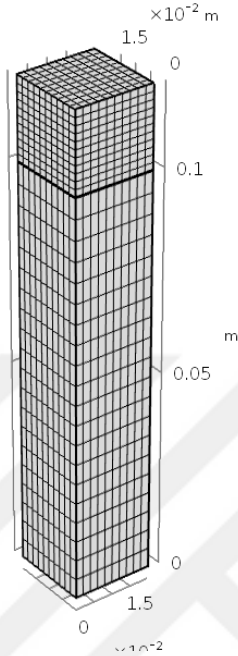
Parametre	Giriş Değeri
Nemli hava tabakası kalınlığı	100 (mm)
Membran kalınlığı	0,25 (mm)
Kuru hava tabakası kalınlığı	20 (mm)
Derinlik	20 (mm)
Nemli hava bağıl nemi, Φ_1	0,9
Kuru hava bağıl nemi, Φ_2	0,3
Havanın difüzyon katsayısı, D_h	$2,5 \cdot 10^{-4} \text{ (m}^2/\text{s)}$
Membran difüzyon katsayısı, D_m [19]	$3 \cdot 10^{-6} \text{ (m}^2/\text{s)}$
Membran giriş konsantrasyonu	0,7 (mol/m ³)
Sıcaklık, T	313 (K)



Şekil 4.4. COMSOL yazılımında oluşturulan üç boyutlu model

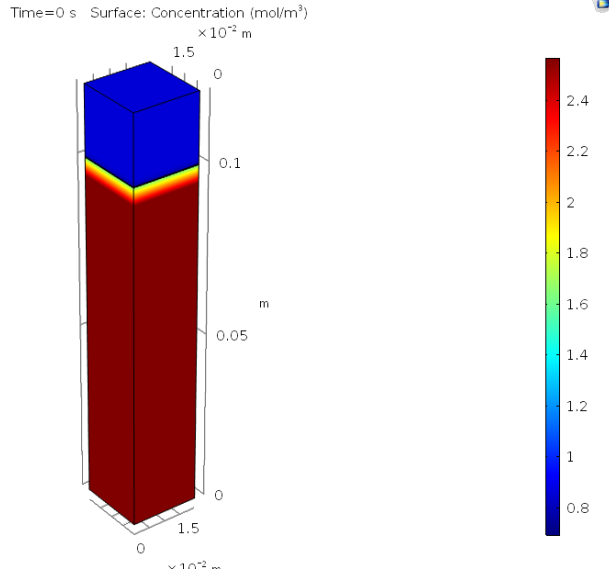
Hesaplama için hazırlanan ağ (mesh) yapısında nemli hava tarafı (kalınlık, 100 mm) 5 mm' lik, membran tarafı (kalınlık, 0,25 mm) 0,05 mm'lik ve kuru hava tarafı (kalınlık, 20 mm) 2 mm'lik bölmelere ayrılmıştır. Bu şekilde toplamda 4598 serbestlik derecesine sahip çözüm modeli elde edilmiştir. Oluşturulan ağ modeli Şekil 4.5'te

gösterilmiştir. Sistem birer saniye aralıklarla 50. saniyeye kadar zamana bağlı olarak çözümlenmiştir. Söz konusu ağ yapısıyla ve zaman aralığıyla sistemin COMSOL yazılımında çözüm süresi 18 saniye olarak belirlenmiştir.



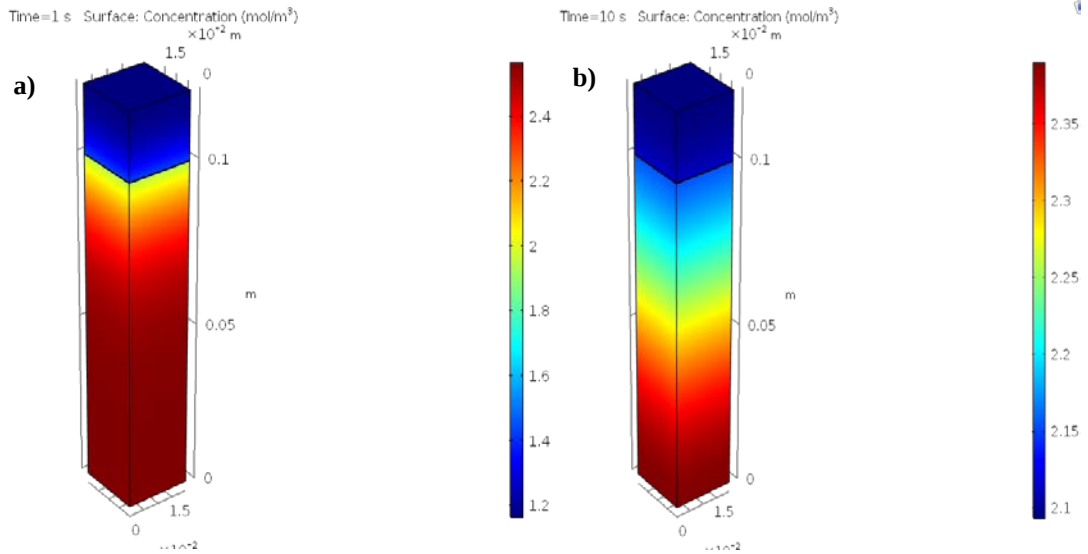
Şekil 4.5. Sistemin COMSOL yazılımında oluşturulan ağ (mesh) modeli

COMSOL yazılımında yapılan analiz sonucunda sistemde $t=0$ anında su buharının konsantrasyon değişimi Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılabileceği gibi nemli hava tarafının konsantrasyon değeri yaklaşık $2,6 \text{ mol/m}^3$ iken kuru hava tarafının konsantrasyonu $0,86 \text{ mol/m}^3$ civarındadır. Nemli hava bölgesinin membrana yakın olan kısmında, nem alma işleminin başlamasından dolayı, konsantrasyon değeri $1,9 \text{ mol/m}^3$ civarına düşmüştür. Membran tarafında ise konsantrasyon değeri, yine nem alma işleminin başlamasından dolayı, $0,7-0,8 \text{ mol/m}^3$ aralığındadır.



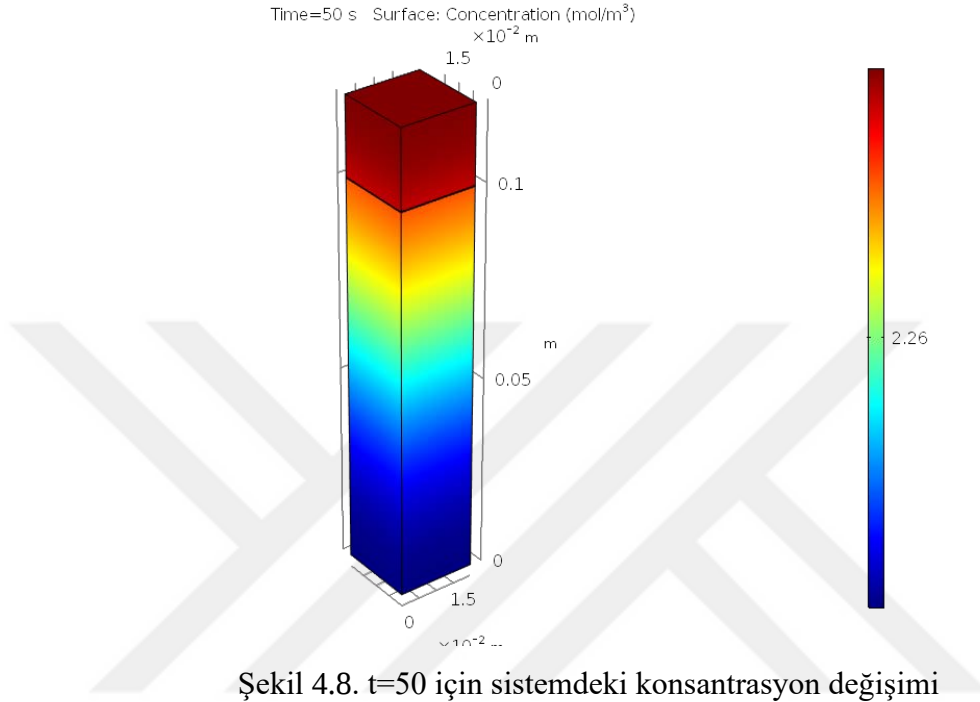
Şekil 4.6. t=0 anında COMSOL yazılımında sistemdeki konsantrasyon değişimi

Sistemde t=1 ve t=10. saniyelerdeki konsantrasyon değişimleri ise Şekil 4.7a ve 4.7b’de gösterilmiştir. t=1 anında nem alma işlemi tamamen başladığından nemli havadaki su buharı konsantrasyonu özellikle membrana yakın bölümüne doğru azalarak 2,1 mol/m³ civarına düşmüş, kuru hava tabakasının ise membrana yakın bölümünde 1,4 mol/m³ civarına kadar yükseldiği görülebilmektedir. t=10. saniyede ise nemli hava tabakasının üst kısımlarının da konsantrasyon değeri azalmış, 2,40-2,15 mol/m³ aralığında değişmiştir.



Şekil 4.7. Sistemdeki konsantrasyon değişimi a) t=1, b) t=10

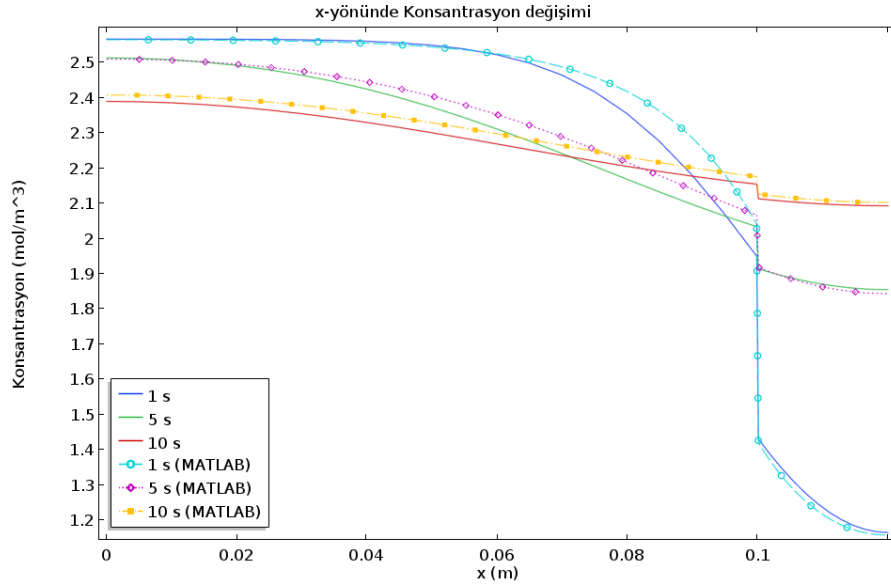
Sistem, kuru hava tabakasının taşıyabileceği en yüksek su buharı kapasitesine ulaşması sebebiyle 50. saniyede hemen hemen denge durumuna gelmektedir. Denge durumunun konsantrasyon değişimi Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Sistem ortalama $2,26 \text{ mol/m}^3$ konsantrasyon değerinde dengeye ulaşmıştır.



Şekil 4.8. $t=50$ için sistemdeki konsantrasyon değişimi

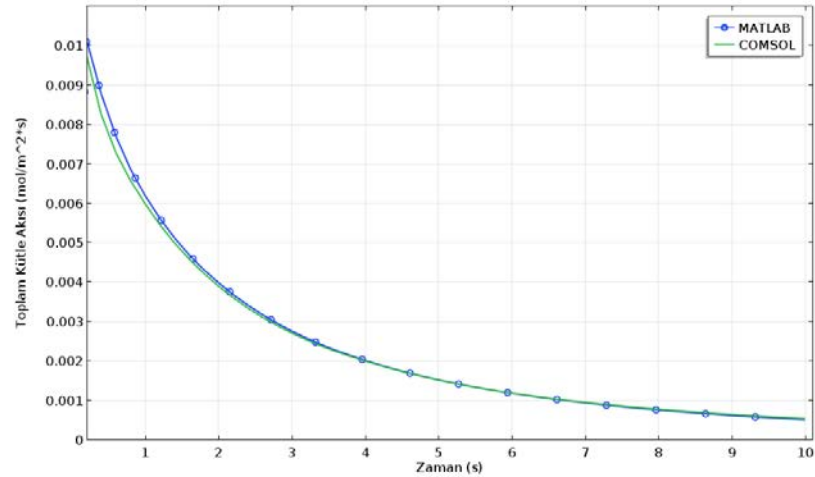
MATLAB yazılımında yapılan hesaplamalarda ise adım aralıkları, daha önce belirtildiği gibi, eşitlik (4.29), (4.30) ve (4.31) ile hesaplanmış olup bu denklemlerdeki l , m ve n değerleri, COMSOL yazılımı ile uyumlu olması açısından, sırasıyla 40, 12 ve 22 olarak belirlenmiştir. MATLAB yazılımında döngü değişkenleri sıfırdan başlatılmadığı için zaman (t), 1’den 50’ye kadar birer saniye arttırılmış ve bu şekilde konsantrasyon için 75×51 ’lik bir matris elde edilmiştir.

Sistemde COMSOL ve MATLAB kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda 1. 5. ve 10. saniyeler için x-yönünde elde edilen konsantrasyon değerleri Şekil 4.9’da karşılaştırılmıştır. Şekilden de görülebildiği gibi COMSOL ve MATLAB yazılımlarında birbirine oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4.9. COMSOL ve MATLAB yazılımlarında x-yönünde konsantrasyon değişimi

Çalışmada COMSOL ve MATLAB yazılımları kullanılarak eşitlik (4.23) ile hesaplanan x-yönündeki toplam kütle akılarının (mol/m².s) zamana bağlı değişimi ise Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Eşitlik (4.23) türevli ifade içerdiğinden, sayısal yöntemle hesaplama yapılırken daha doğru sonuç elde edilebilmesi için, zaman aralığı 0,2 saniye olarak belirlenip 0,2-10 saniye aralığında çözüm yapılmıştır.



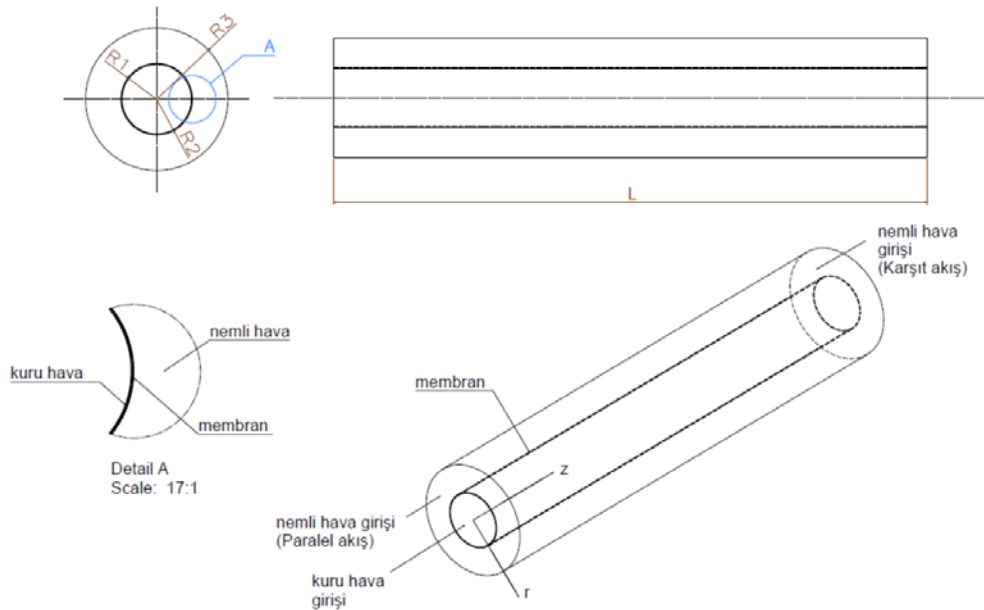
Şekil 4.10. COMSOL ve MATLAB yazılımlarında toplam kütle akılarının zamanla değişimi

5. MEMBRANLI BORU-TİPİ NEM ALMA SİSTEMİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ

Bu çalışmada, membranlı boru-tipi nem alma sisteminin nemli ve kuru hava için modellenmesi ve analizi yapılmıştır. Sistem nemli ve kuru hava taraflarında paralel ve karşıt akış olmak üzere iki farklı akış tipi için COMSOL yazılımı kullanılarak modellenmiş daha sonra aynı sistemin MATLAB yazılımı kullanılarak sonlu farklar yöntemiyle analizi yapılmıştır. Her iki çalışmadan elde edilen sonuçlar kullanılarak, en-boy oranı (L/D) ve Reynolds sayısına bağlı olarak nemli ve kuru hava tarafları için Sherwood sayısı eşitlikleri elde edilmiştir.

5.1. Sistemin Modellenmesi

Membranlı boru-tipi nem alma sistemi için oluşturulan modelin teknik resmi Şekil 5.1’de gösterilmiştir. Şekilde de görülebileceği gibi sistem, halka kesitli uzun bir kanaldan oluşmaktadır. Burada R_1 kuru hava kanalının yarıçapını, R_2 membran yarıçapını, R_3 ise nemli hava kanalı yarıçapını ifade etmektedir. Sistemde kullanılan membranın kalınlığı $R_2 - R_1$ olacaktır. L ise silindirik membranın z-yönündeki maksimum uzunluğudur. Sistem şekildeki gibi paralel ve karşıt akış olmak üzere iki farklı akış tipi için laminar akışta analiz edilecektir.



Şekil 5.1. Membranlı silindirik nem alma sistemi teknik resmi

Membranlı silindirik nem alma sistemi, r (radyal mesafe), z (boylamsal mesafe) ve t (zaman) olmak üzere üç boyut için modellenmiştir. Silindirik koordinatlarda sözü geçen üç boyut için nemli hava tarafı kütle iletim denklemi eşitlik (5.1)'de verilmiştir:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + V_{z,h} \cdot \frac{\partial c}{\partial z} = D_h \cdot \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial c}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right] \quad (5.1)$$

Burada, c konsantrasyonu (mol/m^3), t zamanı (s), z boylamsal mesafeyi (m), r radyal mesafeyi (m), D_h havanın difüzyon katsayısını (m^2/s) ve $V_{z,h}$ nemli havanın z -yönündeki hızını (m/s) ifade etmektedir. Söz konusu denklem aşağıdaki eşitlikler kullanılarak boyutsuzlaştırılmıştır:

$$C^* = \frac{c - C_s}{C_h - C_s} \quad (5.2)$$

$$t^* = \frac{D_h \cdot t}{L^2} \quad (5.3)$$

$$z^* = \frac{z}{L} \quad (5.4)$$

$$r^* = \frac{r}{R_3} \quad (5.5)$$

$$\frac{L \cdot V_{z,h}}{D_h} = \gamma \cdot Re \cdot Sc \quad (5.6)$$

$$\gamma = \frac{L}{d_e} \quad (5.7)$$

$$\psi = \frac{L}{R_3} \quad (5.8)$$

Burada, L silindirik membranin z-yönündeki maksimum yüksekliğini, R_3 silindirin en dıştaki yarıçapını, Re Reynolds sayısını, Sc Schimidt sayısını ve d_e eş değer çapı ifade etmektedir. Eş değer çap, d_e eşitlik (5.9) ile hesaplanmıştır:

$$d_e = \sqrt{4 \cdot (R_3^2 - R_2^2)} \quad (5.9)$$

Yukarıdaki eşitliklerin eşitlik (5.1)'de yerine konulmasıyla nemli hava tarafı için boyutsuz kütle iletim denklemi aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$\frac{\partial C^*}{\partial t^*} + \gamma \cdot Re \cdot Sc \cdot \frac{\partial C^*}{\partial z^*} = \frac{\psi^2}{r^*} \frac{\partial C^*}{\partial r^*} + \psi^2 \frac{\partial^2 C^*}{\partial r^{*2}} + \frac{\partial^2 C^*}{\partial z^{*2}} \quad (5.10)$$

Membran ve kuru hava tarafı için üç boyutlu kütle iletim denklemleri sırasıyla eşitlik (5.11) ve (5.12)'de verilmiştir:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_m \cdot \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial c}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right] \quad (5.11)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + V_{z,s} \cdot \frac{\partial c}{\partial z} = D_s \cdot \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial c}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right] \quad (5.12)$$

Burada $V_{z,s}$ kuru havanın z-yönündeki hızını (m/s) ifade etmektedir. Nemli hava tarafı kütle iletim denklemini boyutsuzlaştırmak için uygulanan işlemler membran ve kuru hava tarafı için de uygulanırsa membran ve kuru hava için boyutsuz kütle iletim denklemleri sırasıyla eşitlik (5.13) ve (5.14)'daki gibi elde edilebilir:

$$\frac{\partial C^*}{\partial t^*} = \alpha_d \left[\frac{\psi^2}{r^*} \frac{\partial C^*}{\partial r^*} + \psi^2 \frac{\partial^2 C^*}{\partial r^{*2}} + \frac{\partial^2 C^*}{\partial z^{*2}} \right] \quad (5.13)$$

$$\frac{\partial C^*}{\partial t^*} + e^* \frac{\partial C^*}{\partial z^*} = \beta_d \left[\frac{\psi^2}{r^*} \frac{\partial C^*}{\partial r^*} + \psi^2 \frac{\partial^2 C^*}{\partial r^{*2}} + \frac{\partial^2 C^*}{\partial z^{*2}} \right] \quad (5.14)$$

Burada D_m ve D_s sırasıyla su buharının membran ve kuru havadaki difüzyon katsayısı (m^2/s) olup $\alpha_d = D_m/D_h$, $\beta_d = D_s/D_h$ ve $e^* = V_{z,s} \cdot L/D_h$ olacaktır.

Sistemde nemli havadaki, membrandaki ve kuru havadaki r-yönündeki su buharı kütle akıları ($mol/m^2.s$) sırasıyla eşitlik (5.15), eşitlik (5.16) ve eşitlik (5.17) ile hesaplanacaktır:

$$N_{h,r} = -D_h \cdot \frac{\partial c}{\partial r} \quad (5.15)$$

$$N_{m,r} = -D_m \cdot \frac{\partial c}{\partial r} \quad (5.16)$$

$$N_{s,r} = -D_s \cdot \frac{\partial c}{\partial r} \quad (5.17)$$

r-yönündeki kütle akısı eşitlikleri konsantrasyon gradyanları boyutsuz olacak şekilde aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$N_{h,r} = f_1 \cdot \frac{\partial C^*}{\partial r^*} \quad (5.18)$$

$$N_{m,r} = f_2 \cdot \frac{\partial C^*}{\partial r^*} \quad (5.19)$$

$$N_{s,r} = f_3 \cdot \frac{\partial C^*}{\partial r^*} \quad (5.20)$$

Burada f_1 , f_2 ve f_3 aşağıdaki eşitliklerle hesaplanacaktır.

$$f_1 = \frac{-D_h \cdot \Delta c}{R_3} \quad (5.21)$$

$$f_2 = \frac{-D_m \cdot \Delta c}{R_3} \quad (5.22)$$

$$f_3 = \frac{-D_s \cdot \Delta c}{R_3} \quad (5.23)$$

Yukarıdaki eşitliklerde $\Delta c = c_h - c_s$ olup, c_h ve c_s sırasıyla nemli ve kuru havadaki su buharı başlangıç konsantrasyonudur (mol/m^3). Aynı şekilde nemli havadaki, membrandaki ve kuru havadaki z-yönündeki su buharı kütle akıları ($\text{mol/m}^2.\text{s}$) ise sırasıyla eşitlik (5.24), eşitlik (5.25) ve eşitlik (5.26) ile hesaplanacaktır:

$$N_{h,z} = -D_h \cdot \frac{\partial c}{\partial z} \quad (5.24)$$

$$N_{m,z} = -D_m \cdot \frac{\partial c}{\partial z} \quad (5.25)$$

$$N_{s,z} = -D_s \cdot \frac{\partial c}{\partial z} \quad (5.26)$$

Aynı şekilde z-yönündeki kütle akısı denklemleri de konsantrasyon gradyanları boyutsuz olacak şekilde aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$N_{h,z} = f_1 \cdot \frac{\partial C^*}{\partial z^*} \quad (5.27)$$

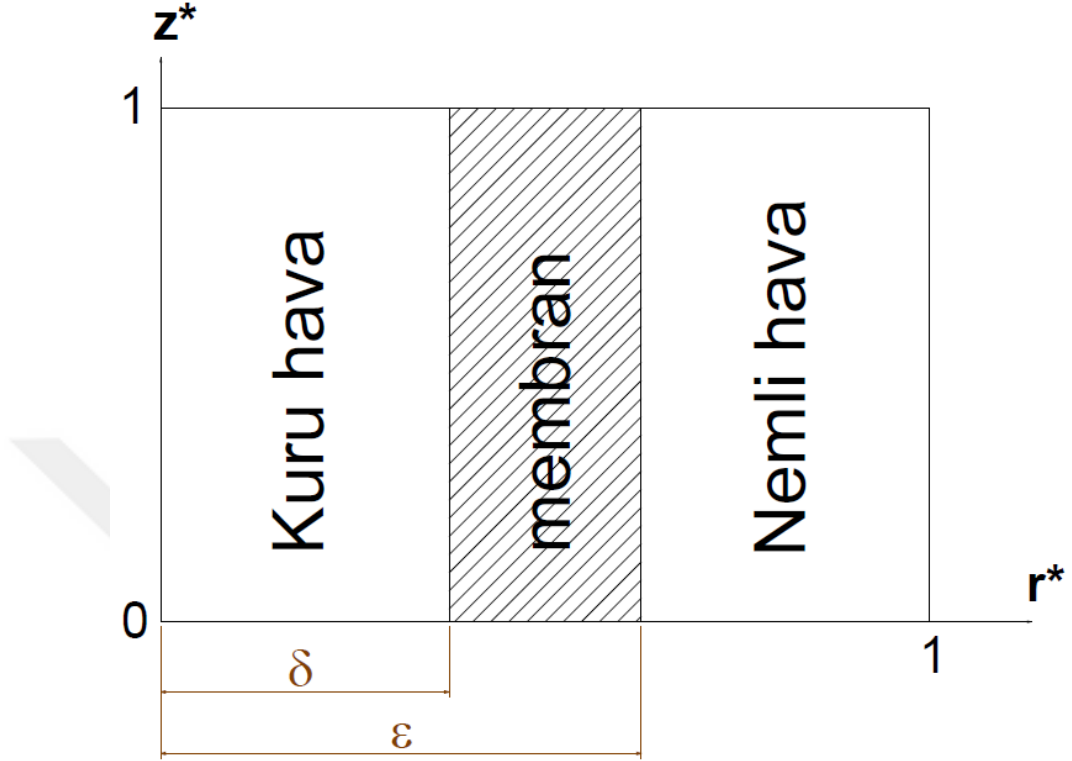
$$N_{m,z} = f_2 \cdot \frac{\partial C^*}{\partial z^*} \quad (5.28)$$

$$N_{s,z} = f_3 \cdot \frac{\partial C^*}{\partial z^*} \quad (5.29)$$

5.2. Sistemin Sonlu Farklar Yöntemiyle Modellenmesi

Sistemin sonlu farklar yöntemiyle analiz edilebilmesi için öncelikle boyutsuz koordinatlara göre sonlu farklar adım aralıklarının belirlenmesi gerekmektedir. Boyutsuz r^* ve z^* uzunlukları önceki bölümde sırasıyla eşitlik (5.4) ve eşitlik (5.5)'te

tanımlanmıştır. Sistemde nemli hava, membran ve kuru hava tarafları boyutsuz r^* ve z^* koordinatlarında Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Membranlı silindirik sistemin boyutsuz koordinatlarda gösterimi

Şekilde de görülebileceği gibi kuru hava tabakasının ve membranın koordinatları sırasıyla δ ve ε olarak belirlenmiştir. Buradan kuru hava tabakası kalınlığının δ ve membranın kalınlığının $\varepsilon - \delta$ olacağı görülebilmektedir. Sistemin r^* yönünde boyutsuz maksimum uzunluğu 1 olacağından nemli hava tabakası kalınlığı $1 - \varepsilon$ olacaktır. Aynı zamanda Şekil 5.1’deki kuru hava, membran ve nemli hava tabakası kalınlıkları da hatırlanırsa, boyutsuz δ ve ε uzunlukları aşağıdaki eşitliklerle hesaplanabilecektir:

$$\delta = \frac{R_1}{R_3} \quad (5.30)$$

$$\varepsilon = \frac{R_2}{R_3} \quad (5.31)$$

Hesaplanan bu kalınlıklara göre kuru hava, membran ve nemli hava tabakalarının r^* yönünde sonlu farklar adım aralıkları sırasıyla eşitlik (5.32), (5.33) ve (5.34) ile tanımlanmıştır.

$$h_1 = \frac{\delta}{l} \quad (5.32)$$

$$h_2 = \frac{\varepsilon - \delta}{m} \quad (5.33)$$

$$h_3 = \frac{1 - \varepsilon}{n} \quad (5.34)$$

Burada l , m ve n sırasıyla kuru hava, membran ve nemli hava tabakaları için tanımlanan gelişigüzel bölme sayılarıdır. z^* -yönünde ise sözü geçen tabakalar için h_z olmak üzere tek bir adım aralığı tanımlanmıştır. h_z , eşitlik (5.35) ile hesaplanmıştır.

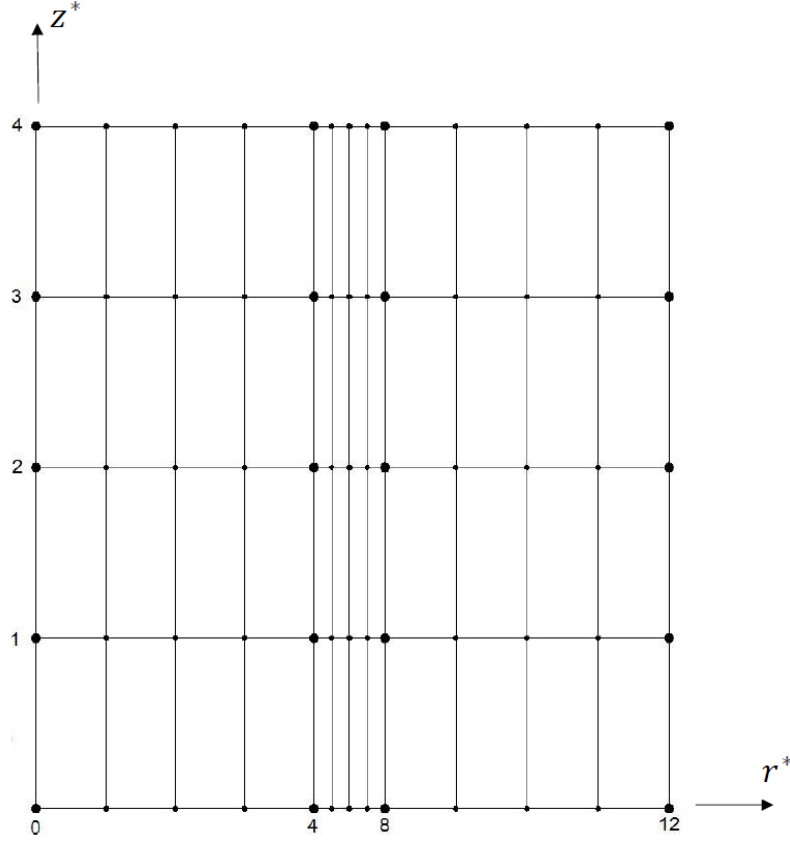
$$h_z = \frac{1}{\zeta} \quad (5.35)$$

Eşitlik (5.35)'te ζ , yine gelişigüzel bölme sayısıdır. Tanımlanan bölme sayılarına göre sistemin örnek noktasal gösterimi Şekil 5.3'te verilmiştir. Örnekte tüm bölme sayıları 4 olarak belirlenmiştir.

Nemli hava tarafı için boyutsuz kütle iletim denklemi önceki bölümde eşitlik (5.10)'da tanımlanmıştır. Söz konusu denklem sonlu farklar yöntemiyle radyal yön (r) i , boylamsal yön (z) j ve zaman vektörü k olacak şekilde yazılırsa eşitlik (5.36) elde edilir:

$$\begin{aligned}
& \frac{C^*(i,j,k) - C^*(i,j,k-1)}{\Delta t} + \gamma Re Sc \frac{C^*(i,j+1,k) - C^*(i,j-1,k)}{2h_z} \\
&= \frac{\psi^2}{r^*} \frac{C^*(i+1,j,k) - C^*(i-1,j,k)}{2h_3} \\
&+ \psi^2 \frac{C^*(i-1,j,k) - 2C^*(i,j,k) + C^*(i+1,j,k)}{h_3^2} \\
&+ \frac{C^*(i,j-1,k) - 2C^*(i,j,k) + C^*(i,j+1,k)}{h_z^2}
\end{aligned} \tag{5.36}$$

Denklemden, en doğru sonucu elde edebilmek ve belirlenen sınır şartlarına uygun olması açısından, konsantrasyonun zaman, r ve z yönlerindeki gradyanı sırasıyla geriye doğru, merkezi ve merkezi sonlu farklar yöntemiyle yazılmıştır.



Şekil 5.3. $l = m = n = \zeta = 4$ için sistemin örnek noktasal gösterimi

Burada her ifade kendi içinde toplanır ve her bir ifadede oluşan katsayılar topluluğu tek bir katsayı ile değiştirilip $C(i,j,k)$ ifadesi yalnız bırakılırsa eşitlik (5.37) elde edilebilir:

$$\begin{aligned}
C^*(i, j, k) = \frac{1}{\theta_{1b}} [& -\mu_1 C^*(i, j, k - 1) + \theta_{1a} C^*(i - 1, j, k) \\
& + \theta_{1c} C^*(i + 1, j, k) - \theta_{1d} C^*(i, j - 1, k) \\
& - \theta_{1e} C^*(i, j + 1, k)]
\end{aligned} \tag{5.37}$$

Eşitlik (5.37)'deki θ_{1a} , θ_{1b} , θ_{1c} , θ_{1d} , θ_{1e} ve μ_1 değerleri ise aşağıdaki eşitliklerle hesaplanmıştır:

$$\theta_{1a} = -\frac{\psi^2}{2r^*h_3} + \frac{\psi^2}{h_3^2} \tag{5.38}$$

$$\theta_{1b} = \frac{1}{\Delta t} + \frac{2\psi^2}{h_3^2} + \frac{2}{h_z^2} \tag{5.39}$$

$$\theta_{1c} = \frac{\psi^2}{2r^*h_3} + \frac{\psi^2}{h_3^2} \tag{5.40}$$

$$\theta_{1d} = -\frac{\gamma Re Sc}{2r^*h_3} - \frac{1}{h_z^2} \tag{5.41}$$

$$\theta_{1e} = \frac{\gamma Re Sc}{2r^*h_3} - \frac{1}{h_z^2} \tag{5.42}$$

$$\mu_1 = -\frac{1}{\Delta t} \tag{5.43}$$

Membran tarafı için eşitlik (5.13) ile tanımlanan boyutsuz kütle iletim denklemi sonlu farklar yöntemine göre yazılırsa eşitlik (5.44) elde edilebilir:

$$\begin{aligned}
& \frac{C^*(i, j, k) - C^*(i, j, k - 1)}{\Delta t} \\
&= \alpha_d \left[\frac{\psi^2}{r^*} \frac{C^*(i + 1, j, k) - C^*(i - 1, j, k)}{2h_2} \right. \\
&+ \psi^2 \frac{C^*(i - 1, j, k) - 2C^*(i, j, k) + C^*(i + 1, j, k)}{h_2^2} \\
&\left. + \frac{C^*(i, j - 1, k) - 2C^*(i, j, k) + C^*(i, j + 1, k)}{h_z^2} \right]
\end{aligned} \tag{5.44}$$

Burada yine aynı şekilde her ifade kendi içinde toplanır ve her bir ifadede oluşan katsayılar topluluğu tek bir katsayı ile değiştirilip $C(i, j, k)$ ifadesi yalnız bırakılırsa eşitlik (5.45) elde edilir:

$$\begin{aligned}
C^*(i, j, k) = \frac{1}{\theta_{2b}} [& -\mu_2 C^*(i, j, k - 1) + \theta_{2a} C^*(i - 1, j, k) \\
& + \theta_{2c} C^*(i + 1, j, k) + \theta_{2d} C^*(i, j - 1, k) \\
& + \theta_{2e} C^*(i, j + 1, k)]
\end{aligned} \tag{5.45}$$

Eşitlik (5.45)'deki θ_{2a} , θ_{2b} , θ_{2c} , θ_{2d} , θ_{2e} ve μ_2 değerleri ise aşağıdaki eşitliklerle tanımlanmıştır:

$$\theta_{2a} = -\frac{\alpha_d \psi^2}{2r^* h_2} + \frac{\alpha_d \psi^2}{h_2^2} \tag{5.46}$$

$$\theta_{2b} = \frac{1}{\Delta t} + \frac{2\alpha_d \psi^2}{h_2^2} + \frac{2\alpha_d}{h_z^2} \tag{5.47}$$

$$\theta_{2c} = \frac{\alpha_d \psi^2}{2r^* h_2} + \frac{\alpha_d \psi^2}{h_2^2} \tag{5.48}$$

$$\theta_{2d} = \frac{\alpha_d}{h_z^2} \tag{5.49}$$

$$\theta_{2e} = \frac{\alpha_d}{h_z^2} \quad (5.50)$$

$$\mu_2 = -\frac{1}{\Delta t} \quad (5.51)$$

Son olarak eşitlik (5.14)'te tanımlanan kuru hava tarafı boyutsuz kütle iletim denklemi, sonlu farklar yöntemine göre aşağıdaki eşitlikteki gibi yazılabilir:

$$\begin{aligned} & \frac{C^*(i, j, k) - C^*(i, j, k-1)}{\Delta t} + e^* \frac{C^*(i, j+1, k) - C^*(i, j-1, k)}{2h_z} \\ &= \beta_d \left[\frac{\psi^2}{r^*} \frac{C^*(i+1, j, k) - C^*(i-1, j, k)}{2h_1} \right. \\ & \quad + \psi^2 \frac{C^*(i-1, j, k) - 2C^*(i, j, k) + C^*(i+1, j, k)}{h_1^2} \\ & \quad \left. + \frac{C^*(i, j-1, k) - 2C^*(i, j, k) + C^*(i, j+1, k)}{h_z^2} \right] \end{aligned} \quad (5.52)$$

Nemli hava ve membran tarafına uygulanan matematiksel işlemler eşitlik (5.52)'ye de uygulanırsa eşitlik (5.53) elde edilir:

$$\begin{aligned} C^*(i, j, k) = \frac{1}{\theta_{3b}} & [-\mu_3 C^*(i, j, k-1) + \theta_{3a} C^*(i-1, j, k) \\ & + \theta_{3c} C^*(i+1, j, k) - \theta_{3d} C^*(i, j-1, k) \\ & - \theta_{3e} C^*(i, j+1, k)] \end{aligned} \quad (5.53)$$

θ_{3a} , θ_{3b} , θ_{3c} , θ_{3d} , θ_{3e} ve μ_3 değerleri ise aşağıdaki eşitliklerle hesaplanacaktır:

$$\theta_{3a} = -\frac{\beta_d \psi^2}{2r^* h_1} + \frac{\beta_d \psi^2}{h_1^2} \quad (5.54)$$

$$\theta_{3b} = \frac{1}{\Delta t} + \frac{2\beta_d \psi^2}{h_1^2} + \frac{2\beta_d}{h_z^2} \quad (5.55)$$

$$\theta_{3c} = \frac{\beta_d \psi^2}{2r^* h_1} + \frac{\beta_d \psi^2}{h_1^2} \quad (5.56)$$

$$\theta_{3d} = -\frac{e^*}{2h_z} - \frac{\beta_d}{h_z^2} \quad (5.57)$$

$$\theta_{3e} = \frac{e^*}{2h_z} - \frac{\beta_d}{h_z^2} \quad (5.58)$$

$$\mu_3 = -\frac{1}{\Delta t} \quad (5.59)$$

5.2.1. Sınır Şartları

Sistemin sonlu farklar yöntemiyle analizinin yapılabilmesi için üç yalıtım ve iki ara-yüz olmak üzere beş adet sınır şartı belirlenmiştir. Yalıtılmış sınırlarda kütle geçişi olmayacaktır. Buna göre yalıtım sınır şartları, Şekil 5.2 de dikkate alınarak, aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$r^* = 0 ; \frac{\partial C^*}{\partial r^*} = 0 \quad C^*(i, j, k) = C^*(i + 1, j, k) \quad (5.60)$$

$$r^* = 1 ; \frac{\partial C^*}{\partial r^*} = 0 \quad C^*(i, j, k) = C^*(i - 1, j, k) \quad (5.61)$$

$$z^* = 1 ; \frac{\partial C^*}{\partial r^*} = 0 \quad C^*(i, j, k) = C^*(i, j - 1, k) \quad (5.62)$$

Sistemde ara-yüzlerde kütle akıları eşit olacaktır. Yine Şekil 5.2’de belirlenen koordinatlar dikkate alınarak, kuru hava-membran ara-yüzü sınır şartı eşitlik (5.63) ile tanımlanmıştır.

$$r^* = \delta \quad D_s \frac{\partial C^*}{\partial r^*} = D_m \frac{\partial C^*}{\partial r^*} \quad (5.63)$$

Burada $\alpha_d = D_m/D_h$ ve $\beta_d = D_s/D_h$ olduğu hatırlanıp denklem tekrar düzenlenirse;

$$\left. \frac{\partial C^*}{\partial r^*} \right|_{kuru\ hava} = \frac{\alpha_d}{\beta_d} \left. \frac{\partial C^*}{\partial r^*} \right|_{membran} \quad (5.64)$$

olarak elde edilecektir. Bu eşitlik sonlu farklar yöntemine göre yazılıp gerekli matematiksel işlemler yapılırsa eşitlik aşağıdaki şekli alacaktır:

$$C^*(i-1, j, k) - (1 + \omega_1)C^*(i, j, k) + \omega_1 C^*(i+1, j, k) = 0 \quad (5.65)$$

Burada ω_1 değeri, eşitlik (5.66) ile hesaplanmıştır:

$$\omega_1 = \frac{\alpha_d \cdot h_1}{\beta_d \cdot h_2} \quad (5.66)$$

Sistemde membran-nemli hava ara-yüz sınır şartı ise eşitlik (5.67) ile tanımlanmıştır:

$$r^* = \varepsilon \quad D_m \frac{\partial C^*}{\partial r^*} = D_h \frac{\partial C^*}{\partial r^*} \quad (5.67)$$

Burada yine $\alpha_d = D_m/D_h$ eşitliği yerine yazılırsa eşitlik (5.68) elde edilecektir:

$$\alpha_d \left. \frac{\partial C^*}{\partial r^*} \right|_{membran} = \left. \frac{\partial C^*}{\partial r^*} \right|_{nemli\ hava} \quad (5.68)$$

Yukarıdaki eşitlik sonlu farklar yöntemine göre yazılıp, matematiksel işlemler yapıldığında aşağıdaki eşitlik elde edilecektir:

$$\omega_2 C^*(i-1, j, k) - (1 + \omega_2)C^*(i, j, k) + C^*(i+1, j, k) = 0 \quad (5.69)$$

Burada ω_2 değeri aşağıdaki eşitlikle hesaplanmıştır:

$$\omega_2 = \frac{\alpha_d \cdot h_3}{h_2} \quad (5.70)$$

Nemli hava ve kuru hava taraflarının başlangıç konsantrasyonları sırasıyla eşitlik (5.71) ve (5.72) ile hesaplanmıştır:

$$c_h = \frac{\phi_h \cdot P_{sat}}{R \cdot T} \quad (5.71)$$

$$c_s = \frac{\phi_s \cdot P_{sat}}{R \cdot T} \quad (5.72)$$

Yukarıdaki eşitliklerde P_{sat} havanın doyma basıncını (Pa), R evrensel gaz sabitini (J/mol.K) ve T mutlak sıcaklığı (K) temsil etmektedir. Hesaplamalarda T , 298 K olarak belirlenmiştir. Belirlenen sıcaklık değerine göre P_{sat} değeri Antonie denkleminde bulunmuştur [40]:

$$P_{sat} = e^{A - \frac{B}{T+C}} \quad (5.73)$$

Bu denklemde $A = 16,3872$, $B = 3885,7$ ve $C = 230,17$ olup nemli hava için Antonie parametreleridir.

Membranlı silindirik nem alma sisteminde nemli hava-membran ve kuru hava-membran taraflarındaki konsantrasyon ve kütle akısı değerleri hesaplandıktan sonra söz konusu kısımlar için Sherwood sayıları bulunabilecektir. Nemli hava tarafı için Sherwood sayısı aşağıdaki eşitlikle hesaplanmıştır:

$$Sh_h = -\frac{N_{h,r} \cdot d_e}{D_h} \cdot \frac{1}{\bar{c} - c} \quad (5.74)$$

Burada $\bar{c}$, belirlenen yüzeydeki ortalama konsantrasyon (mol/m³) olup eşitlik (5.75) ile tanımlanmıştır.

$$\bar{c} = \frac{1}{A_s} \int_{A_s} c dA_s \quad (5.75)$$

Eşitlik (5.75)'deki A_s integral uygulanan yüzeyin alanı (m^2) olup nemli hava tarafı için aşağıdaki eşitlikle hesaplanacaktır:

$$A_{s,h} = 2\pi(R_3 - R_2)L \quad (5.76)$$

Kuru hava tarafı için ise Sherwood sayısı eşitlik (5.77) ile tanımlanmıştır:

$$Sh_s = -\frac{N_{s,r} \cdot d_s}{D_h} \cdot \frac{1}{\bar{c} - c} \quad (5.77)$$

Burada d_s kuru hava tarafı eş değer çapı (m) olup model daire kesitli silindir olduğundan kuru hava kanalı çapına ($d_s = 2 \cdot R_1$) eşit olacaktır. Kuru hava tarafında ortalama konsantrasyon değeri $\bar{c}$ ise yine eşitlik (5.75) ile hesaplanmış fakat A_s değeri aşağıdaki eşitlikle bulunmuştur:

$$A_{s,s} = 2\pi R_1 L \quad (5.78)$$

COMSOL'da nemli ve kuru hava tarafları Sherwood sayıları hesaplanırken, eşitlik (5.75)'te tanımlanan ortalama yüzey konsantrasyon değerleri yazılımında bulunan "General Projection" komutuyla gerçekleştirilmiştir. Söz konusu komut, seçilen bir çizgide, yüzeyde veya hacimde, belirlenen doğrultularda integral alınabilmesine olanak tanımaktadır.

5.2.2. Sistemde Laminar Akışta Hız Profillerinin Bulunması

Membranlı silindirik nem alma sisteminin performans analizi, kuru hava ve nemli hava taraflarında belirli Reynolds (Re) sayılarına göre yapılmıştır. Bu sebeple sistemde belirlenen bir Re sayısına göre kuru ve nemli hava tabakalarında boylamsal (z) yöndeki hız profillerinin bulunması gerekmektedir. İlk olarak kuru hava tarafı için belirli bir Reynolds (Re) sayısına göre z-yönünde ortalama hız aşağıdaki eşitlikle bulunabilir:

$$V_{ort,s} = \frac{Re_s \cdot \nu}{d_s} \quad (5.79)$$

Burada $V_{ort,s}$ kuru havanın borudaki ortalama hızını (m/s) ve ν havanın kinematik viskozitesini (m^2/s) temsil etmektedir. Akış, dairesel kesitli bir boruda gerçekleştiğinden eş değer çap olarak kuru hava kanalı çapı alınmıştır. Burada belirlenen Re_s sayısına göre $V_{ort,s}$ değeri hesaplandıktan sonra borudaki maksimum hız, laminar akışta, aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilecektir:

$$V_{max,s} = 2 \cdot V_{ort,s} \quad (5.80)$$

Kanalda, herhangi bir r konumundaki hız ise aşağıdaki eşitlik ile hesaplanacaktır:

$$V_{z,s}(r) = V_{max,s} \cdot \left[1 - \left(\frac{r}{R_1} \right)^2 \right] \quad (5.81)$$

Nemli hava tarafında ise belirlenen bir Re sayısına göre ortalama hız aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanacaktır:

$$V_{ort,h} = \frac{Re_h \cdot \nu}{d_e} \quad (5.82)$$

Burada, $V_{ort,h}$ nemli havanın kanaldaki ortalama hızı (m/s), d_e kanalın eş değer çapı (m) olup önceki bölümde, eşitlik (5.9) ile, tanımlanmıştır. Halka şeklindeki kanalın kesit alanı ise eşitlik (5.83) ile hesaplanacaktır:

$$A_h = \pi \cdot d_e^2 \quad (5.83)$$

Kanal içindeki nemli havanın hacimsel debisi (m^3/s) aşağıdaki eşitlikle bulunacaktır:

$$\dot{V}_h = V_{ort,h} \cdot A_h \quad (5.84)$$

Bilindiği gibi laminar akışta kanaldaki maksimum hız eşitlik (5.85)'deki gibi olacaktır:

$$V_{max,h} = \frac{3}{2} \cdot V_{ort,h} \quad (5.85)$$

Kanal içerisinde hız profili ise eşitlik (5.86) ile tanımlanmıştır:

$$V_{z,h}(r) = \frac{2 V_{ort,h}}{M} \left[1 + \left(\frac{r}{R_3} \right)^2 + b \ln(r/R_3) \right] \quad (5.86)$$

Burada M değişkeni aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmıştır.

$$M = \left[1 + \left(\frac{R_2}{R_3} \right)^2 - b \right] \quad (5.87)$$

Yukarıdaki eşitlikteki b ise eşitlik (5.88) ile tanımlanmıştır.

$$b = \frac{\left(\frac{R_2}{R_3} \right)^2 - 1}{\ln(R_2/R_3)} \quad (5.88)$$

Yukarıda verilen kuru hava ve nemli hava tarafları hız profili hesapları, daha ayrıntılı olarak EK-A ve EK-B’de açıklanmıştır.

5.3. Sistem Performansının Hesaplanması

Analizi yapılan membranlı boru-tipi nem alma sisteminde nemli hava tarafının bağıl nemi 0,9, kuru hava tarafının bağıl nemi ise 0,3 olarak belirlenmiştir. Söz konusu bağıl nem değerleri, iki taraf arasında su buharı konsantrasyonu farkı yaratacağından nemli havadan kuru havaya doğru su buharı geçişinin, yani kütle transferinin, olması beklenmektedir. Sistemde nemli hava ve kuru hava hareket halinde olduğundan kütle transferi hem iletimle hem de taşınım (konveksiyon) gerçekleşecektir.

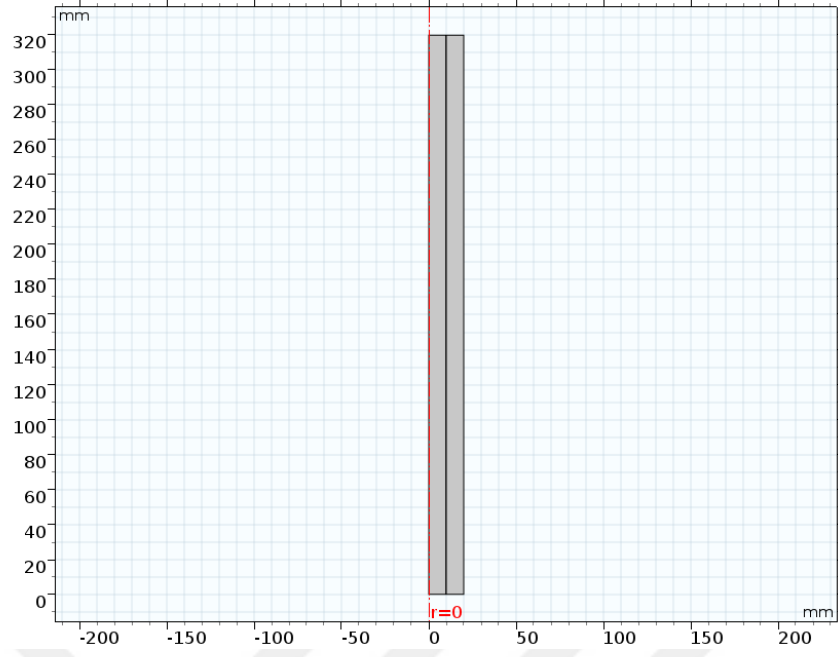
Sistemin, daha önce belirtildiği gibi, öncelikle COMSOL Multiphysics yazılımı kullanılarak analizi yapılmış, daha sonra MATLAB yazılımında sonlu farklar yöntemi yardımıyla elde edilen sonuçların doğrulaması yapılmıştır. Sözü geçen yazılımlarda analizin yapılabilmesi için gereken parametrelerin değerleri çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Analiz parametreleri değerleri

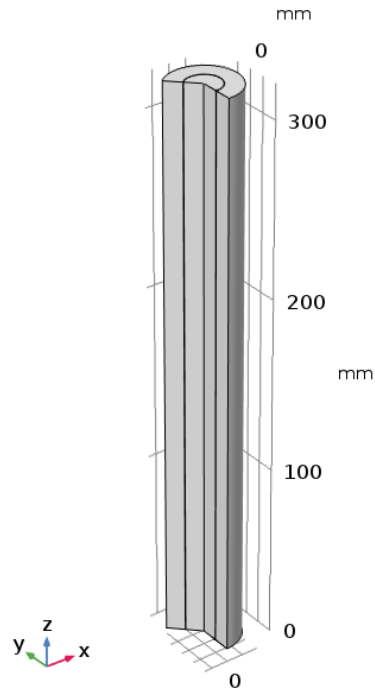
Parametre	Açıklama	Değer
R_1	Membran iç yarıçapı	$R_2-0,25$ (mm)
R_2	Membran dış yarıçapı	10 (mm)
R_3	Nemli hava kanalı yarıçapı	R_2/κ_r (mm)
κ_r	Membran yarıçapının toplam yarıçapa oranı	0,5
L	Silindirik membran uzunluğu	$L/D*D$ (mm)
D_h	Havanın difüzyon katsayısı [41]	$2,5*10^{-5}$ (m ² /s)
D_m	Membranın difüzyon katsayısı [19]	$3*10^{-6}$ (m ² /s)
ν	Havanın kinematik viskozitesi	$17,02*10^{-6}$ (m ² /s)
ϕ_h	Nemli hava bağıl nemi	0,9
ϕ_s	Kuru hava bağıl nemi	0,3
L/D	Membran uzunluk-çap oranı	4-128
Re_h	Nemli hava Reynolds sayısı	250-2000
Re_s	Kuru hava Reynolds sayısı	250-2000
$c_{0,m}$	Membranda su buharı başlangıç konsantrasyonu	0 (mol/m ³)

Sistemde analiz yapılırken membranın iç yarıçapı, nemli hava kanalı yarıçapı ve silindirik membran uzunluğu membranın yarıçapına bağlı olarak sırasıyla membran kalınlığına, κ_r değişkenine ve L/D oranına göre belirlenmiştir. Buna ek olarak hesaplamalarda L/D oranı 4 ile 128 arasında, nemli hava ve kuru hava tarafı Reynolds sayıları, ikisi aynı olacak şekilde, 250 ile 2000 arasında değiştirilmiştir. Membranın başlangıçta su buharı konsantrasyonunun 0 mol/m³ olduğu kabul edilmiştir.

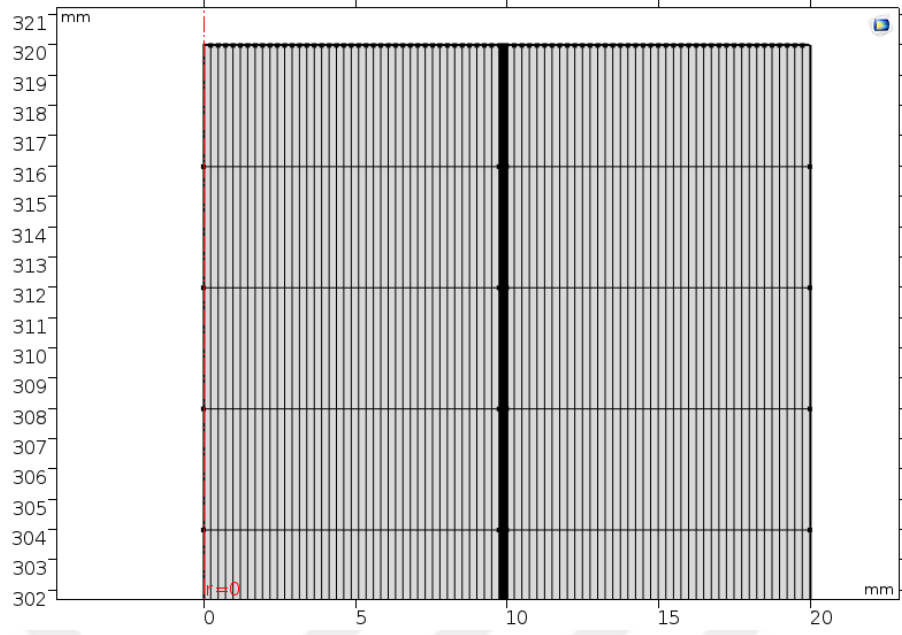
COMSOL yazılımında analiz yapılırken, “Transport of Diluted Species” modülü kullanılarak, yukarıdaki parametrelere göre, sistem öncelikle 2-boyutlu olacak şekilde oluşturulmuş, daha sonra eksenel-simetri (2-D Axisymmetric) modülü ile $r = 0$ eksenini etrafında döndürülmüştür. COMSOL yazılımında $L/D = 16$ olacak şekilde oluşturulan 2-boyutlu geometri ve döndürme işleminden sonra oluşan 3-boyutlu model sırasıyla Şekil 5.4 ve Şekil 5.5’te gösterilmiştir.



Şekil 5.4. COMSOL yazılımında oluşturulan 2-boyutlu model ($L/D = 16$)



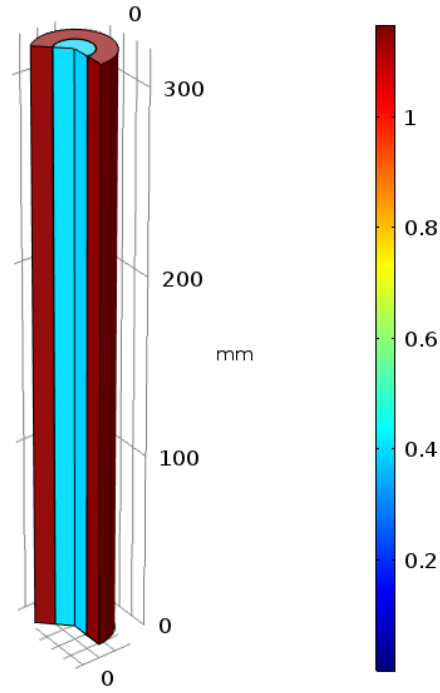
Şekil 5.5. 2-boyutlu geometrinin $r = 0$ eksenı etrafında döndürölmesiyle oluşan 3-boyutlu model ($L/D = 16$)



Şekil 5.6. Hesaplamalar için COMSOL yazılımında oluşturulan ağ (mesh) modeli

Sistemde COMSOL yazılımında hesaplama yapılabilmesi için oluşturulan ağ (mesh) modeli ise Şekil 5.6’da gösterilmiştir. Ağ modeli hazırlanırken sistem geometrisi z-yönünde 40 eşit parçaya bölünmüştür. r-yönünde ise nemli ve kuru hava tarafları 40 parçaya, membran tarafı ise 20 eşit parçaya bölünmüştür. MATLAB’ta da sonlu farklar yöntemiyle hesaplama yapılırken nemli hava, membran ve kuru hava tarafları, COMSOL yazılımıyla uyumlu olması açısından, aynı sayıda bölmeye ayrılmıştır. Daha doğru sonuç elde edebilmek için COMSOL ve MATLAB yazılımlarında zaman aralığı 0,1 saniye olacak şekilde 10 saniyelik bir süre için sistemin çözümlemesi yapılmıştır.

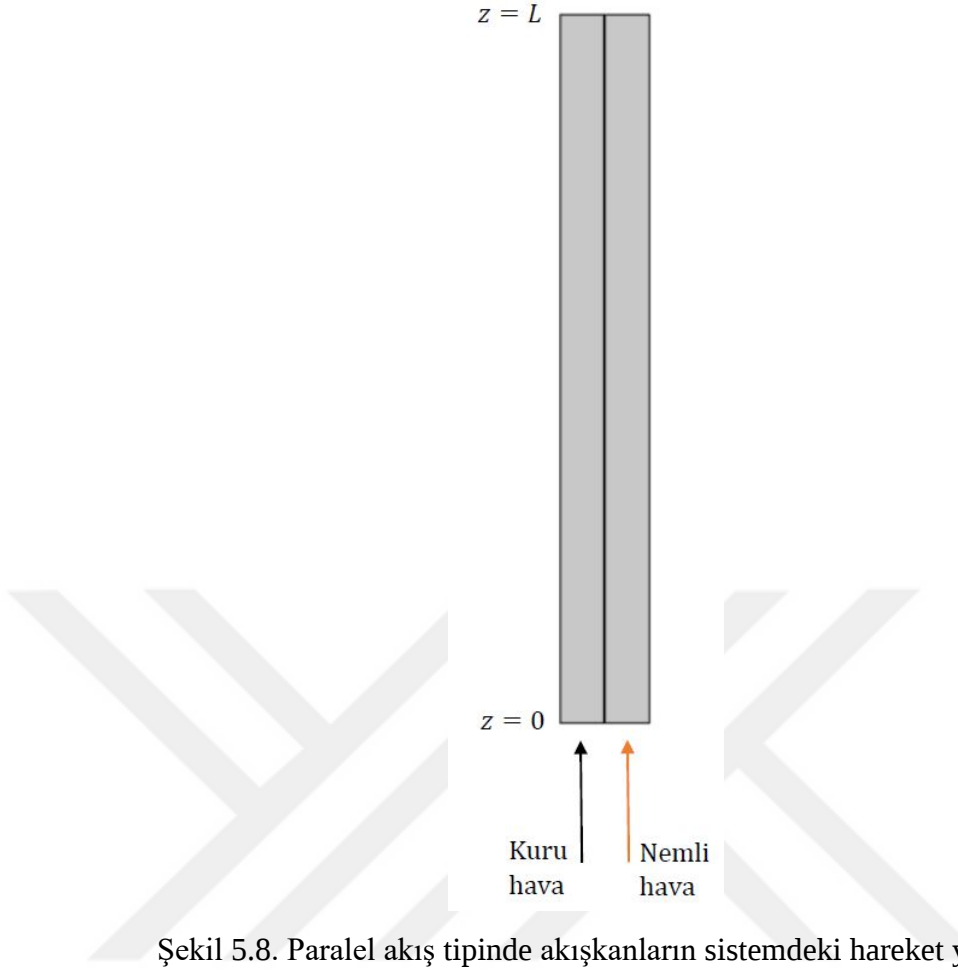
Önceki bölümde bahsedilen, eşitlik (5.71) ve eşitlik (5.72)’ye göre, çizelge 5.1’deki bağıl nem değerleri için, nemli hava tarafının başlangıç ($t = 0$) su buharı konsantrasyon değeri $1,1540 \text{ mol/m}^3$, kuru hava tarafının başlangıç konsantrasyon değeri ise $0,385 \text{ mol/m}^3$ olarak hesaplanmıştır. $t = 0$ anında sistemdeki konsantrasyon değerlerinin COMSOL yazılımındaki görüntüsü Şekil 5.7’de verilmiştir.



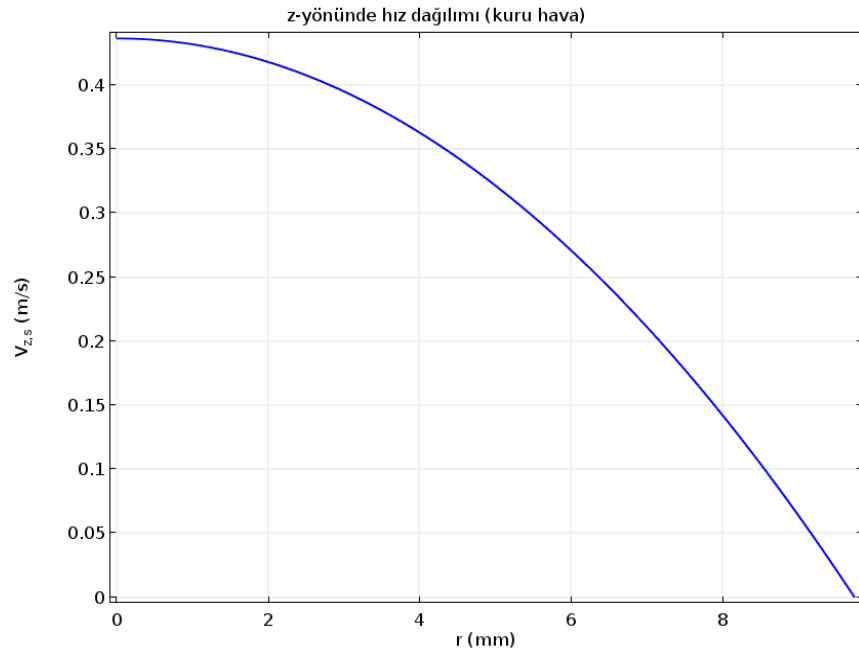
Şekil 5.7. $t = 0$ anında sistemdeki konsantrasyon değerleri (COMSOL)

5.3.1. Paralel Akış

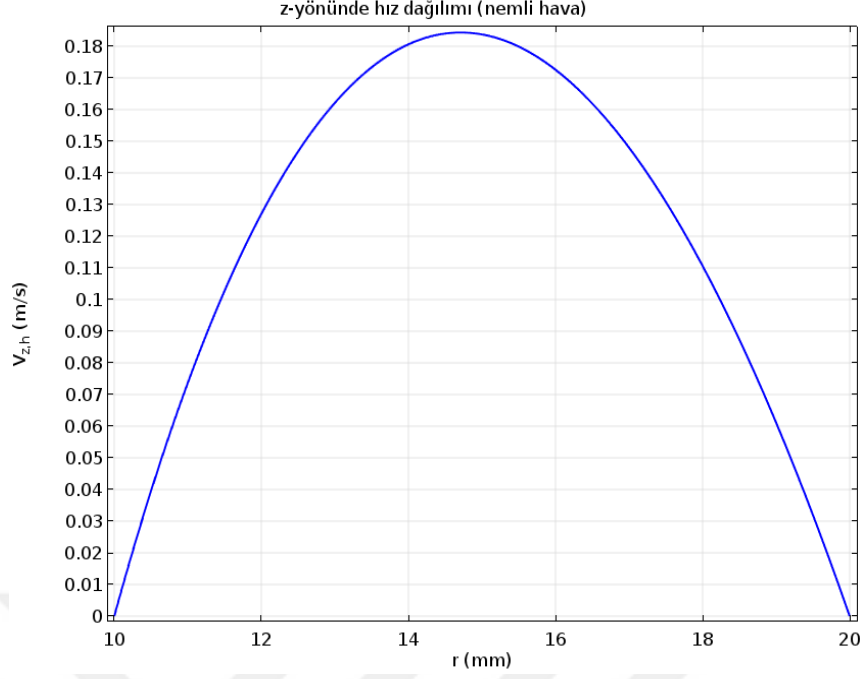
Sistemde paralel akış tipinde hem nemli hava ve hem de kuru hava pozitif z -yönünde hareket etmektedir. Buna göre COMSOL yazılımında, $z = 0$ ekseninde her iki taraf için akış girişi (Inflow) tanımlanmış, $z = L$ 'de ise akış çıkışı (Outflow) tanımlanmıştır (Şekil 5.8). Sistem yalıtılmış olarak kabul edildiğinden $r = R_3$ eksenü üzerinde (eksenel-simetriden dolayı $r = -R_3$ 'de de) kütle akısı sıfır (no flux) olacaktır. Paralel akışta $Re = 250$ için kuru hava ve nemli hava tarafları z -yönünde hız dağılımları sırasıyla Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'daki gibi elde edilmiştir.



Şekil 5.8. Paralel akış tipinde akışkanların sistemdeki hareket yönü

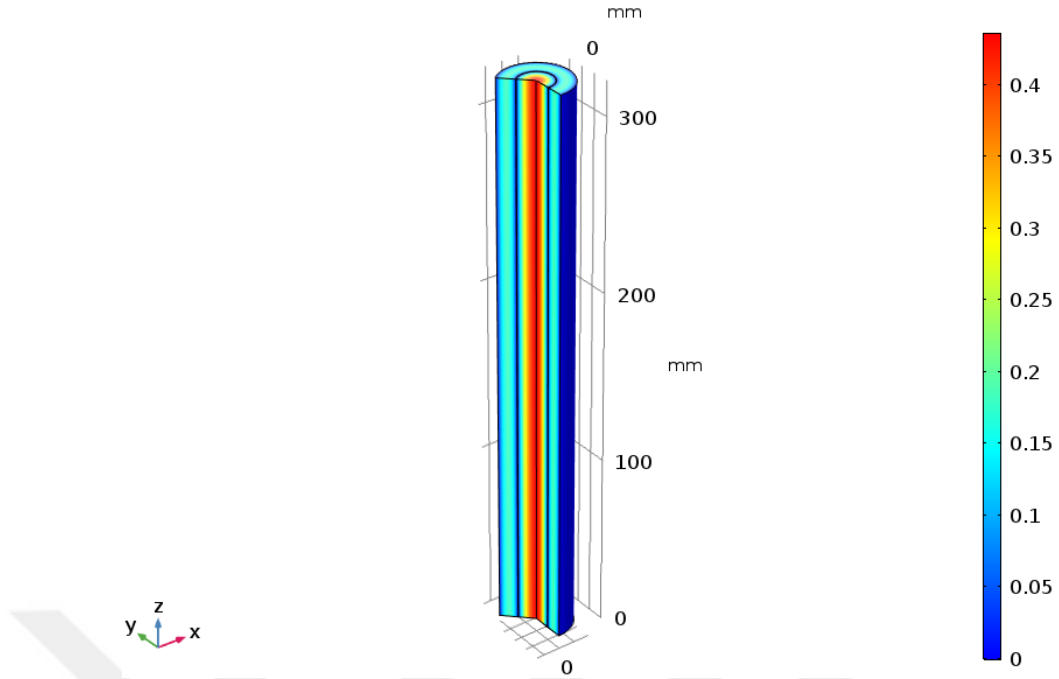


Şekil 5.9. Paralel akışta kuru hava tarafı z -yönündeki hız dağılımı ($Re = 250$)



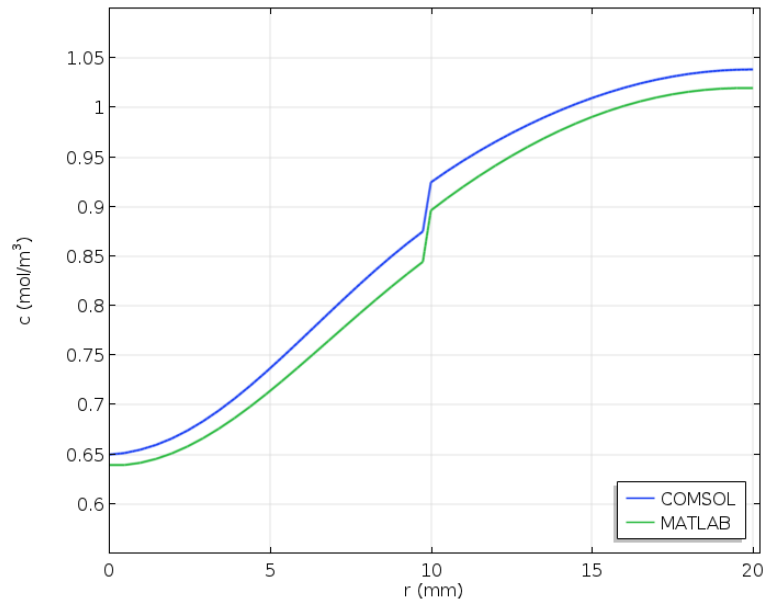
Şekil 5.10. Paralel akışta nemli hava tarafı z-yönündeki hız dağılımı ($Re = 250$)

Şekil 5.9'a bakıldığında, kuru hava tarafı hız profili eşitlik (5.76) ile tanımlandığından, $r = 0$ için hız maksimum değerine ulaşırken, $r = R_1$ 'de kaymama şartından ötürü hız değeri 0 olacaktır. Sistem 3-boyutlu olarak düşünüldüğünde kaymama şartından ötürü $r = -R_1$ koordinatında yine hız değeri sıfır olacaktır. Nemli hava tarafı için eşitlik (5.81) hatırlanırsa, $r = R_2$ ve $r = R_3$ koordinatlarında katı yüzeylerdeki kaymama şartından ötürü hız değeri 0 olacaktır (Şekil 5.10). Yine sistem 3-boyutlu olarak düşünülürse, $r = -R_2$ ve $r = -R_3$ koordinatlarında da hız değerinin sıfır olduğu görülebilecektir. Hız, nemli hava kanalının orta noktasına yakın bir konumda maksimum değerine ulaşmaktadır. Membran tarafında ise hava durgun halde olduğundan hız değeri daima sıfır olacaktır. Sistemdeki hız dağılımı Şekil 5.11'de 3-boyutlu model üzerinde daha net görülebilmektedir:



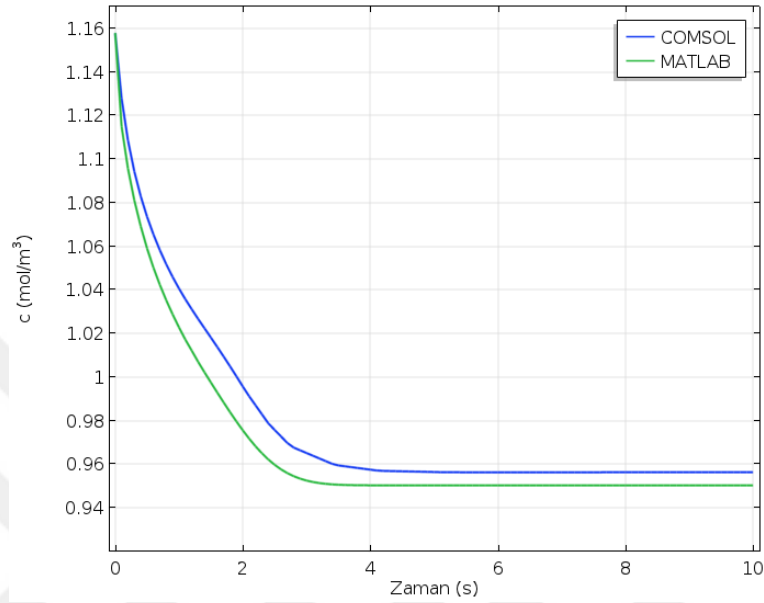
Şekil 5.11. Paralel akışta sistemde z-yönündeki hız dağılımının 3-boyutlu modelde gösterimi ($Re = 250$)

Sistemde, $t = 2$ anında $Re = 250$ ve $L/D = 16$ için, COMSOL ve MATLAB yazılımlarında elde edilen çıkış ($z = L$) konsantrasyonu değerleri Şekil 5.12’de gösterilmiştir.



Şekil 5.12. Paralel akışta COMSOL ve MATLAB yazılımlarında çıkış konsantrasyonunun r-koordinatı ile değişimi ($Re = 250, L/D = 16$)

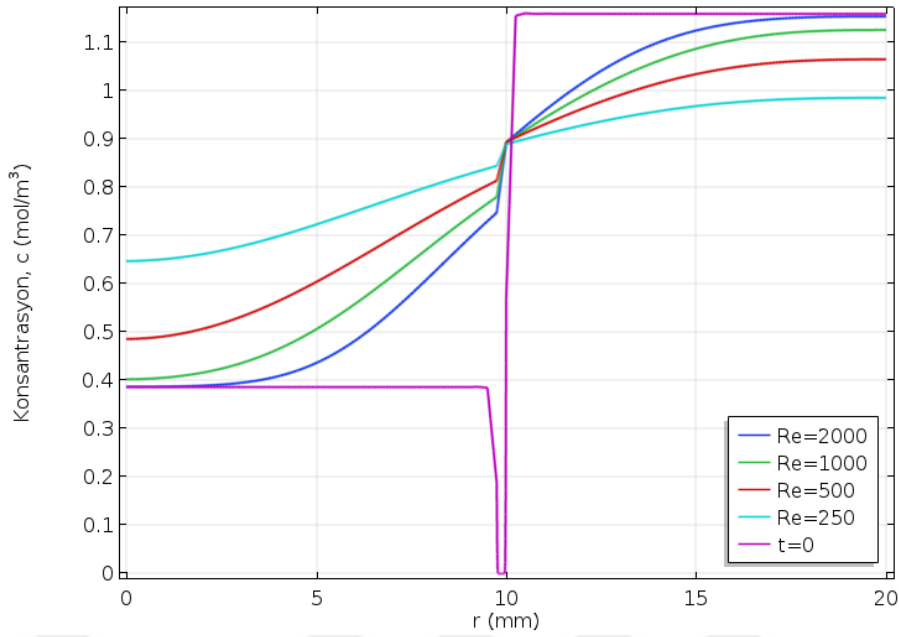
Şekil 5.12’de de görülebileceği gibi, her iki yazılımda $t = 2$ anında, çıkış konsantrasyonu için, birbirine oldukça yakın değerler (Bağıl hata < %2) elde edilmiştir. COMSOL ve MATLAB yazılımları, Şekil 5.13’te hava tarafı ortalama çıkış konsantrasyonunun zamanla değişimi için de karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.13. Paralel akışta COMSOL ve MATLAB yazılımlarında hava tarafı çıkış konsantrasyonunun zamanla değişimi ($Re = 250, L/D = 16$)

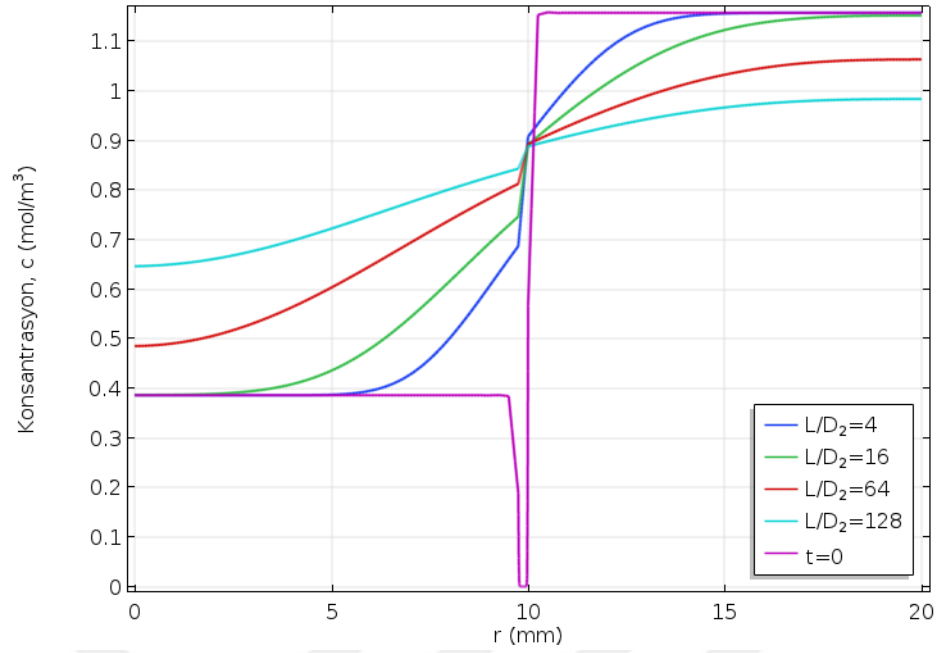
Şekil 5.12 ve Şekil 5.13’te, her iki yöntemle elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında birbiriyle gayet uyumlu oldukları görülebilmektedir. Buradan, COMSOL yazılımıyla elde edilen sonuçların güvenilir olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sebeple sistemin paralel akışta bundan sonraki aşamalarındaki analizleri COMSOL yazılımında gerçekleştirilmiştir.

Sistemde belirlenen Re sayılarında, $L/D = 16$ için, çıkış konsantrasyonunun r -koordinatı ile değişimi Şekil 5.14’te gösterilmiştir.



Şekil 5.14. Paralel akışta çıkış konsantrasyonunun Re sayısı ile değişimi ($L/D = 16$)

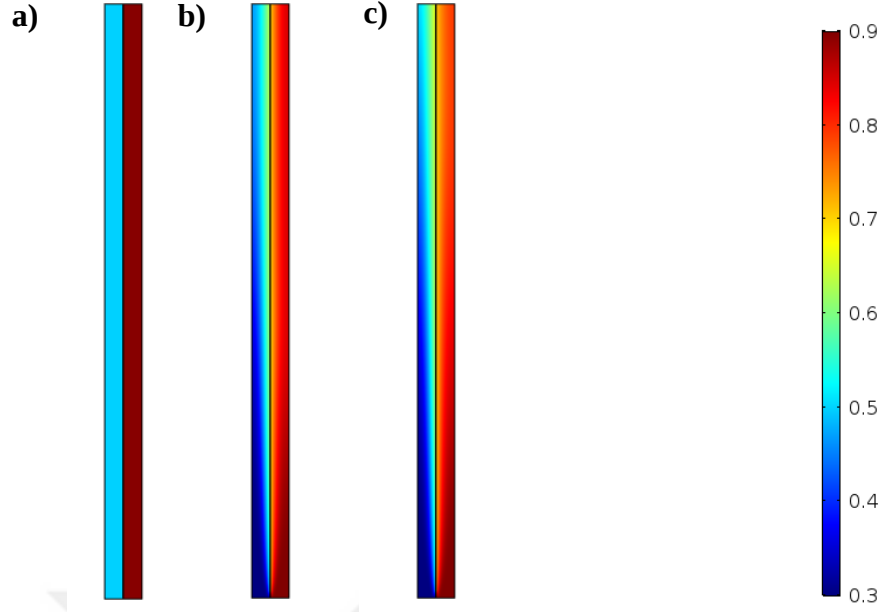
Yukarıdaki şekilde görülebileceği gibi, belirlenen membran en-boy oranında, Re sayısının artmasıyla nemli havadan kuru havaya geçen su buharı miktarı azalmaktadır. Hatta başlangıç anıyla ($t = 0$) karşılaştırıldığında, $Re = 2000$ 'de nemli havadan kuru havaya neredeyse hiç su buharı geçişi olmamıştır. Bu durum, Reynold sayısının artmasıyla kuru hava ve nemli hava hızlarının artmasından ve bu sebeple akışkanların birbiriyle yeterince etkileşim yüzeyine ve süresine sahip olamamalarından kaynaklanmaktadır. Yüksek Re sayılarında, L/D oranı yüksek membran kullanılmasıyla bu durumun önüne geçilebilecektir. Şekil 5.15'te $Re = 2000$ için çıkış konsantrasyonunun membranın L/D oranıyla değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.15. Paralel akışta çıkış konsantrasyonunun L/D ile değişimi ($Re = 2000$)

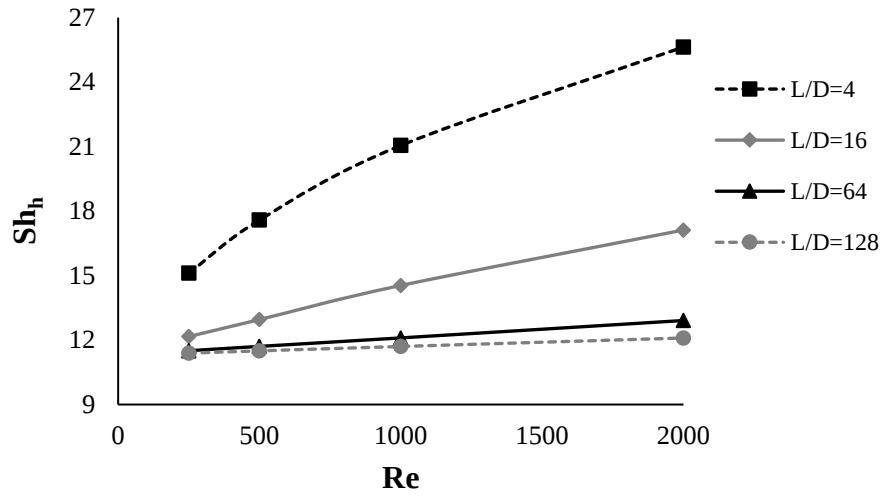
Şekil 5.15'te, bir önceki paragrafta da bahsedildiği gibi, L/D oranının artmasıyla, nemli hava-kuru hava etkileşim yüzeyinin ve süresinin artmasından dolayı nemli havadan kuru havaya geçen su buharı miktarı artmaktadır. Küçük L/D oranlarında, su buharı geçişi çok az miktarda olup, büyük oranda kuru hava-membran ve nemli hava-membran arayüzlerine yakın kısımlarda gerçekleşmektedir.

Sistemde paralel akışta, $Re = 250$ ve $L/D = 16$ için, $t = 0$, $t = 1$ ve $t = 2$ anlarındaki bağıl nem değerleri 2-boyutlu yüzey üzerinde Şekil 5.16'da gösterilmiştir. Şekilde de görülebileceği gibi nemli hava tarafının bağıl nem değeri nem alma işleminden dolayı zamanla azalırken, kuru hava tarafı bağıl nem değeri ise artmaktadır.



Şekil 5.16. Paralel akışta bağıl nem değerleri değişiminin 2-boyutlu yüzey üzerinde gösterimi a) $t = 0$, b) $t = 1$ ve c) $t = 2$

Paralel akışta nemli hava tarafı Sherwood sayılarının belirlenen L/D değerlerinde Re sayısı ile değişimi Şekil 5.17’de gösterilmiştir.



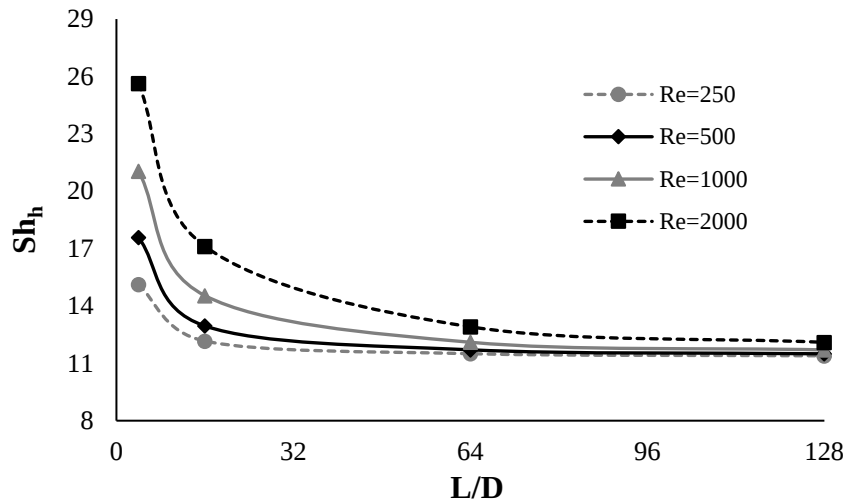
Şekil 5.17. Paralel akışta nemli hava tarafı ortalama Sh sayısının Re sayısı ile değişimi

Şekil 5.17’den anlaşılabileceği gibi nemli hava tarafı için ortalama Sh sayıları, tüm L/D değerlerinde, Re sayısı ile artmaktadır. Düşük L/D değerlerinde, konsantrasyon

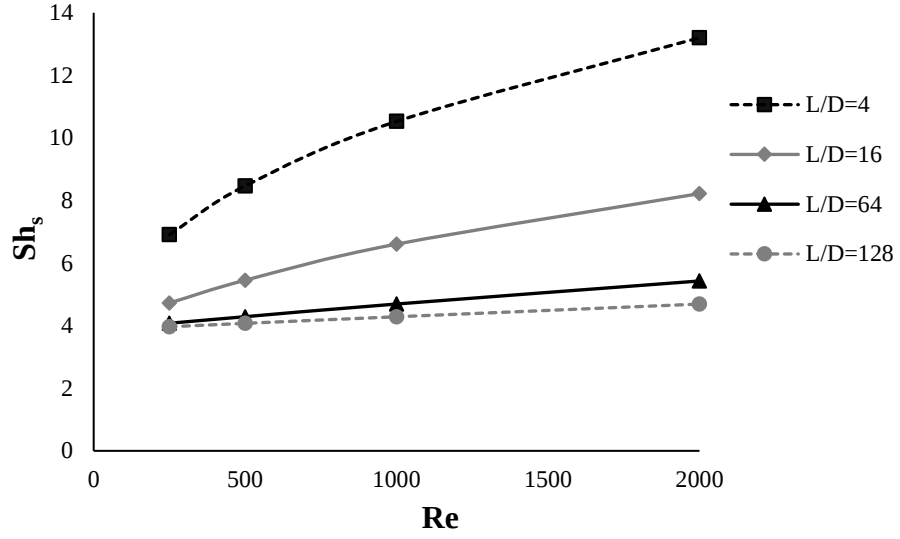
gradyanının yüksek olmasından dolayı (geçen su buharı miktarı düşük), Sh sayıları daha yüksek olarak elde edilmiştir. Paralel akışta, nemli hava tarafı için en yüksek Sh değeri $L/D = 4$ olduğu durumda, $Re = 2000$ için yaklaşık 26 olarak hesaplanmıştır.

Sistemde nemli hava tarafı ortalama Sh sayılarının belirlenen Re sayılarında L/D oranıyla değişimi ise Şekil 5.18’de gösterilmiştir. Nemli hava tarafı ortalama Sh sayılarının, belirlenen tüm Re sayılarında, L/D oranıyla azalarak yaklaşık 11 değerinde sabit bir değere ulaştığı görülmektedir.

Şekil 5.19’da ise kuru hava tarafı ortalama Sh sayılarının Re sayısı ile değişimi verilmiştir. Kuru hava tarafında da, nemli hava tarafında olduğu gibi, ortalama Sh sayıları Re sayısı ile artmaktadır. En yüksek Sh değeri yaklaşık 13,5 olarak $L/D = 4$ ve $Re = 2000$ ’de elde edilmiştir.

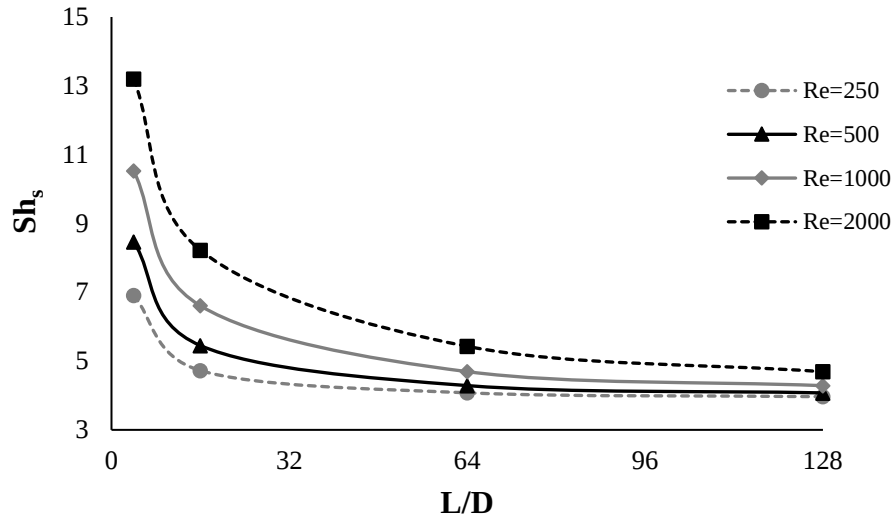


Şekil 5.18. Paralel akışta nemli hava tarafı ortalama Sh sayısının L/D oranı ile değişimi



Şekil 5.19. Paralel akışta kuru hava tarafı ortalama Sh sayısının Re sayısı ile değişimi

Kuru hava tarafında ortalama Sh sayılarının L/D oranıyla değişimi Şekil 5.20'de gösterilmiştir. Burada da yine nemli hava tarafına benzer şekilde ortalama Sh sayısı L/D oranı arttıkça azalmış ve tüm Re sayılarında yaklaşık 3,9 değerine yakınsamıştır.



Şekil 5.20. Paralel akışta kuru hava tarafı ortalama Sh sayısının L/D oranı ile değişimi

Sistemde nemli hava tarafı ve kuru hava tarafında, yukarıdaki grafiklerden de yararlanılarak ortalama Sh sayıları için Re sayısına ve L/D oranına bağlı eşitlikler elde

edilmiştir. Bu eşitlikler elde edilirken, Yılmaz [42] tarafından önerilen yöntemden de faydalanılarak, öncelikle nemli hava tarafı için ortalama Sh sayısı Sh_h olarak aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$Sh_h = Sh_{h,\infty} \left[1 + \frac{1}{\sigma_a^3} \right]^{1/3} \quad (5.89)$$

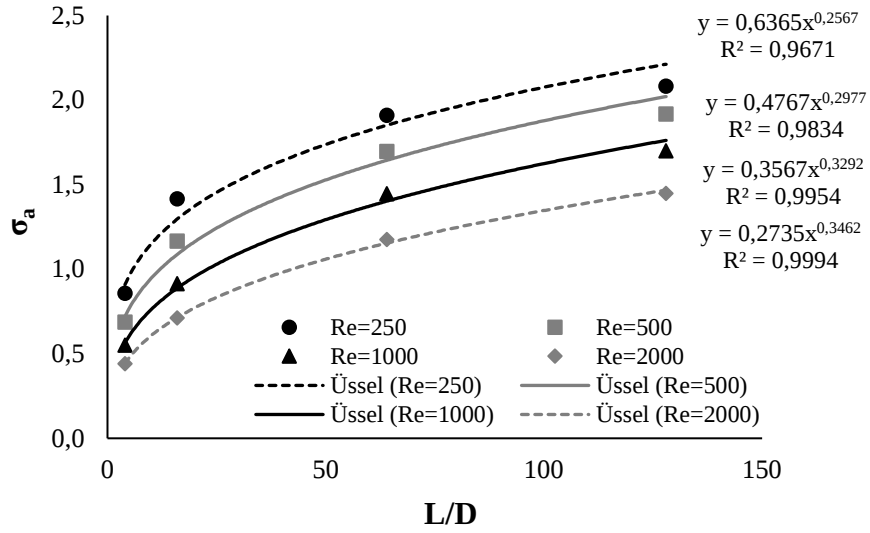
Burada Şekil 5.18 ve Şekil 5.20 incelendiğinde ortalama Sh sayılarının nemli ve kuru hava tarafı için L/D oranı sonsuza giderken sırasıyla 11 ve 3,9 değerine yakınsadıkları görülmektedir. Bu sebeple nemli hava tarafı için kullanılan $Sh_{h,\infty}$ 'nin değeri 11 olacaktır. Eşitlik (5.89)'daki σ_a ise Re sayısının ve L/D oranının bir fonksiyonu olup aşağıdaki gibi ifade edilmiştir:

$$\sigma_a = f(Re) \cdot \left(\frac{L}{D} \right)^m \quad (5.90)$$

Eşitlik (5.89)'da gerekli matematiksel işlemler yapıp σ_a değişkeni yalnız bırakılırsa, söz konusu değişken aşağıdaki eşitlikteki gibi de elde edilebilir:

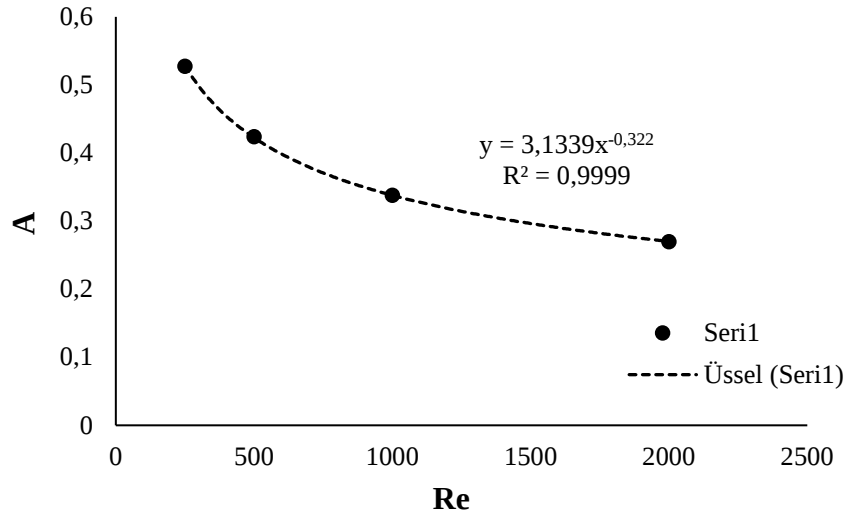
$$\sigma_a = \left[\frac{1}{\frac{Sh_h^3}{Sh_{h,\infty}^3} - 1} \right]^{1/3} \quad (5.91)$$

Burada, eşitlik (5.91) kullanılarak farklı Re sayısında ve L/D oranlarında σ_a değerleri hesaplanmıştır. Bir sonraki adımda, Şekil 5.21'de, σ_a değerlerinin belirlenen Re sayılarında L/D oranıyla değişim grafiği çizilmiştir.



Şekil 5.21. σ_a değerlerinin belirlenen Re sayılarında L/D oranıyla değişimi

Yukarıdaki şekilde grafiğe eklenen eğilim çizgilerinin denklemlerinde “ Ax^n ” şeklindeki ifadelerin “ n ” ile temsil edilen üslerinin aritmetik ortalaması eşitlik (5.90)’daki “ m ” değerine eşit olacak, yani $m = 0,307$ olacaktır. Eşitlik (5.90)’daki $f(Re)$ kısmı, eğilim çizgisi denklemlerindeki A katsayılarının Re sayısı ile değişiminden bulunacaktır. Söz konusu değişim aşağıdaki grafikte gösterilmiştir:



Şekil 5.22. A değerlerinin Re sayısı ile değişimi

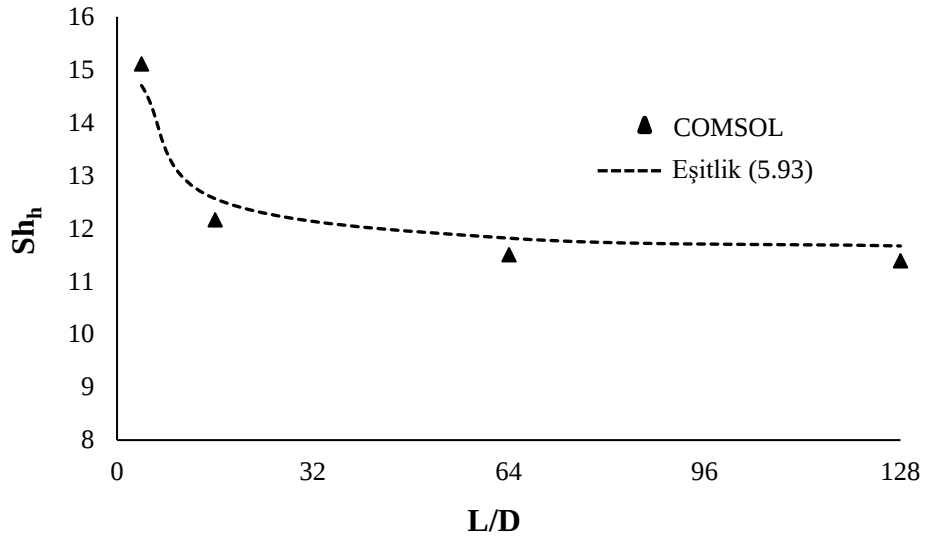
Şekil 5.22'deki grafiğin eğilim çizgisine bakıldığında $A = 3,1339Re^{-0,322}$ olduğu görülebilmektedir. Bulunan bu değerler eşitlik (5.90)'da yerine yazılırsa σ_a değeri aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilecektir:

$$\sigma_a = 3,1339Re^{-0,322} \left(\frac{L}{D} \right)^{0,307} \quad (5.92)$$

Eşitlik (5.92) ile elde edilen σ_a değişkeni eşitlik (5.89)'da yerine yazılır ve gerekli matematiksel işlemler yapılırsa, hava tarafı ortalama Sh sayıları için elde edilen denklem aşağıdaki gibi olacaktır.

$$Sh_h = Sh_{h,\infty} \left[1 + \frac{Re^{1,221}}{216,93 \left(\frac{L}{D} \right)^{0,921}} \right]^{1/3} \quad (5.93)$$

Eşitlik (5.93) ile hesaplanarak elde edilen Sh_h değerleri, COMSOL yazılımında elde edilen Sh sayıları ile Şekil 5.23'te, $Re = 250$ için, karşılaştırılmıştır:



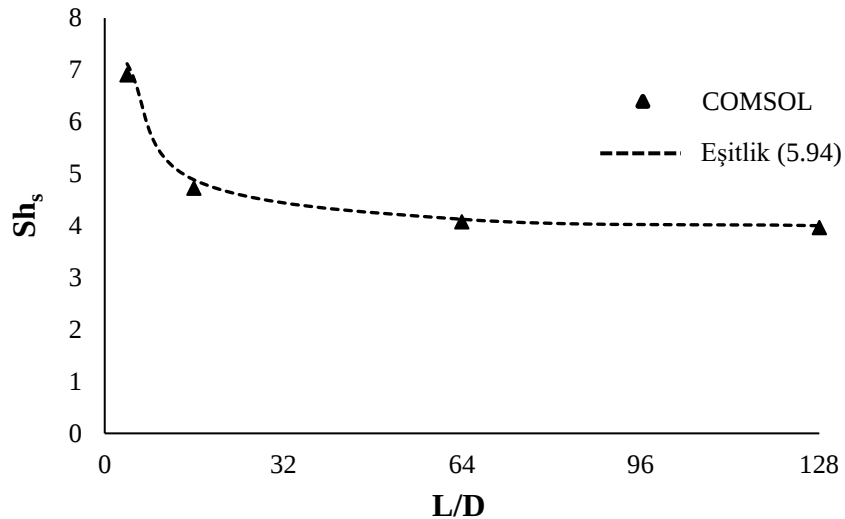
Şekil 5.23. Paralel akışta nemli hava tarafı için eşitlik (5.93) ile elde edilen ortalama Sh sayılarının COMSOL yazılımıyla karşılaştırılması ($Re = 250$)

Şekil 5.23'te de görülebileceği gibi Eşitlik (5.93) ile hesaplanan ortalama Sh değerleri COMSOL yazılımı ile hesaplanan ortalama Sh değerlerine oldukça yakın olup hesaplanan bağıl hata değeri tüm değerlerde yaklaşık %3'tür. Buna göre elde edilen eşitliğin güvenilir olduğu sonucuna varılmıştır.

Yukarıda sözü geçen yöntem kuru hava tarafı için de uygulanıp, gerekli matematiksel işlemler yapılırsa, kuru hava tarafı ortalama Sh sayısı için aşağıdaki eşitlik elde edilecektir:

$$Sh_s = Sh_{s,\infty} \left[1 + \frac{Re^{0,93}}{6,33 \left(\frac{L}{D} \right)^{1,2}} \right]^{1/3} \quad (5.94)$$

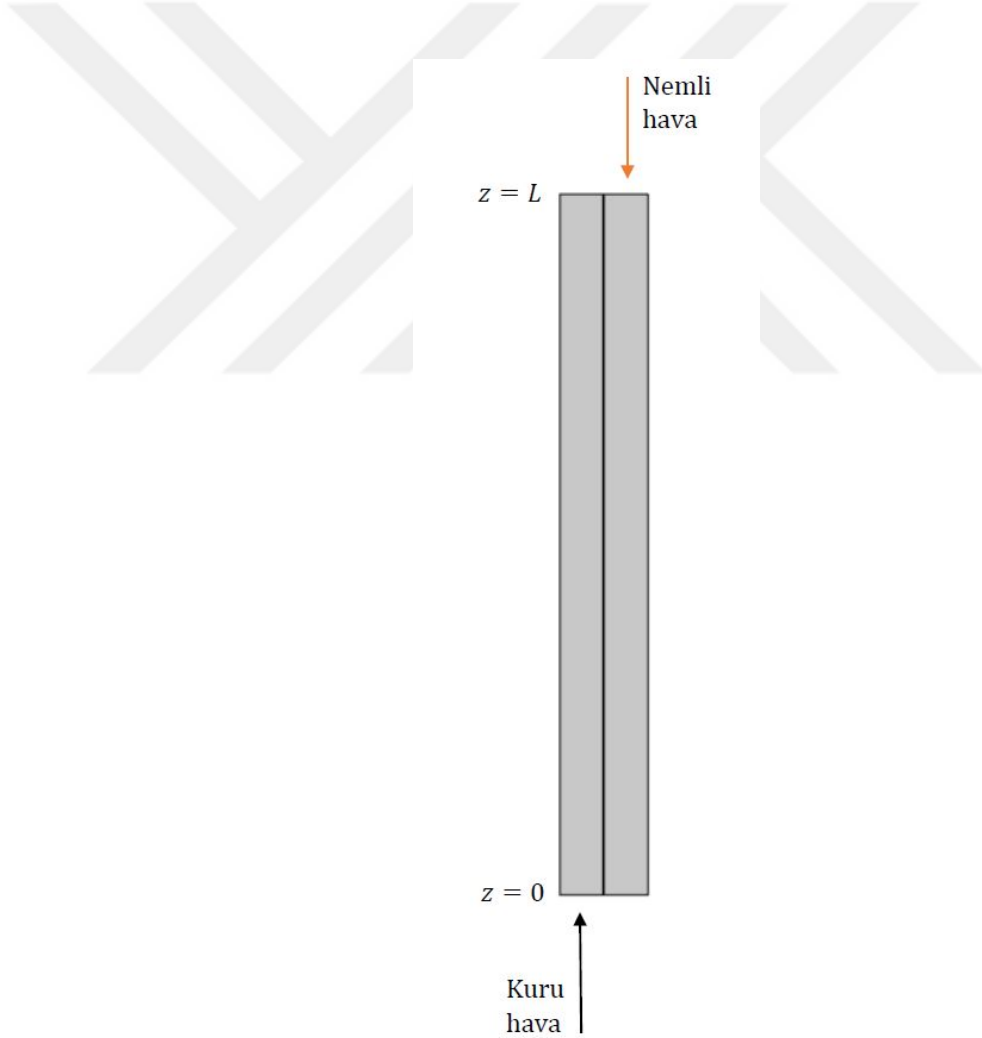
Eşitlik (5.94)'te $Sh_{s,\infty}$ değeri 3,9 olacaktır. Kuru hava tarafı için eşitlik (5.94) ile bulunan ortalama Sh değerleri COMSOL yazılımında elde edilen ortalama Sh değerleri ile, $Re = 250$ için Şekil 5.24'te karşılaştırılmıştır. Grafikte de görülebileceği gibi iki yöntemle elde edilen sonuçlar birbirine oldukça yakın olup bağıl hata değeri tüm sonuçlarda %3'ün altındadır.



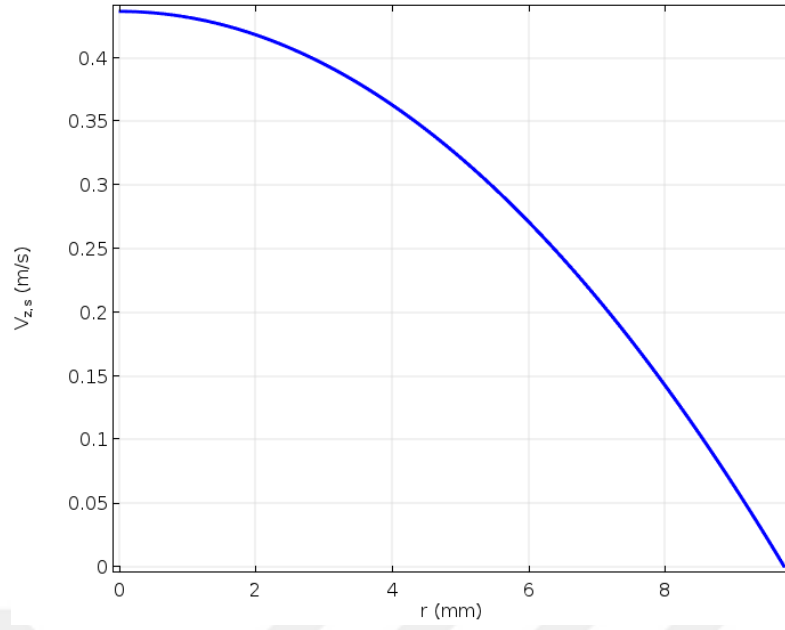
Şekil 5.24. Paralel akışta kuru hava tarafı için eşitlik (5.94) ile elde edilen ortalama Sh sayılarının COMSOL yazılımıyla karşılaştırılması ($Re = 250$)

5.3.2. Karşıt Akış

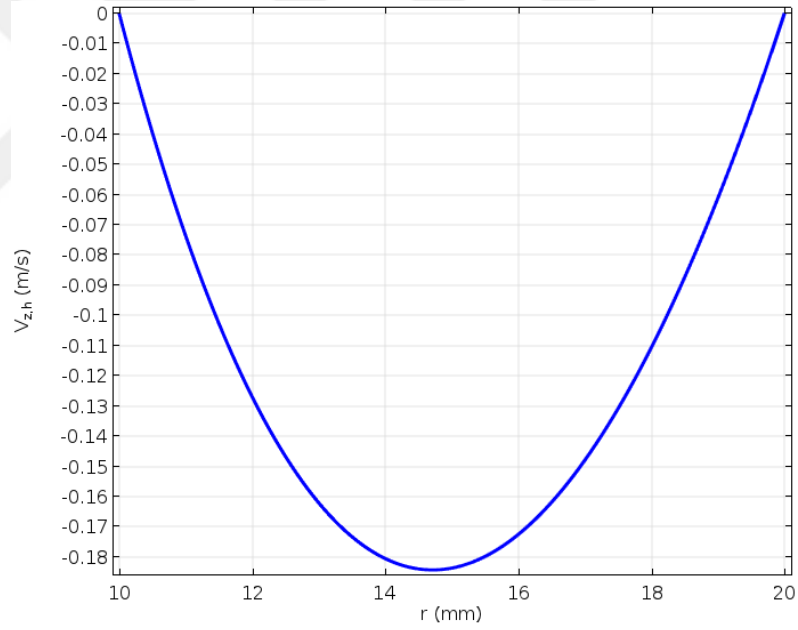
Membranlı silindirik nem alma sisteminde karşıt akış tipinde, kuru hava pozitif z -yönünde hareket ederken nemli hava negatif z -yönünde hareket etmektedir. Bu sebeple COMSOL yazılımında analiz yapılırken kuru hava tarafında $z = 0$ ekseninde akış girişi (Inflow) ve $z = L$ ekseninde akış çıkışı (Outflow) tanımlanırken, nemli hava tarafında $z = L$ ekseninde akış girişi ve $z = 0$ ekseninde akış çıkışı tanımlanmıştır (Şekil 5.25). Modelde sadece nemli havanın akış yönü değiştirildiği için diğer tanımlamalar paralel akış ile aynı olacak şekilde analiz yapılmıştır. Kuru hava ve nemli hava taraflarında hız dağılımları, $Re = 250$, için sırasıyla Şekil 5.26 ve Şekil 5.27’de gösterilmiştir.



Şekil 5.25. Karşıt akış tipinde akışkanların sistemdeki hareket yönü

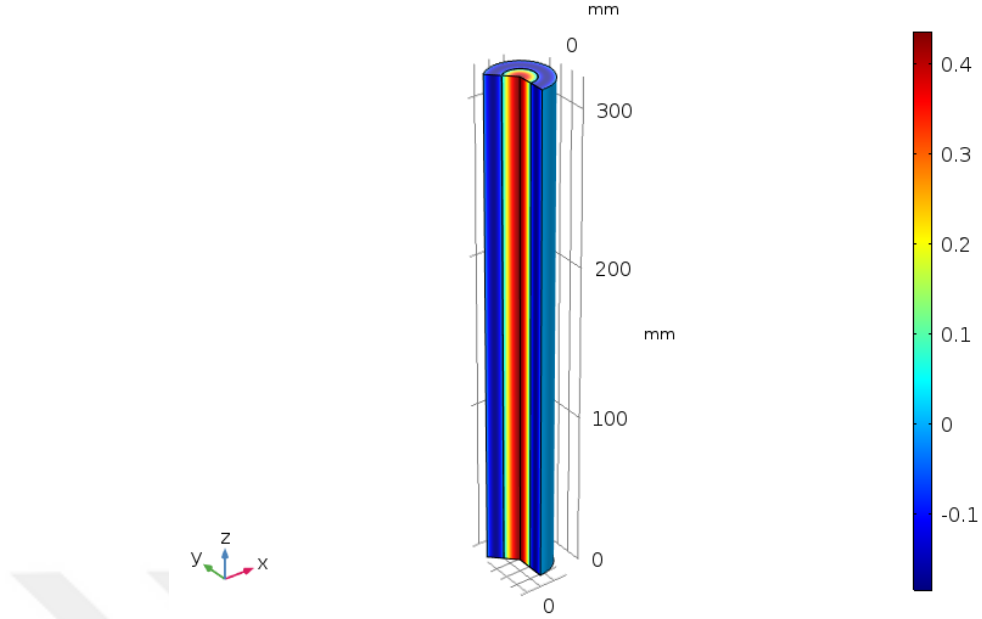


Şekil 5.26. Karşıt akışta kuru hava tarafı z-yönünde hız dağılımı ($Re = 250$)



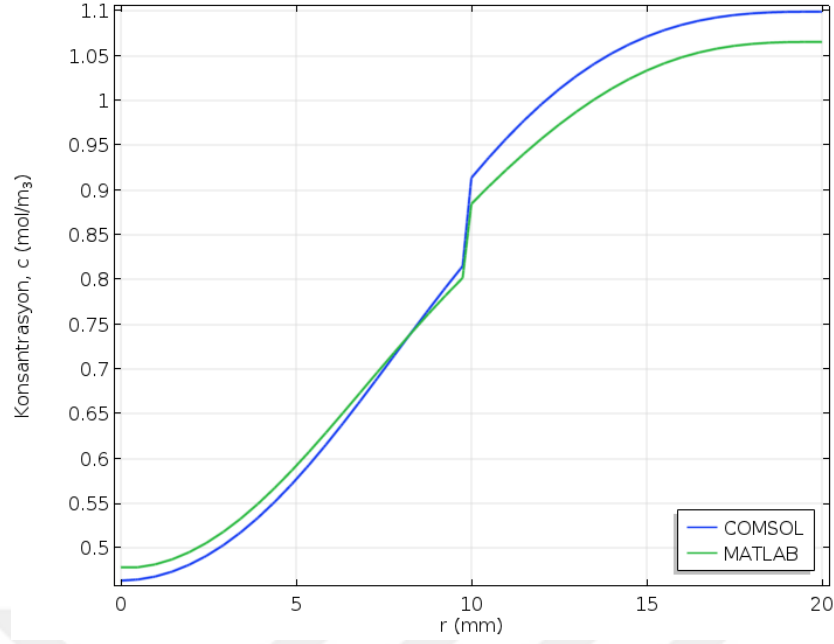
Şekil 5.27. Karşıt akışta nemli hava tarafı z-yönünde hız dağılımı ($Re = 250$)

Karşıt akışta, kuru hava tarafı için z-yönündeki hız dağılımında paralel akışa göre, beklenildiği gibi, herhangi bir farklılık yoktur (Şekil 5.26). Fakat nemli hava tarafında hava negatif z-yönünde hareket ettiğinden hız değerleri negatif olmuştur (Şekil 5.27). Hızın maksimum ve 0 olduğu koordinatlar ise değişmemiştir. Karşıt akışta sistemde z-yönünde hız dağılımı 3-boyutlu model üzerinde Şekil 5.28'de gösterilmiştir.



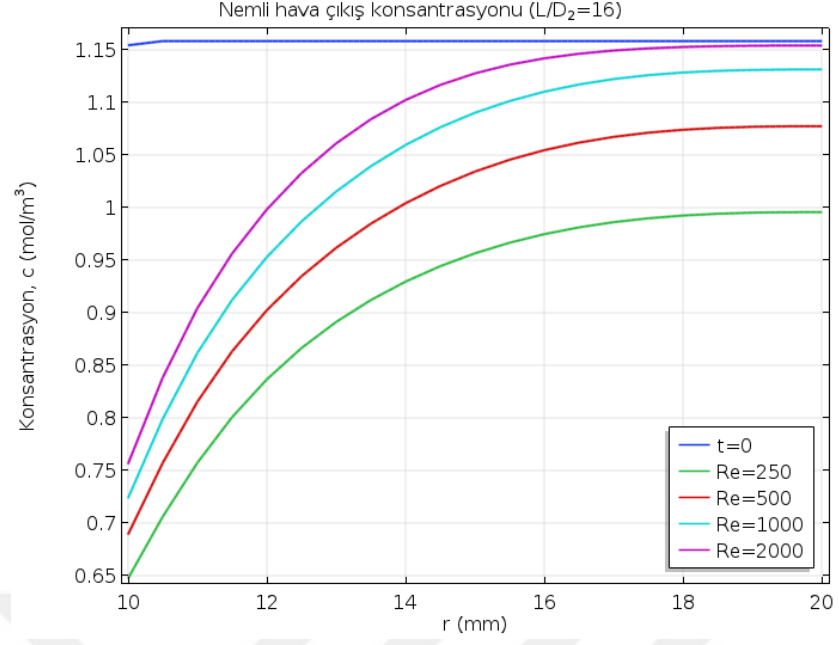
Şekil 5.28. Karşıt akışta sistemde z-yönündeki hız dağılımının 3-boyutlu modelde gösterimi ($Re = 250$)

Karşıt akışta $t = 10$ için, COMSOL yazılımında elde edilen konsantrasyon değerleri, MATLAB yazılımında sonlu farklar yöntemiyle elde edilen konsantrasyon değerleri ile Şekil 5.29’da karşılaştırılmıştır. Burada, nemli havanın ve kuru havanın çıkış düzlemleri farklı olduğundan modelin z-yönünde tam orta noktasındaki ($z = L/2$) konsantrasyon değerleri dikkate alınmıştır. Her iki yöntemle elde edilen konsantrasyon değerleri birbirine kabul edilebilir derecede yakın olup bağıl hata değeri en yüksek %5 olarak hesaplanmıştır.

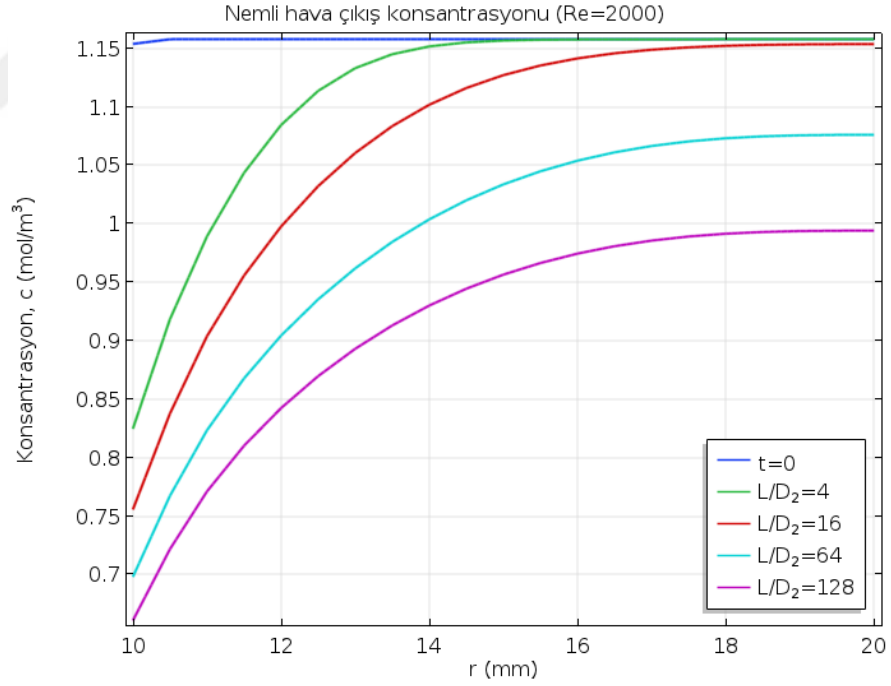


Şekil 5.29. Karşıt akışta COMSOL ve MATLAB yazılımlarında $z = L/2$ 'de konsantrasyonunun r-koordinatı ile değişimi ($Re = 250, L/D = 16$)

Karşıt akışta nemli hava tarafının çıkış konsantrasyonu değerinin Re sayısı ile değişimi Şekil 5.30'da gösterilmiştir. Burada, paralel akışta olduğu gibi Re sayısının artmasıyla, akışkanların birbirine yeterli temas yüzeyi ve süresi bulamamasından dolayı, çıkış konsantrasyonu değeri artmış, hatta $Re = 2000$ 'de membrana yakın bölgede su buharı geçişi olmuştur. L/D oranı yüksek membran kullanılarak, temas süresinin ve yüzeyinin artırılmasıyla, yüksek Re sayılarında kuru hava tarafına geçen su buharı miktarı arttırılabilecektir. Bu durum, Şekil 5.31'de gösterilmiştir.



Şekil 5.30. Karşıt akışta nemli hava tarafı çıkış konsantrasyonunun Re sayısı ile değişimi ($L/D = 16$)

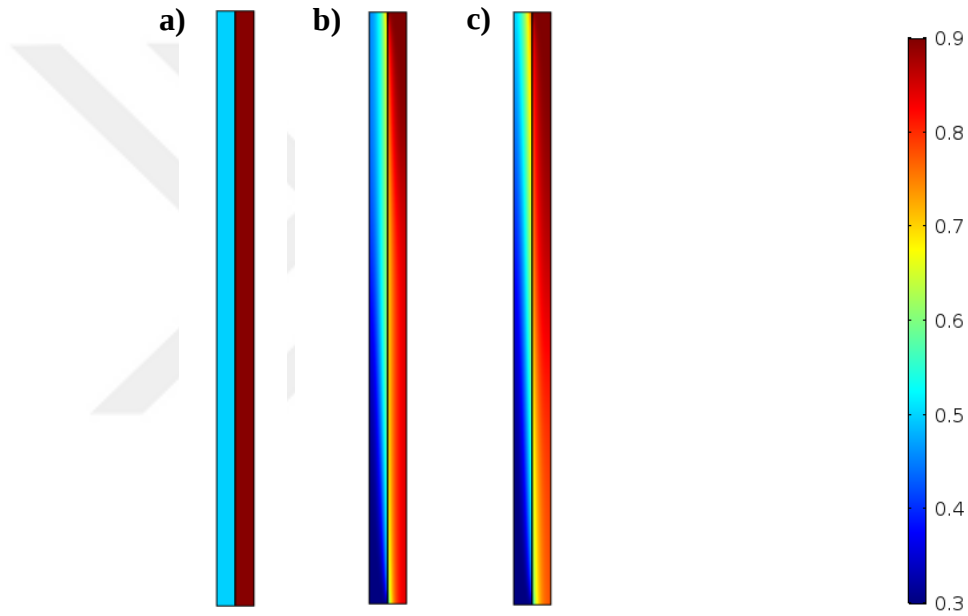


Şekil 5.31. Karşıt akışta çıkış konsantrasyonunun L/D ile değişimi ($Re = 2000$)

Yukarıda bahsedildiği gibi, L/D oranı arttıkça nemli hava tarafı su buharı konsantrasyon değeri azalmakta, yani nemli havadan alınan nem miktarı artmaktadır.

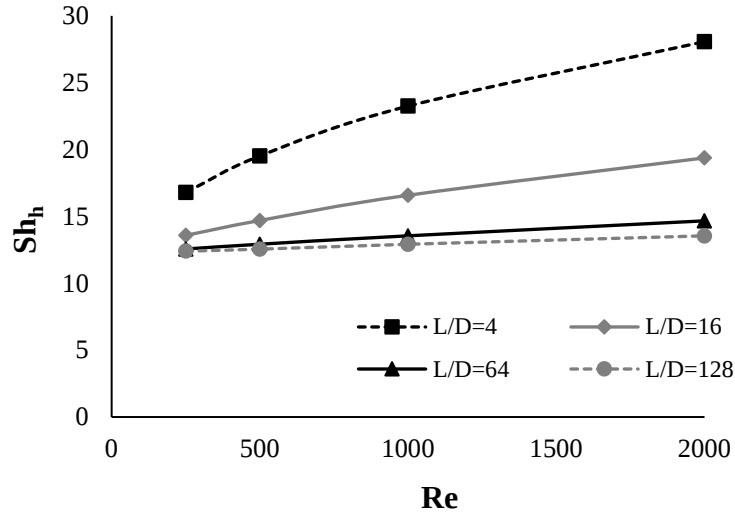
$L/D = 128$ için, paralel akışta (Şekil 5.15) nemli hava tarafı konsantrasyon değeri yaklaşık $0,89 \text{ mol/m}^3$ olarak hesaplanırken, karşıt akışta nemli hava tarafı konsantrasyon değeri yaklaşık $0,6 \text{ mol/m}^3$ olarak bulunmuştur. Buradan karşıt akış tipinde sistemin nem alma performansının daha iyi olduğu söylenebilir.

Sistemde karşıt akışta nemli ve kuru hava taraflarının $Re = 250$ ve $L/D = 16$ için, $t = 0$, $t = 1$ ve $t = 2$ anlarındaki bağıl nem değerleri 2-boyutlu yüzey üzerinde ise Şekil 5.32’de gösterilmiştir. Paralel akışta olduğu gibi, su buharı geçişinden dolayı kuru hava tarafının bağıl nemi artarken, nemli hava tarafının bağıl nemi azalmaktadır.



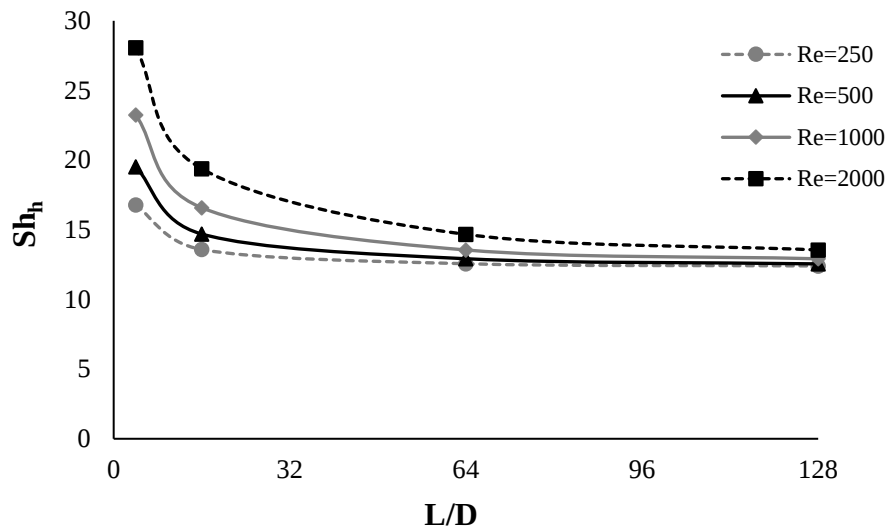
Şekil 5.32. Karşıt akışta bağıl nem değerleri değişiminin 2-boyutlu yüzey üzerinde gösterimi a) $t = 0$, b) $t = 1$ ve c) $t = 2$

Karşıt akışta nemli hava tarafı Sh sayılarının, belirlenen L/D değerlerinde, Re sayısı ile değişimi ise Şekil 5.33’te gösterilmiştir.



Şekil 5.33. Karşıt akışta nemli hava tarafı ortalama Sh sayısının Re sayısı ile değişimi

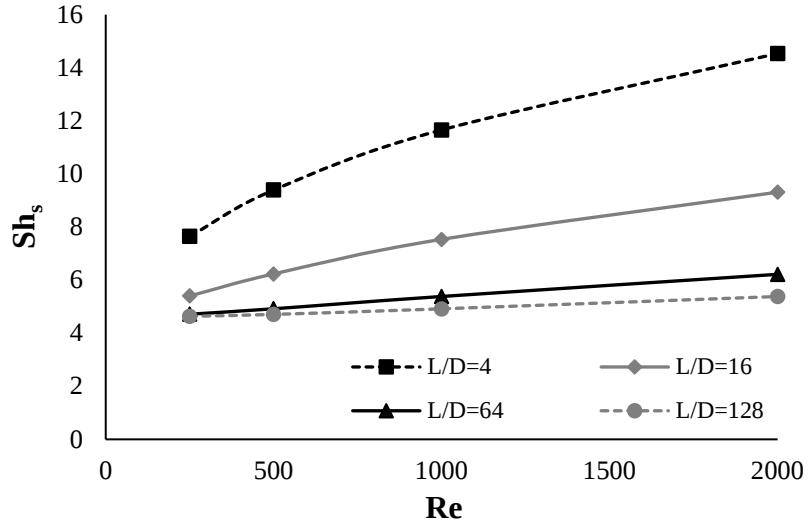
Şekil 5.33'te görülebileceği gibi nemli hava tarafı için ortalama Sh sayıları, paralel akışa benzer şekilde, tüm L/D değerlerinde Re sayısı ile artmaktadır. Karşıt akışta nemli hava tarafı için en yüksek Sh değeri $L/D = 4$ olduğu durumda, $Re = 2000$ için yaklaşık 28 olarak hesaplanmıştır. Nemli hava tarafı ortalama Sh sayılarının L/D oranıyla değişimi ise Şekil 5.34'te gösterilmiştir.



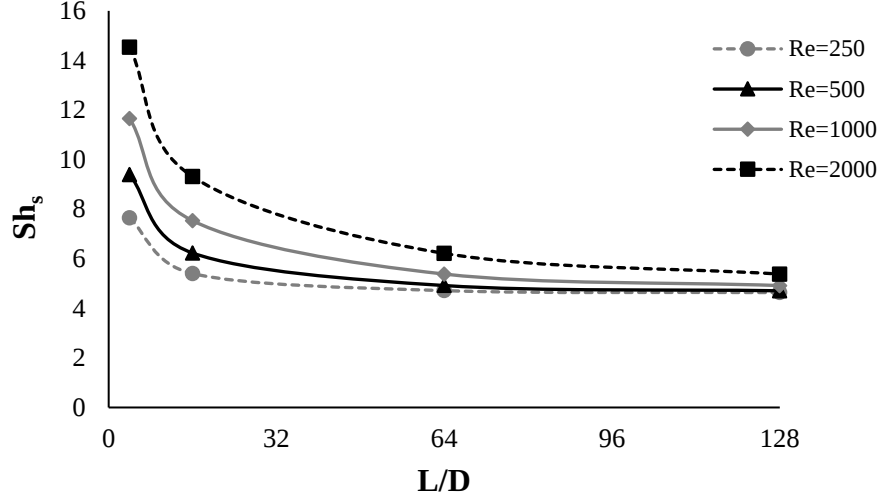
Şekil 5.34. Karşıt akışta nemli hava tarafı ortalama Sh sayısının L/D oranıyla değişimi

Şekil 5.34'te karşıt akışta nemli hava tarafı ortalama Sh sayıları L/D oranının artmasıyla azaldığı görülebilmektedir. Burada ortalama Sh sayıları, L/D oranı sonsuza yaklaşırken 12 değerine yakınsamaktadır.

Sistemde karşı akışta kuru hava tarafı ortalama Sh sayılarının Re sayısı ve L/D oranıyla değişimi sırasıyla Şekil 5.35 ve Şekil 5.36'da verilmiştir. Re sayısının artmasıyla, akışkanların temas süresinin azalmasından dolayı, konsantrasyon gradyanı artmış bu da Sh sayısını arttırmıştır. L/D oranı arttıkça geçen su buharı miktarı artıp, konsantrasyon gradyanı azalacağından ortalama Sh sayısı azalmaktadır. Ortalama Sh sayıları yüksek L/D oranlarında yaklaşık 4,5 değerine yakınsamaktadır.



Şekil 5.35. Karşıt akışta kuru hava tarafı ortalama Sh sayısının Re sayısı ile değişimi

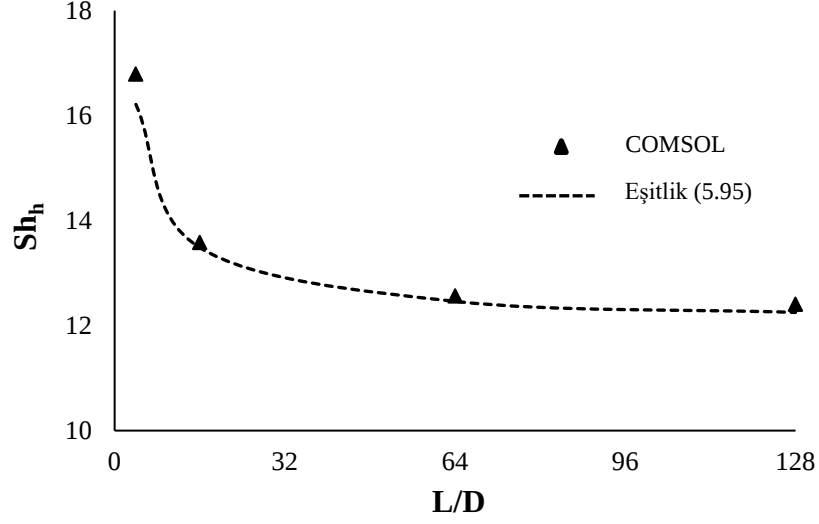


Şekil 5.36. Karşıt akışta kuru hava tarafı ortalama Sh sayısının L/D oranıyla değişimi

Karşıt akış tipinde de nemli hava ve kuru hava tarafları ortalama Sh sayıları için eşitlikler bulunurken paralel akışta nemli hava tarafı için uygulanan yöntemin aynısı uygulanmıştır. Dolayısıyla nemli hava tarafı ortalama Sh sayısı için aşağıdaki eşitlik elde edilmiştir:

$$Sh_h = Sh_{h,\infty} \left[1 + \frac{Re^{1,053}}{65,324 \left(\frac{L}{D} \right)^{0,903}} \right]^{1/3} \quad (5.95)$$

Burada $Sh_{h,\infty}$ değeri 12 olacaktır. Eşitlik (5.95) ile elde edilen ortalama Sh sayıları, COMSOL yazılımında elde edilen ortalama Sh sayıları ile, $Re = 250$ için, Şekil 5.37’de karşılaştırılmıştır. Şekilde de görülebileceği gibi, söz konusu eşitlikle elde edilen ortalama Sh sayıları COMSOL yazılımında elde edilen değerlere oldukça yakındır.

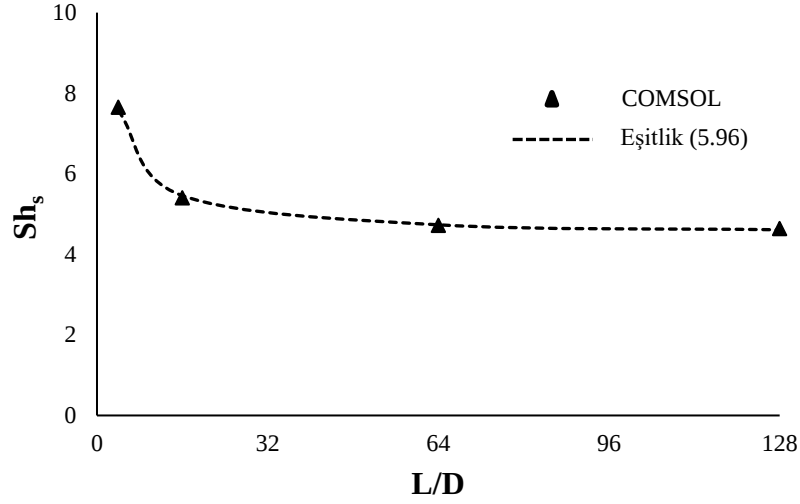


Şekil 5.37. Karşıt akışta nemli hava tarafı için eşitlik (5.95) ile elde edilen ortalama Sh sayılarının COMSOL yazılımıyla karşılaştırılması ($Re = 250$)

Kuru hava tarafında ise aynı yöntemlerle ortalama Sh sayısı için eşitlik (5.96) elde edilmiştir. Eşitlikte $Sh_{s,\infty}$ değeri 4,5 olacaktır.

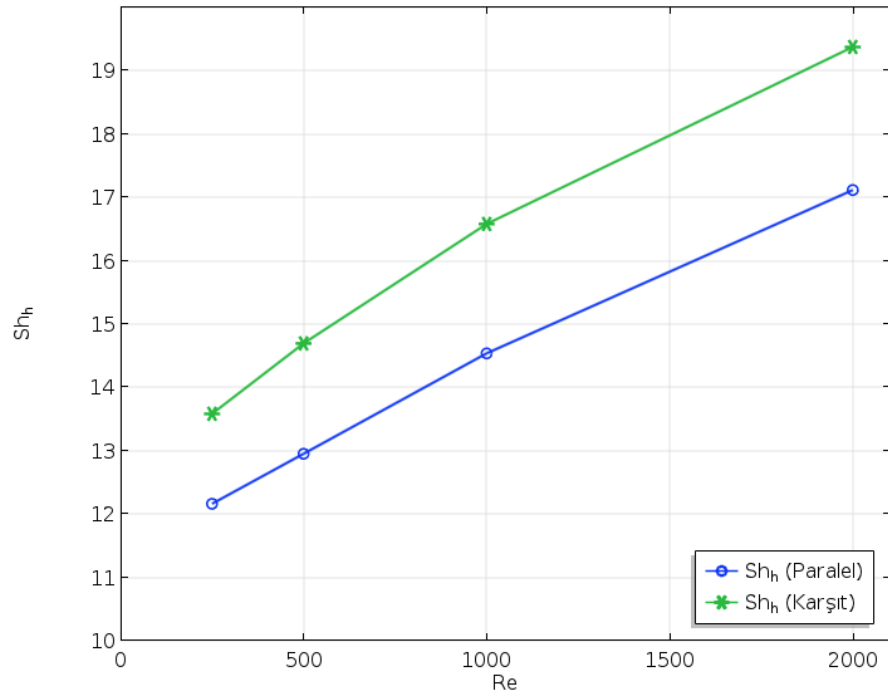
$$Sh_S = Sh_{s,\infty} \left[1 + \frac{Re^{1,077}}{21,21 \left(\frac{L}{D} \right)^{1,131}} \right]^{1/3} \quad (5.96)$$

Yukarıdaki eşitlikle elde edilen ortalama Sh sayıları COMSOL yazılımıyla elde edilen ortalama Sh sayıları ile Şekil 5.38’de karşılaştırılmıştır. İki yöntemle elde edilen ortalama Sh sayılarının birbirine oldukça yakın olduğu şekilde görülebilmektedir. Bu sebeple söz konusu eşitliğin de güvenle kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

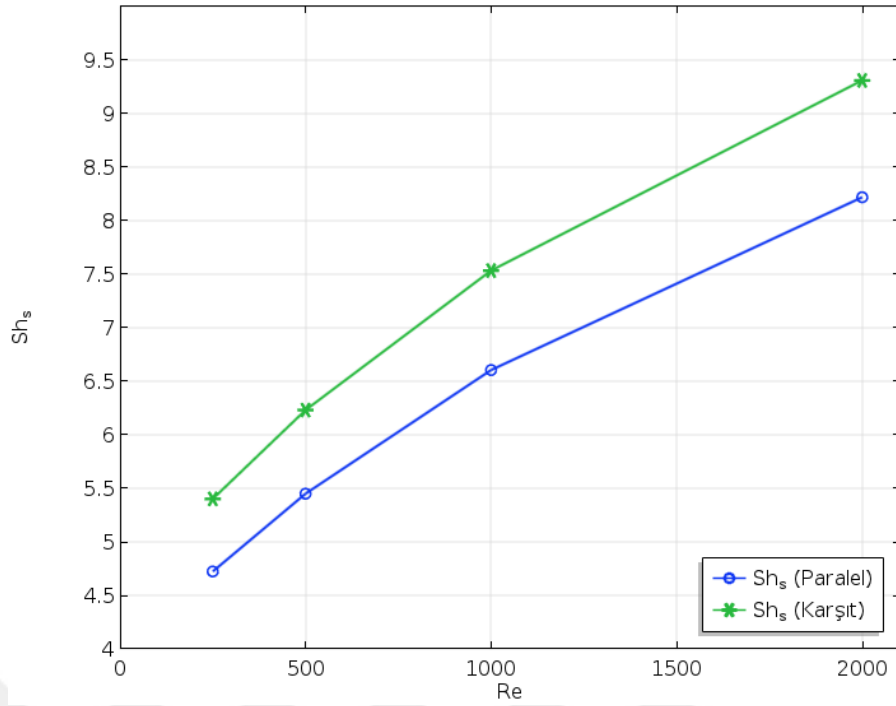


Şekil 5.38. Karşıt akışta kuru hava tarafı için eşitlik (5.96) ile elde edilen ortalama Sh sayılarının COMSOL yazılımıyla karşılaştırılması ($Re = 250$)

Sistemde paralel akışta ve karşıt akışta $L/D = 16$ için, ortalama Sh sayılarının Re sayısı ile değişimi, nemli ve kuru hava taraflarında sırasıyla Şekil 5.39 ve Şekil 5.40'ta gösterilmiştir.



Şekil 5.39. Paralel ve karşıt akışta nemli hava tarafı ortalama Sh sayılarının Re sayısı ile değişimi ($L/D = 16$)



Şekil 5.40. Paralel ve karşıt akışta kuru hava tarafı ortalama Sh sayılarının Re sayısı ile değişimi ($L/D = 16$)

Membranlı boru-tipi nem alma sisteminde, belirlenen L/D oranında, nemli hava tarafı için en yüksek Sh sayısı $Re = 2000$ 'de paralel akışta yaklaşık 17,1, karşıt akışta ise yaklaşık 19,2 olarak elde edilmiştir. Kuru hava tarafında ise en yüksek Sh sayısı yine $Re = 2000$ 'de paralel akışta yaklaşık 8,2, karşıt akışta yaklaşık 9,4 olarak hesaplanmıştır. Sistemde karşıt akışın kütle transferi performansı açısından paralel akışa göre daha iyi olduğu görülebilmektedir.

5.4. Sonuç

Bu çalışmada, membranlı boru-tipi nem alma sisteminin modellenmesi, paralel ve karşıt akış tiplerinde kütle transferi açısından performans analizi yapılmıştır. Yapılan çalışmada, sistem öncelikle COMSOL yazılımı kullanılarak modellenmiş, daha sonra MATLAB yazılımında sonlu farklar yöntemi kullanılarak, COMSOL yazılımında elde edilen bazı kritik parametrelerin doğrulaması yapılmıştır. Doğrulama sonucunda her iki yöntemin kabul edilebilir seviyede birbirine uyumlu olduğu ve COMSOL

yazılımında elde edilen sonuçların güvenilir olduğu sonucuna varılmıştır. Elde edilen diğer sonuçlar ise aşağıda listelenmiştir:

- Hem paralel hem de karşıt akışta düşük Re sayılarında ve yüksek L/D oranlarında, nemli hava-kuru hava temas süresi ve yüzeyi arttığından, geçen su buharı miktarı artmıştır.
- Yüksek Re sayılarında her iki akış tipinde nemli ve kuru hava tarafları ortalama Sh sayıları artmaktadır. Fakat L/D oranı arttığında kütle akısı azaldığından her iki tarafta ortalama Sh sayıları azalmaktadır.
- Her iki akış tipi birbiriyle kıyaslandığında, karşıt akışta nemli havadan kuru havaya geçen su buharı miktarının tüm Re sayılarında ve L/D oranlarında daha yüksek olduğu görülebilmektedir. Hesaplanan ortalama Sh sayıları incelendiğinde yine karşıt akışın paralel akıştan daha üstün olduğu belirlenmiştir.
- Paralel ve karşıt akışlarda, nemli ve kuru hava tarafları ortalama Sh sayıları için elde edilen eşitliklerle, COMSOL yazılımında bulunan sonuçlar birbirine oldukça uyumludur. Söz konusu eşitlikler, membranlı boru-tipi nem alma sisteminde, belirlenen aralıklarda bilinen herhangi bir Re sayısında ve L/D oranında, COMSOL yazılımına ihtiyaç duyulmadan ortalama Sh sayısının bulunabilmesi için büyük fayda sağlayacaktır.

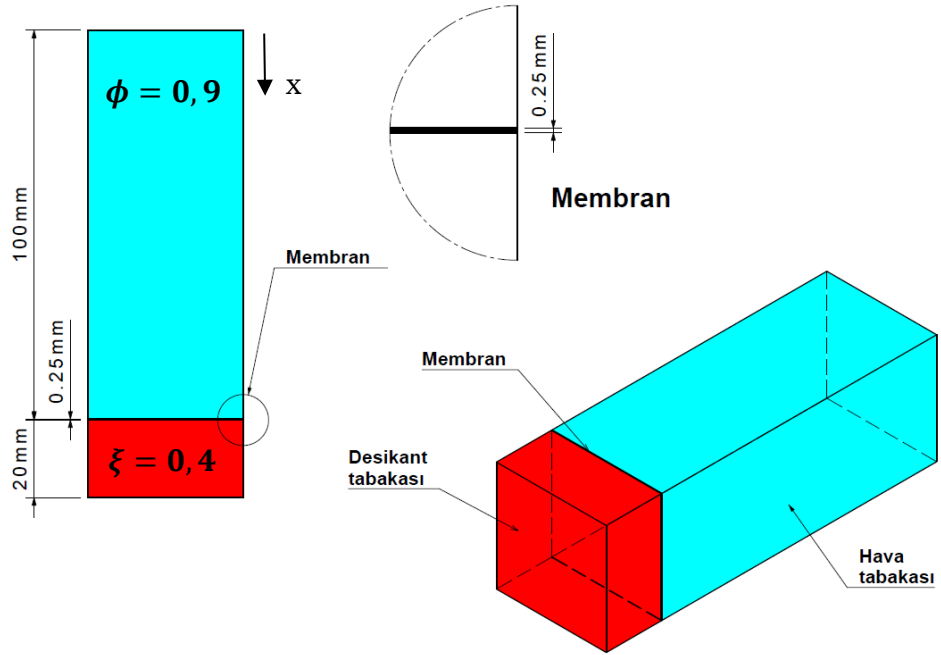
6. MEMBRANLI KÜBİK SIVI DESİKANT NEM ALMA SİSTEMİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ

6.1. Giriş

Bu çalışmada, daha önce nemli hava-kuru hava akışkanları için modellenmiş olan, membranlı kübik nem alma sisteminin, sıvı desikant-hava akışkanları için tekrar modellenmesi ve analizi yapılacaktır. Söz konusu analizde sistemin yine COMSOL yazılımı kullanılarak kütle transferi incelemesi yapılacak ve analizin doğrulaması için yine MATLAB yazılımında, sonlu farklar yönteminden yararlanılacaktır.

6.2. Sistemin Modellenmesi

Membranlı kübik sıvı desikant nem alma sisteminin analizi için oluşturulan modelin teknik resmi Şekil 6.1’de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Modellenen membranlı kübik sıvı desikant nem alma sisteminin teknik resmi

Tasarlanan sistemde kırmızı renk ile gösterilen bölümde kalınlığı 20 mm ve konsantrasyonu $\xi = 0,4$ olan LiCl-su çözeltisi bulunmaktadır. Turkuvaz renkli tabakada ise kalınlığı 100 mm ve bağıl nemi $\phi = 0,9$ olan nemli hava bulunmaktadır. Nemli hava ve kuru hava tabakaları arasına kalınlığı 0,25 mm olan membran yerleştirilmiştir. Sistemde hava ve sıvı desikant çözeltileri durağan halde olup kütle transferi zamana bağlı olarak sadece x-yönünde gerçekleşmektedir. Akışkanlar durgun halde olduklarından konveksiyonla kütle transferi yoktur.

Sistemin teorik modellemesi için, 4. bölümdeki eşitlikler kullanılmıştır. Fakat bu sistemde kuru hava yerine sıvı desikant kullanıldığından sıvı desikantın içersindeki su buharı konsantrasyonunun dolayısıyla sıvı desikantın konsantrasyon değişiminin hesaplanması gerekmektedir. Sıvı desikant çözeltisinin içerdiği su buharı konsantrasyonu eşitlik (6.1) ile tanımlanmıştır:

$$c_s = \frac{P_{des}}{R \cdot T} \quad (6.1)$$

Burada, R evrensel gaz sabiti (8,314 kJ/kmol.K), T mutlak sıcaklık (313 K) ve P_{des} sıvı desikant içindeki su buharının kısmi basıncıdır (kPa). LiCl-su çözeltisi için aynı sıcaklıkta P_{des} değeri ise Conde [43] eşitliğiyle hesaplanmıştır:

$$P_{des} = P_{sat} \cdot \alpha \left(\beta + \kappa \frac{T}{647,096} \right) \quad (6.2)$$

P_{sat} değeri ise Antonie [40] eşitliği ile hesaplanmıştır:

$$P_{sat} = e^{A - \frac{B}{T+C}} \quad (6.3)$$

Bu denklemde $A = 16,3872$, $B = 3885,7$ ve $C = 230,17$ olup nemli hava için Antonie parametreleridir. Eşitlik (6.2)'deki α , β ve κ değerleri ise aşağıdaki eşitliklerle hesaplanmıştır:

$$\beta = 2 - \left[1 + \left(\frac{\xi}{\pi_0} \right)^{\pi_1} \right]^{\pi_2} \quad (6.4)$$

$$\kappa = \left[1 + \left(\frac{\xi}{\pi_3} \right)^{\pi_4} \right]^{\pi_5} - 1 \quad (6.5)$$

$$\alpha = 1 - \left[1 + \left(\frac{\xi}{\pi_6} \right)^{\pi_7} \right]^{\pi_8} - \pi_9 e^{\frac{-(\xi-0,1)^2}{0,005}} \quad (6.6)$$

Yukarıdaki eşitliklerdeki $\pi_0, \pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8$ ve π_9 değerleri Çizelge 6.1’de verilmiştir [43]. ξ değeri ise, daha önce bahsedildiği gibi, çözelti konsantrasyonu olup eşitlik (6.7) ile hesaplanmıştır:

Çizelge 6.1. LiCl-su çözeltisi için buhar basıncı sabitleri

Sabitler	LiCl-su
π_0	0,28
π_1	4,3
π_2	0,6
π_3	0,21
π_4	5,1
π_5	0,49
π_6	0,362
π_7	-4,75
π_8	-0,4
π_9	0,03

$$\xi = \frac{m_{LiCl}}{m_{LiCl} + m_{su} + \Delta m_{su}} \quad (6.7)$$

Yukarıdaki eşitlikte, m_{LiCl} sulu çözeltideki LiCl kütesini, m_{su} çözeltideki su miktarını ve Δm_{su} çözeltinin su miktarındaki değişimi temsil etmektedir.

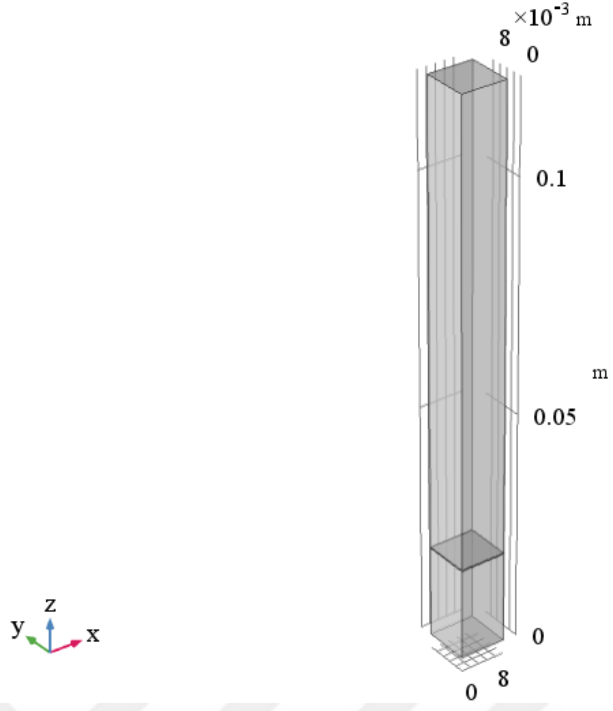
6.3. Hesaplama Sonuçları

Hesaplamalarda öncelikle COMSOL yazılımı kullanılarak sistemin analizi yapılmış, daha sonra MATLAB yazılımında sonlu farklar yöntemiyle hesaplamaların doğrulaması yapılmıştır. COMSOL yazılımında analiz yapılırken hava ve membran tabakaları için “Transport of Diluted Species (tds)”, sıvı desikant tabakası için ise “Transport of Concentrated Species (tcs)” modülleri kullanılmıştır. Hesaplamalarda kullanılan parametreler Çizelge 6.2’de verilmiştir. Belirlenen tabaka uzunluklarına göre COMSOL yazılımında elde edilen 3-boyutlu model ise Şekil 6.2’de gösterilmiştir.

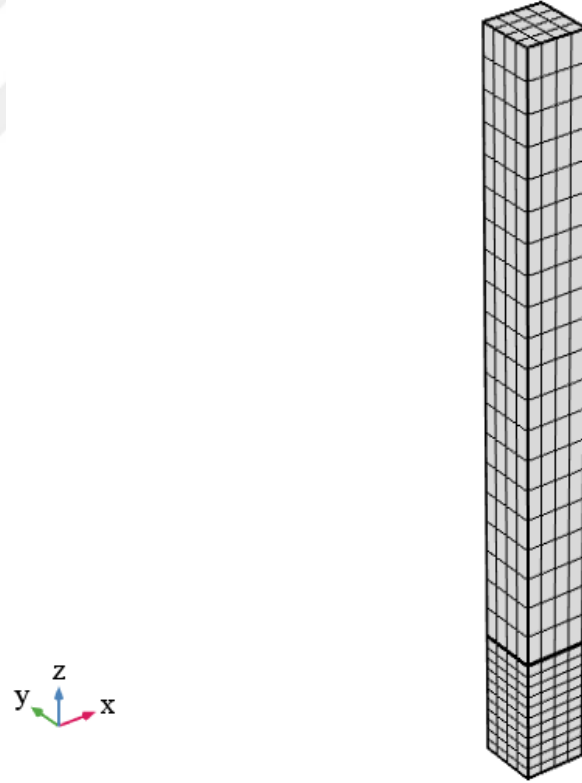
Çizelge 6.2. Hesaplama parametreleri değerleri

Parametre	Açıklama	Değer
a_h	Hava tabakası kalınlığı	100 (mm)
a_m	Membran kalınlığı	0,25 (mm)
a_s	Desikant tabakası kalınlığı	20 (mm)
a_x	x-yönünde uzunluk	10 (mm)
a_y	y-yönünde uzunluk	10 (mm)
D_h	Hava difüzyon katsayısı [41]	$2,5 \cdot 10^{-5}$ (m ² /s)
D_m	Membran difüzyon katsayısı [19]	$3 \cdot 10^{-6}$ (m ² /s)
D_s	Sıvı desikant difüzyon katsayısı	$4,2 \cdot 10^{-6}$ (m ² /s)
Φ	Havanın başlangıç bağıl nemi	0,9
$c_{0,m}$	Membranda su buharı başlangıç konsantrasyonu	0,7 (mol/m ³)
ξ	Sıvı desikant başlangıç konsantrasyonu	0,4 (kg/kg)

COMSOL yazılımında, hesaplamalar için oluşturulan ağ (mesh) yapısı ise Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Ağ oluşturulurken hava tabakası uzunluğu 5 mm olmak üzere 20 eşit parçaya, membran tabakası uzunluğu 0,025 mm olmak üzere 10 eşit parçaya ve sıvı desikant tabakası ise uzunluğu 2 mm olmak üzere yine 10 eşit parçaya bölünmüştür. Model x ve y-yönlerinde ise 2,5 mm’lik 4 eşit parçaya bölünmüştür. Bu şekilde serbestlik derecesi 1100 olan ağ yapısı elde edilmiştir. MATLAB yazılımında da sonlu farklar yöntemiyle çözüm yapılırken, aynı şekilde hava, membran ve sıvı desikant tabakaları sırasıyla 20, 10 ve 10 eşit parçaya bölünmüştür. Her iki yöntemde de zaman aralığı 1 saniye olacak şekilde 200 saniye için çözüm yapılmıştır.

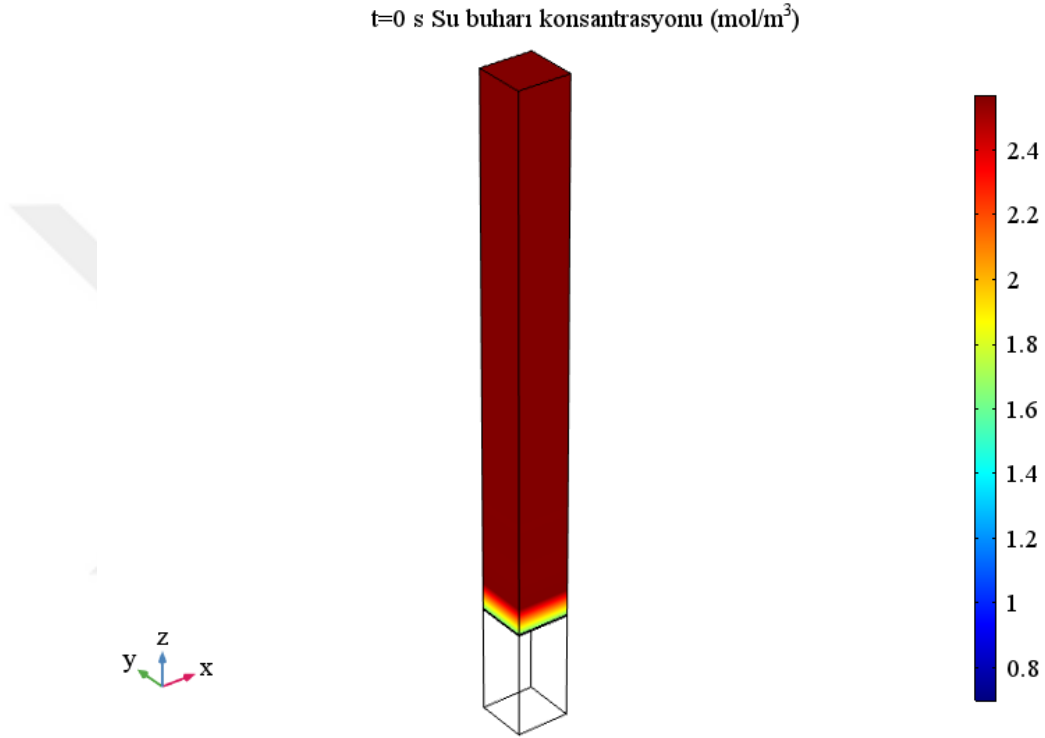


Şekil 6.2. COMSOL yazılımında elde edilen 3-boyutlu model



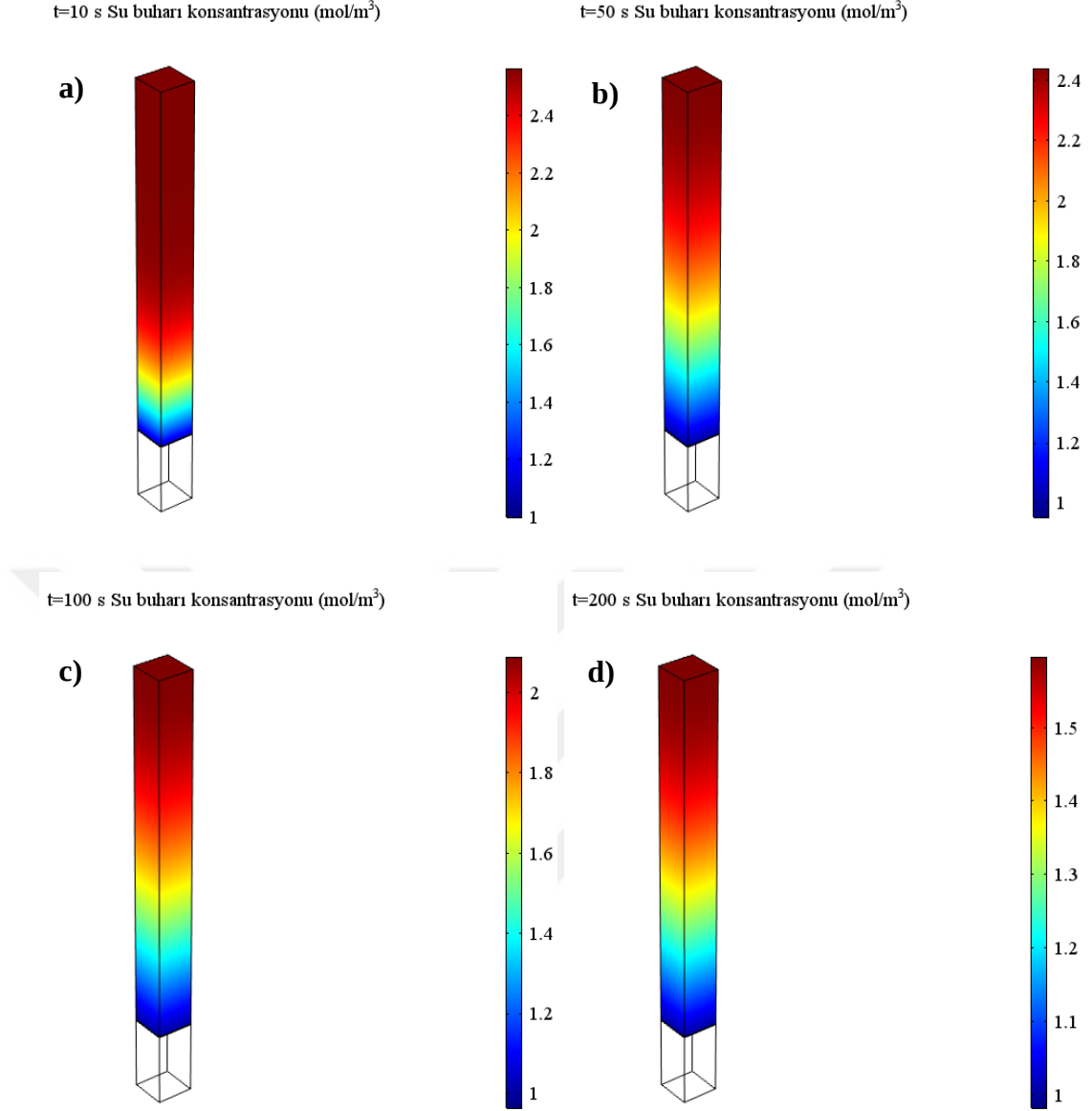
Şekil 6.3. Hesaplamalar için COMSOL yazılımında oluşturulan ağ (mesh) yapısı

Çizelge 6.2’de hava tabakası başlangıç bağıl nemi $\Phi = 0,9$ olarak verilmiştir. Söz konusu bağıl nem değerine karşılık gelen su buharı konsantrasyonu değeri ise, eşitlik (4.50)’den, $2,5676 \text{ mol/m}^3$ olarak hesaplanmıştır. Membran tabakası için başlangıçtaki su buharı konsantrasyonu değeri $0,7 \text{ mol/m}^3$ olarak kabul edildiğinden $t = 0$ anında sistemde hava ve membran tabakaları su buharı konsantrasyonları için aşağıdaki şekil elde edilecektir:



Şekil 6.4. $t = 0$ anında COMSOL yazılımında hava ve membran tabakaları su buharı konsantrasyonları

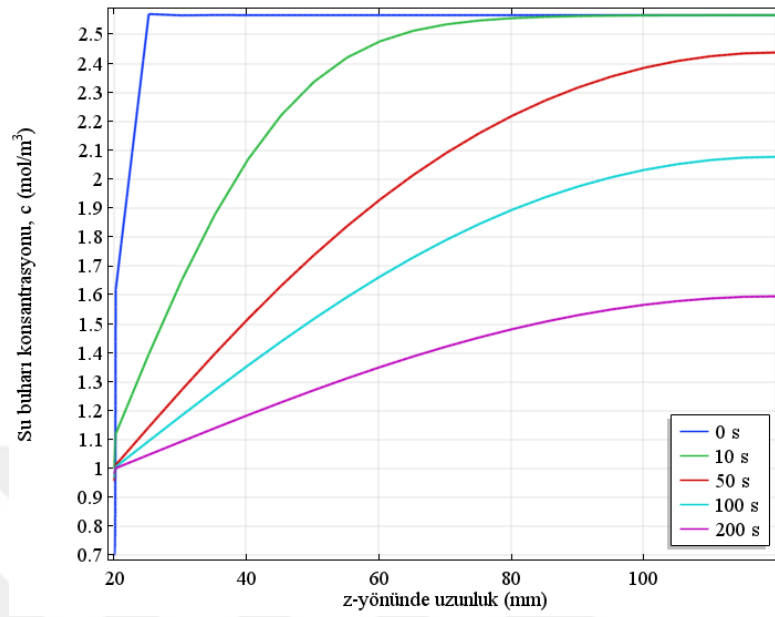
Şekil 6.4’te görülebildiği gibi, başlangıçta hava tabakasının üst kısımlarında su buharı konsantrasyonu değerinde değişim gözlenmemiş fakat membrana yakın bölgelerde su buharı geçişi başladığından su buharı konsantrasyonunda azalma meydana gelmiştir. Sistemde $t = 10$, $t = 50$, $t = 100$ ve $t = 200$. saniyelerdeki su buharı konsantrasyonu değişimleri ise Şekil 6.5’te gösterilmiştir.



Şekil 6.5. Sistemde hava ve membran tabakalarında su buharı konsantrasyonunun bazı t değerleri için değişimi a) $t = 10$, b) $t = 50$, c) $t = 100$, d) $t = 200$

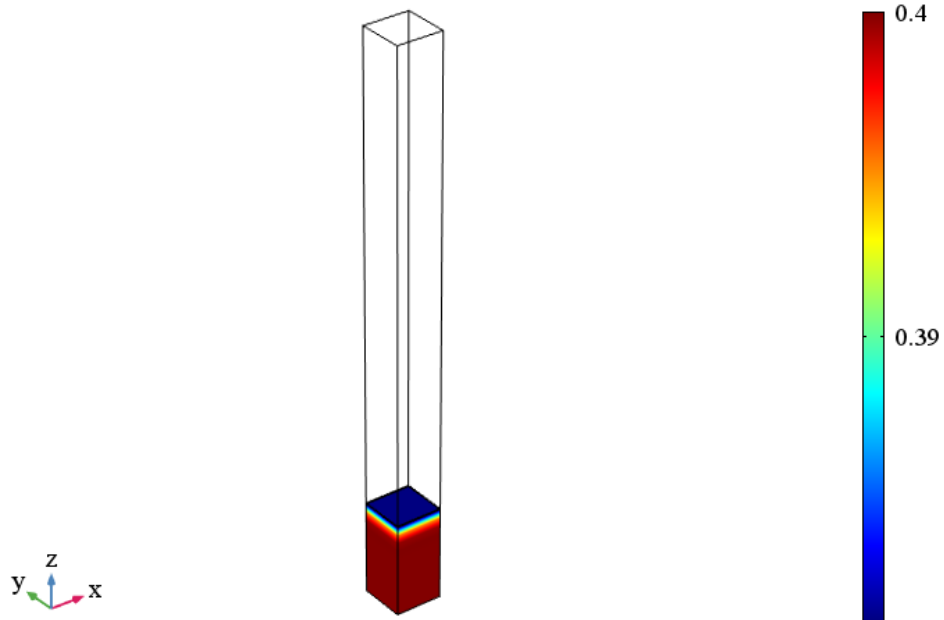
Şekil 6.5a'da, $t = 10$ için, hava tarafı su buharı konsantrasyonu üst kısımlarda başlangıç konsantrasyonu olan $2,5676 \text{ mol/m}^3$ değerine yakın iken membrana yakın olan alt kısımlarda nem alma işleminden ötürü $1,2 \text{ mol/m}^3$ değerinin altına düşmüştür. $t = 50$ için (Şekil 6.5b), hava tabakasının üst kısımlarının da su buharı miktarı azalarak $2,4 \text{ mol/m}^3$ civarına düşmüş olup, $t = 100$ için bu değer $2,2 \text{ mol/m}^3$ olarak elde edilmiştir (Şekil 6.5c). Son çözüm zamanı olan $t = 200$ 'de, sistemdeki en yüksek su buharı konsantrasyonu yaklaşık $1,6 \text{ mol/m}^3$ seviyelerine inmiştir (Şekil 6.5d).

Sistemde su buharı konsantrasyonunun söz konusu t değerlerinde z -yönündeki değişimi, aşağıdaki grafikten daha iyi anlaşılabilmektedir.



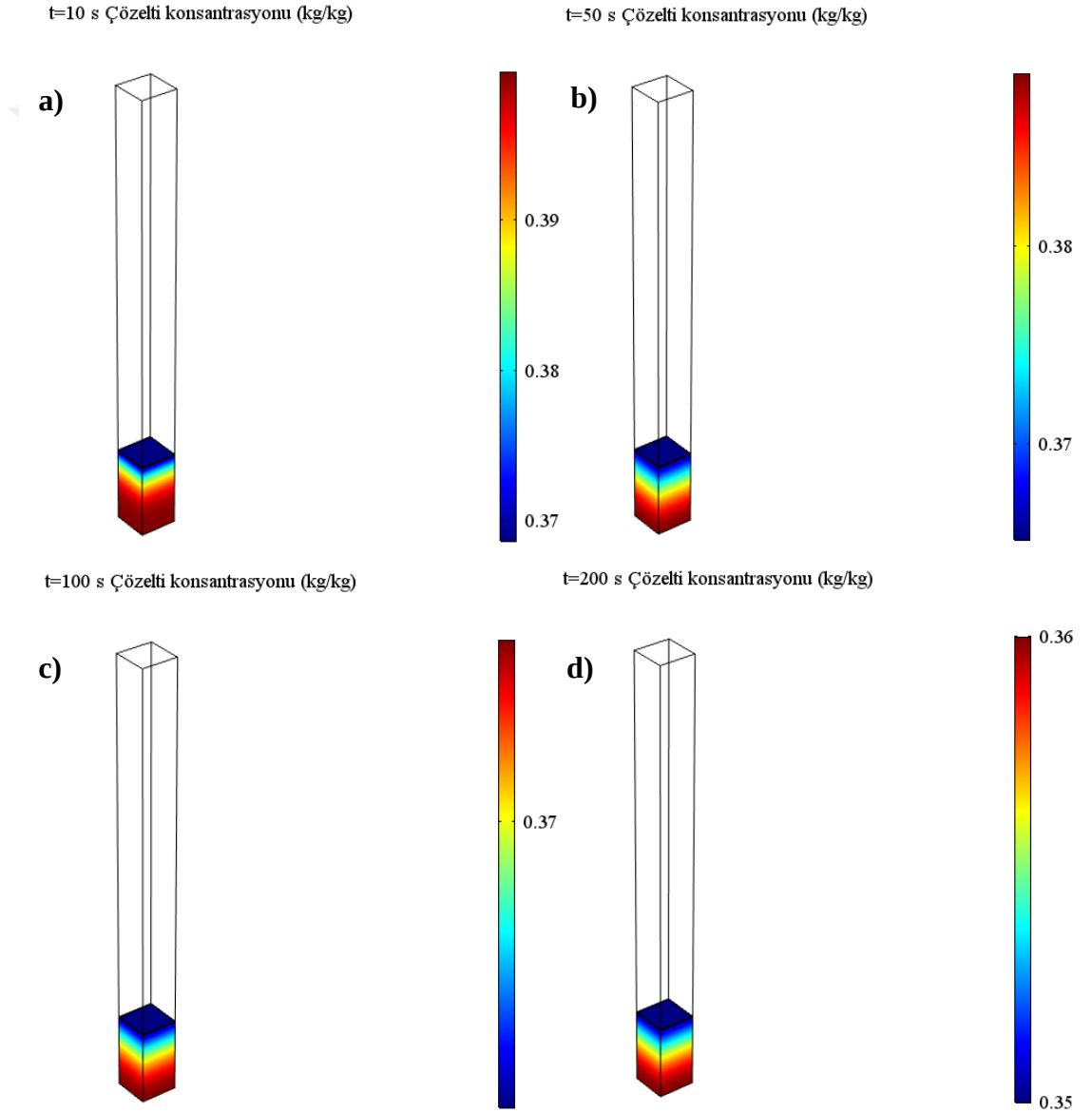
Şekil 6.6. Sistemde bazı t değerleri için hava ve membran tarafı su buharı konsantrasyonu değişimi

$t=0$ s Çözelti konsantrasyonu (kg/kg)



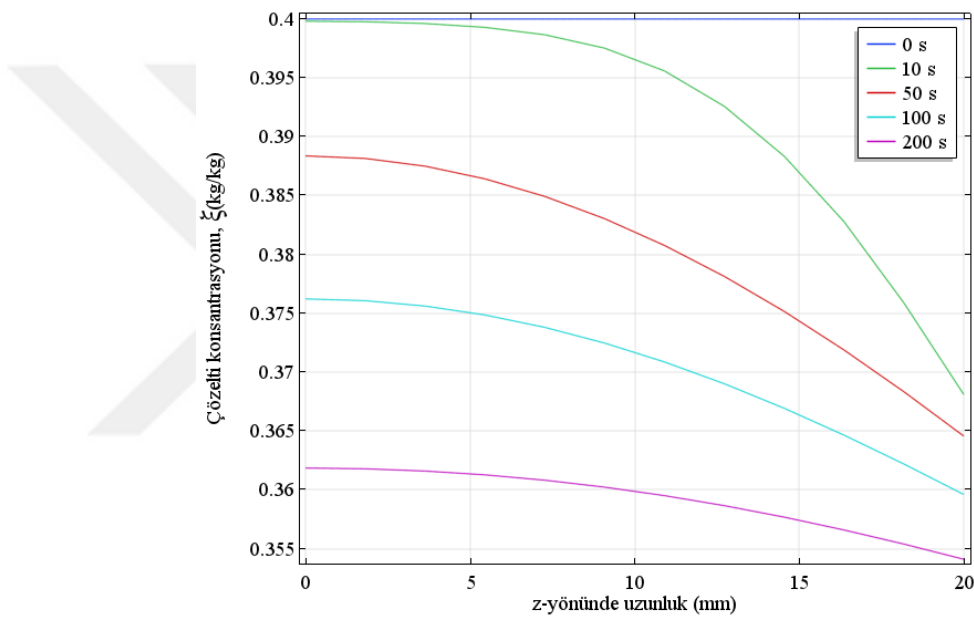
Şekil 6.7. $t = 0$ anında COMSOL yazılımında sıvı desikant konsantrasyonu

Sıvı desikant tabakasının $t = 0$ anındaki COMSOL yazılımında konsantrasyon dağılımı ise Şekil 6.7’de gösterilmiştir. Sistemde sıvı desikant konsantrasyonu eşitlik (6.7) ile tanımlanmış olup, desikant tabakasına geçen su buharı miktarının artmasıyla desikant konsantrasyonunun azalacağı eşitlikte görülebilmektedir. Şekilde görülebileceği gibi, hava tabakasından sıvı desikant tabakasına su buharı geçişinden dolayı, sıvı desikant tabakasının üst kısımlarında çözelti konsantrasyonu azalmaya başlamıştır. Çözelti konsantrasyonunun $t = 10$, $t = 50$, $t = 100$ ve $t = 200$. saniyelerdeki değişimi ise Şekil 6.8’de gösterilmiştir.



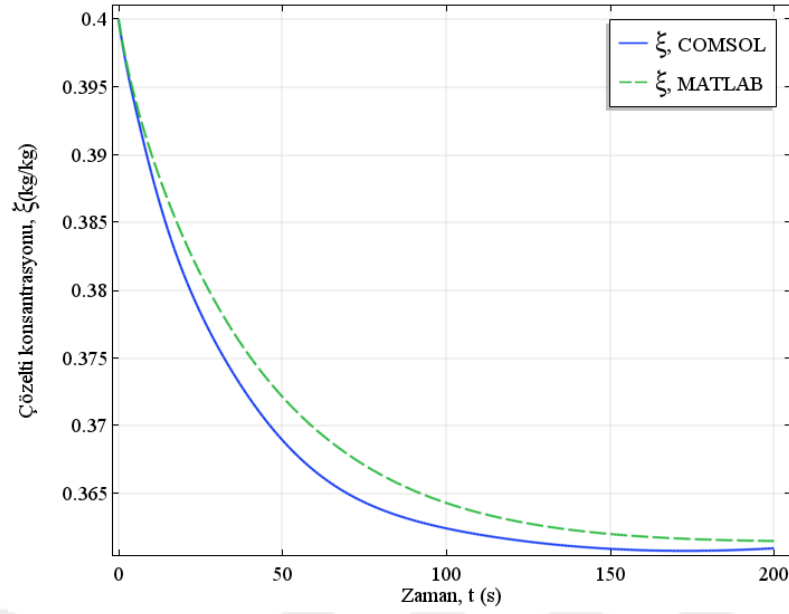
Şekil 6.8. Sistemde sıvı desikant tabakasında çözelti konsantrasyonunun bazı t değerleri için değişimi a) $t = 10$, b) $t = 50$, c) $t = 100$, d) $t = 200$

Sistemde 10. saniyede desikant tabakasının alt kısımları başlangıç konsantrasyonu olan 0,4 kg/kg'a yakinken üst kısımlarda çözelti konsantrasyonu 0,37 kg/kg değerinin altına düşmüştür. 50. saniyede, geçen su buharı miktarının daha da artmasıyla, konsantrasyon değeri alt kısımlarda da azalmaya başlamış yaklaşık 0,39 kg/kg olarak bulunmuştur. 100. saniyede alt ve üst kısımların konsantrasyon değerleri yaklaşık 0,36-0,38 kg/kg arasında değişirken, son çözüm zamanında sistemde en yüksek konsantrasyon değeri yaklaşık 0,362 kg/kg iken, en düşük değer ise yaklaşık 0,35 kg/kg olarak bulunmuştur. Çözelti konsantrasyonunun sözü geçen t değerlerinde z -yönündeki değişimi grafiksel olarak Şekil 6.9'daki gibi de gösterilebilir:



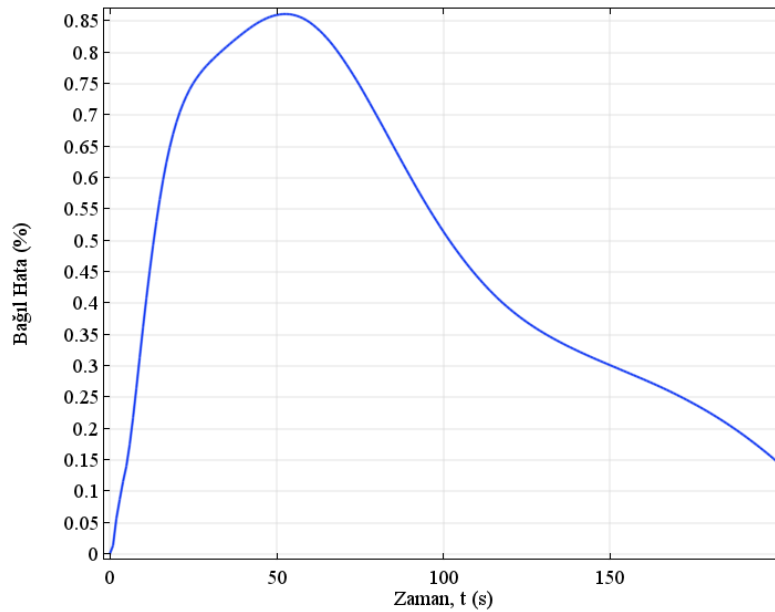
Şekil 6.9. Sistemde bazı t değerleri için sıvı desikant çözeltisi konsantrasyonu değişimi

Hesaplamalarda COMSOL ve MATLAB yazılımlarında elde edilen sonuçların karşılaştırılması için sıvı desikant çözeltisi konsantrasyonunun zamanla değişimi kullanılmıştır. Sıvı desikant konsantrasyonunun zamanla değişimi her iki yöntem için Şekil 6.10'da gösterilmiştir.



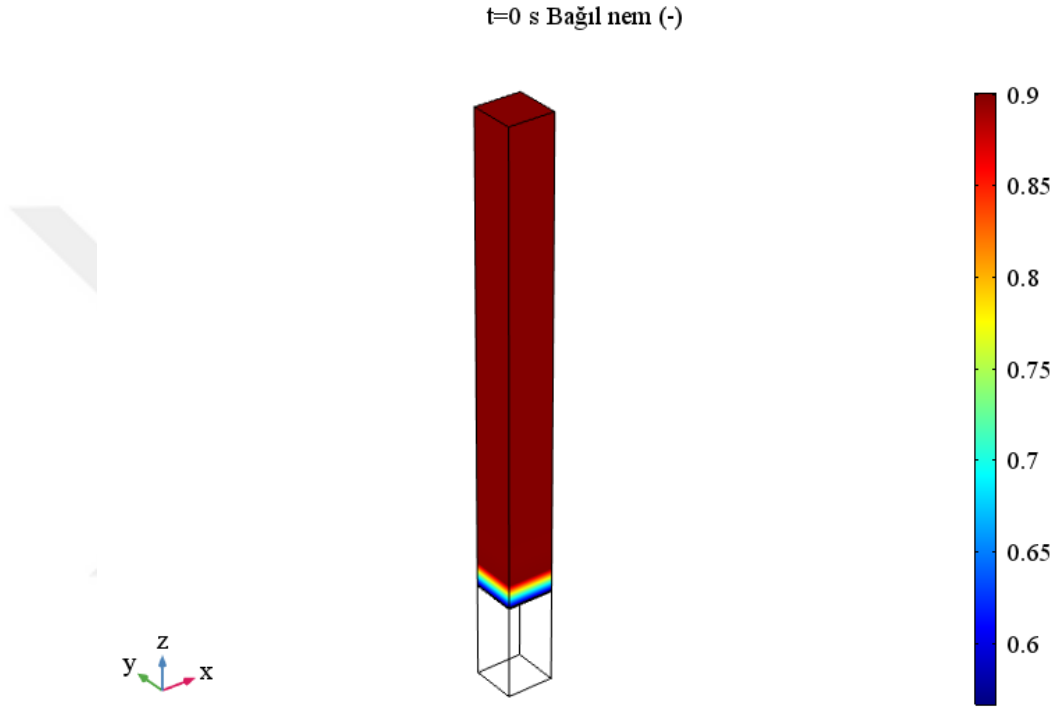
Şekil 6.10. Sıvı desikant çözeltisi konsantrasyonunun zamanla değişiminin her iki yöntem için karşılaştırılması

Şekil 6.10'da görülebileceği gibi, her iki yöntemle elde edilen sonuçlar birbirine oldukça yakındır. İki yöntem arasındaki bağıl hata değerlerinin değişimi ise Şekil 6.11'de gösterilmiştir. En yüksek bağıl hata değeri yaklaşık %0,86 olarak bulunmuştur. Bu durum, COMSOL yazılımı ile elde edilen sonuçların güvenilir olduğunu göstermektedir.



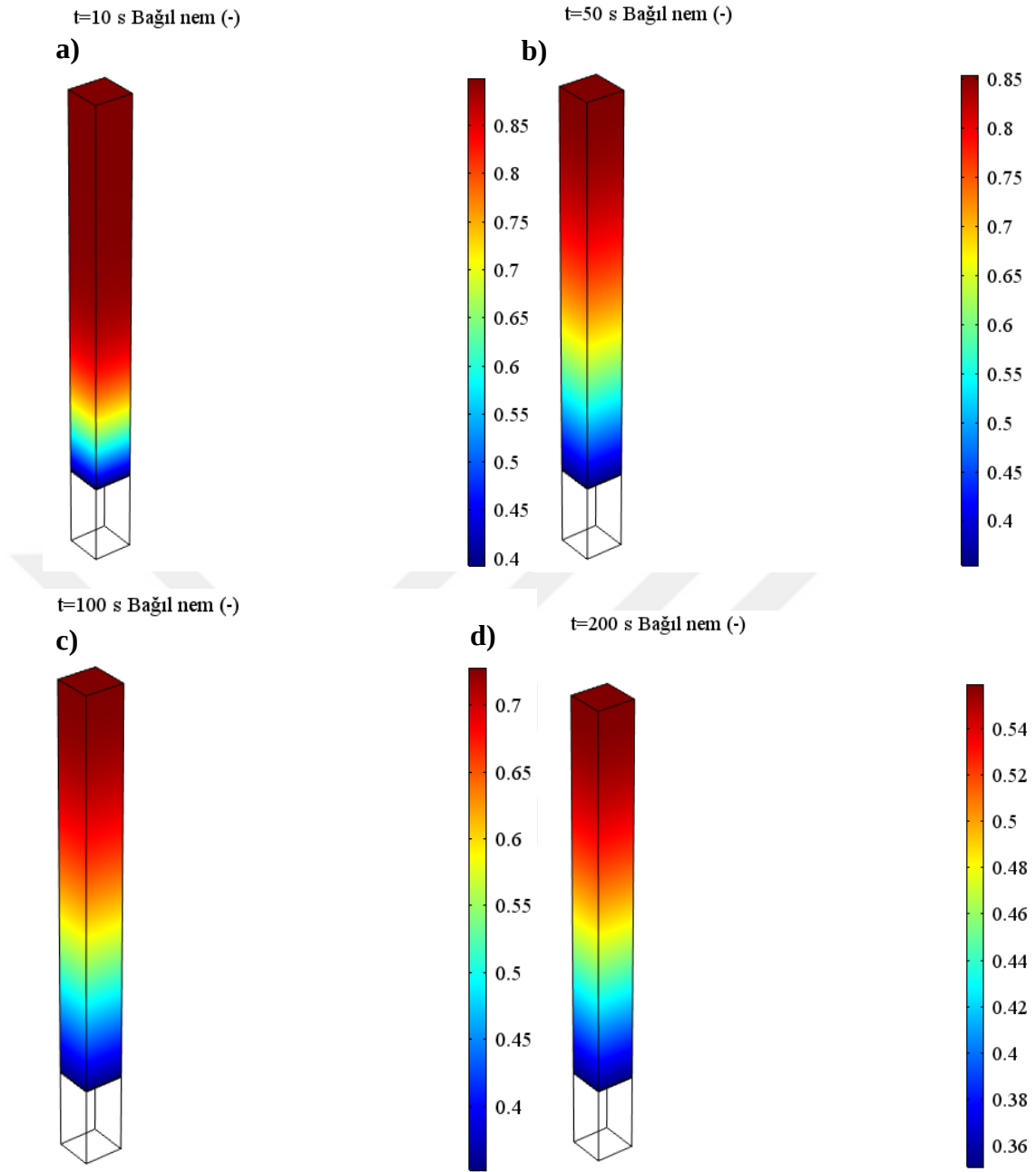
Şekil 6.11. İki yöntemle elde edilen sonuçlar arasındaki bağıl hata değerleri

Sistemde, hava tabakasında, su buharı konsantrasyonu değiştiğinden hava tabakasının bağıl nem değeri de değişmiştir. Sistemin $t = 0$ anında bağıl nem durumu Şekil 6.12’de gösterilmiştir. Burada, görülebileceği gibi, yine su buharı geçişinin başlamasından ötürü hava tabakasının membrana yakın alt kısımlarında bağıl nem değeri 0,6 değerine kadar düşmüştür. Bağıl nem değerinin $t = 10$, $t = 50$, $t = 100$ ve $t = 200$. saniyelerdeki değişimi ise Şekil 6.13’te gösterilmiştir.



Şekil 6.12. $t = 0$ anında COMSOL yazılımında hava tabakasının bağıl nem durumu

Sistemde hava tabakasının bağıl nemi, su buharı konsantrasyonundaki değişime bağlı olarak, eşitlik (4.50) ile hesaplandığından hava tabakasında su buharı konsantrasyonu azaldıkça bağıl nem değeri de azalacaktır. Bu sebeple hava tabakasının bağıl nemi 10. saniyede 0,4 ile 0,9 arasında değişirken 50. saniyede en yüksek 0,85 civarında bulunmuştur. 100. saniyede havadan sıvı desikanta geçen su buharı miktarının daha da artmasıyla hava tabakasının alt kısımlarında 0,4’ün altında, üst kısımlarında ise 0,7 değerinin biraz üstünde bulunmuştur. Son çözüm zamanında ise, alt ve üst kısımlar arasındaki fark daha da azalmış, sırasıyla yaklaşık 0,36 ve 0,56 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.13. Sistemde hava tabakasında bağıl nem değerlerinin bazı t değerleri için değişimi a) $t = 10$, b) $t = 50$, c) $t = 100$, d) $t = 200$

6.4. Sonuç

Bu çalışmada, membranlı kübik sıvı desikant nem alma sisteminin modellenmesi ve kütle transferi analizi yapılmıştır. Sistemin öncelikle zamana bağlı tek boyutta COMSOL yazılımında modellenerek kütle transferi analizi yapılmıştır. Daha sonra MATLAB yazılımında, sonlu farklar yöntemiyle kütle iletim denklemleri sayısal

olarak çözümlenerek COMSOL yazılımında elde edilen sonuçların doğrulanması yapılmıştır. Her iki yöntemde elde edilen sonuçların birbirine oldukça yakın olması, COMSOL yazılımında oluşturulan modelin güvenilir olduğunu göstermiştir.



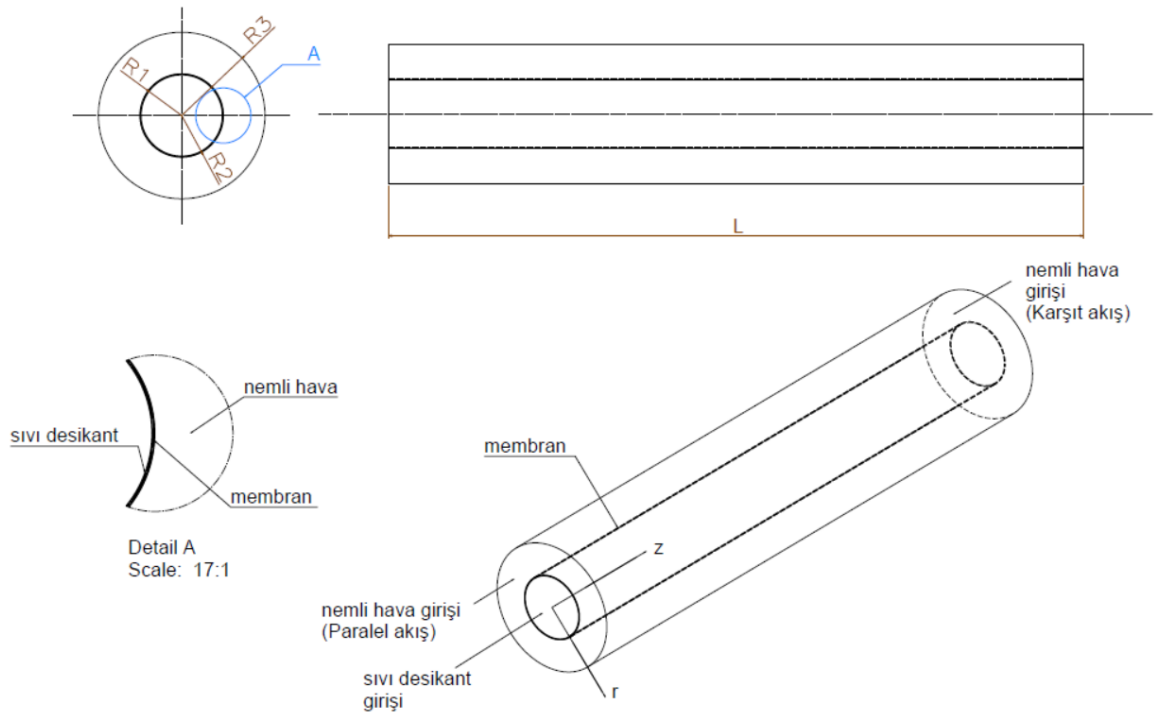
7. MEMBRANLI BORU-TİPİ SIVI DESİKANT NEM ALMA SİSTEMİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ

7.1. Giriş

Bu çalışmada, daha önce nemli hava-kuru hava akışkanları için modellenmiş olan, membranlı boru-tipi nem alma sisteminin, sıvı desikant-hava akışkanları için, COMSOL yazılımında, tekrar modellenmesi ve analizi yapılacaktır. Yapılan analizde elde edilen sonuçlardan yararlanılarak Sherwood sayısı (Sh) için Reynolds sayısına (Re), Schmidt sayısına (Sc) ve membranın en-boy oranına (L/D) bağlı eşitlikler verilecektir. Buna ek olarak sistemin nem alma veriminin Re sayısı ile ve L/D oranıyla değişimi incelenecektir.

7.2. Sistemin Modellenmesi

Membranlı boru-tipi sıvı desikant nem alma sisteminin analizi için oluşturulan modelin teknik resmi Şekil 7.1’de gösterilmiştir.



Şekil 7.1. Modellenen membranlı silindirik sıvı desikant nem alma sisteminin teknik resmi

Şekil 7.1’de görüldüğü gibi sistem, daire kesitli kanal içerisine, eş merkezli olacak şekilde, silindirik bir membranın yerleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Silindirik membranın içersinden sıvı desikant çözeltisi akarken, halka kesitli kanaldan nemli hava akmaktadır. Sistemde paralel akışta hava ve sıvı desikant çözeltisi pozitif z-yönünde hareket ederken, karşıt akışta sıvı desikant yine pozitif z-yönünde, hava ise negatif z-yönünde hareket edecektir. Sistemde yapılan hesaplamalarda, analizi kolaylaştırmak için, aşağıdaki kabuller yapılmıştır:

- Sıvı desikant ve hava akışkanları, hidrodinamik olarak tam gelişmiş ve laminar akışta hareket etmektedir.
- Kütle transferi radyal (r) ve boylamsal (z) yönünde gerçekleşmektedir. Havada, membranda ve sıvı desikantta açısıl yönde kütle transferi yoktur.
- Sıvı desikant ve hava ısı olarak 25 °C sıcaklıkta dengededir.
- Sistemde ısı transferi ihmal edilmiştir.

Sistemde hava tarafı için iki boyutlu zamana bağlı kütle transferi denklemi eşitlik (7.1)’de verilmiştir:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + V_{z,h} \cdot \frac{\partial c}{\partial z} = D_h \cdot \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial c}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right] \quad (7.1)$$

Burada, c konsantrasyonu (mol/m^3), t zamanı (s), z boylamsal mesafeyi (m), r radyal mesafeyi (m), D_h su buharının havadaki difüzyon katsayısını (m^2/s) ve $V_{z,h}$ havanın z-yönündeki hızını (m/s) ifade etmektedir. Sıvı desikant tarafı için iki boyutlu zamana bağlı kütle transferi denklemi eşitlik (7.2)’de verilmiştir:

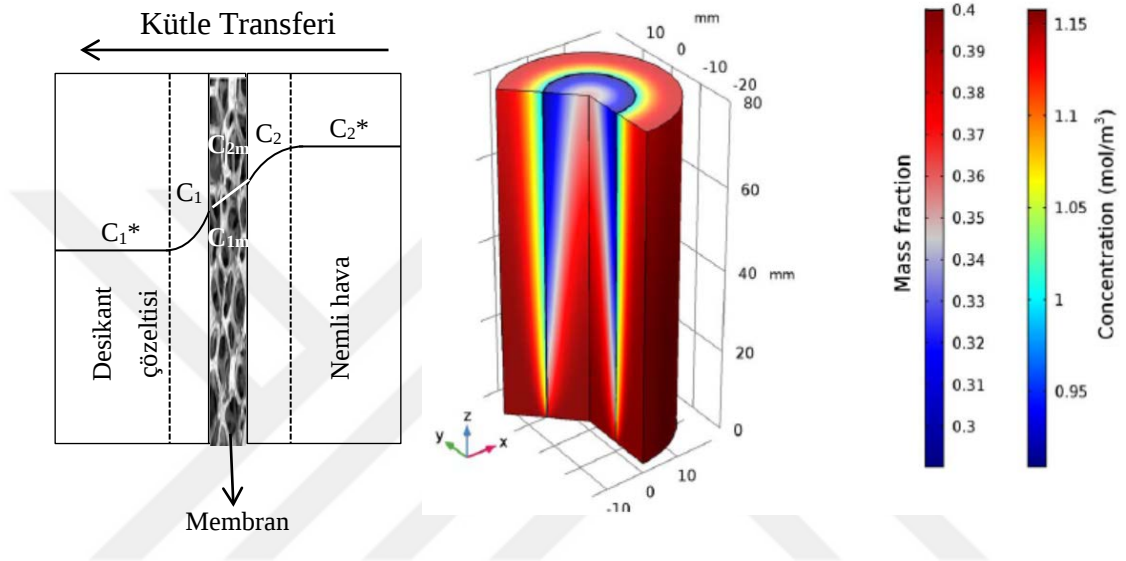
$$\frac{\partial c}{\partial t} + V_{z,s} \cdot \frac{\partial c}{\partial z} = D_s \cdot \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial c}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right] \quad (7.2)$$

Burada $V_{z,s}$ sıvı desikantın z-yönündeki hızını (m/s) temsil etmektedir. Membran tarafında ise kütle transferi denklemi eşitlik (7.3)’teki gibi olacaktır:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_m \cdot \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial c}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right] \quad (7.3)$$

Eşitlik (7.3)'te D_m , su buharının membrandaki difüzyon katsayısını (m^2/s) ifade etmektedir.

Sistemde sıvı desikant çözeltisiyle nemli hava arasında su buharı konsantrasyonu farkı olduğundan nemli havadan sıvı desikanta su buharı geçişi yani kütle transferi gerçekleşecektir. Sistemde su buharı geçişinin COMSOL yazılımındaki ve şematik görünümü Şekil 7.2'de verilmiştir.



Şekil 7.2. Sistemde su buharı geçişinin COMSOL yazılımındaki ve şematik görünümü

Sistemde hava ve sıvı desikant tarafları kütle transferi ara-yüz sınır şartları eşitlik (7.4)'te tarif edilmiştir. Buna göre membrandaki kütle transferi akısı, eşitlik (7.4a), hava tarafındaki kütle transferi akısına, eşitlik (7.4b), ve çözelti tarafındaki kütle transferi akısına, eşitlik (7.4c), eşit olacaktır. Membrandaki su buharı geçişi, membranın ince yapısından ötürü, Fick kanunu ile modellenmiştir. Bu sebeple membranın kütle transferi katsayısı D_m/δ olarak tanımlanmış olup burada δ , membran kalınlığıdır.

$$N_A = \frac{D_m}{\delta} (C_{2m} - C_{1m}) \quad (7.4a)$$

$$N_A = k_a (C_2^* - C_2) \quad (7.4b)$$

$$N_A = k_s(C_1 - C_1^*) \quad (7.4c)$$

Burada C_{1m} ve C_{2m} membranin iç tarafında ara-yüz konsantrasyonları (mol/m^3) olup, membranın ince yapısından ötürü, C_1 ve C_2 konsantrasyonlarına yakın oldukları kabul edilmektedir. C_2^* ise havadaki toplam su buharı konsantrasyonu olup eşitlik (7.5) ile tanımlanmıştır:

$$C_2^* = \frac{\varphi \cdot P_{sat}}{R \cdot T} \quad (7.5)$$

Burada φ havanın bağıl nemi, P_{sat} havanın doyma basıncı (kPa), R evrensel gaz sabiti ($8,314 \text{ kJ/kmol.K}$), T mutlak sıcaklık (K) ve P_{des} sıvı desikant içindeki buharın kısmi basıncıdır (kPa). Hava için P_{sat} değeri Antonie [40] eşitliği ile hesaplanmıştır:

$$P_{sat} = e^{A - \frac{B}{T+C}} \quad (7.6)$$

Eşitlik (2.4)'teki C_1^* değeri ise sıvı desikant içerisindeki toplam su buharı konsantrasyonu olup eşitlik (7.7) ile tanımlanmıştır:

$$C_1^* = \frac{P_{des}}{R \cdot T} \quad (7.7)$$

Burada P_{des} sıvı desikant içerisindeki su buharının doyma basıncı olup Conde [43] eşitliğiyle tanımlanmıştır:

$$P_{des} = P_{sat} \cdot \alpha \left(\beta + \kappa \frac{T}{647,096} \right) \quad (7.8)$$

Eşitlik (7.8)'deki α , β ve κ değerleri ise eşitlik (7.9)'da tanımlanmıştır:

$$\beta = 2 - \left[1 + \left(\frac{\xi}{\pi_0} \right)^{\pi_1} \right]^{\pi_2} \quad (7.9a)$$

$$\kappa = \left[1 + \left(\frac{\xi}{\pi_3} \right)^{\pi_4} \right]^{\pi_5} - 1 \quad (7.9b)$$

$$\alpha = 1 - \left[1 + \left(\frac{\xi}{\pi_6} \right)^{\pi_7} \right]^{\pi_8} - \pi_9 e^{\frac{-(\xi-0,1)^2}{0,005}} \quad (7.9c)$$

Yukarıdaki eşitliklerdeki $\pi_0, \pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8$ ve π_9 değerleri Çizelge 7.1'de verilmiştir [43]. ξ değeri ise, daha önce bahsedildiği gibi, çözelti konsantrasyonu olup eşitlik (7.10) ile hesaplanmıştır:

Çizelge 7.1. LiCl-su çözeltisi için buhar basıncı sabitleri

Sabitler	LiCl-su
π_0	0,28
π_1	4,3
π_2	0,6
π_3	0,21
π_4	5,1
π_5	0,49
π_6	0,362
π_7	-4,75
π_8	-0,4
π_9	0,03

$$\xi = \frac{m_{LiCl}}{m_{LiCl} + m_{su} + \Delta m_v} \quad (7.10)$$

Çözelti yoğunluğu sıvı desikant konsantrasyonu ile değişmektedir. Bu sebeple, çözelti yoğunluğu çözelti konsantrasyonu ve sıcaklığına bağlı olup saf suyun yoğunluğu ile tanımlanmıştır [43]:

$$\rho_s = \rho_w \sum_{i=0}^3 \rho_i \left(\frac{\xi}{1-\xi} \right)^i \quad (7.11)$$

Burada ρ_w saf suyun yoğunluğu (kg/m^3) olup aşağıdaki eşitlikle hesaplanmıştır [43]:

$$\rho_w = 322 \left(1 + B_0 \theta^{\frac{1}{3}} + B_1 \theta^{\frac{2}{3}} + B_2 \theta^{\frac{5}{3}} + B_3 \theta^{\frac{16}{3}} + B_4 \theta^{\frac{43}{3}} + B_5 \theta^{\frac{110}{3}} \right) \quad (7.12)$$

Eşitlik (7.11)'deki ρ_i değerleri ve eşitlik (7.12)'deki B_i değerleri Çizelge 7.2'de verilmiştir [43]. Eşitlik (7.12)'deki θ değeri ise aşağıdaki eşitlikle bulunmuştur:

$$\theta = 1 - \frac{T}{T_c} \quad (7.13)$$

Çizelge 7.2. LiCl-su ve saf su için yoğunluk sabitleri

ρ_i	LiCl-su	B_i	Su
ρ_0	1,0	B_0	1,9937718430
ρ_1	0,540966	B_1	1,0985211604
ρ_2	-0,303792	B_2	-0,5094492996
ρ_3	0,100791	B_3	-1,7619124270
		B_4	-45,9005480267
		B_5	723692,2618632

Sıvı desikant çözeltisinin dinamik viskozitesi de çözelti konsantrasyonuna bağlı olup saf suyun viskozitesi kullanılarak eşitlik (7.14) ile hesaplanmıştır [43]:

$$\mu_s = \mu_w \cdot e^{\mu_1 \zeta^{3,6} + \mu_2 \zeta + \mu_3 \frac{\zeta}{\theta} + \mu_4 \zeta^2} \quad (7.14)$$

Burada, μ_i değerleri Çizelge 7.3'te verilmiştir. ζ ve μ_w değerleri ise sırasıyla eşitlik (7.15) ve eşitlik (7.16) ile tanımlanmıştır [43].

$$\zeta = \frac{\xi}{(1 - \xi)^{\frac{1}{0,6}}} \quad (7.15)$$

$$\mu_w = 1,787 \times 10^{-6} (1,0261862 + 12481,702 \theta^{0,02} - 19510,923 \theta^{0,04} + 7065,286 \theta^{0,08} - 395,561 \theta^{2,85} + 143922,996 \theta^8) \quad (7.16)$$

Çizelge 7.3. LiCl-su çözeltisi için viskozite sabitleri

μ_i	LiCl-su
μ_1	0,090481
μ_2	1,390262
μ_3	0,675875
μ_4	-0,583517

Havadan sıvı desikanta geçen su buharı miktarı kütleli olarak eşitlik (7.17) ile tanımlanmıştır. Çözeltiye geçen su buharı kütlesi hem çözelti konsantrasyonunu hem de çözelti buhar basıncını değiştirecektir.

$$\Delta m_v = N_A M_A S \Delta t \quad (7.17)$$

Eşitlik (7.17)'de M_A suyun molar ağırlığı (kg/mol), S kesit alanı (m²) ve Δt zamanı (s) ifade etmektedir. Tam gelişmiş laminar akışta sıvı desikant için hız profili eşitlik (7.18)'deki gibi olacaktır (Bknz. EK-A):

$$V_{z,s}(r) = 2V_{ort,s} \left(1 - \frac{r^2}{R_1^2} \right) \quad (7.18)$$

Hava tarafı hız profili ise aşağıdaki eşitliklerle belirlenmiştir (Bknz. EK-B):

$$V_{z,h}(r) = \frac{2 V_{ort,h}}{M} \left[1 + \left(\frac{r}{R_3} \right)^2 + b \ln(r/R_3) \right] \quad (7.19a)$$

$$M = \left[1 + \left(\frac{R_2}{R_3} \right)^2 - b \right] \quad (7.19b)$$

$$b = \frac{\left(\frac{R_2}{R_3} \right)^2 - 1}{\ln(R_2/R_3)} \quad (7.19c)$$

Sistemde hava akışı için Re sayısı aşağıdaki eşitlikle tanımlanmıştır:

$$Re_h = \frac{\rho_h V_{ort,h} d_e}{\mu_h} \quad (7.20)$$

Sistemde belirli Re sayılarına göre kütle transferi analizi yapılacağından öncelikle eşitlik (7.20) kullanılarak kanaldaki ortalama hız, $V_{ort,h}$, bulunacak, daha sonra eşitlik (7.19) yardımıyla kanaldaki hız profili belirlenecektir. Eşitlik (7.20)'de ρ_h havanın yoğunluğunu (kg/m^3), μ_h havanın dinamik viskozitesini (Pa.s) ve d_e kanal eşdeğer çapını temsil etmektedir. d_e eşitlik (7.21) ile hesaplanmıştır:

$$d_e = \sqrt{\frac{4 S_a}{\pi}} \quad (7.21a)$$

$$S_a = \pi(R_3^2 - R_2^2) \quad (7.21b)$$

Sistemde Sh sayısı, Re ve Sc sayılarına bağlı olarak, Chilton-Colburn benzeşimi kullanılarak tanımlanmıştır. Bunun sebebi söz konusu benzeşimin gazlarda ve sıvılarda hem laminar hem de türbülanslı akışlarda sıklıkla kullanılarak oldukça iyi sonuçlar vermesidir. Chilton-Colburn benzeşimine göre Sh sayısı eşitlik (7.22) ile ifade edilmiştir:

$$Sh = C Re^m Sc^n \quad (7.22)$$

Bilindiği gibi Sh sayısı eşitlik (7.23) ile de ifade edilebilmektedir:

$$Sh = \frac{k_a d_e}{D_h} \quad (7.23)$$

Burada k_a kütle transferi katsayısıdır (m/s). Sc sayısı ise eşitlik (7.24) ile tarif edilmiştir:

$$Sc = \frac{\mu_h}{\rho_h D_h} \quad (7.24)$$

Sistemde havadaki su buharı konsantrasyonu değişimine bağlı nem alma verimi ise eşitlik (7.25) ile tanımlanmıştır:

$$\eta(\%) = 100 \frac{(C_{h,g} - C_{h,\varsigma})}{(C_{h,g} - C^{sat})} \quad (7.25)$$

Burada $C_{h,g}$ ve $C_{h,\varsigma}$ sırasıyla havadaki silindirik membran girişinde ve çıkışında su buharı konsantrasyonunu (mol/m^3) temsil etmektedir. C^{sat} ise sıvı desikant ile dengede olan havanın içersindeki su buharı konsantrasyonudur (mol/m^3).

7.2.1. Sınır Şartları

Membranlı silindirik nem alma sisteminde paralel ve karşıt akışta, diferansiyel denklemlerin çözülebilmesi için bazı sınır şartları belirlenmiştir. Paralel akışta, hava ve sıvı desikant taraflarında, havadaki ve sıvı desikanttaki su buharı giriş konsantrasyonları, C_1^* ve C_2^* , belirli ve sabit olup bununla ilgili sınır şartı aşağıdaki gibi olacaktır.

Hava tarafı için paralel akışta:

$$z = 0 \quad c = C_{h,g} \quad (7.26)$$

Sıvı desikant tarafı için:

$$z = 0 \quad c = C_{s,g} \quad (7.27)$$

Sistemde kanal çıkışında ise, sistem yalıtılmış olarak kabul edildiğinden, konsantrasyon değişimi sıfır olacaktır. Bu durum paralel akışta eşitlik (7.28)'deki gibi ifade edilmiştir:

$$z = L \quad \frac{\partial c}{\partial z} = 0 \quad (7.28)$$

Karşıt akışta ise, sıvı desikant yine z-yönünde, hava negatif z-yönünde aktığından sıvı desikant için eşitlik (7.27) ile yazılan sınır şartı değişmeyecek fakat hava için eşitlik (7.26)'daki sınır şartı aşağıdaki halini alacaktır:

$$z = L \quad c = C_{h,g} \quad (7.29)$$

Paralel akış için eşitlik (7.28)'de tanımlanan kanal çıkışı yalıtım sınır şartı, karşıt akışta aşağıdaki eşitlikle tanımlanmıştır:

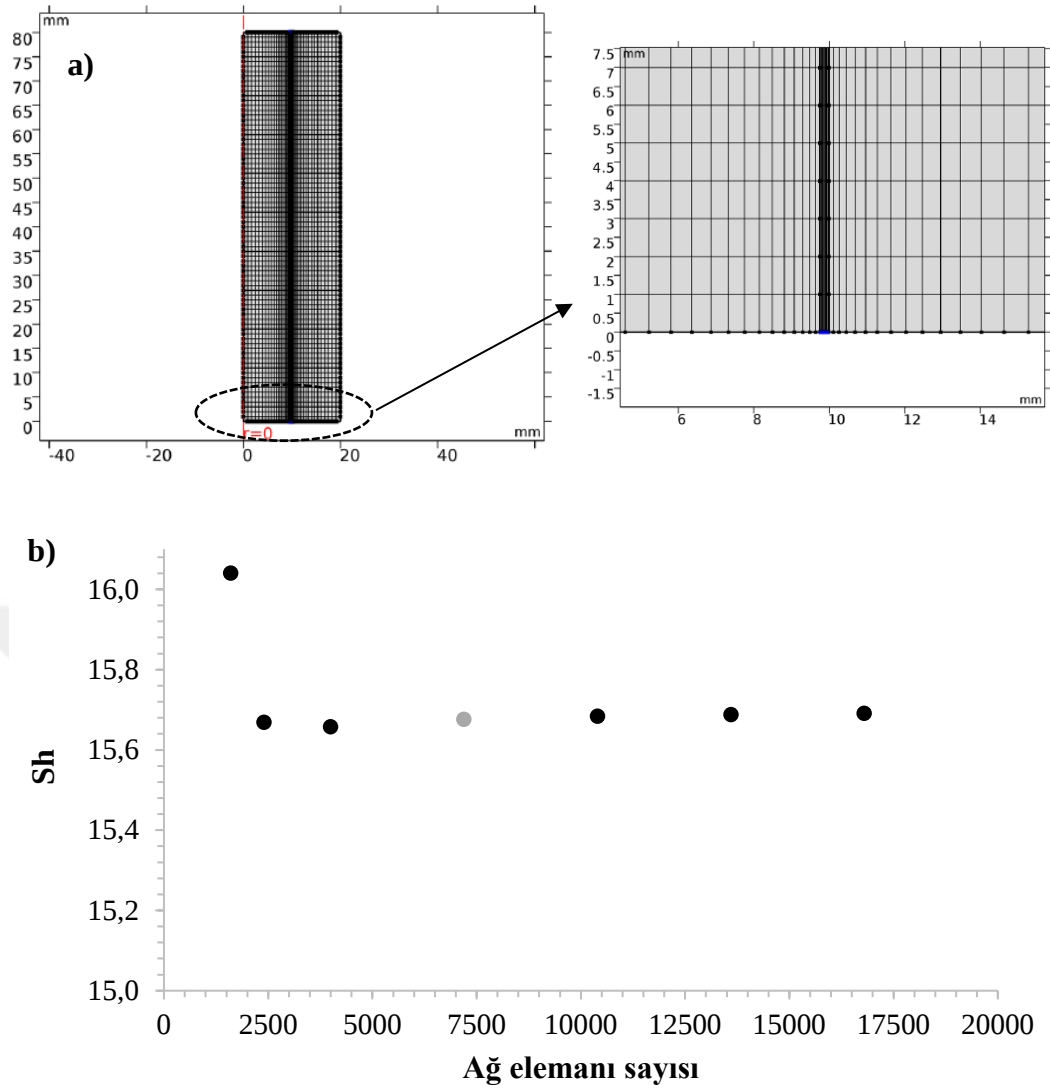
$$z = 0 \quad \frac{\partial c}{\partial z} = 0 \quad (7.30)$$

Sistemde $t = 0$ anında hava ve sıvı desikant su buharı konsantrasyonları da bilinmektedir. Söz konusu durumda hava ve sıvı desikant su buharı konsantrasyonları sırasıyla eşitlik (7.5) ve eşitlik (7.7) ile hesaplanmıştır.

7.2.2. Çözüm Yöntemi

Çalışmada kütle transferi analizinde, daha önce söz edildiği gibi, COMSOL Multiphysics yazılımı kullanılmıştır. Hava tarafından membran tarafına kütle geçişi hesaplanması için COMSOL'da 'Transport of Diluted Species', membrandan sıvı desikanta kütle geçişi için ise 'Transport of Concentrated Species' modülleri kullanılmıştır. Analizi yapılan geometri öncelikle 2-boyutlu olarak modellenmiş, daha sonra COMSOL'da '2-D Axisymmetric' (eksenel simetri) modülü ile kabuk haline dönüştürülmüştür.

COMSOL yazılımında yapılan analizde, hesaplamanın yapılabilmesi için, oluşturulan ağ (mesh) yapısı ve Sh sayısı için ağ bağımsızlığı grafiği, $L/D = 4$ ve $Re = 250$ için, Şekil 7.3'te gösterilmiştir. Grafikten de anlaşılabileceği gibi, belirli bir ağ elemanı sayısından sonra Sh sayısındaki değişim ihmal edilebilecek kadar azdır (yaklaşık %0,05).

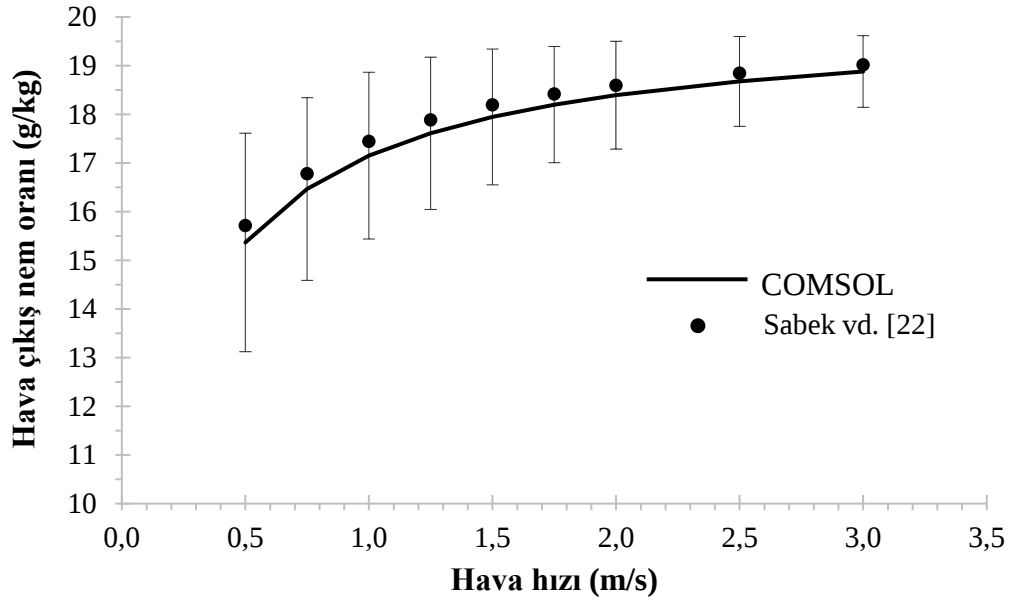


Şekil 7.3. COMSOL yazılımında oluşturulan $L/D = 4$ için ağ (mesh yapısı) a) ağ dağılımı, b) Sh sayısı için ağ bağımsızlığı analizi ($Re = 250$)

7.2.3. Analiz Doğrulaması

Çalışmada yapılan analizin doğrulaması için, COMSOL yazılımında oluşturulan modelin literatürdeki bir çalışmayla ve MATLAB yazılımında elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 7.4'te COMSOL yazılımında yapılan analiz sonucu elde edilen hava çıkış nem oranı değerlerinin hava hızı ile değişiminin Sabek vd. [22] tarafından yapılan çalışmada elde edilen değerlerle karşılaştırılması yapılmıştır. Şekilden de anlaşılabileceği gibi analizde elde edilen sonuçlarla literatürdeki

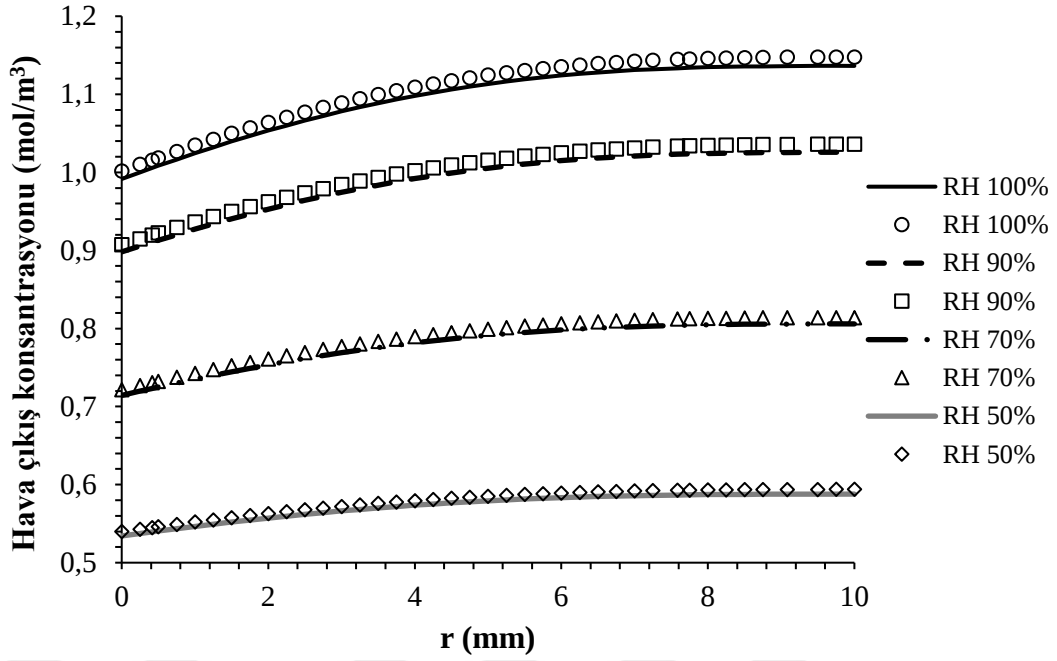
çalışmada elde edilen sonuçlar birbirine oldukça yakın olup bağıl hata %2,2'nin altındadır.



Şekil 7.4. COMSOL yazılımında elde edilen hava çıkış nem oranı değerlerinin literatürdeki bir çalışmayla karşılaştırılması

MATLAB yazılımıyla yapılan karşılaştırma için ise söz konusu yazılımda hava, membran ve sıvı desikant tarafı kütle transferi denklemlerinin, verilen başlangıç ve sınır şartlarında, sonlu farklar yöntemiyle çözümü yapılmıştır. Kütle transferi denkleminde yer alan türevli ifadelerin analizi için, Crank-Nicholson yönteminde ikinci dereceden düşük kesme hatalı formüller kullanılmıştır. Sonlu farklar yöntemiyle elde edilen katsayılar matris haline getirilmiş ve Gauss-Seidel iteratif yöntemiyle bu matrisin çözümü yapılmıştır. Çözüm yapılırken sonuçların hızlı yakınsaması için, SOR (Successive over-relaxation) yöntemi kullanılmış ve yakınsama kriteri 10^{-9} 'dan düşük olarak belirlenmiştir.

COMSOL yazılımında farklı hava giriş bağıl nem değerleri için elde edilen hava çıkış konsantrasyonu değerlerinin MATLAB yazılımında elde edilen verilerle karşılaştırılması Şekil 7.5'te gösterilmiştir. Karşılaştırmada hava çıkış konsantrasyonu değerlerinin halka şeklindeki kanalın yarıçapına ($R_o - R_i$) göre değişimi incelenmiştir.



Şekil 7.5. COMSOL ve MATLAB yazılımlarında hava çıkış konsantrasyon değerleri

Şekilde çizgisel eğriler COMSOL yazılımında elde edilen değerleri, sembol eğriler ise MATLAB yazılımındaki eğrileri temsil etmektedir. Grafikte de görülebildiği gibi, tüm bağıl nem değerlerinde her iki yazılımda elde edilen sonuçlar birbirine oldukça yakındır. Literatürle de yapılan karşılaştırma göz önüne alınırsa COMSOL yazılımında yapılan analizin güvenilir olduğu sonucuna varılabilir.

7.3. Bulgular ve Tartışma

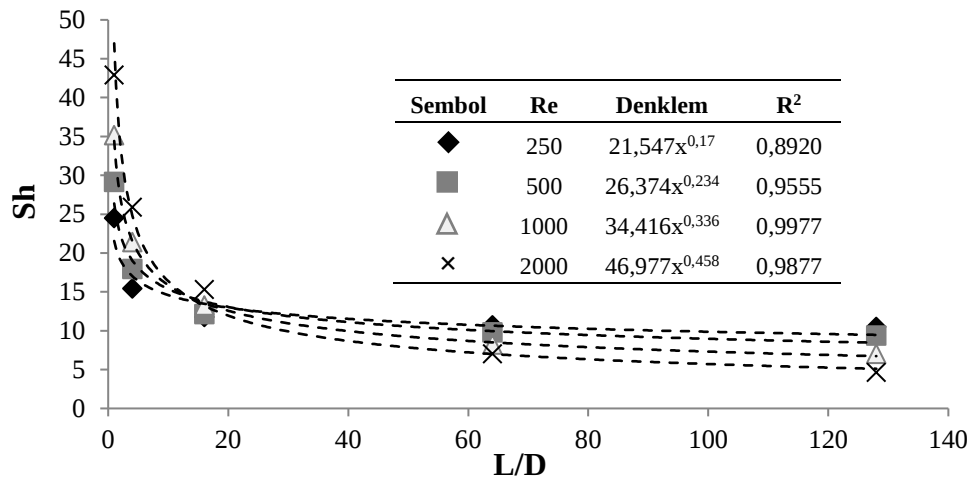
Bu çalışmada, COMSOL yazılımı kullanılarak, membranlı silindirik nem alma sisteminin paralel ve karşıt akış tiplerinde modellenmesi ve kütle transferi analizi yapılmıştır. Yapılan analizde hava tarafında Re sayısı olarak 250, 500, 1000 ve 2000, çözelti konsantrasyonu olarak literatürde en çok çalışılan %35, %40 ve %45 belirlenmiştir. Analizde, L/D ; 1, 4, 16, 64 ve 128, Sc sayısı; 0,68, 1,36, 2,2 ve 3,4 olarak seçilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan diğer parametreler ise Çizelge 7.4'te verilmiştir.

Çizelge 7.4. Hesaplamalarda kullanılan diğer parametreler

Parametre Adı	Sembol	Birim	Değer
Membran su buharı difüzyon katsayısı [19]	D_m	m^2/s	$3 \cdot 10^{-6}$
Hava su buharı difüzyon katsayısı [41]	D_h	m^2/s	$2,5 \cdot 10^{-5}$
Hava su buharı kütle transferi katsayısı [44]	k_a	m/s	$2,5 \cdot 10^{-2}$
Sıvı desikant su buharı kütle transferi katsayısı [43]	k_s	m/s	$4,204 \cdot 10^{-3}$
Membran çapının kanal çapına oranı	D/D_d	-	0,5
Membran kalınlığı	δ	mm	0,25
Ortam sıcaklığı	T	K	298
Antoine denklemi sabiti	A		16,3872
Antoine denklemi sabiti	B		3885,7
Antoine denklemi sabiti	C		230,15

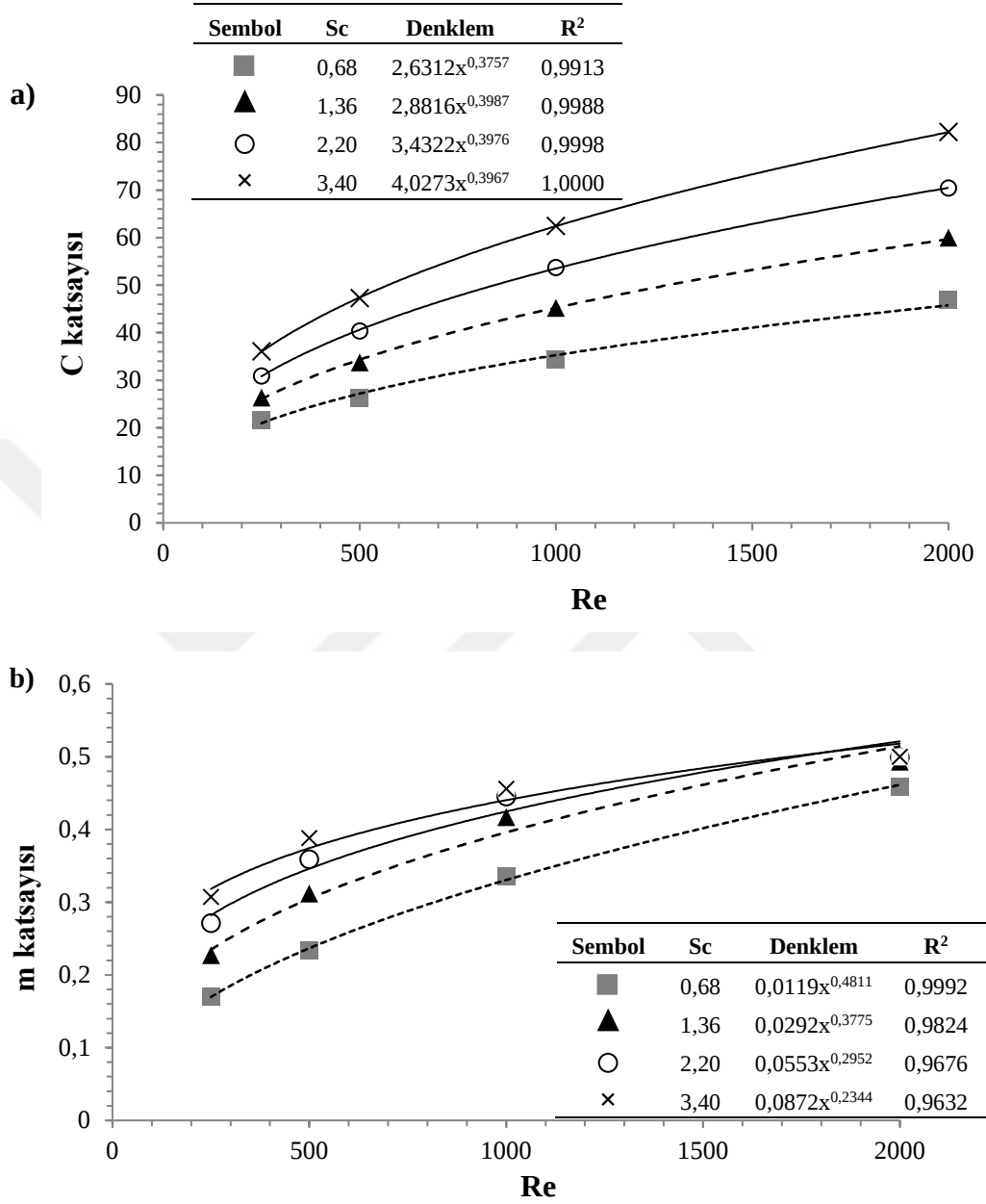
7.3.1. Paralel Akış

Sistemde paralel akışta, $Sc = 0,68$ için, farklı Re sayılarında Sh sayısının L/D oranıyla değişimi Şekil 7.6'da gösterilmiştir. Şekilde tüm Re sayılarında Sh sayısının L/D oranıyla azaldığı görülebilmektedir. Düşük L/D oranlarında konsantrasyon sınır tabakası gelişmediği için Sh sayısı yüksektir. Söz konusu durumda konsantrasyon sınır tabakasının kalınlığı da düşüktür. Uydurulan eğrilerin R^2 değeri, Sh sayılarının değişimine iyi uyum sağladığını göstermektedir.



Şekil 7.6. Paralel akışta farklı Re sayılarında Sh sayısının L/D ile değişimi ($Sc = 0,68$)

Şekil 7.6’da uydurulan eğrilere ait denklemlerin katsayılarının (C ve m), farklı Sc sayılarında Re sayısı ile değişimi ise Şekil 7.7’de gösterilmiştir.



Şekil 7.7. Paralel akışta kütle transferi eşitliğindeki katsayıların farklı Sc sayılarında Re sayısı ile değişimi a) C katsayısı, b) m katsayısı

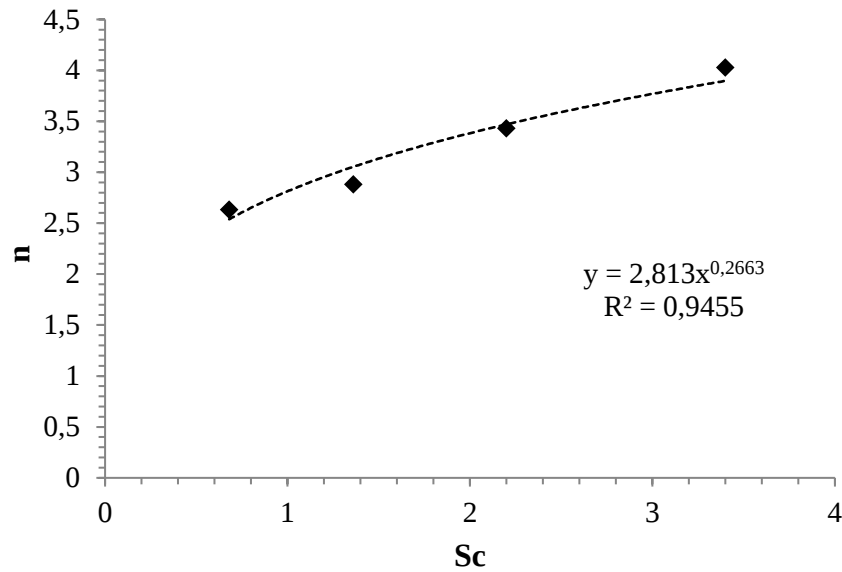
Şekil 7.7’de C ve m katsayıları için uydurulan eğrilerin R² değerlerine bakıldığında tüm durumlarda 1’e yakın oldukları görülebilmektedir. Bunun yanında Re sayısındaki artışın konveksiyon kütle transferi katsayısını yani Sh sayısını arttırdığı

görülebilmektedir. Paralel akışta, farklı Sc sayılarında Re sayısına ve L/D oranına bağlı elde edilen denklemler Çizelge 7.5'te özetlenmiştir.

Çizelge 7.5. Paralel akışta farklı Sc sayılarında Re sayısına ve L/D oranına bağlı elde edilen denklemler

Sc	Sh			
	Denklem	R^2	a	R^2
0,68	$2,6312 Re^{0,3757} \left(\frac{D}{L}\right)^a$	0,9913	$0,0119 Re^{0,4811}$	0,9992
1,36	$2,8816 Re^{0,3987} \left(\frac{D}{L}\right)^a$	0,9988	$0,0292 Re^{0,3775}$	0,9824
2,2	$3,4322 Re^{0,3976} \left(\frac{D}{L}\right)^a$	0,9998	$0,0553 Re^{0,2952}$	0,9676
3,4	$4,0273 Re^{0,3967} \left(\frac{D}{L}\right)^a$	1	$0,0872 Re^{0,2344}$	0,9632

Çizelge 7.5'te görülebileceği gibi Re sayılarının üstel katsayıları birbirlerine oldukça yakın olup söz konusu katsayılar tüm Sc sayıları için sabit kabul edilebilir. Bu sebeple Re sayısının kuvveti, yani m sayısı, yaklaşık 0,4 olacaktır. Bir sonraki adımda n katsayısının bulunabilmesi için Re sayılarının katsayılarının Sc sayısı ile değişimi Şekil 7.9'da gösterilmiştir.

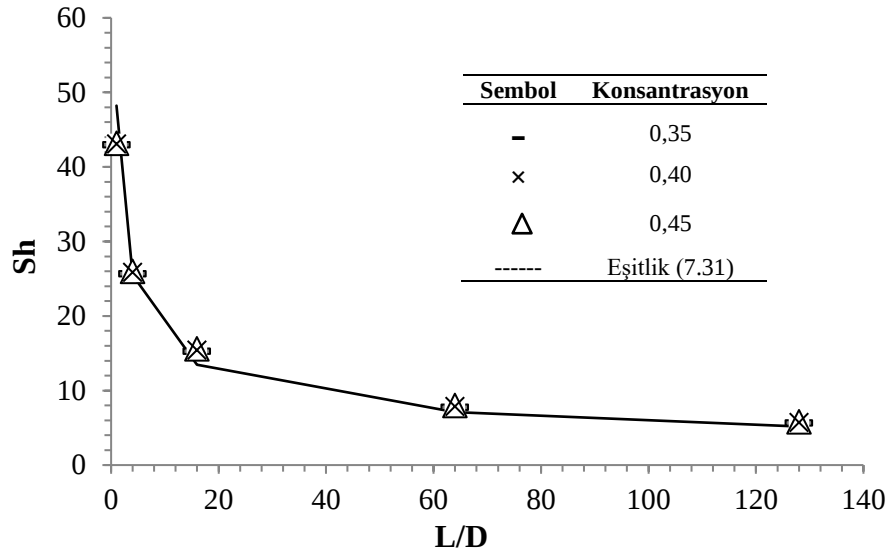


Şekil 7.8. Paralel akışta Re sayısı katsayılarının Sc sayısı ile değişimi

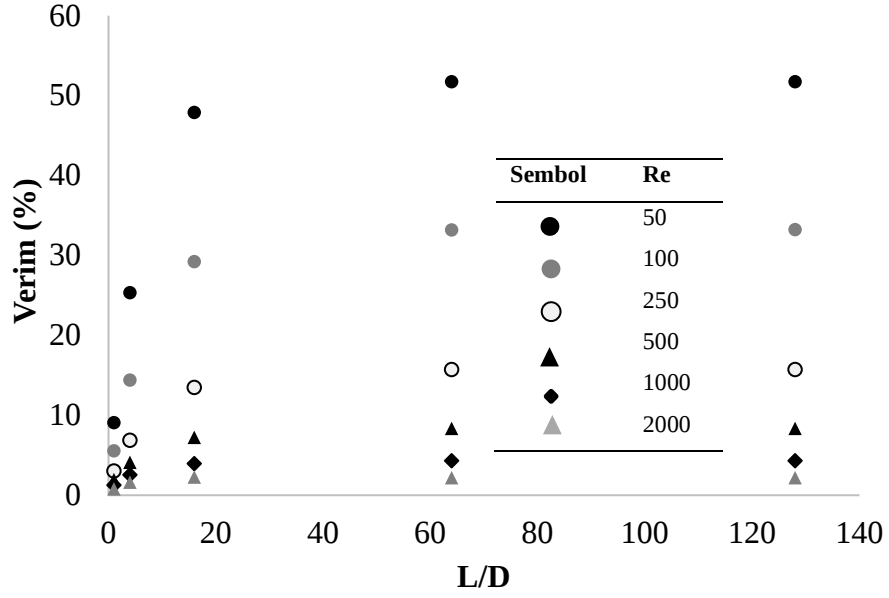
Şekil 7.8’de katsayının Sc sayısı ile arttığı görülebilmektedir. Üstel denkleme uydurulan eğrinin R^2 değeri ise 0,9455’tir. Yukarıdaki grafiğe göre eşitlik (7.22)’deki C katsayısının değeri yaklaşık 2,8, n katsayısının değeri ise yaklaşık 0,27 olacaktır. Kütle transferi eşitliğinin son hali, Re, Sc ve L/D ’ye bağlı olarak aşağıdaki gibi olacaktır.

$$Sh = 2,8Re^{0,4} \left(\frac{D}{L}\right)^a Sc^{0,27}, \quad a = 0,046Re^{1/3} \quad (7.31)$$

Paralel akış tipinde eşitlik (7.31)’de elde edilen kütle transferi denklemi, farklı sıvı desikant konsantrasyonları ile elde edilen Sh sayıları ile Şekil 7.9’da karşılaştırılmıştır. Eşitlik (7.31) ile farklı konsantrasyonlar için elde edilen grafikler 0,9964 R^2 mertebesinde birbirlerine yakın olduklarından, eşitlik (7.31)’in konsantrasyon değerinden bağımsız olduğu kabul edilebilir.



Şekil 7.9. Paralel akışta kütle transferi için elde edilen denklemin farklı konsantrasyon değerleri için doğrulanması



Şekil 7.10. Paralel akışta farklı Re sayılarında nem alma veriminin L/D oranıyla değişimi

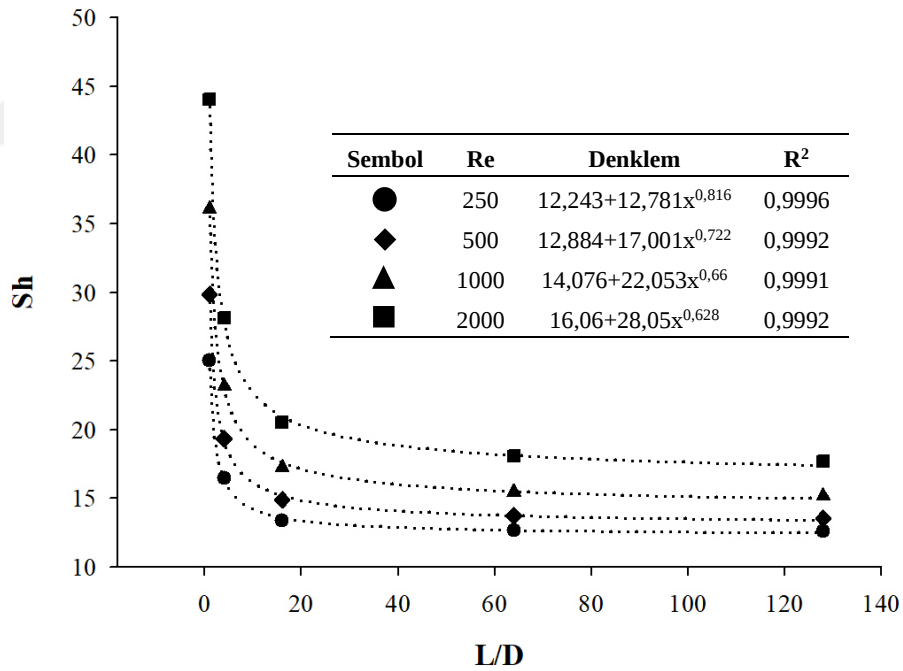
Şekil 7.10'da ise paralel akışta farklı Re sayılarında nem alma veriminin L/D oranıyla değişimi gösterilmiştir. Sistemde L/D oranının artması hava-sıvı desikant temas süresini arttıracığından nem alma verimi artmaktadır. Tasarlanan sistemde en yüksek verimin araştırılabilmesi için $Re = 50$ ve $Re = 100$ için de sistemin analizi yapılmıştır. Düşük Re sayılarında havanın çıkış konsantrasyonu, havanın sistemde kalma süresi arttığından, azalmaktadır. Nem alma verimi tüm Re sayılarında $L/D = 40$ civarına kadar hızlı bir şekilde artmış fakat söz konusu L/D oranından sonra verimde herhangi bir değişim olmamıştır. Tasarlanan sistemin optimum L/D oranının 40 olduğu görülmektedir.

7.3.2. Karşıt Akış

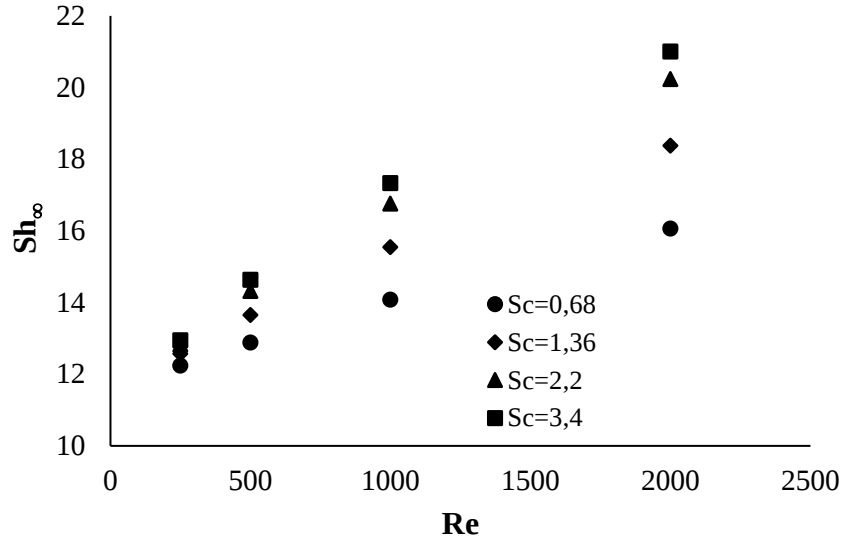
Membranlı boru tipi sıvı desikant nem alma sisteminde, karşıt akış için analiz yapılırken, eşitlik (7.22)'den yararlanılarak hesaplanan Sh sayıları, COMSOL yazılımında elde edilen Sh sayıları ile yeterli hassasiyette uyum göstermemiştir. Bu sebeple, karşıt akış tipi için aşağıdaki eşitlik önerilmiştir:

$$Sh = Sh_{\infty} + C Re^m Sc^n \quad (7.32)$$

Burada Sh_{∞} , belirlenen Re ve Sc sayısı aralıklarında, (sırasıyla [250; 2000] ve [0,68; 3,4]) L/D oranı sıfıra yaklaşırken, sistemin alabileceği en küçük Sh sayısı değeridir. Söz konusu sayının ve eşitlikteki diğer bilinmeyen C, m ve n parametrelerinin bulunabilmesi için, paralel akışta olduğu gibi, Sh sayısının L/D ile değişiminin belirlenmesi gerekmektedir. Bu değişim, Şekil 7.11'deki grafikte gösterilmiştir. Şekilde de görülebileceği gibi, düşük L/D oranlarında konsantrasyon sınır tabakası gelişmediğinden Sh sayıları karşıt akışta da büyüktür. Uydurulan eğrilerin R^2 değerleri oldukça yüksek olup, söz konusu eğrilerin COMSOL ile elde edilen Sh sayılarına iyi uyum sağladığını göstermektedir. Eşitlik (7.32)'deki Sh_{∞} sayısının belirlenebilmesi için Şekil 7.11'de elde edilen denklemlerde üstel ifadelerle toplanan sabit değerlerin, belirlenen tüm Sc sayılarında, Re sayısı ile değişiminin bulunması gerekmektedir. Bu değişim ise Şekil 7.12'deki gibi olacaktır.

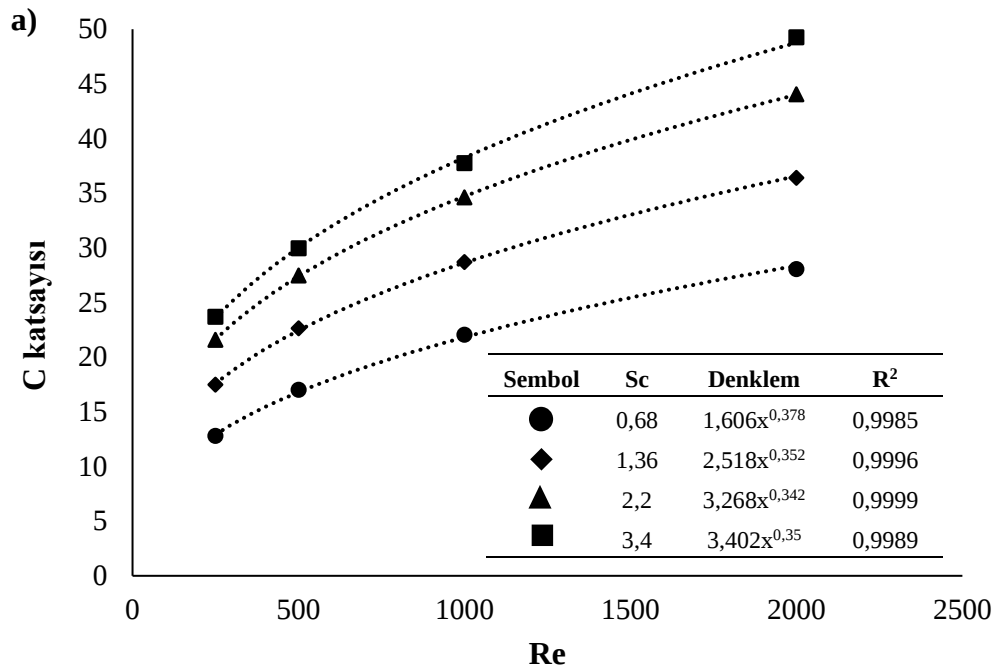


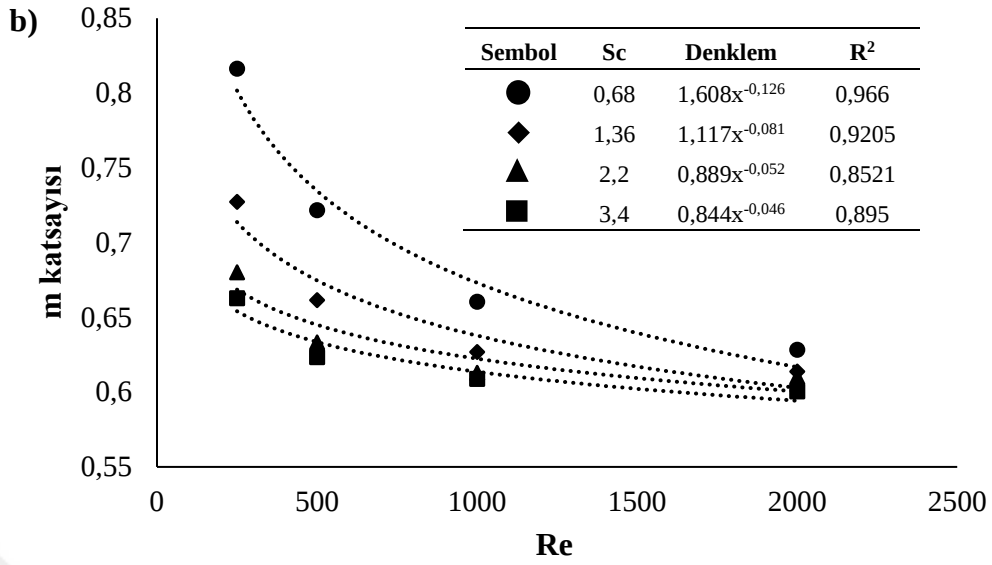
Şekil 7.11. Karşıt akışta farklı Re sayılarında Sh sayısının L/D ile değişimi ($Sc = 0,68$)



Şekil 7.12. Karşıt akışta farklı Sc sayılarında Sh_{∞} değerlerinin Re sayısı ile değişimi

Şekil 7.12’de Sh_{∞} değerlerinin, belirlenen tüm Sc sayılarında, Re sayısı küçüldükçe aynı sabit sayıya, yani elde edilen en küçük Sh_{∞} değerine doğru yakınsadığı görülmektedir. Bu sebeple Sh_{∞} değeri olarak Şekil 7.11’de elde edilen 12,243 değeri kabul edilebilir. Sh_{∞} değeri bulunduktan sonra eşitlik (7.32)’deki diğer bilinmeyen katsayılar paralel akışta uygulanan yöntemle hesaplanacaktır. İlk olarak, eşitlikteki C ve m katsayılarının farklı Sc sayılarında Re sayısı ile değişimi Şekil 7.13’te gösterilmiştir.





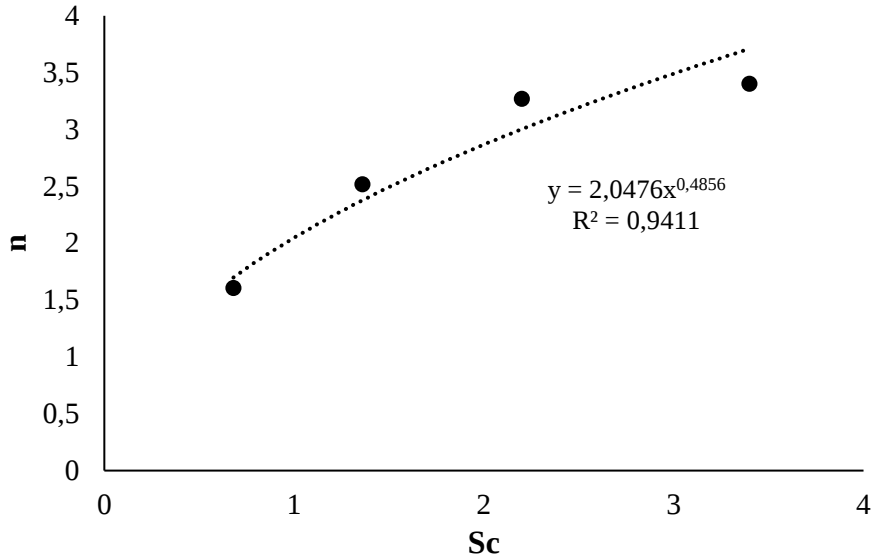
Şekil 7.13. Karşıt akışta kütle transferi eşitliğindeki katsayıların farklı Sc sayılarında Re sayısı ile değişimi a) C katsayısı, b) m katsayısı

Şekil 7.13'te, özellikle C katsayısı için uydurulan eğrilerin R^2 değerlerine bakıldığından 1'e oldukça yakın oldukları görülebilmektedir. Re sayısının artması karşıt akışta da konveksiyonla gerçekleşen kütle transferini arttıracığından Sh sayıları artmaktadır. Karşı akışta Sh sayısı için, farklı Sc sayılarında Re sayısına ve L/D oranına bağlı elde edilen denklemler Çizelge 7.6'da özetlenmiştir.

Çizelge 7.6. Karşıt akışta farklı Sc sayılarında Re sayısına ve L/D oranına bağlı elde edilen denklemler

Sc	Sh			
	Denklem	R ²	a	R ²
0,68	$1,606 Re^{0,378} \left(\frac{D}{L}\right)^a$	0,9985	$1,608 Re^{-0,126}$	0,966
1,36	$2,518 Re^{0,352} \left(\frac{D}{L}\right)^a$	0,9996	$1,117 Re^{-0,081}$	0,9205
2,2	$3,268 Re^{0,342} \left(\frac{D}{L}\right)^a$	0,9999	$0,889 Re^{-0,052}$	0,8521
3,4	$3,402 Re^{0,35} \left(\frac{D}{L}\right)^a$	0,9989	$0,844 Re^{-0,046}$	0,895

Çizelge 7.6’da Re sayılarının kuvvetlerinin birbirine oldukça yakın oldukları görülebilmektedir. Bu sebeple Re sayısının kuvveti yani m katsayısı, elde edilen kuvvetlere yakın olacak şekilde, 0,36 olarak kabul edilebilir. Eşitlik (7.32)’deki n katsayısının bulunabilmesi için, Re sayısı katsayılarının Sc sayısı ile değişimi Şekil 7.14’te gösterilmiştir.



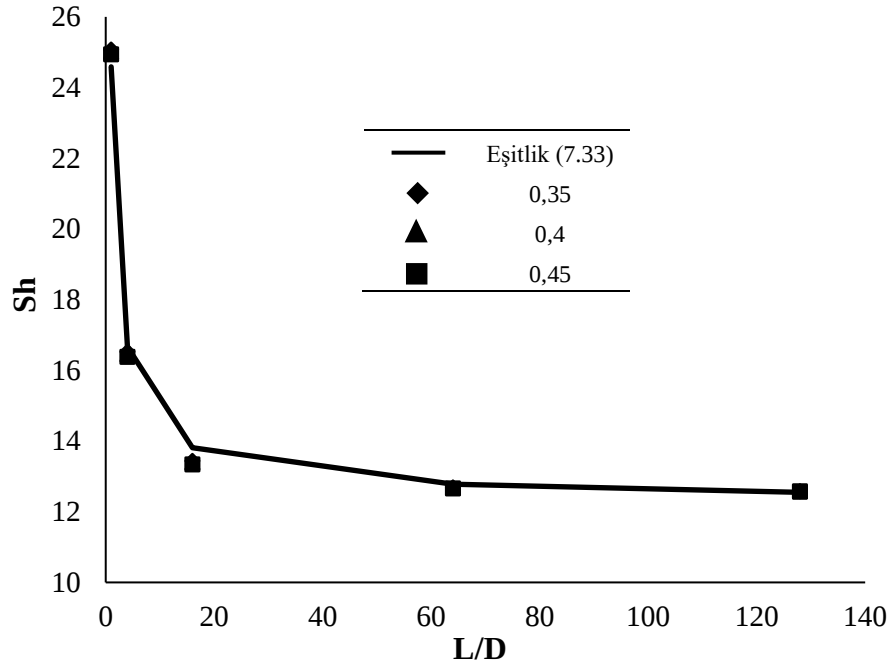
Şekil 7.14. Karşıt akışta Re sayısı katsayılarının Sc sayısı ile değişimi

Şekil 7.14’te elde edilen değerlere uydurulan eğrinin R^2 değerinin 0,9411 olduğu görülmektedir. Burada Re sayısının katsayısı, C ’nin, yaklaşık 2,05 ve n katsayısının değerinin yaklaşık 0,49 olduğu anlaşılmaktadır. Hesaplanan katsayılar göre karşıt akışta Sh sayısı için genel ifade aşağıdaki eşitlikteki gibi olacaktır:

$$Sh = 12,243 + 2,05 Re^{0,36} \left(\frac{D}{L}\right)^a Sc^{0,49}, \quad a = 1,12 Re^{-0,076} \quad (7.33)$$

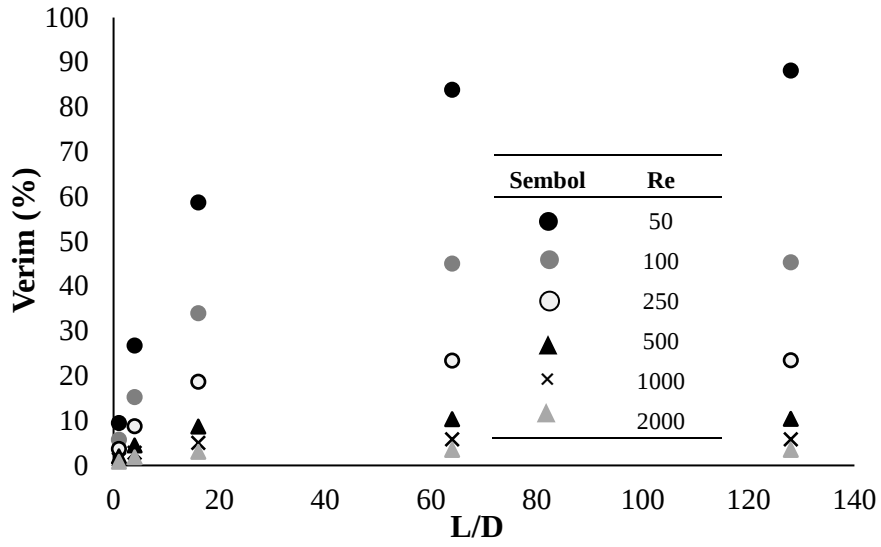
Eşitlik (7.33)’te a katsayısı Çizelge 7.6’da belirlenen a değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Söz konusu eşitlik ile elde edilen Sh sayıları, farklı sıvı desikant çözeltisi konsantrasyonlarında COMSOL yazılımında elde edilen Sh sayıları ile Şekil 7.15’te karşılaştırılmıştır. Grafikte de görülebileceği gibi karşıt akış için önerilen eşitlik, tüm konsantrasyon değerlerinde, COMSOL yazılımında hesaplanan Sh sayısı

değerlerine oldukça yüksek hassasiyette uyum sağlamıştır. Sh sayısının, karşıt akışta da sıvı desikant konsantrasyonundan etkilenmediği anlaşılmaktadır.

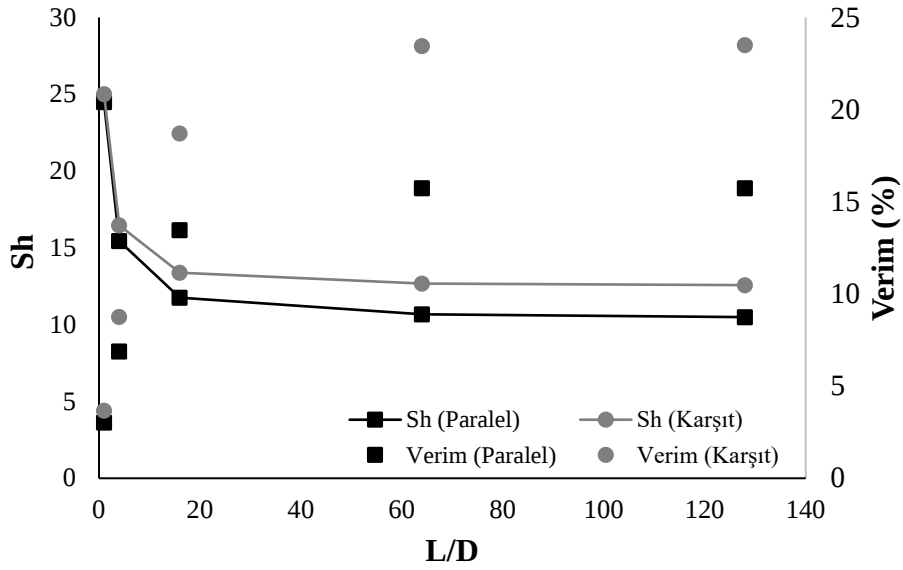


Şekil 7.15. Karşıt akışta kütle transferi için elde edilen denklemin farklı konsantrasyon değerleri için doğrulanması

Sistemde karşıt akışta, farklı Re sayılarında nem alma veriminin L/D oranıyla değişimi ise Şekil 7.16'da gösterilmiştir. Aynı L/D oranında Re sayısı arttıkça hava-desikant temas süresi azalacağından nem alma verimi azalmaktadır. Bu sebeple en yüksek nem alma verimi, 50 Re sayısında ve $L/D = 128$ için, %89 civarında elde edilmiştir. Paralel akışta olduğu gibi, $L/D = 40$ değerinden sonra nem alma veriminde önemli bir değişiklik olmamaktadır. Bu sebeple karşıt akışta da sistemin optimum L/D oranının 40 olduğu söylenebilir.



Şekil 7.16. Karşıt akışta farklı Re sayılarında nem alma veriminin L/D oranıyla değişimi



Şekil 7.17. Paralel ve karşıt akışta Sh sayılarının ve nem alma verimlerinin karşılaştırılması ($Sc = 0,68$, $Re = 250$)

Sistemde belirli bir Re ve Sc sayısında, her iki akış tipinde hesaplanan Sh sayısı ve nem alma verimi değerleri Şekil 7.17'de karşılaştırılmıştır. Belirlenen Re ve Sc sayılarında her iki akış tipinde elde edilen Sh sayılarının arasında önemli bir fark görünmemektedir. Verim değerlerinde ise iki akış tipi arasındaki fark daha büyük olup karşıt akışta en yüksek verim %23 civarında elde edilirken, paralel akışta yaklaşık %15

olarak bulunmuştur. Hesaplanan verim ve Sh değerleri, sistemin kütle transferi performansının karşıt akışta paralel akışa göre daha iyi olduğunu göstermektedir.

7.4. Sonuç

Bu çalışmada membranlı silindirik nem alma sisteminin COMSOL yazılımı kullanılarak paralel ve karşıt akışta, kütle transferi analizi yapılmış ve kütle transferi için L/D oranına, Re sayısına ve Sc sayısına bağlı eşitlikler elde edilmiştir. Elde edilen eşitliklerin farklı çözelti konsantrasyonları için doğrulaması yapılmıştır.

Sistemde her iki akış tipinde nem alma verimi Re sayısına ve L/D oranına bağlı olup düşük Re sayısında (50), paralel akışta yaklaşık %50, karşı akışta ise yaklaşık %89 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan verim ve Sh sayısı değerleri, sistemin kütle transferi performansının karşıt akışta daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bunun yanında, paralel ve karşıt akışta nem alma verimi belirli bir L/D oranına kadar hızlı bir şekilde artmış daha sonra dengeye ulaşarak sabit kalmıştır. Her iki akış tipi için optimum L/D oranı yaklaşık 40 olarak tespit edilmiştir.

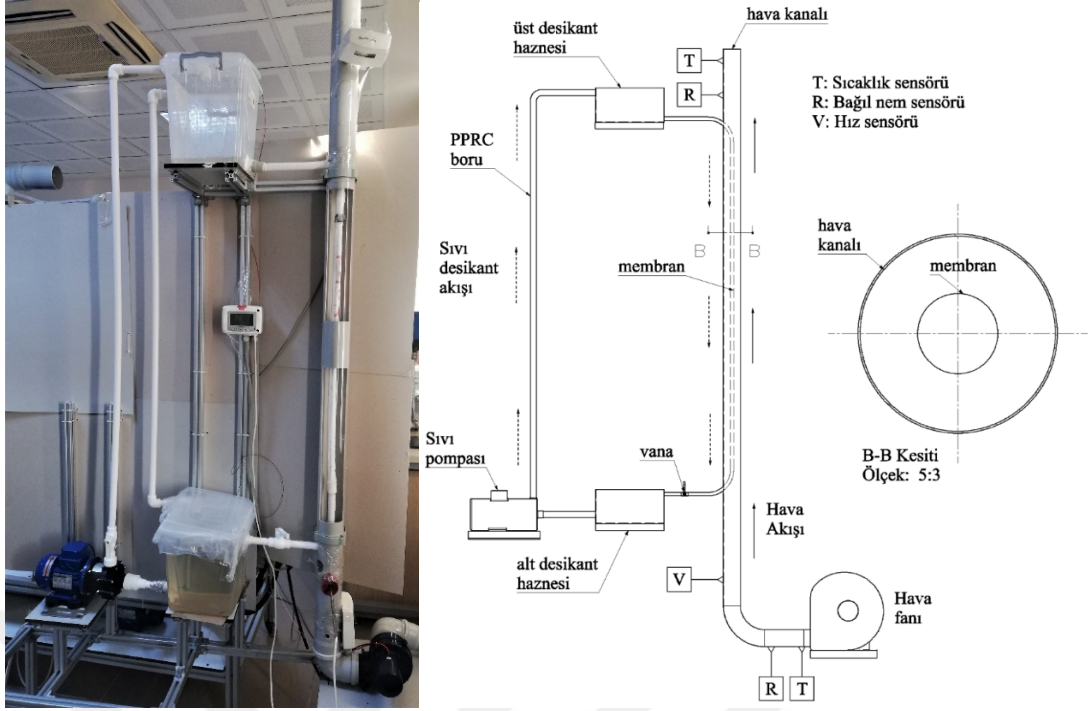
8. MEMBRANLI BORU-TİPİ SIVI DESİKANT NEM ALMA SİSTEMİNİN DENEYSEL DOĞRULAMASI

8.1. Giriş

Deneysel çalışmada, membranlı boru-tipi sıvı desikant nem alma sistemini deneysel olarak doğrulamak ve membranlı sistemi pratik olarak test etmek amaçlanmıştır. Bu sebeple öncelikle deney düzeneği hazırlanarak deneyler gerçekleştirilmiş daha sonra COMSOL yazılımında membranlı boru-tipi sıvı desikant nem alma sistemi deney düzeneğine uygun boyutlarda modellenerek analiz edilmiştir. Deneysel ve numerik sonuçlar birbiriyle karşılaştırılarak COMSOL modelinin doğrulaması yapılmıştır. Daha sonra COMSOL modelinde Sh sayıları hesaplanarak kütle transferi katsayısı için Re sayısına, L/D oranına ve Sc sayısına bağlı eşitlik elde edilmiştir.

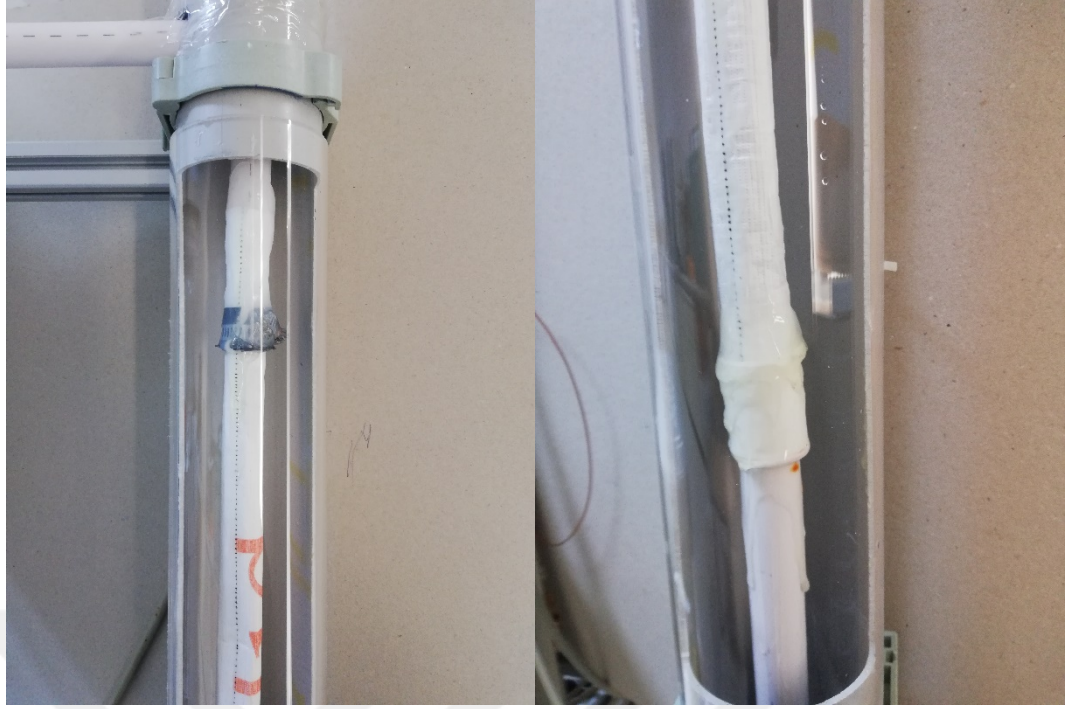
8.2. Deney Düzeneğinin Modellenmesi ve Deneysel Analiz

Oluşturulan deney düzeneği ve şematik gösterimi Şekil 8.1’de sunulmuştur. Şekilde de görülebileceği gibi, sistem temel olarak, alt ve üst olmak üzere iki adet desikant haznesinden, bir adet sıvı pompasından, bir adet hava fanından, boru tipi membrandan ve desikant taşınımında kullanılan PPRC boru ve boru elemanlarından, bir adet PVC hava kanalından ve çeşitli sensörlerden oluşmaktadır. Deney düzeneğinde kullanılan malzemelerden daha ayrıntılı olarak ileriki bölümlerde bahsedilmiştir.



Şekil 8.1. Deney düzeneği ve şematik gösterimi

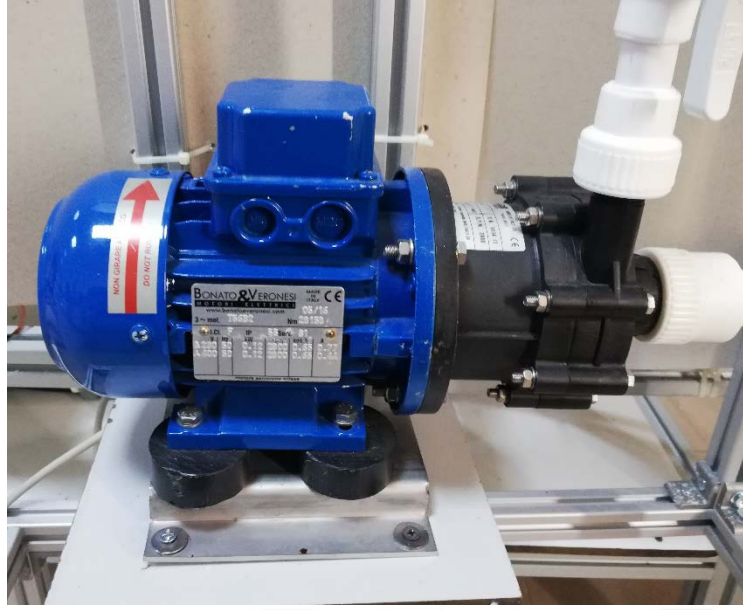
Sistemde sıvı desikant çözeltisi sıvı pompası yardımıyla alt desikant haznesinden üst desikant haznesine taşınmaktadır. Deney başlangıcında alt taraftaki vana kapatılıp, desikant geçişi engellenerek, çözeltinin üst desikant haznesine bir miktar dolması sağlanmaktadır. Daha sonra vana bir miktar açılıp çözelti, yer çekimi etkisiyle, üst hazneden alt hazneye akarken, hava fanı yardımıyla hava kanalından yukarıya doğru hava gönderilmektedir. Sistemde membran hava kanalının içersine, hava kanalı ile eş-merkezli olacak şekilde yerleştirilmiştir. Membran alt ve üst kısımlarından PPRC boruya Şekil 8.2’deki gibi monte edilmiştir. Sızdırma olmaması için membran PPRC boruya üst kısmından kelepçeyle, alt kısmından ise boru kaynağı ile tutturulmuş ve sıvı yapıştırıcı, silikon gibi malzemelerle desteklenmiştir.



Şekil 8.2. Membranın hava kanalı içerisinde PPRC boruya sabitlenmesi

Sistemde desikant sirkülasyonu için 20 mm çaplı PPRC borularla birlikte aynı çapta dirsek, küresel vana ve manşon gibi bağlantı elemanları da kullanılmıştır. Hava kanalı için, hava fanı çıkış çapına uyumlu olacak şekilde, 72 mm iç çapında PVC boru kullanılmıştır. Söz konusu PVC borunun belirli bir kısmı kesilerek, kesilen kısma gerektiğinde membrana müdahale edilebilmesi için, şeffaf dairesel pleksiglas parça monte edilmiştir (Şekil 8.2).

Membranlı boru tipi nem alma sistemi deney düzeneğinde sıvı pompası olarak, Şekil 8.3'te görülen, “GEMMECOTTI HTM 4 PP” marka/model manyetik kaplinli korozyona dayanıklı santrifüj pompa kullanılmıştır. Seçilen pompanın 50 Hz frekansta maksimum basma yüksekliği 7 m, maksimum gücü ise 0,12 kW olup diğer teknik özellikleri ve pompa karakteristik eğrileri EK-C’de verilmiştir. Sistemde sıvı pompası, çalışma frekansının ayarlanabilmesi için, otomatik kontrol ünitesine bağlanmıştır. Bu şekilde üst hazne ile alt hazne arasında sıvı dengesi sağlanarak, herhangi bir taşma veya sıvı seviyesinin aşırı azalması gibi problemlerin önüne geçilmiştir.

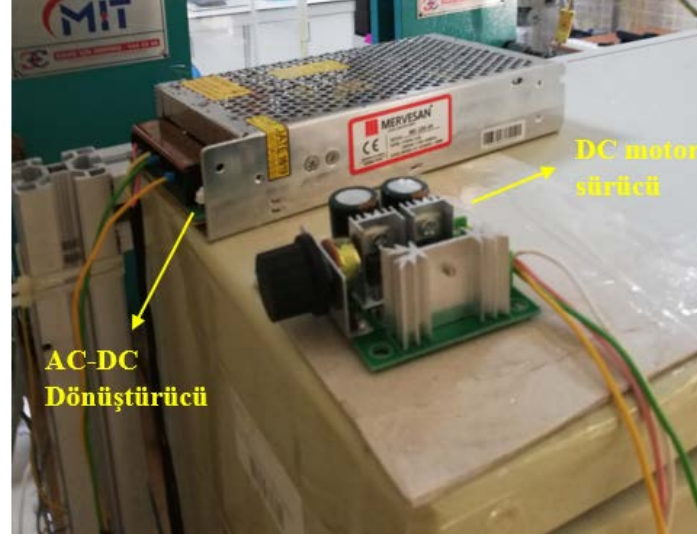


Şekil 8.3. Sıvı pompası

Sistemde hava fanı olarak “TMC Salyangoz Blower (24V, 3679 L/dk)” marka/model kullanılmıştır (Şekil 8.4, EK-D). Kullanılan hava fanının gücü 60 W olup doğru akımla (DC) tahrik edilebilmektedir. Herhangi bir doğru akım kaynağı bulunmadığından, Şekil 8.5’teki alternatif akımı (AC) doğru akıma dönüştüren adaptör (AC-DC dönüştürücü) yardımıyla kullanılmıştır. Hava fanı çalışma frekansının ayarlanabilmesi için DC motor sürücüsü bağlantısı yapılmıştır.



Şekil 8.4. Hava fanı



Şekil 8.5. AC-DC dönüştürücü ve DC sürücü

Sistemde havadan alınan nem miktarının belirlenebilmesi için bazı noktalara sensörler yerleştirilmiştir. Şekil 8.1’de de görülebileceği gibi havanın girişteki ve çıkıştaki bağıl nem ve sıcaklığının ölçülebilmesi için söz konusu noktalara VAISALA HMT120 marka/model sensör yerleştirilmiştir. Havanın kanaldaki maksimum hızının ölçümü için KIMO-CTV210 hız sensörü kullanılmıştır. Desikantın membran giriş/çıkış sıcaklığının ölçümü ise alt ve üst desikant haznelere yerleştirilen K-tipi ısıl çiftlerle yapılmıştır. Deneyler yapılırken Testo 881 marka/model termal kamera ile membrandan görüntü alınarak sıcaklık değişimi gözlenmiştir. Kullanılan sensörlerin hassasiyet değerleri ve ölçüm aralıkları Çizelge 8.1’de verilmiştir.

Çizelge 8.1. Sensörlerin ölçüm aralıkları ve hassasiyetleri

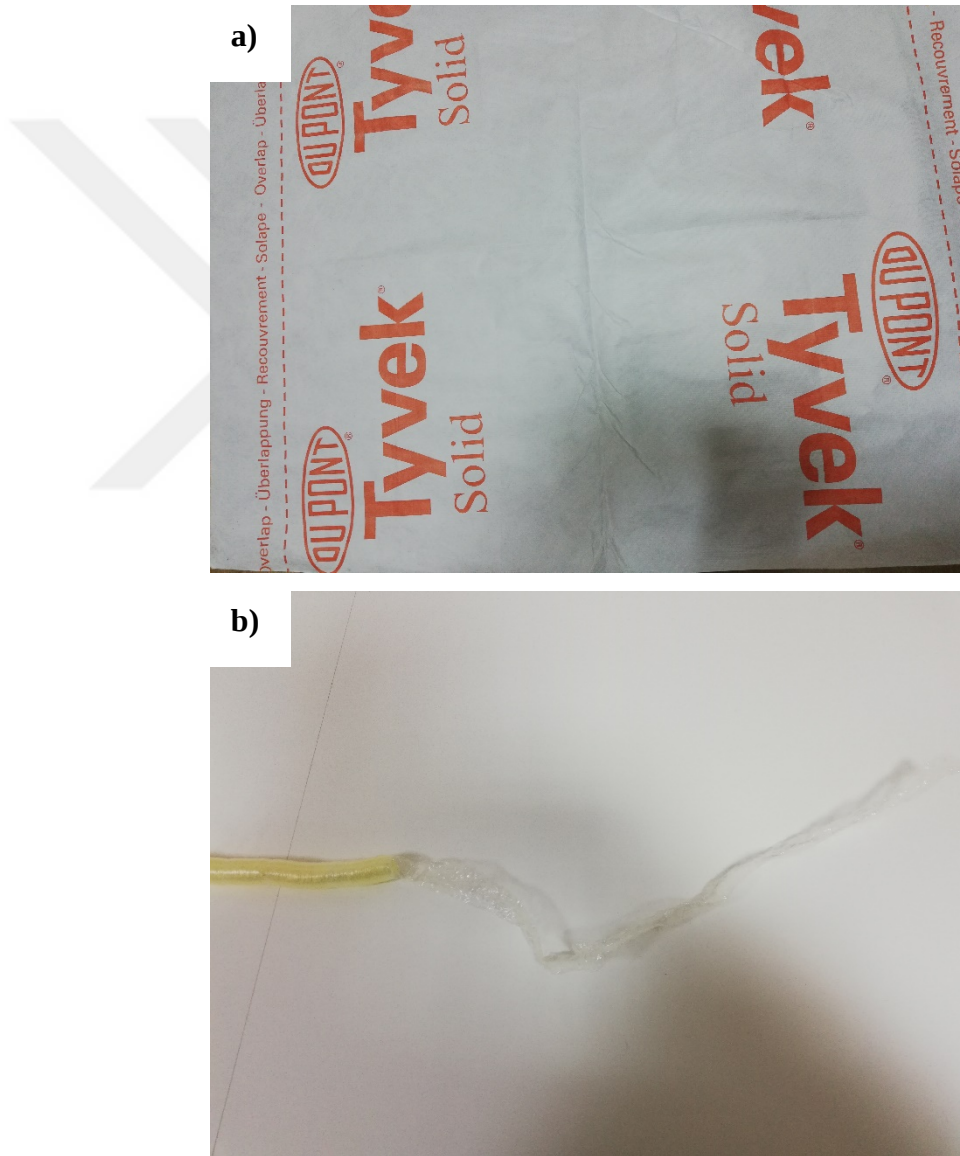
Ölçüm Aleti	Ölçülen Parametre	Ölçüm Aralığı	Hassasiyet
VAISALA HMT120	Bağıl Nem	0-100 %	$\pm 1,5$
	Sıcaklık	$(-40)-(+80) ^\circ\text{C}$	$\pm 0,2 ^\circ\text{C}$
KIMO-CTV210	Hız	0-30 m/s	$\pm 0,3$
K-tipi ısıl çift	Sıcaklık	0-1100 $^\circ\text{C}$	$\pm 2,2$
Testo 881	Sıcaklık	$(-30)-(+100) ^\circ\text{C}$	$\pm 2 ^\circ\text{C}$

Deney düzeneğinde sıvı pompasının frekansı SCADA otomatik kontrol programıyla kontrol edilmiştir. Ayrıca deney düzeneğinde bulunan sensörler de programa

bağlanarak veriler anlık olarak bilgisayar üzerinden takip edilmiş ve deney bitiminde ölçüm verileri bilgisayara “EXCEL” dosyası uzantısı olarak kaydedilmiştir.

8.2.1. Deney Düzeneginde Kullanılan Membranlar ve Difüzyon Katsayıları

Membranlı boru-tipi sıvı desikant nem alma deney düzeneginde Tyvek® Solid ve suni kılıf olmak üzere iki farklı membran kullanılmıştır. Kullanılan membranlar Şekil 8.6’da gösterilmiştir.

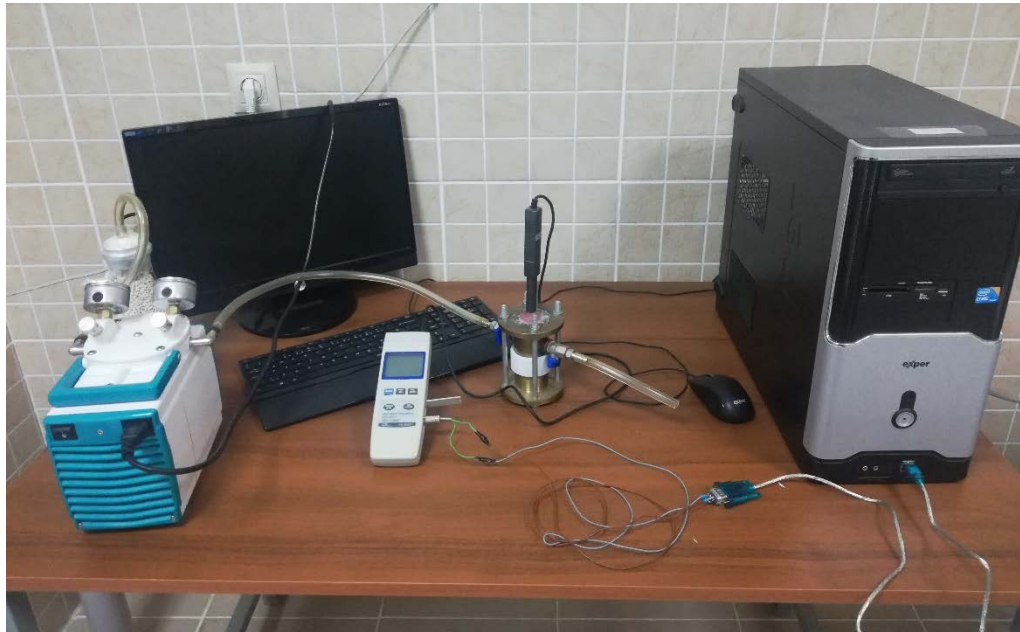


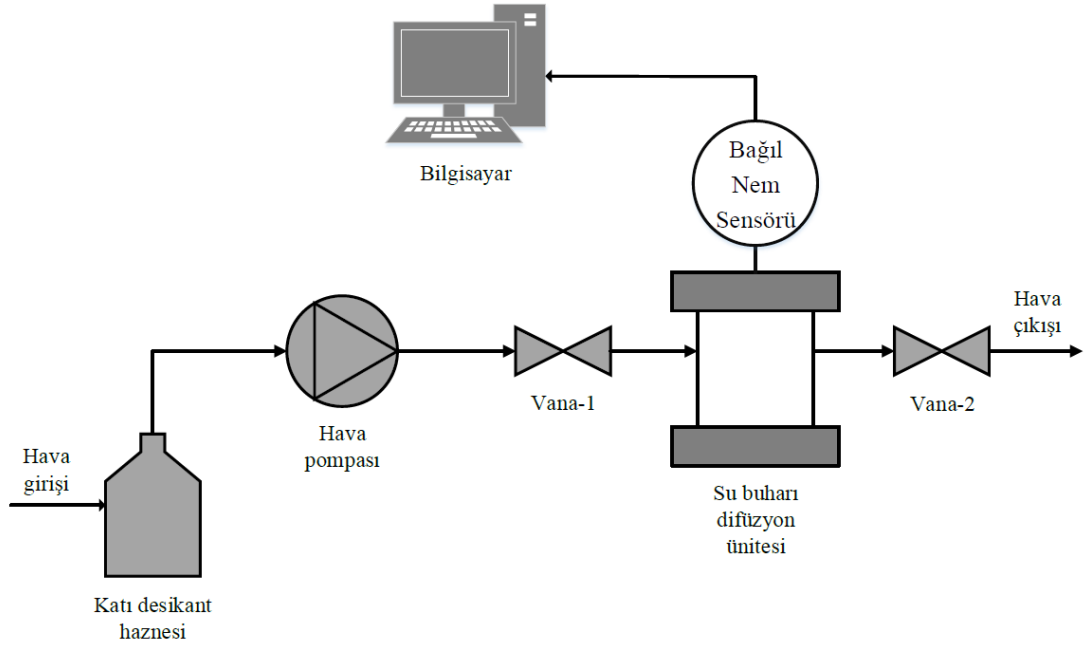
Şekil 8.6. Deney düzeneginde kullanılan membranlar: a) Tyvek® Solid, b) suni kılıf

Tyvek® Solid, Dupont markasının ürettiği membranın ticari adıdır. Genellikle yapı sektöründe su yalıtımı amacıyla kullanılmaktadır. Bu membran, yüksek yoğunluklu polietilen malzemeden üretilmiş olup birim alanda 82 gr kütle ve yaklaşık 220 µm kalınlığa sahiptir [45]. Tyvek® Solid membran, düz yaprak şeklinde temin edildiğinden, belirlenen çap ve uzunlukta, dikilip yapıştırılarak silindir haline getirilmiştir (Şekil 8.6a).

Suni kılıf ise gıda sektöründe, sosis, sucuk, salam v.b. üretiminde doğal bağırsak yerine kullanılmaktadır. Kullanıldığı uygulamadan ötürü, üründe ağırlık kaybının azaltılması ve bozulmanın önlenmesi için, su buharı ve oksijen geçirgenliği düşüktür [46]. Suni kılıf silindirik şekilde temin edildiğinden herhangi bir müdahalede bulunulmadan deney düzeneğinde kullanılmıştır.

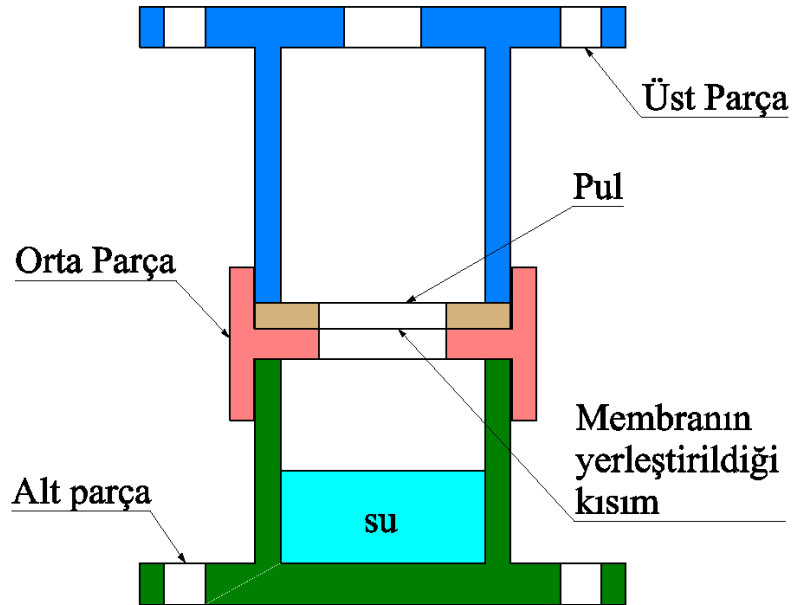
Temin edilen membranların teorik hesaplamalarda kullanılmak üzere su buharı difüzyon katsayıları deneysel olarak hesaplanmıştır. Bunun için hazırlanan deney düzeneği ve şematik gösterimi Şekil 8.7’de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi deney düzeneği, bir adet vakum pompası, bir adet katı desikant haznesi, su buharı difüzyon ünitesi ve bağıl nem sensöründen oluşmaktadır. Bağıl nem sensöründen alınan ölçümler anlık olarak bilgisayara “RS232 Data Logger” yazılımı ile kaydedilmiştir.





Şekil 8.7. Su buharı difüzyon ölçüm deney düzeneği

Deney düzeneğindeki su buharı difüzyon ünitesinin kesit görünümü ise Şekil 8.8’de gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılabileceği gibi su buharı difüzyon ünitesi, alt parça, orta parça, pul ve üst parça olmak üzere dört kısımdan oluşmaktadır. Deneyde alt parçaya bir miktar su konulmaktadır. Difüzyon katsayısı ölçülecek membran ise, uygun boyutlarda hazırlanarak, pul ile orta parça arasına sıkıştırılmaktadır.



Şekil 8.8. Su buharı difüzyon ünitesi kesit görünümü

Deneyde öncelikle vakum pompası çalıştırılarak katı desikant haznesinden kuru hava çekilir. Bu durumda her iki vana da açıktır. Alınan kuru hava, su buharı difüzyon ünitesinin üst kısmına bağıl nem değeri %25-30 arasına düşünceye kadar verilir. İstenen bağıl nem değeri elde edildikten sonra her iki vana ve pompa kapatılır. Burada üst kısım ile alt kısım arasındaki bağıl nem farkı oldukça yüksek olduğundan, alt kısımdan üst kısma doğru membran üzerinden su buharı geçişi başlar. Bağıl nem sensöründe ölçülen değer %70-75 civarına ulaştığında deney sonlandırılıp veriler bilgisayara kaydedilir.

Membranların difüzyon katsayısı belirlenirken deney düzeneğinde ölçülen bağıl nem değerleri kullanılacaktır. Membranın su buharı geçirgenliği (SBG) aşağıdaki eşitlikle tarif edilmiştir:

$$SBG = \frac{(df_{ln}/dt) \cdot V \cdot \delta}{A \cdot R \cdot T} \quad (8.1)$$

Burada, f_{ln} boyutsuz basınç oranını, t zamanı (sn), V difüzyon ünitesi iç hacmini (cm^3), δ membran kalınlığını (cm), A membran kesit alanını (cm^2), R evrensel gaz sabitini ($8,314 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/(\text{mol} \cdot \text{K})$) ve T ise sıcaklığı (K) ifade etmektedir. Boyutsuz basınç oranı ise aşağıdaki eşitlikle bulunmuştur:

$$f_{ln} = \ln \left(\frac{P_{sat} - P_0}{P_{sat} - P_i} \right) \quad (8.2)$$

Eşitlik (8.2)'de P_{sat} havanın belirlenen sıcaklıktaki doyma basıncını (Pa), P_0 havanın ilk durumdaki buhar basıncını (Pa) ve P_i havanın herhangi bir andaki buhar basıncını (Pa) temsil etmektedir. Burada P_i eşitlik (8.3) ile belirlenecektir:

$$P_i = P_{sat} \cdot \phi \quad (8.3)$$

Yukarıdaki eşitlikte ϕ havanın bağıl nem değeridir. Eşitlik (8.3)'te P_{sat} değeri sıcaklık değişmediği sürece sabit kalacaktır. Fakat difüzyon ünitesinde havanın bağıl nem değeri %25-30 civarından %70-75 civarına kadar arttığı için P_i değeri de artacaktır. Su

buharının havadaki çözünürlüğü de burada önemli bir parametre olup eşitlik (8.4) ile hesaplanmıştır:

$$S_v = \frac{P_{i,max}}{R \cdot T \cdot P_{sat}} \quad (8.4)$$

Burada, $P_{i,max}$ havanın deney süresince ulaştığı en yüksek buhar basıncı (Pa) değeridir. Membranın difüzyon katsayısı ise eşitlik (8.5) ile tanımlanmıştır:

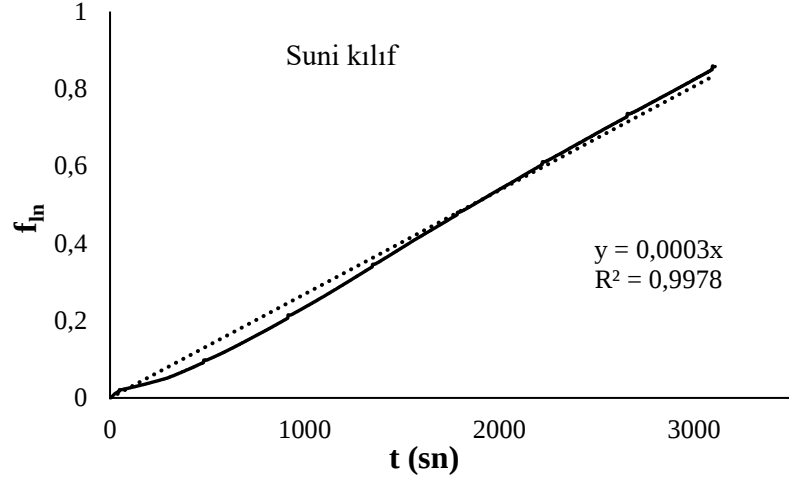
$$D_m = \frac{SBG}{S_v} \quad (8.5)$$

Deney düzeneğinde kullanılan membranların difüzyon katsayılarının belirlenebilmesi için yapılan deneylerdeki parametreler Çizelge 8.2’de verilmiştir.

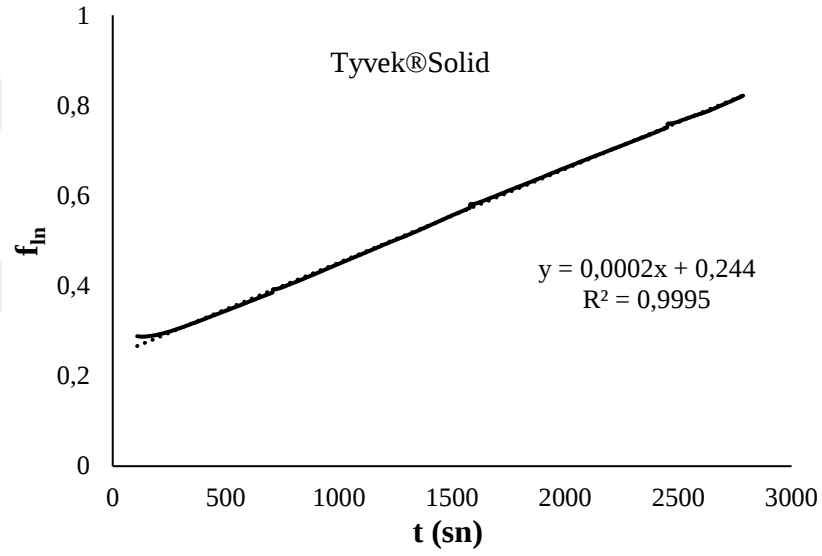
Çizelge 8.2. Difüzyon deneyi parametreleri

Parametre	Birim	Suni kılıf	Tyvek® Solid
Difüzyon ünitesi iç hacmi, V	cm^3	61,86	61,86
Membran kesit alanı, A	cm^2	5,1	5,1
Sıcaklık, T	K	297	297
Havanın belirlenen sıcaklıktaki doyma basıncı, P_{sat}	Pa	2947,84	2947,84
Evrensel gaz sabiti, R	$\text{Pa.m}^3/(\text{mol.K})$	8,314	8,314
Membran kalınlık, δ	cm	0,033	0,1868
Zaman, t	sn	3108	2678

Hesaplamalarda öncelikle ölçülen bağıl nem değerlerine göre f_{in} değerlerinin bulunup zamanla değişimlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Suni kılıf için f_{in} değerlerinin zamanla değişimi Şekil 8.9’da gösterilmiştir. Eşitlik (8.1)’deki df_{in}/dt ifadesi, grafikte uydurulan eğrinin eğimine eşit olacaktır. Şekilde görülebileceği gibi uydurulan eğrinin R^2 değeri oldukça yüksektir. Bu sebeple çok az bir hata oranıyla df_{in}/dt değerinin 0,0003 olduğu kabul edilmiştir. Tyvek® Solid için f_{in} değerlerinin zamanla değişimi ise Şekil 8.10’da gösterilmiştir. Burada da uydurulan eğrinin R^2 değeri oldukça yüksek olup yüksek olup çok az bir hata oranıyla df_{in}/dt değeri 0,0002 olarak alınmıştır.



Şekil 8.9. Suni kılıf için logaritmik basınç oranı değerlerinin zamanla değişimi



Şekil 8.10. Tyvek® Solid için logaritmik basınç oranı değerlerinin zamanla değişimi

Belirlenen ve elde edilen diğer deneysel parametrelere göre difüzyon katsayıları suni kılıf için $1,71 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, Tyvek® Solid için ise $1,35 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak hesaplanmıştır.

8.2.2. Deneysel Prosedür ve Matematiksel Modelleme

Membranlı boru-tipi sıvı desikant nem alma sisteminde yapılan deneylerde giriş havası nemlendirilerek şartlandırılmıştır. Uygulanan deneysel prosedürler aşağıda listelenmiştir.

- Hava hızı, belirlenen Re sayısına karşılık gelen hız değerine ayarlanıp, sistemin nem ve sıcaklık olarak dengeye ulaşması için, yaklaşık 10 dakika süreyle sistemden sadece hava geçirilir.
- Sistemden sadece hava geçirilirken termal kamera ile hava kanalının görüntüleri alınır.
- Sistem nem ve sıcaklık olarak dengeye ulaştığında sıvı pompası çalıştırılıp alt hazneden üst hazneye sıvı desikant çözeltisi gönderilir.
- Boruda bulunan vana kapatılarak üst haznede bir miktar sıvı desikant birikmesi sağlanır ve daha sonra vana bir miktar açılarak çözeltinin yukarıdan aşağıya doğru akması sağlanır. Bu şekilde deneye başladıktan sonra belirli zamanlarda hava kanalının belirli noktasından termal kamera yardımıyla görüntüler alınır.
- Yaklaşık 60 dakika süreyle deney yapıldıktan sonra, SCADA yazılımı yardımıyla, elde edilen deneysel veriler bilgisayara kaydedilip, sıvı pompası ve hava fanı kapatılarak hava ve sıvı desikant akışı kesilir. Vana tamamen açılarak üst haznede bulunan sıvı desikantın tamamen alt hazneye dönmesi sağlanır.
- Sıvı desikantın yoğunluğu deneye başlamadan önce ve sonrasında Rudolph 2910 model yoğunluk ölçer ile ölçülmektedir.

Deneyisel analizde, belirli Re sayılarında sistem performansı incelendiğinden, öncelikle söz konusu Re sayılarında kanaldaki ortalama hava hızının bulunması gerekmektedir. Re sayısı eşitlik (8.6)'da eş değer çap kullanılarak tarif edilmiştir:

$$Re_h = \frac{\rho_h V_{ort} d_e}{\mu_h} \quad (8.6)$$

Burada ρ_h ve μ_h sırasıyla havanın yoğunluğu ve dinamik viskozitesidir. Eşitlik (8.6)'daki d_e değişkeni ise eşitlik (8.7)'de verilmiştir:

$$d_e = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} \quad (8.7)$$

Eşitlik (8.7)'de S ifadesi, nemli havanın geçtiği kanalın kesit alanı olup aşağıdaki eşitlikle hesaplanır:

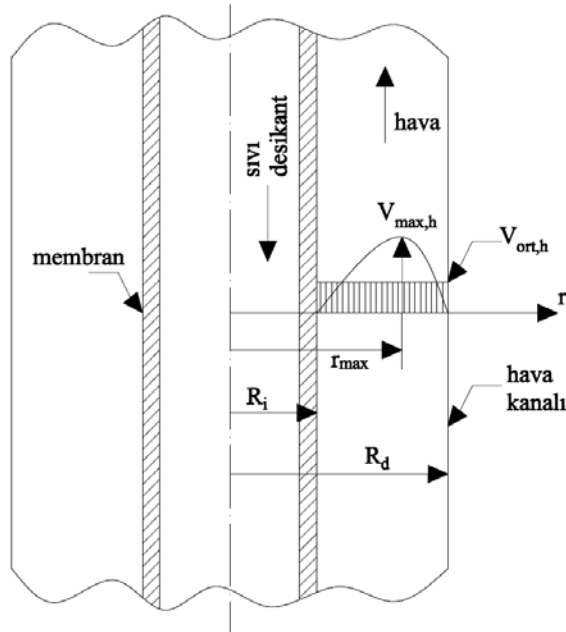
$$S = \pi(R_d^2 - R_i^2) \quad (8.8)$$

Burada R_d ve R_i sırasıyla hava kanalının dış ve iç yarıçapını temsil etmektedir. Verilen bir Re sayısında ortalama hız eşitlik (8.6) ve eşitlik (8.7) kullanılarak bulunur. Deney düzeneğinde hız sensörü dairesel kanalın kesitine yerleştirildiğinden maksimum hız, yani $V_{\max,h}$ ölçülmektedir. Bu sebeple, maksimum hızın bulunabilmesi için, kanaldaki hız profilinin tanımlanması gerekmektedir. Laminar akış için, kanaldaki havanın hız profili eşitlik (8.9)'da verilmiştir (EK-A).

$$V_{z,h} = \frac{2 V_{ort,h}}{M} \left[1 + \left(\frac{r}{R_d} \right)^2 + b \ln(r/R_d) \right] \quad (8.9a)$$

$$M = \left[1 + \left(\frac{R_i}{R_d} \right)^2 - b \right] \quad (8.9b)$$

$$b = \frac{\left(\frac{R_i}{R_d} \right)^2 - 1}{\ln(R_i/R_d)} \quad (8.9c)$$



Şekil 8.11. Hava kanalında hava ve desikant akımları

Sistemde hava kanalındaki hava ve sıvı desikant akımları Şekil 8.11’de gösterilmiştir. Eşitlik (8.9)’da elde edilen hız profilinin r değişkenine göre türevi alınarak sıfıra eşitlenmesi durumunda kanaldaki maksimum hızın yeri, $r_{\max}$, hesaplanabilir. $r_{\max}$ değeri kullanılarak eşitlik (8.9a) ile havanın kanaldaki maksimum hızı, $V_{\max,h}$, bulunur.

Sistemde havanın herhangi bir durumda mutlak nemi eşitlik (8.10) ile hesaplanacaktır [43]:

$$\omega = 0,622 \frac{\phi P_{sat}}{P - \phi P_{sat}} \quad (8.10)$$

Eşitlik (8.10)’da ϕ ve P sırasıyla havanın bağıl nem ve basınç değeridir. P_{sat} ise nemli havanın doyma basıncı olup Antoine denkleminde bulunabilir [40]:

$$P_{sat} = e^{A - \frac{B}{T+C}} \quad (8.11)$$

Burada $A=16,3872$, $B=3885,7$ ve $C=230,15$ olup su buharı için Antoine parametreleridir. Havadan çözeltiye su buharı geçişi, çözeltinin buhar basıncının havanın buhar basıncından düşük olması durumunda gerçekleşeceğinden, çözeltinin buhar basıncı da önemli bir parametredir. Çözeltinin buhar basıncı Conde [43] tarafından eşitlik (8.12)’deki gibi verilmiştir:

$$P_{des} = P_{sat} \cdot \alpha \left(\beta + \kappa \frac{T}{647,096} \right) \quad (8.12)$$

Yukarıdaki eşitlikteki α , β ve κ değerleri ise Eşitlik (8.13)’te tanımlanmıştır:

$$\beta = 2 - \left[1 + \left(\frac{\xi}{\pi_0} \right)^{\pi_1} \right]^{\pi_2} \quad (8.13a)$$

$$\kappa = \left[1 + \left(\frac{\xi}{\pi_3} \right)^{\pi_4} \right]^{\pi_5} - 1 \quad (8.13b)$$

$$\alpha = 1 - \left[1 + \left(\frac{\xi}{\pi_6} \right)^{\pi_7} \right]^{\pi_8} - \pi_9 e^{\frac{-(\xi-0,1)^2}{0,005}} \quad (8.13c)$$

Yukarıdaki eşitliklerdeki $\pi_0, \pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8, \pi_9$ değerleri Çizelge 8.3'te verilmiştir [43]. ξ ise sıvı desikant çözeltisinin konsantrasyonu olup eşitlik (8.14) ile tanımlanmıştır.

$$\xi = \frac{m_{LiCl}}{m_{LiCl} + m_{su}} \quad (8.14)$$

Burada m_{LiCl} ve m_{su} sırasıyla çözeltide bulunan katı LiCl ve su kütleleridir. Sistemde nem alma verimi eşitlik (8.15) ile hesaplanacaktır:

$$\eta(\%) = 100 \frac{\omega_{h,g} - \omega_{h,\zeta}}{\omega_{h,g} - \omega_{sat}} \quad (8.15)$$

Eşitlik (8.15)'te $\omega_{h,g}$ ve $\omega_{h,\zeta}$ sırasıyla havanın kanal girişindeki ve çıkışındaki nem oranıdır. ω_{sat} ise sıvı desikant ile dengede olan havanın nem oranı olup, çözelti sıcaklığındaki buhar basıncı, P_{des} kullanılarak eşitlik (8.10) ile hesaplanmaktadır.

Çizelge 8.3. LiCl-su çözeltisi için buhar basıncı sabitleri

Sabitler	LiCl-su
π_0	0,28
π_1	4,30
π_2	0,60
π_3	0,21
π_4	5,10
π_5	0,49
π_6	0,362
π_7	-4,75
π_8	-0,40
π_9	0,03

Çalışmada nem alma verimi deneysel olarak hesaplandığından belirsizlik analizinin yapılması gerekmektedir. Nem alma veriminin toplam belirsizliği eşitlik (8.16)'da verilmiştir [47].

$$\frac{\delta\eta}{\eta} = \sqrt{\left(\frac{\delta\omega_{h,g}}{\omega_{h,g}}\right)^2 + \left(\frac{\delta\omega_{h,\zeta}}{\omega_{h,\zeta}}\right)^2 + \left(\frac{\delta\omega_{sat}}{\omega_{sat}}\right)^2} \quad (8.16)$$

8.2.3. Bulgular ve Tartışma

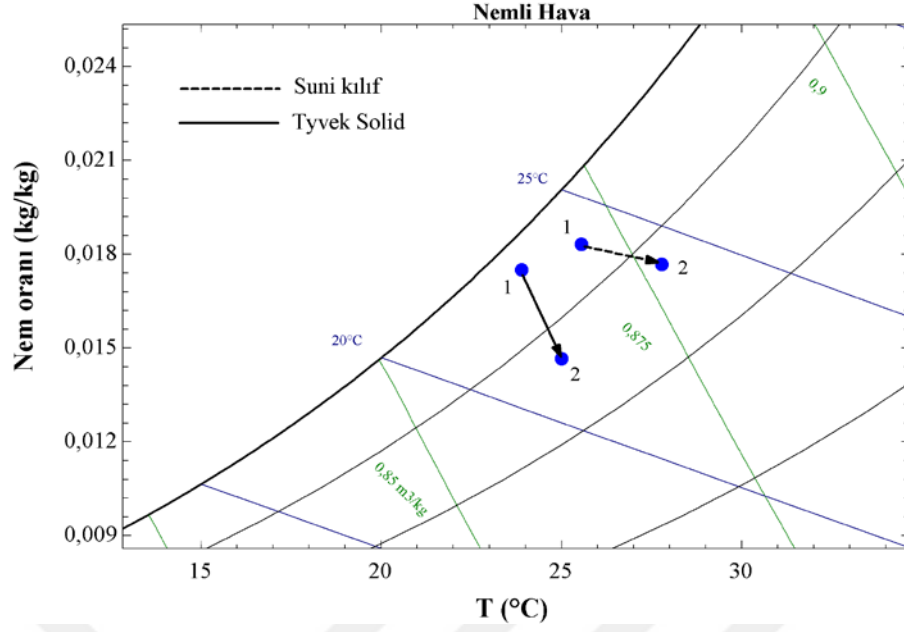
Suni kılıf ve Tyvek® Solid ile Re=200'den başlanarak Re=2000'e kadar deneyler yapılmıştır. Deney düzeneğinde hava fanı tipi DC (doğru akım) olup, devri lineer olarak kontrol edilebilmektedir. Devir kontrolü ile hız, belirlenen Re sayılarına karşılık gelen maksimum hava hızı değerlerinde sabit tutulmuştur.

Çalışmada deneylerdeki parametreler Çizelge 8.4'te gösterilmiştir. Sıvı pompasının frekansı, daha önce söz edildiği gibi, SCADA yazılımı yardımıyla kontrol edilmiş olup sıvı desikantın üst hazneden taşmasını önlemek için 26 Hz frekansta ve 30 lt/dak debide çalıştırılmıştır. Sıvı pompasının 50 Hz frekansındaki debisi ise 58,3 lt/dak 'dır.

Çizelge 8.4. Deneysel parametreler

Parametre	Suni kılıf	Tyvek Solid
Membran yarıçapı, R _i	10 mm	~10 mm
Hava kanalı yarıçapı, R _d	36 mm	36 mm
Çözelti başlangıç konsantrasyonu, ξ	0,42	0,42
Membran su buharı difüzyon katsayısı	1,71·10 ⁻⁸ m ² /s	1,35·10 ⁻⁶ m ² /s
Membran su buharı geçirgenlik katsayısı	8,99·10 ⁻⁶ kmol/s	5,63·10 ⁻⁴ kmol/s
Sıvı pompası frekansı	26 Hz	26 Hz
Sıvı desikant giriş sıcaklığı, T _{s,g}	30-32 °C	27-28,5 °C
Sıvı desikant çıkış sıcaklığı, T _{s,ç}	30-32,5 °C	27-29 °C
Hava giriş sıcaklığı, T _{h,g}	24,4-26,1 °C	20,6-25 °C
Hava çıkış sıcaklığı, T _{h,ç}	25,6-27,8 °C	24,4-25 °C

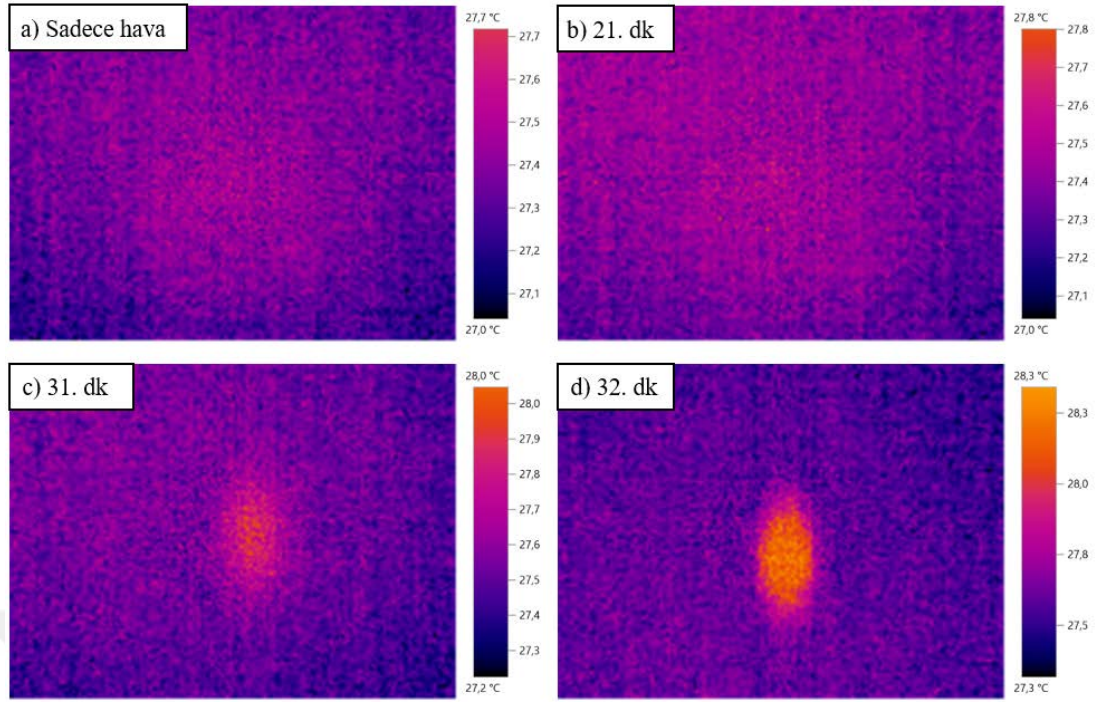
Sistemde yapılan deneylerde Re=200 için her iki membranda elde edilen belirli bir andaki giriş/çıkış sıcaklık ve bağıl nem değerlerine göre psikrometrik diyagramdaki nem değişimi Şekil 8.12'de gösterilmiştir. Her iki membranda havanın girişteki mutlak nemi birbirine çok yakın iken (~0,018 kg/kg) Tyvek® Solid ile havanın çıkıştaki mutlak nemi daha düşüktür. Belirlenen şartlarda Tyvek® Solid membranın suni kılıfa göre havadan daha iyi nem aldığı görülebilmektedir.



Şekil 8.12. Re=200 için deneylerde belirli bir anda psikrometrik diyagramda havadaki nem değişimi

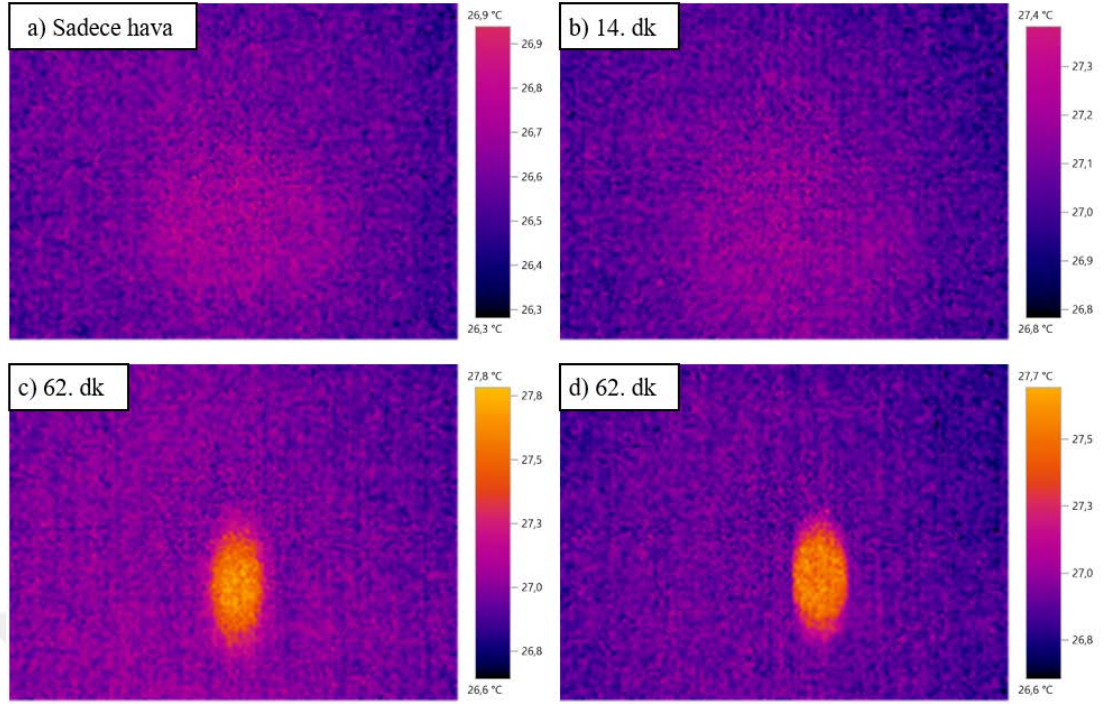
8.2.3.1. Suni Kılıf ile Elde Edilen Sonuçlar

Membranlı boru tipi nem alma deney düzeneğinde ilk olarak suni kılıf ile deneyler yapılmıştır. Söz konusu membran ile, daha önce söz edildiği gibi, Re=200-2000 aralığında toplam on deney yapılmıştır. Hava hızının yüksek olduğu deneylerde hava-membran temas süresinin kısa olmasından dolayı yalnız Re=200 ve Re=400 değerlerinde havadan nem alınabilmektedir. Deneyler yapılırken, desikant akışı olmadığı ve desikant akışı olduğu sürelerde termal kamera ile görüntü alınmıştır. Re=200 için deney sırasında elde edilen termal kamera görüntüleri Şekil 8.13'te verilmiştir. Şekil 8.13'te de görülebildiği gibi, sistemde desikantın akmadığı zamanda termal kamera görüntüsünde herhangi bir sıcaklık değeri gözlenmemektedir. Deneyin ilk zamanlarında nem absorpsiyonun düşüklüğünden dolayı termal kamera görüntülerinde sıcaklık dağılımı tespit edilememiş, deneyin ilerleyen zamanlarında termal görüntülerinde sıcaklık dağılımı gözlenebilmektedir. Nem absorpsiyonun devam etmesi ve sistemde kapalı çevrim yapan LiCl çözeltisinin zamanla sıcaklığının artması bu duruma neden olmaktadır. 31 ve 32. dakikalarda suni kılıfın sıcaklığının arttığı Şekil 8.13'te açıkça gözlenmektedir. Söz konusu zamanlarda membran ile kanal yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı 1 °C'ye kadar ulaşmıştır.

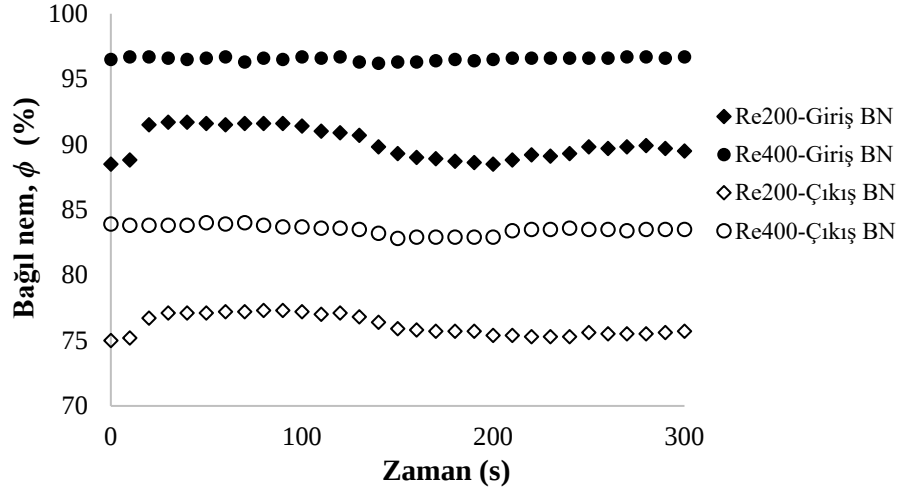


Şekil 8.13. Suni kılıfla $Re=200$ 'de elde edilen termal kamera görüntüleri: a) Sadece hava, b) 21. dk, c) 31.dk ve d) 32.dk

$Re=400$ için yapılan deneyde elde edilen termal kamera görüntüleri ise Şekil 8.14'te verilmiştir. $Re=400$ için yapılan deneyde de desikantın akmadığı ilk zamanlarda ve desikantın aktığı ilk zamanlarda nem alma işleminin yeni başlamasından dolayı membran sıcaklığında önemli bir artış olmadığından termal kamerada sıcaklık farkı belirgin değildir. Fakat sistem nem aldıkça, desikant sıcaklığı, dolayısıyla membran sıcaklığı arttığından 62. dk'daki görüntülerde membran ile hava kanalı yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı daha belirgin hale gelip $1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ seviyesine çıkmıştır.



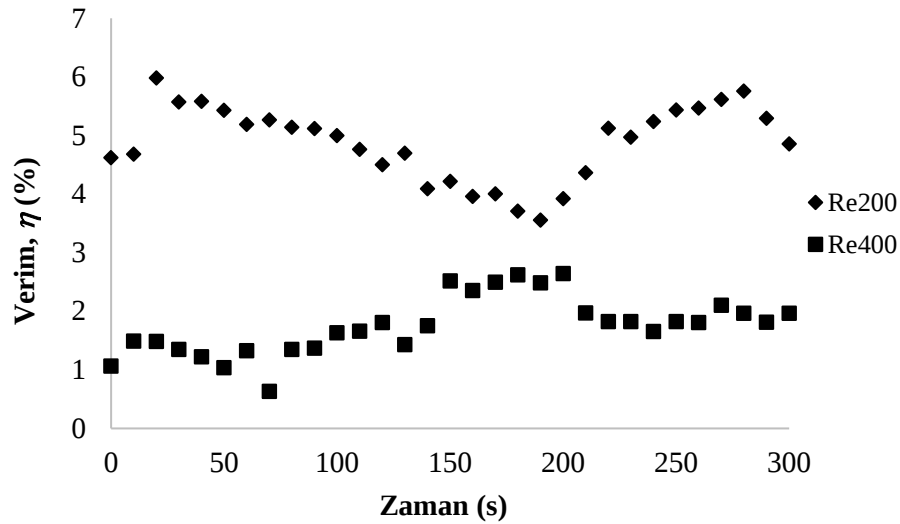
Şekil 8.14. Suni kılıfla $Re=400$ 'de elde edilen termal kamera görüntüleri: a) Sadece hava, b) 14. dk, c) 62.dk ve d) 62.dk



Şekil 8.15. Suni kılıf deneylerinde havanın giriş/çıkış bağıl nem değerleri

Sistemde performansın belirlenmesinde nem alma verimi hesaplandığından havanın giriş ve çıkış bağıl nem değerleri büyük önem taşımaktadır. $Re=200$ ve $Re=400$ için havanın girişte ve çıkışta ölçülen bağıl nem değerleri Şekil 8.15'te gösterilmiştir. Şekilde, termal kamera görüntüleri de dikkate alınarak, $Re=200$ ve $Re=400$ için sistemin dengeye ulaştığı kabul edilen sırasıyla 50-55 dk. ve 54-59.dk arasındaki 300

saniyelik ölçüm değerlerine yer verilmiştir. Şekil 8.15'te görüldüğü gibi, $Re=200$ için havanın sisteme giriş ve çıkışındaki bağıl nem oranları sırasıyla yaklaşık %96 ve %84 olarak ölçülmüştür. $Re=400$ için havanın ölçülen bağıl nem değerleri ise girişte %89-91 aralığında, çıkışta ise %75-77 aralığında değişmektedir. Sistemin her iki Re sayısında da nem aldığı gözlenmektedir. Ayrıca sistemin değişen giriş bağıl nem oranlarına göre tepki verdiği gözlemlenmektedir. Hesaplanan nem alma verimi değerlerinin ise aynı zaman aralığındaki değişimi Şekil 8.16'da gösterilmiştir. Sistemde, düşük Re sayılarında hava hızının düşüklüğü ile hava-sıvı desikant temas süresinin artması kütle transferini dolayısıyla alınan nem miktarını arttırdığından $Re=200$ için elde edilen verim değerleri daha yüksek bulunmuştur. Söz konusu Re sayısında verim değerleri genel olarak %4,5-6 aralığında değişirken $Re=400$ için %1-2,5 aralığında değişmiştir.

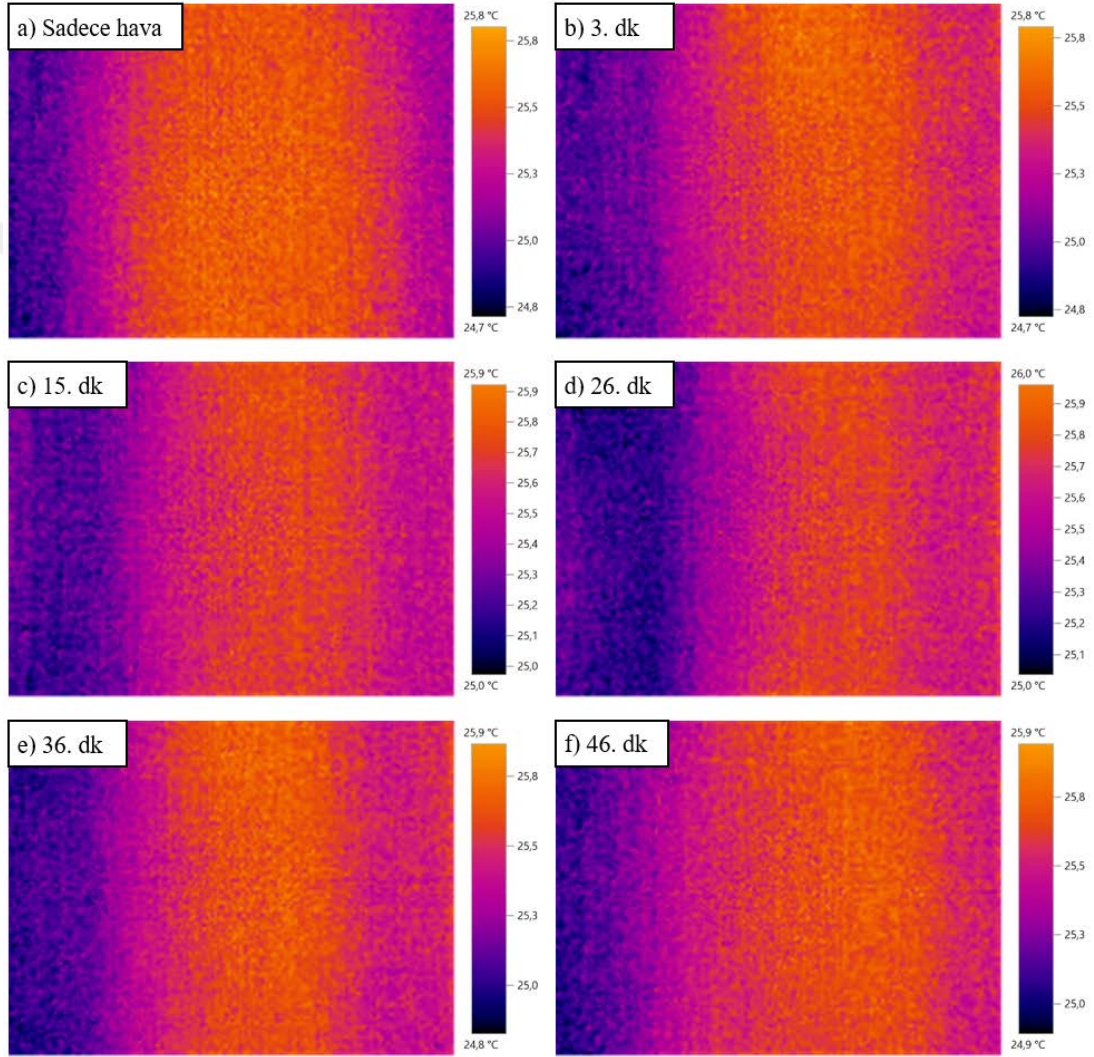


Şekil 8.16. Suni kılıf deneylerinde sistemin nem alma verimi değerleri

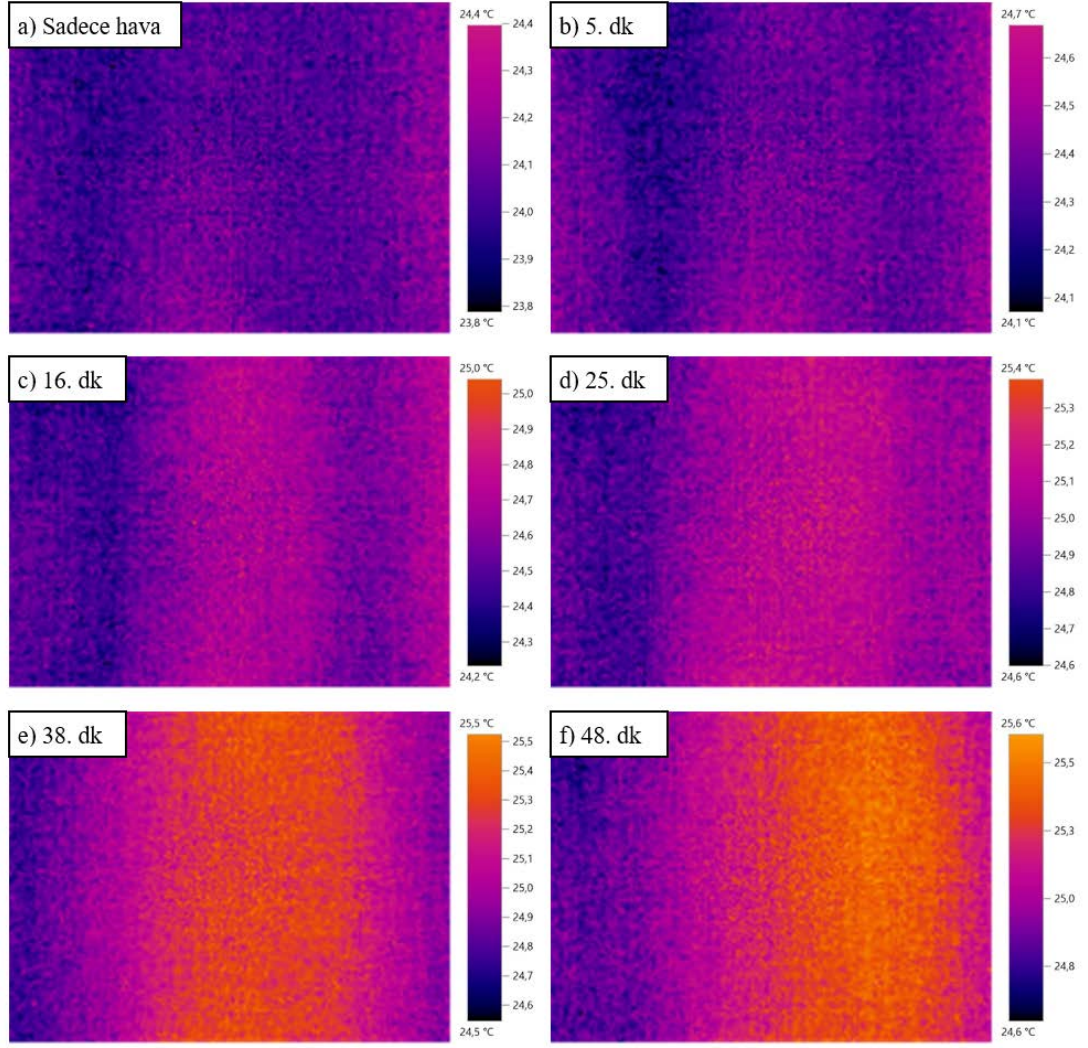
8.2.3.2. Tyvek® Solid ile Elde Edilen Sonuçlar

Membranlı silindirik sıvı desikant nem alma deney düzeneğinde ikinci membran olarak Tyvek® Solid kullanılmıştır. Söz konusu membran ile, suni kılıfta olduğu gibi, $Re=200-2000$ aralığında on tane deney yapılmış ve $Re=200$, $Re=400$ ve $Re=600$ değerlerinde sistemin nem alabildiği gözlemlenmiştir. Sistemde belirli zamanlarda Şekil 8.17 ve 8.18'de, $Re=200$ ve 400 değerinde yapılan deneylerde elde edilen termal kamera görüntüleri verilmektedir. $Re=400$ değerinde yapılan deneylerde sıcaklık

dağılımı daha net görülebilmektedir (Şekil 8.18). $Re=400$ için başlangıçta membranda önemli bir sıcaklık değişimi gözlemlenmezken, kapalı döngü yapan LiCl çözeltisi nem absorpsiyonunun devamı sıcaklığı artırmaktadır. Bu durum, özellikle deneyin 16. dk'sından sonra termal kamera görüntülerinde sıcaklık dağılımından açık bir şekilde görülebilmektedir. Çözelti sıcaklığının artmasıyla membran ile hava kanalı yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı, 38. dk'dan sonra, 1°C civarına ulaşmıştır.

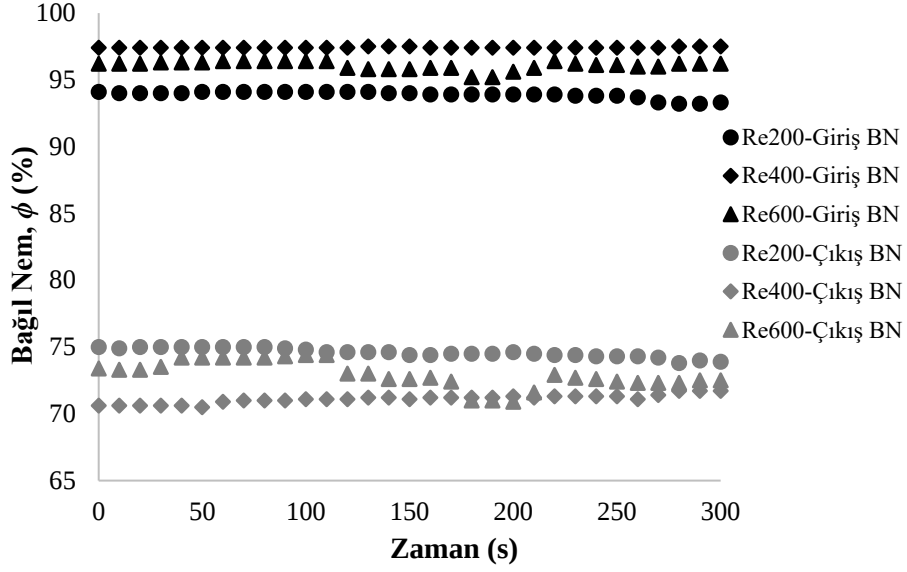


Şekil 8.17. Tyvek® Solid ile $Re=200$ 'de elde edilen termal kamera görüntüleri a) Sadece hava, b) 3. dk, c) 15. dk, d) 26. dk, e) 36. dk ve f) 46. dk

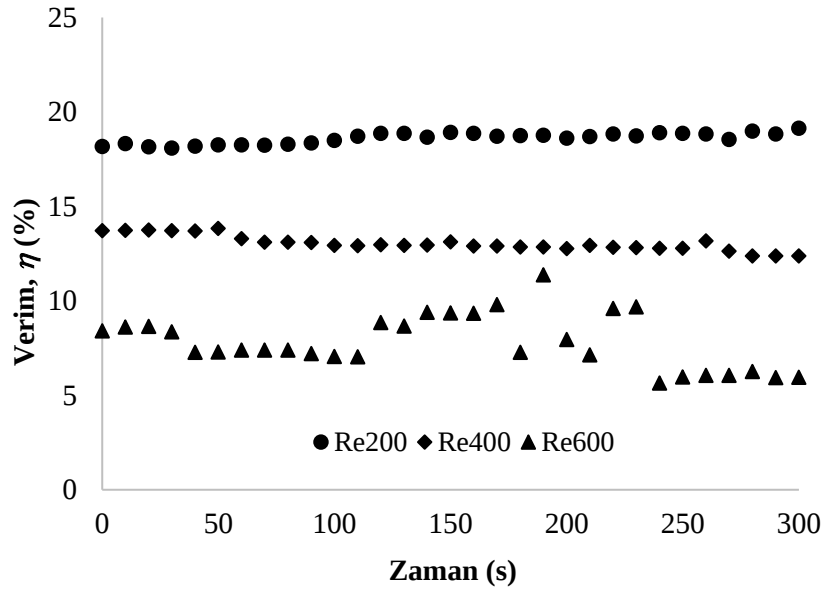


Şekil 8.18. Tyvek® Solid ile $Re=400$ 'de elde edilen termal kamera görüntüleri a) Sadece hava, b) 5. dk, c) 16. dk, d) 25. dk, e) 38. dk ve f) 48. dk

Sistemde Tyvek® Solid ile yapılan deneylerde belirlenen zaman aralığında havanın giriş/çıkış bağıl nem değerlerindeki değişim ise Şekil 8.19'da gösterilmiştir. Bağıl nem ölçümlerinde ve verim hesabında, sistemin dengede olduğu ve ölçülen verilerin daha dengeli olduğu kabul edilen, $Re=200$, $Re=400$ ve $Re=600$ için sırasıyla 26-31 dk., 36-41 dk. ve 29-34 dk. aralığındaki 300 saniyelik ölçüm verileri kullanılmıştır. Şekilden de anlaşılabileceği gibi belirlenen zaman aralıklarında ölçülen hem giriş hem de çıkış bağıl nem değerleri dengede olduğu görülmektedir. Sisteme giren hava nemlendirme düzeneği ile şartlandırıldığından kanal girişinde yüksek bağıl nem değerleri elde edilmiştir. Tyvek® Solid ile yapılan deneylerde $Re=200$, 400 ve 600 için hava kanalı girişinde bağıl nem değerleri sırasıyla %94,9; %97,5 ve %95,5 olarak ölçülmüştür.



Şekil 8.19. Tyvek® Solid deneylerinde havanın sisteme giriş/çıkış bağıl nem değerleri



Şekil 8.20. Tyvek® Solid deneylerinde sistemin nem alma verimi değerleri

Şekil 8.20'de ise Tyvek® Solid ile elde edilen nem alma verimi değerleri gösterilmiştir. Hesaplanan nem alma verimi değerleri de özellikle Re=200 ve Re=400 için oldukça kararlı olup Re=600'de, çıkış bağıl nem değerlerindeki sapmalardan ötürü, küçük sapmalar meydana gelmiştir. Sistemde Re=200 ve Re=400 için nem alma verimi değerleri sırasıyla yaklaşık %18,5 ve %13 olarak hesaplanırken Re=600'de nem alma verimi değerleri %5-10 aralığında değişmiştir. Elde edilen sonuçlardan

sistemde alınan nem miktarının hava hızına karşı oldukça hassas olduğu anlaşılmaktadır.

8.3. Sistemin COMSOL Yazılımında Modellenmesi

Deney düzeneğinin sayısal analizinin yapılabilmesi için boru-tipi membranlı sıvı desikant nem alma sistemi, deney düzeneği ölçülerine uygun olarak, COMSOL yazılımında 3-boyutlu olarak modellenmiştir. COMSOL yazılımında analiz yapılırken aşağıdaki kabuller yapılmıştır:

- Sistem sürekli rejimdedir.
- Momentum, ısı ve kütle transferleri radyal (r), açısal (θ) ve boylamsal (z) yönünde gerçekleşmektedir.
- Sistem tamamen yalıtılmış kabul edilip, sistem sınırlarından dışarıya gerçekleşen ısı ve kütle transferi ihmal edilmiştir.
- Desikant ve hava akımlarının hidrodinamik olarak tam gelişmiş laminar akış olduğu kabul edilmiştir.
- Sıvı-membran arayüzündeki su buharının buharlaşmasından/yoğuşmasından kaynaklanan faz değişim enerjisinin tamamı sıvıya aktarılmıştır.

COMSOL yazılımında modellenen boru-tipi membranlı sıvı desikant nem alma sisteminde gerçekleşen akış ve kütle transferi, Şekil 8.11'e benzer olarak, Şekil 8.21'de gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılabileceği gibi sistemde hava pozitif z-yönünde akarken, çözelti ise negatif z-yönünde akmaktadır. Hava ile çözelti arasındaki buhar basıncı farkı sebebiyle havadan çözeltiye doğru membran üzerinden su buharı geçişi olacaktır.

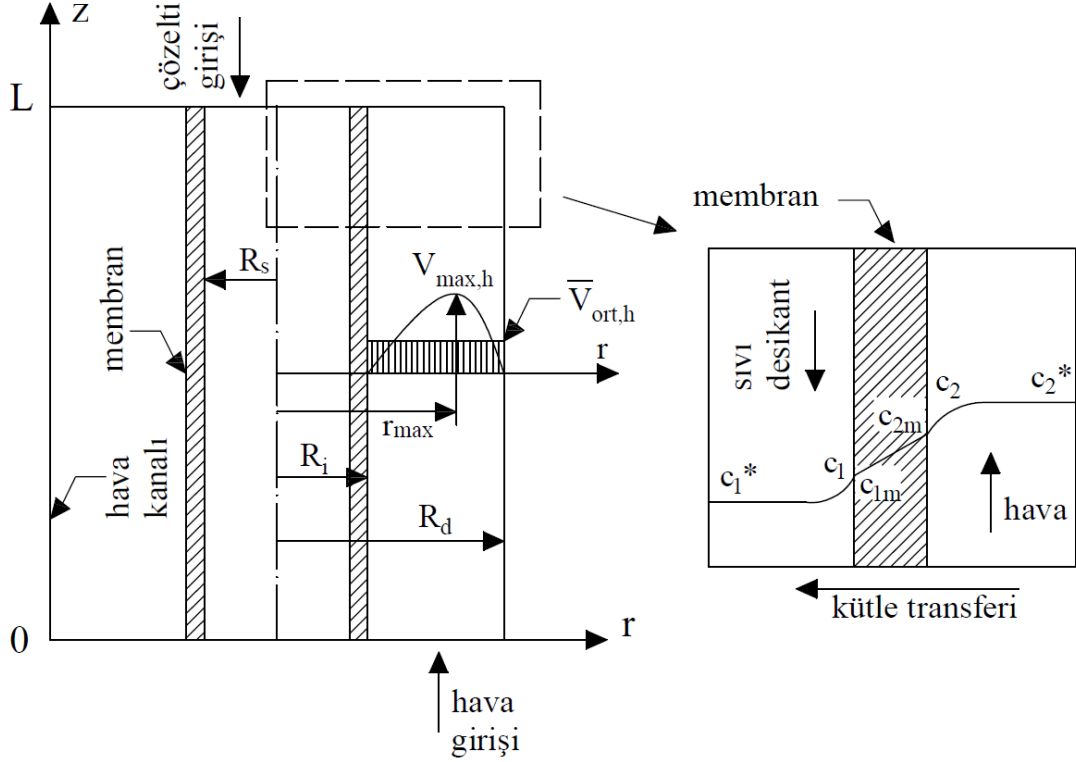
Sistemde hava tarafı için momentum, ısı ve kütle denklemleri aşağıda verilmiştir [48]:

$$\mu_h \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V_{z,h}}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_{z,h}}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V_{z,h}}{\partial z^2} \right] = - \frac{dP_h}{dz} \quad (8.17)$$

$$\lambda_h \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] = \rho_h c_{p,h} V_{z,h} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (8.18)$$

$$D_h \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial c}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 c}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right] = V_{z,h} \left(\frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (8.19)$$

Burada λ_h havanın ısı iletim katsayısını (W/(m.K)), $c_{p,h}$ havanın özgül ısısını (kJ/(kg.K)) ifade etmektedir.



Şekil 8.21. COMSOL yazılımında akış ve kütle transferi modellemesi

Membran tarafında herhangi bir akış bulunmadığı için momentum denkleminin yazılmasına gerek yoktur. Membran tarafında ısı ve kütle denklemi eşitlik (8.20) ve eşitlik (8.21)'de verilmiştir [48].

$$\lambda_m \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] = 0 \quad (8.20)$$

$$D_m \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial c}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 c}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right] = 0 \quad (8.21)$$

Yukarıdaki eşitliklerde λ_m membranın ısı iletim katsayısını (W/(m.K)), D_m ise membranın su buharı difüzyon katsayısını (m^2/s) göstermektedir. Sıvı desikant tarafında momentum, ısı ve kütle transferi denklemleri ise aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir [48].

$$\mu_s \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V_{z,s}}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_{z,s}}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V_{z,s}}{\partial z^2} \right] = - \frac{dP_s}{dz} \quad (8.22)$$

$$\lambda_s \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] = \rho_s c_{p,s} V_{z,s} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (8.23)$$

$$D_s \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial c}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 c}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right] = V_{z,s} \left(\frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (8.24)$$

Yukarıdaki eşitliklerde, sıvı desikantın olmak üzere, μ_s dinamik viskozitesini (Pa.s), $V_{z,s}$ z-yönündeki hızını (m/s), λ_s ısı iletim katsayısını (W/(m.K)), ρ_s yoğunluğunu (kg/m^3), $c_{p,s}$ özgül ısısını (kJ/(kg.K)) ve D_s desikantın su buharı difüzyon katsayısını (m^2/s) temsil etmektedir. Sistemde havanın Re sayısı önceki bölümde eşitlik (2.6)'da tanımlanmıştır. Sc sayısı ise eşitlik (8.25) ile hesaplanmıştır.

$$Sc = \frac{\mu_h}{\rho_h D_h} \quad (8.25)$$

Hava akımının Sh sayısı ise aşağıdaki eşitlikle tanımlanmıştır:

$$Sh = \frac{k_h d_e}{D_h} \quad (8.26)$$

Eşitlik (8.26)'da k_h kütle transferi katsayısını (m/s) ifade etmektedir. İşlem kolaylığı olması açısından deneysel çalışmada verim mutlak nem değerleri kullanılarak tarif edilirken, COMSOL yazılımında ise, aşağıda eşitlikte olduğu gibi, konsantrasyon ifadeleri kullanılarak belirlenmiştir.

$$\eta(\%) = 100 \frac{(c_{h,g} - c_{h,\zeta})}{(c_{h,g} - c_{sat})} \quad (8.27)$$

Burada, havanın olmak üzere, $c_{h,g}$ kanal girişindeki su buharı konsantrasyonunu (mol/m^3), $c_{h,\zeta}$ kanal çıkışındaki su buharı konsantrasyonunu (mol/m^3) ve c_{sat} sıvı desikant ile dengede olan havanın su buharı konsantrasyonunu (mol/m^3) temsil etmektedir.

8.3.1. Sınır Şartları

Yukarıda verilen momentum, ısı ve kütle denklemlerinin çözülebilmesi için sistemde sınır şartlarının belirlenmesi gerekmektedir. Sistemde akış biçimleri Şekil 8.21’de gösterilmiştir. Şekle göre duvarlarda kaymama şartından ötürü hava ve sıvı desikant hızları sıfır yani; $V_{z,h}=0$ ve $V_{z,s}=0$ olacaktır. Hava tarafında giriş koşulları ise aşağıdaki gibi olacaktır:

$$z = 0, \quad T_h = T_{h,g} \quad (8.28a)$$

$$z = 0, \quad c_h = c_{h,g} \quad (8.28b)$$

Burada $T_{h,g}$ tanımlanan giriş sıcaklığıdır (K). $c_{h,g}$ ise aşağıdaki eşitlikle hesaplanmıştır:

$$c_{h,g} = \frac{\phi P_{sat}}{RT} \quad (8.29)$$

Yukarıdaki eşitlikte P_{sat} bir önceki bölümde olduğu gibi eşitlik (8.11) ile hesaplanmıştır. Hava çıkışında ($z=L$) sıcaklık ve konsantrasyon gradyanı, yalıtım sınır şartından ötürü; $\nabla T_h = 0$ ve $\nabla c_h = 0$ olacaktır. Çözelti giriş koşulları aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir:

$$z = L, \quad T_s = T_{s,g} \quad (8.30a)$$

$$z = L, \quad c_s = c_{s,g} \quad (8.30b)$$

Burada $c_{s,g}$ çözelti içerisindeki su buharı konsantrasyonu (mol/m^3) olup eşitlik (8.31) ile belirlenmiştir:

$$c_{s,g} = \frac{P_{des}}{RT} \quad (8.31)$$

Yukarıdaki eşitlikte P_{des} eşitlik (8.12) ile hesaplanmıştır. Çözelti çıkışında da ($z=0$) $\nabla T_s = 0$ ve $\nabla c_s = 0$ olacaktır. Sıvı desikant çözeltisine su buharı geçişi ekzotermik bir tepkime olup çözeltiden bir miktar ısı yayılmasına sebep olmaktadır. Nem alma işlemi sonu yayılan ısı aşağıdaki eşitlikle hesaplanmıştır:

$$q_s = N_A M_A h_d \quad (8.32)$$

Burada, h_d LiCl çözeltisinin bulunduğu sıcaklığa karşılık gelen seyrelme farkı entalpisidir ($\sim 3 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$) [43]. M_A ve N_A ise sırasıyla su buharı molar ağırlığı (kg/mol) ve membrandan geçen su buharı kütle akısıdır ($\text{mol/(m}^2 \cdot \text{s)}$). N_A aşağıdaki eşitliklerle tanımlanmıştır:

$$N_A = \frac{D_m}{\delta} (c_{2m} - c_{1m}) \quad (8.33)$$

$$N_A = k_h (c_2^* - c_2) \quad (8.34)$$

$$N_A = k_s (c_1 - c_1^*) \quad (8.35)$$

Eşitlik (8.33)'te membran üzerindeki kütle transferi sınır şartı verilmiştir. Belirtilen kütle transferi miktarı, hava tarafındaki kütle transferi miktarına (eşitlik 8.34) ve sıvı desikant tarafındaki kütle transferi miktarına (eşitlik 8.35) eşit olacaktır. Membran ince bir yapıya sahip olduğundan kütle akısı, eşitlik (8.33)'te olduğu gibi, Fick kanunu kullanılarak tarif edilmiştir. Yukarıdaki denklemlerde c_{1m} ve c_{2m} sırasıyla çözelti-membran ve membran-hava arayüz su buharı konsantrasyonları (mol/m^3) olup bu konsantrasyon değerlerinin, membranın ince yapısından ötürü, c_1 ve c_2 konsantrasyonlarına yaklaştıkları kabul edilmiştir. c_1^* ve c_2^* ise sırasıyla çözelti ve hava tarafları yığın konsantrasyonlarıdır (mol/m^3).

8.3.2. Çözüm Yöntemi

Sayısal analizde, COMSOL Multiphysics kullanılarak sistem deneysel ölçülere uygun olacak şekilde 3-boyutlu olarak modellenmiştir. Analizde Re, L/D ve Sc sayıları bağımsız değişkenler olarak belirlenerek akış hızının, model geometrisinin ve kütle difüzyonunun sistem performansına etkisi araştırılmıştır. Sistemin laminar akışta analizi için Re sayıları 25, 100, 400, 800 ve 2000 olarak seçilmiştir. Söz konusu Re sayılarına karşılık gelen ortalama hava hızları Çizelge 8.5'te gösterilmiştir. 0,68; 1,36; 2,2 ve 3,4 olmak üzere farklı Sc sayılarında, L/D oranları 5, 10, 20, 40, 80 ve 160 olarak değiştirilmiştir. Diğer hesaplama parametreleri ise Çizelge 8.6'da verilmiştir.

Çizelge 8.5. Belirlenen Re sayılarına karşılık gelen ortalama hava hızları

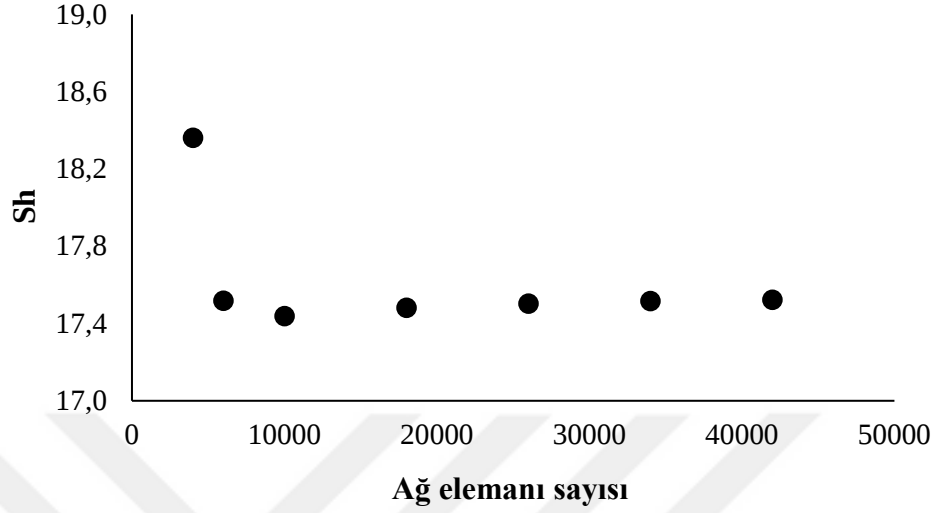
Re	25	100	400	800	2000
$\bar{V}_{ort,h}$ (m/s)	0,006	0,025	0,1	0,2	0,49

Çizelge 8.6. Sayısal analizde kullanılan hesaplama parametreleri

Parametreler	Sembol	Birim	Değer
Membran su buharı difüzyon katsayısı	D_m	m^2/s	$1,35 \cdot 10^{-6}$
Hava su buharı difüzyon katsayısı [41]	D_h	m^2/s	$2,5 \cdot 10^{-5}$
Su buharının havadaki kütle transferi katsayısı [44]	k_a	m/s	$2,5 \cdot 10^{-2}$
Su buharının çözeltilerdeki kütle transferi katsayısı [43]	k_s	m/s	$4,204 \cdot 10^{-3}$
Membran çapı	D	mm	20
Membran uzunluğu	L	mm	L/D·D
Membran çapının hava kanalı çapına oranı	D/D _d	-	0,28
Membran kalınlığı	δ	mm	0,25
Hava ve çözeltiler giriş sıcaklıkları	$T_{h,g};$ $T_{s,g}$	K	298

Yapılan sayısal analizde momentum, ısı ve kütle denklemlerinin çözümü için dört tane COMSOL modülü kullanılmıştır. “Laminar Flow” modülünde tam gelişmiş akış seçilerek Çizelge 8.5'te verilen ortalama hız değerleri hava akımı için giriş hızı değeri olarak girilmiştir. Nem alma işlemi sırasında açığa çıkan ısıнын ve hava, membran ve çözeltiler sıcaklık dağılımlarının belirlenmesi için ısı transferi modülü olan “Heat Transfer in Fluids” kullanılmıştır. Hava ve membran için yazılan kütle eşitliklerinin

çözümü için “Transport in Diluted Species” modülü kullanılırken, sıvı desikant için kütle eşitliğinin çözümü “Transport in Concentrated Species” modülü kullanılmıştır.



Şekil 8.22. Ağ (mesh) hassasiyeti analizi (L/D=10)

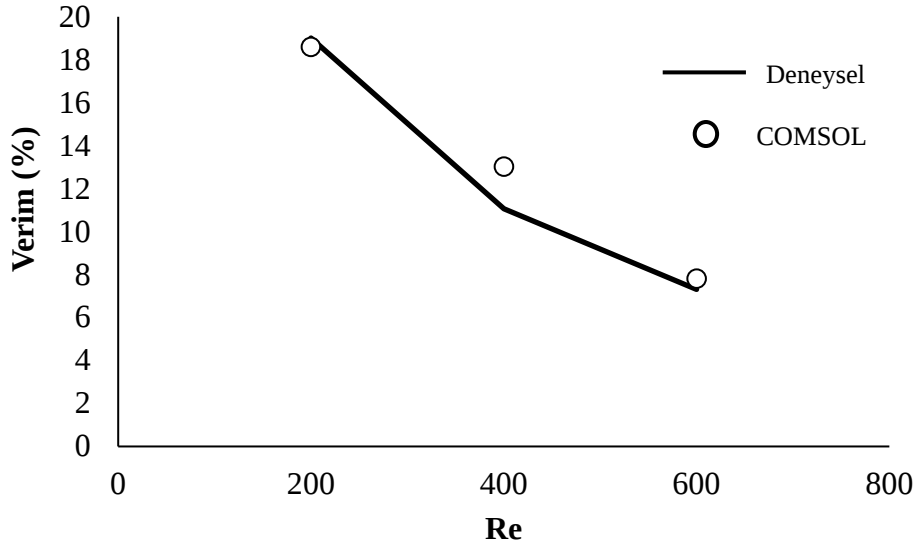
COMSOL yazılımında yapılan çözüm için son derece ince boyutlu ağ uygulanarak en-boy oranına göre 5000 ile 160000 arasında değişen eleman sayıları elde edilmiştir. Uygulanan ağın Sh sayısına etkisinin belirlenmesi için Şekil 8.22’deki hassasiyet analizi yapılmıştır. Şekilden de görülebileceği gibi 15000 eleman sayısından sonra Sh sayısı değişmemektedir.

8.3.3. Deneysel Doğrulama

Önceki bölümlerde söz edildiği gibi oluşturulan COMSOL modeli deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak sayısal çözümün doğrulaması yapılmıştır. Bunun için COMSOL yazılımında membran olarak Tyvek® Solid ($D_m=1,35 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) kullanılmış ve membran boyu, deney düzeneği ile aynı olacak şekilde, $L=740 \text{ mm}$ olarak belirlenmiştir. Deney düzeneğinde Tyvek Solid ile $Re=200, 400$ ve 600 değerlerinde nem alınabildiğinden COMSOL yazılımında da aynı Re sayıları için analiz yapılmıştır. Hesaplama için gerekli olan diğer parametreler ise Çizelge 8.6’dan alınmıştır.

Şekil 8.23’te deneysel çalışmada ve COMSOL yazılımında elde edilen verim değerleri karşılaştırılmıştır. Şekilden de anlaşılabileceği gibi COMSOL yazılımında ve deneysel

çalışmada elde edilen verim değerleri birbirine oldukça yakın olup, regresyon sabiti değeri 0.9659'dur. İki yöntemle elde edilen sonuçlar, COMSOL yazılımında yapılan sayısal çözümün, boru-tipi sıvı desikant nem alma sistemini oldukça isabetli olarak analiz ettiğini göstermektedir.



Şekil 8.23. Deneysel çalışmada ve COMSOL'da elde edilen verim değerlerinin karşılaştırılması

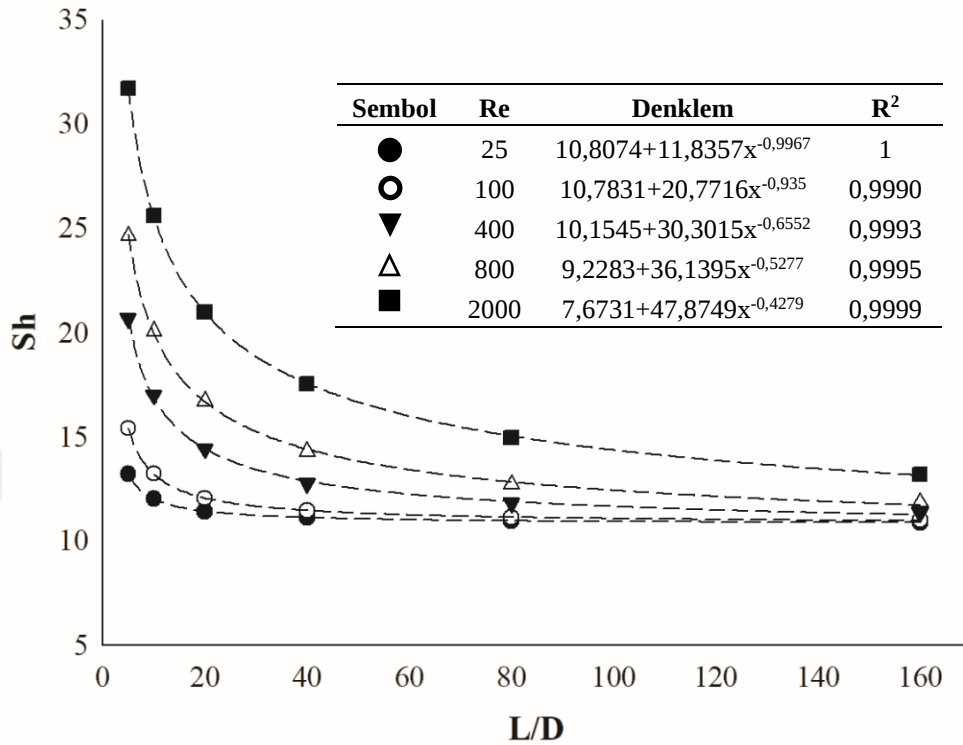
8.3.4. Bulgular ve Tartışma

Membranlı boru-tipi sıvı desikant nem alma sisteminde Sherwood sayısı (Sh) için Reynolds (Re) sayısına (25, 100, 400, 800 ve 2000), Schmidt (Sc) sayısına (0,68; 1,36; 2,2 ve 3,40) ve membranın en-boy (L/D) oranına (5, 10, 20, 40, 80 ve 160) bağlı eşitlik elde edilmiştir. Önerilen eşitliğin genel biçimi eşitlik (8.36)'da gösterilmiştir. Eşitlikteki bilinmeyen katsayılar sayısal yöntemler kullanılarak hesaplanmıştır.

$$Sh = Sh_{\infty} + CRe^m Sc^n \quad (8.36)$$

Şekil 8.24'te Sh sayılarının farklı Re sayılarında L/D oranıyla değişimi gösterilmiştir. Sh sayısı, düşük L/D oranlarında oldukça yüksek bulunmuştur. Bunun sebebi, düşük L/D oranlarında konsantrasyon sınır tabakasının tam olarak gelişmemesi ve sınır tabakası kalınlığının düşük olmasıdır [49]. Re sayısının artması çözelti-hava temas

süresini azalttığından en yüksek Sh değeri yaklaşık 32 olarak, L/D=5 ve Re=2000 olması durumunda hesaplanmıştır.

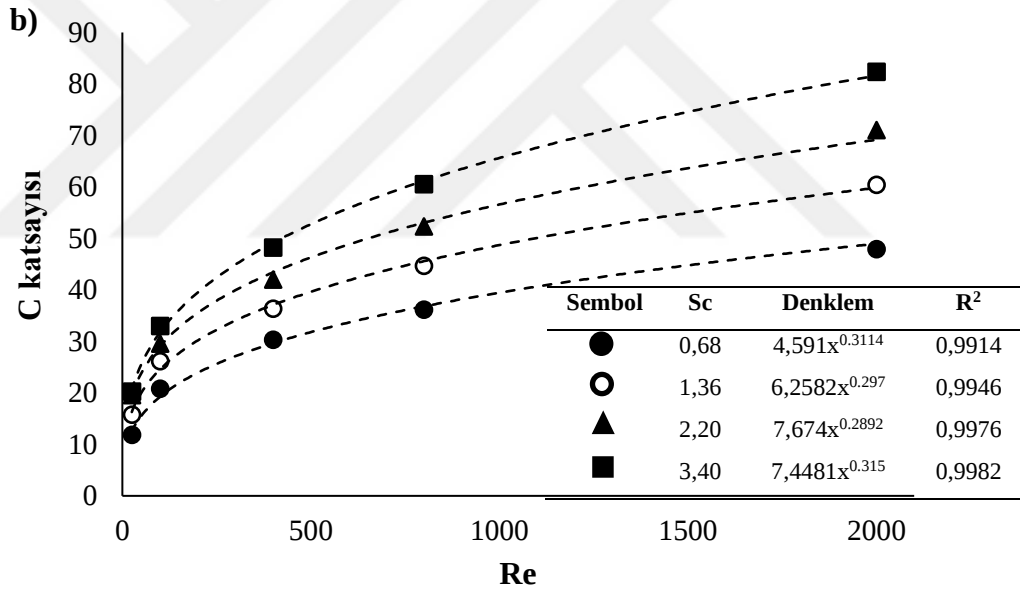
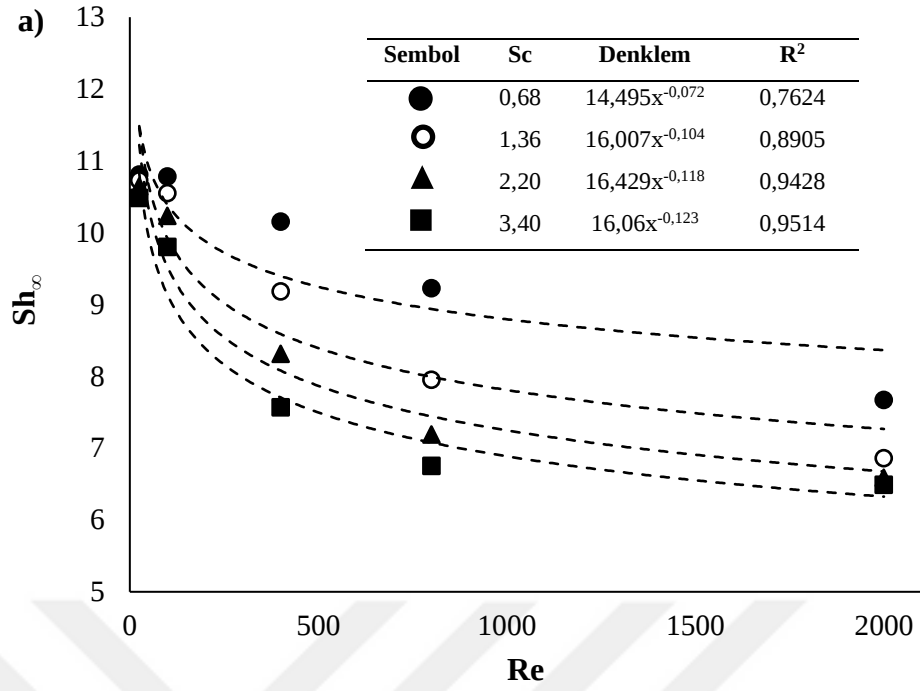


Şekil 8.24. Sh sayılarının farklı Re sayılarında L/D oranıyla değişimi

Şekil 8.25'te ise Sh_{∞} ve C katsayılarının farklı Sc sayılarında Re sayısı ile değişimi gösterilmiştir. Şekil 8.25a'da Sh_{∞} değişkeni için Re sayısına bağlı denklemler farklı Sc sayılarında birbirlerine yakın olduklarından Sh_{∞} katsayısının Sc sayısından bağımsız olduğu söylenebilir. Bu sebeple Sh_{∞} katsayısı $Sh_{\infty}=f(Re)$ olacak şekilde, elde edilen denklemlerin katsayılarının ve üslerinin ortalaması alınarak, aşağıdaki eşitlikteki gibi bulunmuştur:

$$Sh_{\infty} = 15,75Re^{-0,1} \quad (8.37)$$

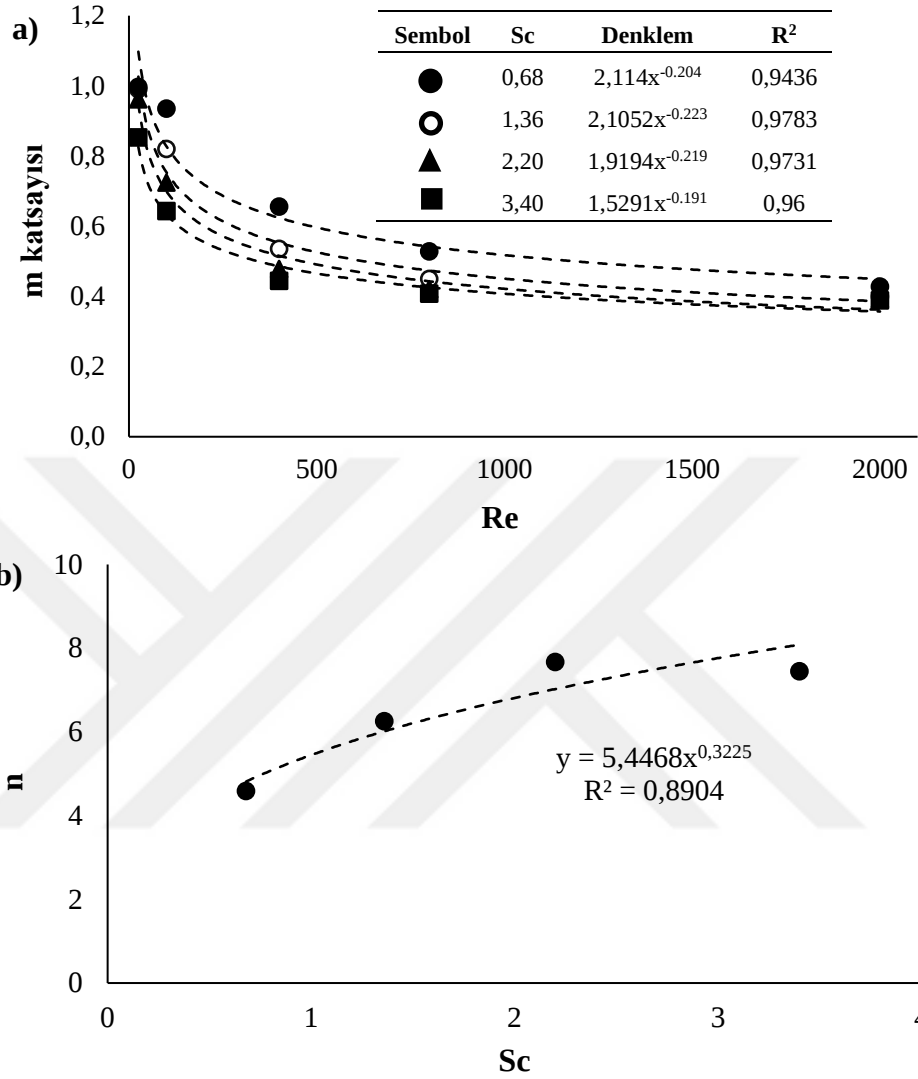
Yukarıda söz edildiği gibi Re sayısının artması çözelti-hava temas süresini azalttığından C katsayısı Re sayısı ile artmıştır. C katsayıları için uydurulan eğrilerin R² değerlerinin yüksek olması, katsayıların üstel denklemlere iyi uyum sağladığını göstermektedir.



Şekil 8.25. a) Sh_{∞} ve b) C katsayılarının farklı Sc sayılarında Re sayısı ile değişimi

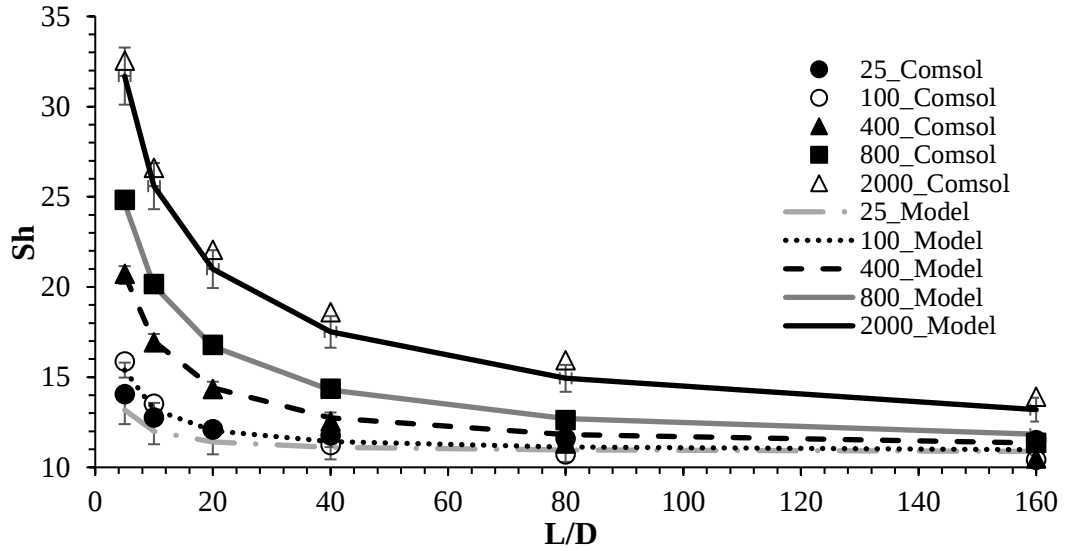
Eşitlik (8.36)'da Re ve Sc sayılarının kuvvetleri m ve n katsayılarının sırasıyla Re ve Sc sayıları ile değişimleri Şekil 8.26'da gösterilmiştir. n katsayılarının Sc sayıları ile değişimine bakıldığında uydurulan eğriden Sc sayısının kuvvetinin yaklaşık 0,323 olduğu görülebilmektedir. Hesaplanan değişkenlerle Sh sayısı için Re, Sc ve L/D'ye bağlı olarak aşağıdaki eşitlik elde edilmiştir:

$$Sh = 15,75Re^{-0,1} + 5,45Re^{0,3} \left(\frac{D}{L}\right)^a Sc^{0,323}, \quad a = 1,917Re^{-0,21} \quad (8.38)$$



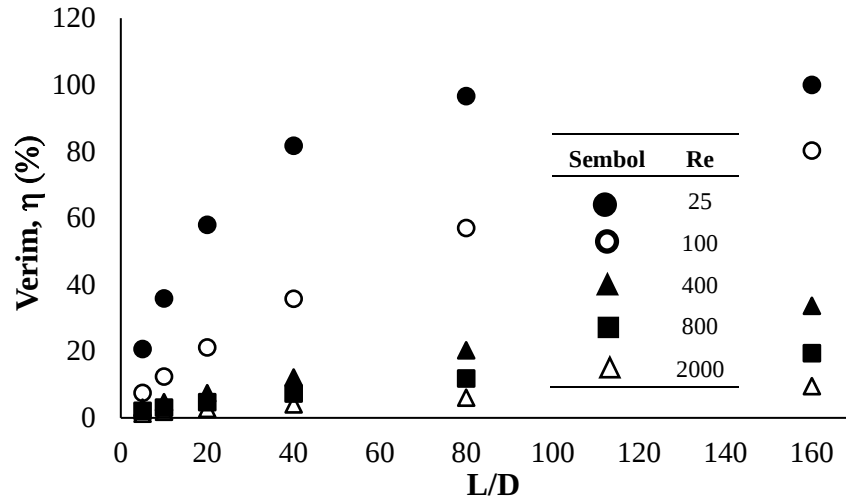
Şekil 8.26. a) m katsayısının Re sayısı ile değişimi, b) n katsayısının Sc ile değişimi

Eşitlik (8.38)'de a değişkeni Şekil 8.26a'da m katsayılarına uydurulan eğrilerin denklemlerinin ortalaması alınarak bulunmuştur. Elde edilen eşitlikle hesaplanan Sh sayılarının, farklı Re sayılarında COMSOL yazılımında hesaplanan Sh sayıları ile karşılaştırılması ise Şekil 8.27'deki grafikte hata çubuklarıyla beraber yapılmıştır. Şekilde de görülebileceği gibi hata çubuklarının birçoğu düşük hatadan ötürü görülememektedir. Bu durum, belirlenen koşullarda (Re: 25-2000; L/D: 5-160 ve Sc: 0,68-3,40) önerilen eşitlikle bulunan Sh sayılarıyla COMSOL yazılımında elde edilen Sh sayılarının oldukça iyi uyum sağladığını göstermektedir.



Şekil 8.27. Eşitlik ve COMSOL ile elde edilen Sh sayılarının karşılaştırılması

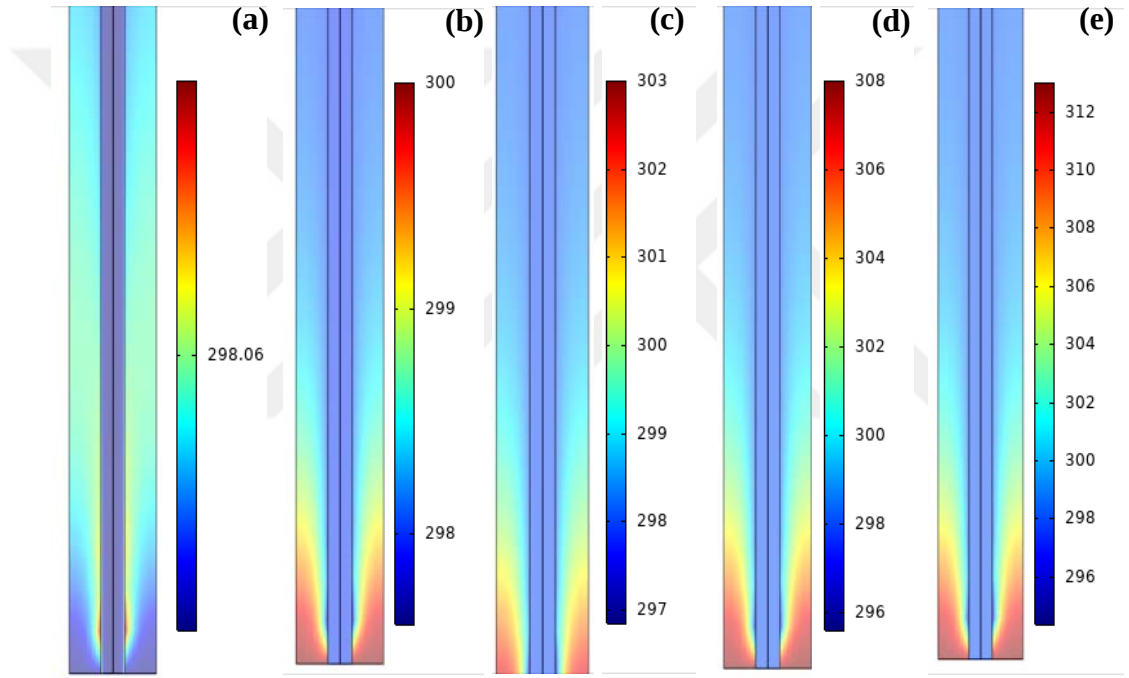
Şekil 8.28’de ise farklı Re sayılarında sistemin nem alma performansının L/D oranıyla değişimi gösterilmiştir. Sistemde membranlı boru uzunluğunun artması hava-desikant temas alanı ve süresini arttıracığından nem alma verimi L/D oranıyla artmaktadır. Re sayısının artması ise hava hızını arttırıp hava-desikant temas süresini azalttığından sistemin nem alma performansını azaltmıştır. Yapılan analizde en yüksek nem alma verimi %99 olarak Re=25, Sc=0,68 ve L/D=80 için elde edilmiştir.



Şekil 8.28. Sistemde farklı Re sayılarında nem alma veriminin L/D ile değişimi

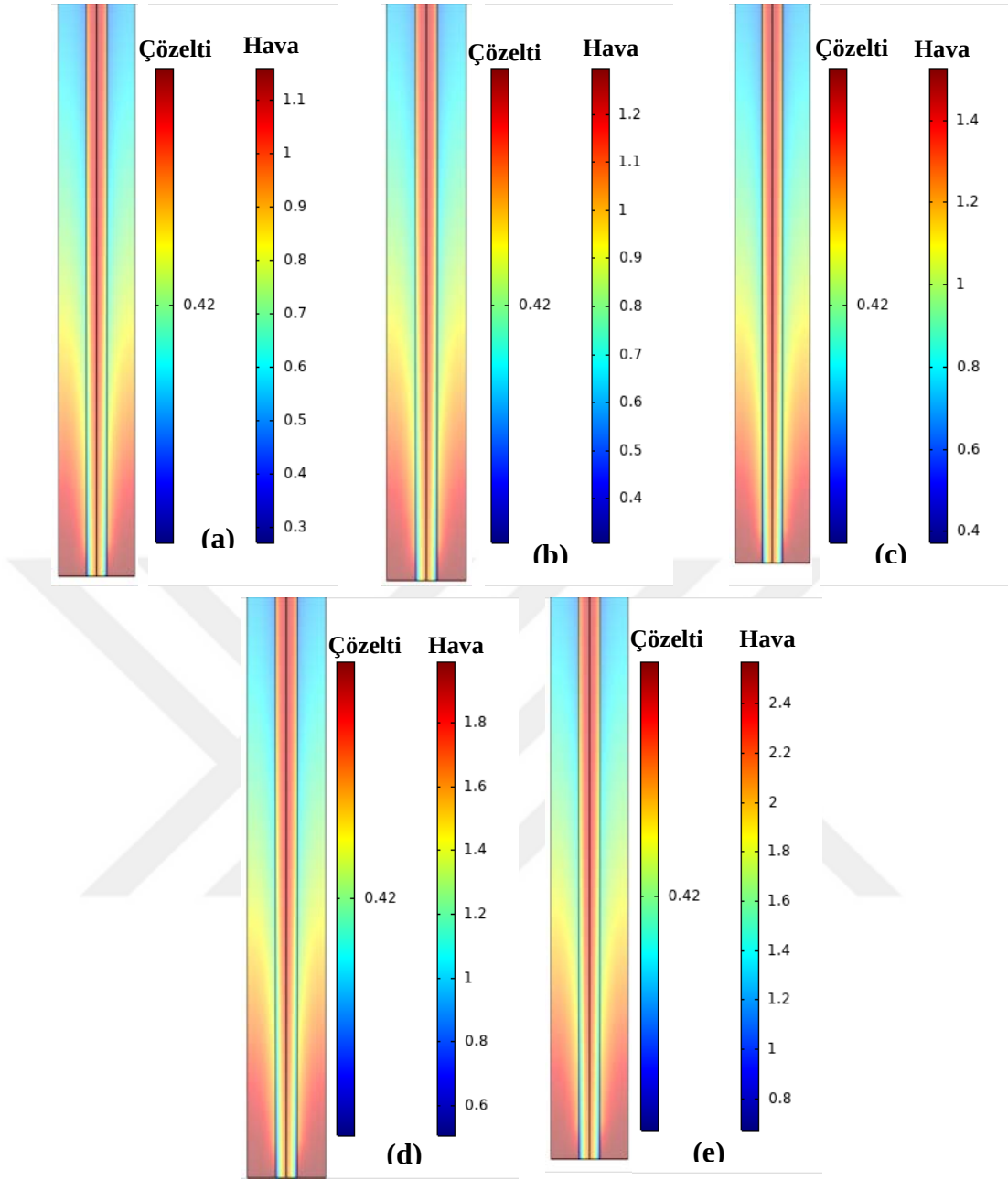
Şekil 8.29’da hava giriş sıcaklığının sistemdeki sıcaklık dağılımına etkisi incelenmiştir. Bu durumda hava giriş sıcaklığı 298, 300, 303, 308 ve 313 K olarak değiştirilirken sıvı desikant giriş sıcaklığı sabit tutulmuştur. Sistemde özellikle hava

tarafındaki sıcaklık dağılımı, beklenildiği gibi, hava giriş sıcaklığından oldukça etkilenmiş olup sıcaklık dağılımının artmasına sebep olmuştur. Enerji kaybindan ötürü havanın sıcaklığı, girişten itibaren membranlı boru boyunca düşüşe geçmiştir. Fakat borunun yaklaşık 0,5 m'lik kısmından sonra sıcaklık dağılımı sabit bir sıcaklığa yaklaşmıştır. Bu sebeple Şekil 8.29'da membranlı borunun 0,5 m'lik kısmına yer verilmiştir. Sistemde hesaplanan nem alma verimleri de hava giriş sıcaklığından oldukça etkilenmektedir. 298 K giriş sıcaklığında nem alma verimi %96,7 olarak hesaplanırken daha yüksek sıcaklıklarda, 300 K için %93,4; 303 K için %89,3; 308 K için %84,3 ve 313 K için %80,6 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 8.29. Hava giriş sıcaklığının sıcaklık dağılımına etkisi: a) 298 K, b) 300 K, c) 303 K, d) 308 K ve e) 313 K

Hava giriş sıcaklığının çözelti konsantrasyonuna ve hava su buharı konsantrasyonuna etkisi ise Şekil 8.30'da gösterilmiştir. Bu durumda hava giriş bağıl nemi 0,9 değerinde sabit tutulmuştur. Hava sıcaklığının artması havadan alınan nem miktarını azalttığından sistemdeki hava su buharı konsantrasyonu dağılımı artmaktadır. Havadaki su buharı konsantrasyonu 298, 300, 303, 308 ve 313 K sıcaklık değerlerinde sırasıyla yaklaşık olarak 1,15-0,65; 1,3-0,75; 1,5-0,8; 1,9-1 ve 2,5-1,3 mol/m³ aralıklarında değişmiştir.



Şekil 8.30. Hava giriş sıcaklığının çözelti ve hava konsantrasyonuna etkisi: a) 298 K, b) 300 K, c) 303 K, d) 308 K ve e) 313 K

8.4. Sonuç

Bu çalışmada membranlı boru-tipi sıvı desikant nem alma sistemi deney düzeneği karşıt akış tipinde imal edilerek sistem pratik olarak test edilmiştir. Deney düzeneğinde $Re=200-2000$ aralığında farklı hava giriş hızlarında Tyvek® Solid ve suni kılıf olmak üzere iki farklı membran için deneyler yapılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar

COMSOL yazılımında gerçekleştirilen sayısal analizle karşılaştırılmıştır. Deneysel ve sayısal analizde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Re=200-2000 aralığında suni kılıf ile yapılan deneylerde sistem sadece Re=200 ve Re=400 için havadan nem alabilmiştir. Re=400'den sonra havadan çözeltiye nem geçişi gözlenememiştir. Deneysel sonuçlara göre suni kılıfta Re=200 ve 400'de nem alma verimleri sırasıyla %4,5-6 ve %1-2,5 aralıklarında değişmiştir.
- Tyvek® Solid ile yapılan deneylerde ise sistem Re=200, 400 ve 600 için havadan sıvı desikanta nem geçişi gözlenmiştir. Sistemin nem alma verimi Re=200 ve 400 için sırasıyla %18,5 ve %13 olarak hesaplanırken Re=600'de nem alma verimi değerleri %5-10 aralığında değişmiştir.
- COMSOL yazılımında oluşturulan 3-boyutlu sayısal model ile elde edilen nem alma verimleri, deney düzeneği ile elde edilen nem alma verimlerine 0,9659 regresyon sabiti ile oldukça yüksek oranda uyum göstermiştir. Böylelikle oluşturulan sayısal modelin membranlı boru-tipi sıvı desikant nem alma sistemini yüksek hassasiyette analiz ettiği sonucuna varılmıştır.
- Çalışmada membranlı boru-tipi sıvı desikant nem alma sisteminde Sh sayısı için önerilen eşitlik, COMSOL modelinde elde edilen Sh sayılarıyla oldukça iyi uyum göstermiş olup bağıl hata %0,1-10 aralığında değişmiştir.
- Deneysel ve sayısal yöntemle elde edilen veriler sistemin nem alma veriminin Re sayısı karşısında oldukça hassas olduğunu göstermiştir. Bunun yanında hava giriş sıcaklığının da nem alma verimi üzerinde etkisi oldukça yüksek olup nem alma verimi 298, 300, 303, 308 ve 313 K sıcaklıklarda sırasıyla %96,7; %93,4; %89,3; %84,3 ve %80,6 olarak belirlenmiştir.

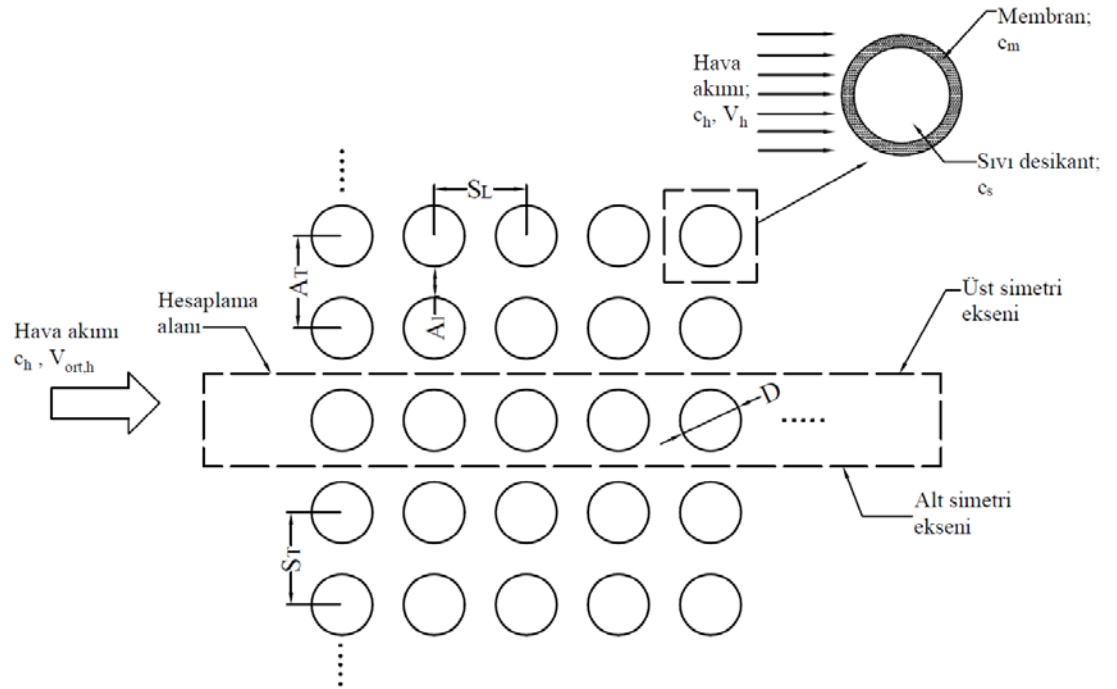
9. MEMBRANLI BORU DEMETİ SIVI DESİKANT NEM ALMA SİSTEMİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ

9.1. Giriş

Bu çalışmada, membranlı boru demeti sıvı desikant nem alma sisteminin 2-boyutlu sayısal analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, membranlı boru demeti nem alma sistemi, boru demeti tipi ısı değiştiricilerde sıklıkla kullanılan sıralı ve saptırmalı olmak üzere iki farklı şekilde COMSOL yazılımında modellenmiştir. Yapılan sayısal analizde Re sayısı ve boru sayısı parametrelerine göre sistemdeki nem alma veriminin değişimi incelenmiş ve sıralı ve saptırmalı sistemlerde optimum hava hızı ve boru sayısı belirlenmiştir.

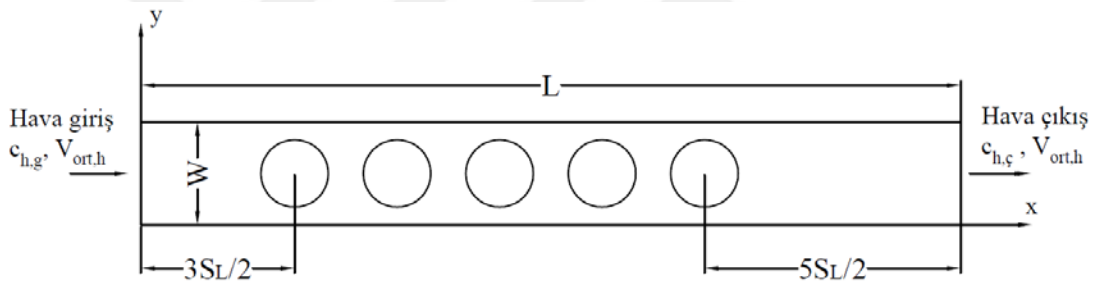
9.2. Sistemin Modellenmesi

Yapılan analizde, daha önce söz edildiği gibi, sıralı ve saptırmalı olmak üzere iki tip boru demeti kullanılmıştır. Sıralı tip boru demeti Şekil 9.1’de gösterilmiştir.



Şekil 9.1. Sıralı tip membranlı boru demeti sistemi

Şekil 9.1’de de görülebileceği gibi sistem membranlı boruların, yatay ve dikey yönde, aralarındaki mesafe eşit olacak şekilde, ardarda yerleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Burada iki boru merkezi arasındaki mesafe yatayda S_L , dikeyde ise S_T olarak belirlenmiştir. Membranlı boruların dış çapı ise D ile temsil edilmektedir. Sıralı tip sistemde S_L mesafesi membranlı boruların dış çaplarının 1,5 katı olacak şekilde belirlenmiştir. Hava sistemde $V_{ort,h}$ hızında ve c_h konsantrasyonunda girerken, membranlı borularda durağan halde c_s konsantrasyonunda LiCl-su çözeltisi bulunmaktadır. Nemli hava membranlı boruların etrafından geçerken yarı-geçirgen membran sayesinde havadan sıvı desikanta bir miktar su buharı geçişi olacaktır. Modellenen sistemde, hesaplama kolaylığı olması açısından, tüm borular için hesaplama yapmak yerine şekildeki gibi alt ve üst kısımdan simetrik bir hesaplama alanı tanımlanarak sistem çözümlemesi bu alanda gerçekleştirilmiştir. Sistemde belirlenen hesaplama alanı, beş adet membranlı boru için, Şekil 9.2’de gösterilmiştir.

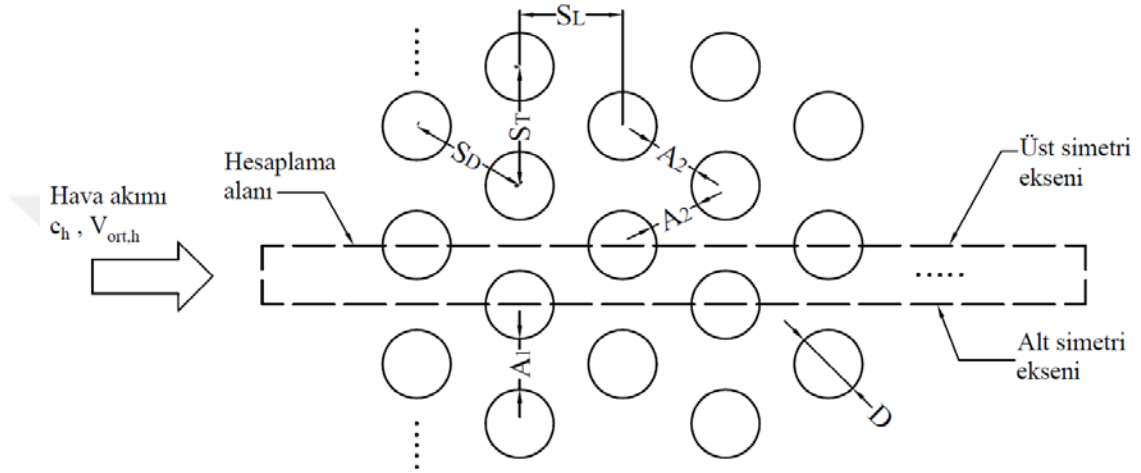


Şekil 9.2. Sıralı tip sistemde belirlenen hesaplama alanı

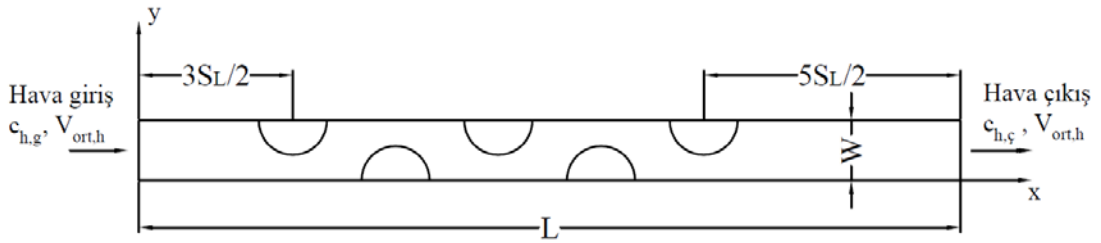
Şekil 9.2’de görülebileceği gibi, belirlenen hesaplama alanı dikdörtgen şeklinde olup uzunluğu L , genişliği ise W ile gösterilmiştir. Sistemde hava x -yönünde akmaktadır. Girişte ve çıkışta düzgün bir hava akımının elde edilebilmesi için giriş bölgesinde $3 \cdot S_L/2$, çıkış bölgesinde ise $5 \cdot S_L/2$ uzunluğunda boşluk bırakılmıştır. Burada, yukarıda belirtildiği gibi, boruların arasındaki yatay mesafe S_L olduğundan, L uzunluğu beş borulu sistemde $8 \cdot S_L$ olacaktır. Hava kanalı genişliği W ise, sistem alt ve üst kısımdan simetrik olduğundan, S_T uzunluğuna eşit olacaktır. Sıralı tip sistemde hesaplamalar $S_T=S_L$ olacak şekilde yapılmıştır.

Saptırmalı tip boru demeti sistem Şekil 9.3’te gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılabileceği gibi saptırmalı sistemde membranlı borular eşkenar üçgen formu

oluşturacak şekilde yerleştirilmiştir. Burada yine iki boru arasındaki yatay mesafe S_L , dikey mesafe S_T ve köşegen mesafe ise S_D ile ifade edilmiştir. Sıralı tip sistemde olduğu gibi burada da S_L uzunluğu membranlı boruların dış çaplarının 1,5 katıdır. Boru düzeni eşkenar üçgen biçiminde olduğundan S_T uzunluğu S_D uzunluğuna eşit olacaktır. S_T ile S_L arasında $S_T = 2 \cdot S_L / \sqrt{3}$ ilişkisi bulunacaktır. Saptırmalı tip sistemde tanımlanan hesaplama alanı Şekil 9.4'te gösterilmiştir.



Şekil 9.3. Saptırmalı tip membranlı boru demeti sistemi



Şekil 9.4. Saptırmalı tip sistemde belirlenen hesaplama alanı

Saptırmalı tip sistemde de hava giriş ve çıkış düzlemlerinde sırasıyla $3 \cdot S_L / 2$ ve $5 \cdot S_L / 2$ uzunluğunda boşluklar bırakılmıştır. Burada toplam kanal uzunluğu L yine $8 \cdot S_L$ olurken kanal genişliği W ise $S_T / 2$ olacaktır.

9.3. Sistem Performansının Hesaplanması

Sıralı ve saptırmalı tip membranlı boru demeti sıvı desikant nem alma sistemlerinde aşağıdaki kabullere göre hesaplamalar yapılmıştır:

- Sistem sürekli rejimdedir.
- Hava akımı tam gelişmiş sıkıştırılmaz laminar akıştır.
- Sıvı desikant çözeltisi durağan halde ve konsantrasyonu sabittir.
- Hava akımının boruların içerisine giremediği varsayılmıştır. Boruların yüzeylerinde kaymama sınır şartı vardır.
- Sistem ısıl olarak yalıtılmış ve sıcaklık sabit kabul edilmiştir. Bu sebeple hava akımının fiziksel özelliklerinin sıcaklıkla değişmediği kabul edilmiştir.
- Borular düzgün ve rijit geometriye sahiptir. Akış sebebiyle herhangi bir deformasyona uğramadıkları kabul edilmiştir.

Her iki sistem için hava tarafında 2-boyutlu kartezyen koordinatlarda süreklilik, momentum ve kütle iletim denklemleri aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir [48].

$$\frac{\partial V_{x,h}}{\partial x} + \frac{\partial V_{y,h}}{\partial y} = 0 \quad (9.1)$$

$$\mu_h \left(\frac{\partial^2 V_{x,h}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_{x,h}}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial P_h}{\partial x} \quad (9.2)$$

$$\mu_h \left(\frac{\partial^2 V_{y,h}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_{y,h}}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial P_h}{\partial y} \quad (9.3)$$

$$D_h \left[\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right] = V_{x,h} \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right) + V_{y,h} \left(\frac{\partial c}{\partial y} \right) \quad (9.4)$$

Yukarıdaki eşitliklerde $V_{x,h}$ ve $V_{y,h}$ hızın sırasıyla x ve y bileşenlerini (m/s) temsil etmektedir. μ_h ve D_h sırasıyla havanın belirlenen sıcaklıktaki dinamik viskozitesini (Pa.s) ve su buharı difüzyon katsayısını (m^2/s) ifade etmektedir. c ise havanın konsantrasyonudur (mol/m^3). Membran tarafında kütle denklemi eşitlik (9.5)'te

verilmiştir [48]. Burada akışkan hareketi bulunmadığından süreklilik ve momentum denklemleri yazılmamıştır.

$$D_m \left[\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right] = 0 \quad (9.5)$$

Eşitlik (9.5)'te D_m su buharının membrandaki difüzyon katsayısıdır (m^2/s). Sıvı desikant çözeltisi de durağan halde olduğundan momentum ve süreklilik denklemleri yazılmamıştır. Ayrıca çözelti konsantrasyonu sabit kabul edildiğinden kütle denkleminin de yazılmasına gerek yoktur. Sıralı ve saptırmalı tip boru demeti sistemlerinde hava için Re sayısı ise eşitlik (9.6) ile tanımlanmıştır:

$$Re = \frac{\rho_h V_{max,h} D}{\mu_h} \quad (9.6)$$

Yukarıdaki eşitlikte ρ_h havanın yoğunluğunu (kg/m^3), $V_{max,h}$ ise havanın kanalda ulaştığı en yüksek hızı (m/s) ifade etmektedir. Sıralı ve saptırmalı tip boru demeti sistemlerinde hava en yüksek hızına en dar kesitten geçerken ulaşacaktır. Bu sebeple sıralı tip sistemde en yüksek hız, borular arasındaki minimum akış alanında, Şekil 9.1'de gösterilen A_1 kesitinde gerçekleşecektir. Bu durum aşağıda verilen kütlenin korunumu denklemleriyle de ifade edilebilir:

$$\rho_h V_{ort,h} A_T = \rho_h V_{max,h} A_1 \quad (9.7)$$

veya

$$V_{ort,h} S_T = V_{max,h} (S_T - D) \quad (9.8)$$

Burada $V_{ort,h}$ havanın boru demeti sistemine yaklaşma hızıdır (m/s). Eşitlik (9.8)'de $V_{max,h}$ yalnız bırakılırsa sıralı tip sistemde en yüksek hız için aşağıdaki denklem elde edilir:

$$V_{max,h} = \frac{S_T}{(S_T - D)} V_{ort,h} \quad (9.9)$$

Saptırmalı tip boru demeti sisteminde ise borular eşkenar üçgen düzeninde yerleştirildiğinden $2A_2 > A_1$ olacak ve kanaldaki en yüksek hız, minimum akış alanı olan A_1 kesitinde gerçekleşecektir. Dolayısıyla saptırmalı tip sistemde de $V_{max,h}$ eşitlik (9.9) kullanılarak hesaplanabilecektir.

Sistemlerin nem alma verimleri eşitlik (9.10)'da verilmiştir.

$$\eta(\%) = 100 \frac{(c_{h,g} - c_{h,\zeta})}{(c_{h,g} - c^{sat})} \quad (9.10)$$

Eşitlik (9.10)'da $c_{h,g}$ ve $c_{h,\zeta}$ sırasıyla havanın boru demeti girişindeki ve çıkışındaki su buharı konsantrasyonunu (mol/m^3) göstermektedir. c^{sat} ise hava ile dengede olan sıvı desikanttaki su buharı konsantrasyonudur (mol/m^3).

9.3.1. Sınır Şartları

Sıralı ve saptırmalı tip sistemlerde havanın giriş şartları Şekil 9.2'de ve 9.4'te verilmiştir. Buna göre havanın giriş koşulları aşağıdaki eşitliklerdeki gibi olacaktır:

$$x = 0, \quad V_h = V_{ort,h} \quad (9.11a)$$

$$x = 0, \quad c_h = c_{h,g} \quad (9.11b)$$

Her iki tip boru demetinde de sistem performansı Re sayılarına göre hesaplanacağından öncelikle herhangi bir Re sayısında eşitlik (9.6) kullanılarak $V_{max,h}$ bulunacak daha sonra eşitlik (9.9) yardımıyla $V_{ort,h}$ hesaplanacaktır. Eşitlik (9.11b)'deki $c_{h,g}$ ise aşağıdaki eşitlikle hesaplanacaktır:

$$c_{h,g} = \frac{\phi P_{sat}}{RT} \quad (9.12)$$

Yukarıdaki eşitlikte ϕ havanın girişteki bağıl nem değerini, R evrensel gaz sabitini (kPa.m³/(mol.K)), T mutlak sıcaklığı (K) ve P_{sat} nemli havanın doyma basıncını (kPa) ifade etmektedir. P_{sat} Antoine denklemiyle hesaplanmıştır [40].

$$P_{sat} = e^{A - \frac{B}{T+C}} \quad (9.13)$$

Burada A=16,3872, B=3885,7 ve C=230,15 olup su buharı için Antoine denklemi parametreleridir. Kanal çıkışında ise konsantrasyon gradyanı $\nabla c_h = 0$ olacaktır. Sistemde kaymama şartından ötürü boru yüzeylerinde hava hızı V_h sıfır olacaktır. Sıralı ve saptırmalı tip boru demeti sistemlerinde Şekil 9.1 ve 9.3'teki gibi kanalın alt ve üst kenarında simetri eksenleri tanımlandığından bunun için belirlenen sınır şartları aşağıda verilmiştir.

$$y = 0, y = W \quad - N \cdot V_h = 0 \quad (9.14a)$$

$$y = 0, y = W \quad - N \cdot (-D_h \nabla c_h) = 0 \quad (9.14b)$$

Sistemde çözeltinin su buharı konsantrasyon değeri alınabilecek nem miktarını etkileyeceğinden bunun da belirlenmesi gerekmektedir. Çözeltideki su buharı konsantrasyonu eşitlik (9.15) ile tarif edilmiştir:

$$c_s = \frac{P_{des}}{RT} \quad (9.15)$$

Burada P_{des} çözeltinin buhar basıncı (kPa) olup aşağıdaki eşitlikle hesaplanmıştır [43]:

$$P_{des} = P_{sat} \cdot \alpha \left(\beta + \kappa \frac{T}{647,096} \right) \quad (9.16)$$

Eşitlik (9.16)'daki α , β ve κ parametreleri ise aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir [43].

$$\beta = 2 - \left[1 + \left(\frac{\xi}{\pi_0} \right)^{\pi_1} \right]^{\pi_2} \quad (9.17a)$$

$$\kappa = \left[1 + \left(\frac{\xi}{\pi_3} \right)^{\pi_4} \right]^{\pi_5} - 1 \quad (9.17b)$$

$$\alpha = 1 - \left[1 + \left(\frac{\xi}{\pi_6} \right)^{\pi_7} \right]^{\pi_8} - \pi_9 e^{\frac{-(\xi-0,1)^2}{0,005}} \quad (9.17c)$$

Yukarıdaki eşitliklerdeki $\pi_0, \pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8, \pi_9$ değerleri LiCl-su için Çizelge 9.1’de verilmiştir [43]. ξ ise sıvı desikant çözeltisinin konsantrasyonudur (kg/kg).

Çizelge 9.1. LiCl-su çözeltisi için buhar basıncı sabitleri

Sabitler	LiCl-su
π_0	0,28
π_1	4,30
π_2	0,60
π_3	0,21
π_4	5,10
π_5	0,49
π_6	0,362
π_7	-4,75
π_8	-0,40
π_9	0,03

9.3.2. Çözüm Yöntemi

Sıralı ve saptırmalı tip boru demeti sıvı desikant nem alma sistemlerinin çözümlemeleri, daha önce söz edildiği gibi, COMSOL Multiphysics yazılımında 2-boyutlu model oluşturularak gerçekleştirilmiştir. Analizde membranlı boru sayısı (n) ve Reynolds sayısı (Re) bağımsız değişkenler olarak kabul edilmiş ve hava hızının ve kütle transferi yüzey alanının sistem performansına etkisi incelenmiştir. Sistem performansının laminar akış şartlarında hesaplanabilmesi için Re sayıları 25, 50, 100 ve 200 olarak belirlenmiştir. Boru sayısı ise 1’den 50’ye kadar arttırılarak farklı Re sayılarında optimum boru sayısının belirlenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca sıralı tip

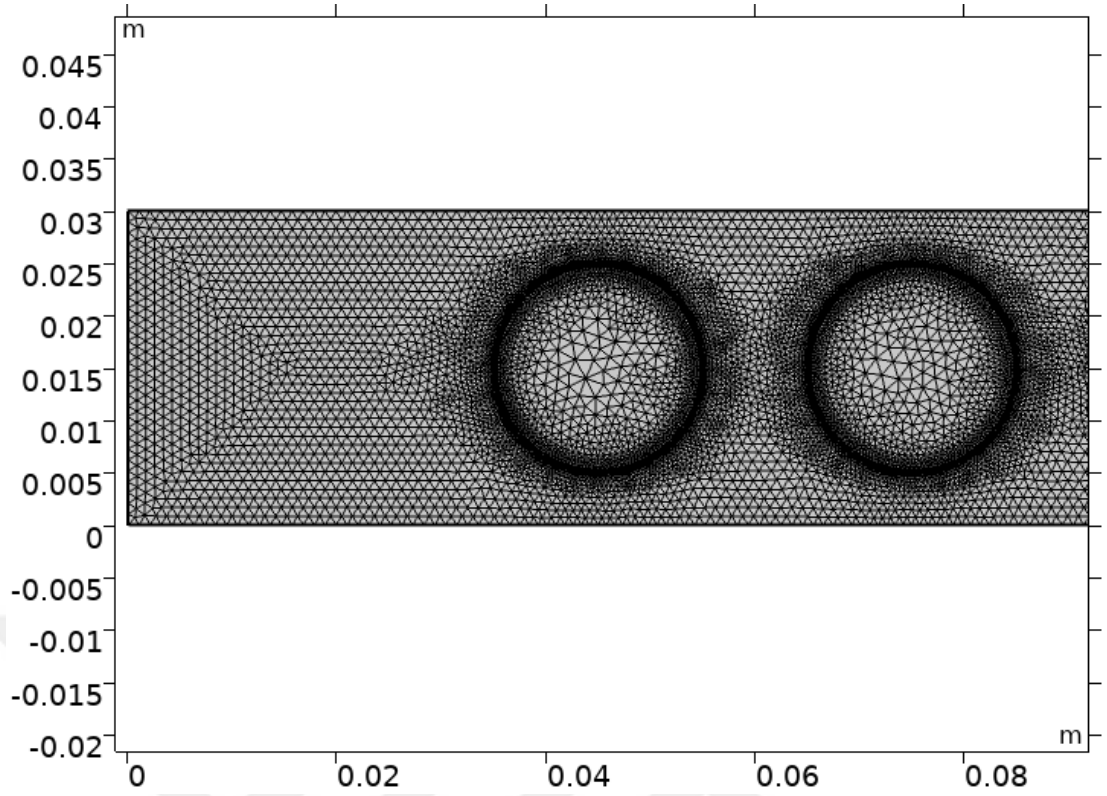
sistemde borular arası düşey mesafe $S_T=S_L$, $S_T=2\cdot S_L$ ve $S_T=4\cdot S_L$ olacak şekilde değiştirilerek S_T 'nin sistemin nem alma performansı üzerine etkisi incelenmiştir.

COMSOL yazılımında yapılan sayısal analizde, süreklilik, momentum ve kütle denklemlerinin çözülebilmesi için üç farklı modül kullanılmıştır. Süreklilik ve momentum denkleminin çözümü “Laminar Flow” modülü ile gerçekleştirilmiştir. Söz konusu modülde tam gelişmiş akış için giriş şartı olarak $V_{ort,h}$ hızı programa girilmiştir. Hava ve membran tarafı kütle denklemlerinin çözümünde ise “Transport of Diluted Species” modülü kullanılmıştır. “Transport of Concentrated Species” modülünde ise sıvı desikant için başlangıç konsantrasyonu tanımlanmıştır. Sistemde hesaplamalar için belirlenen parametreler Çizelge 9.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 9.2. COMSOL yazılımında belirlenen hesaplama parametreleri

Parametreler	Sembol	Birim	Değer
Membran su buharı difüzyon katsayısı	D_m	m^2/s	$1,35\cdot 10^{-6}$
Hava su buharı difüzyon katsayısı [41]	D_h	m^2/s	$2,5\cdot 10^{-5}$
Su buharının havadaki kütle transferi katsayısı [43]	k_a	m/s	$2,5\cdot 10^{-2}$
Membranlı boru dış çapı	D	mm	20
Sıvı desikant konsantrasyonu	ξ	-	0,42
Membran kalınlığı	δ	mm	0,25
Hava ve çözelti sıcaklıkları	T	K	298
Hava Reynolds sayısı	Re	-	25-200
Membranlı boru sayısı	n	-	1-50
Evrensel gaz sabiti	R	$Pa\cdot m^3/(mol\cdot K)$	8,314

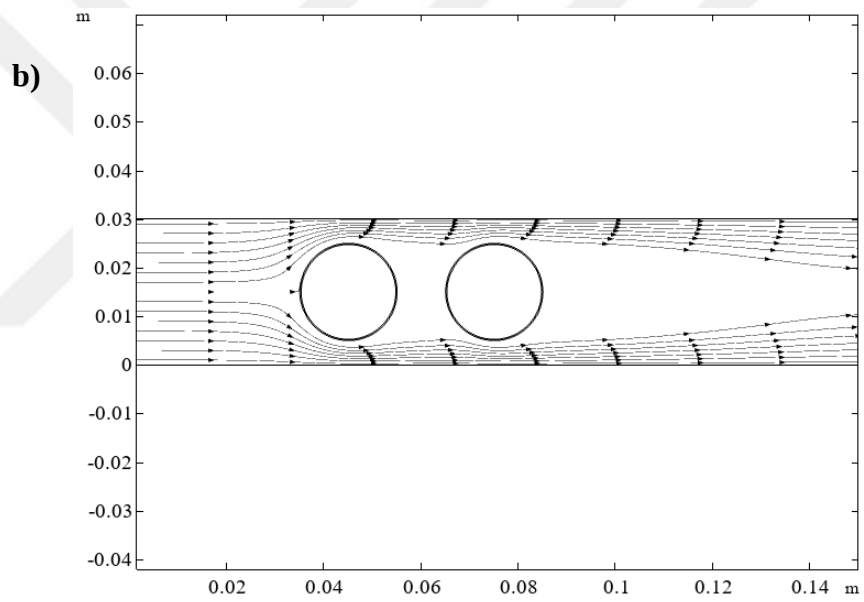
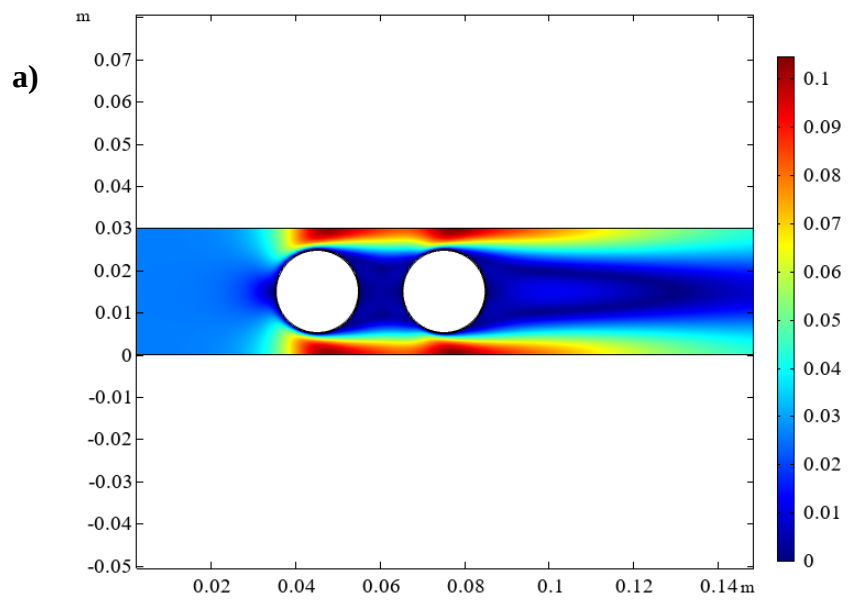
COMSOL yazılımında oluşturulan modelde çözüm için son derece ince yapılı ağ yapısı (mesh) oluşturulmuştur. Oluşturulan ağ yapısında özellikle momentum ve kütle transferi açısından hassas olan boru yüzeylerinde ağ yapısı daha da ince tutulmuştur. Sıralı tip sistemde oluşturulan örnek ağ yapısı Şekil 9.5’te gösterilmiştir.

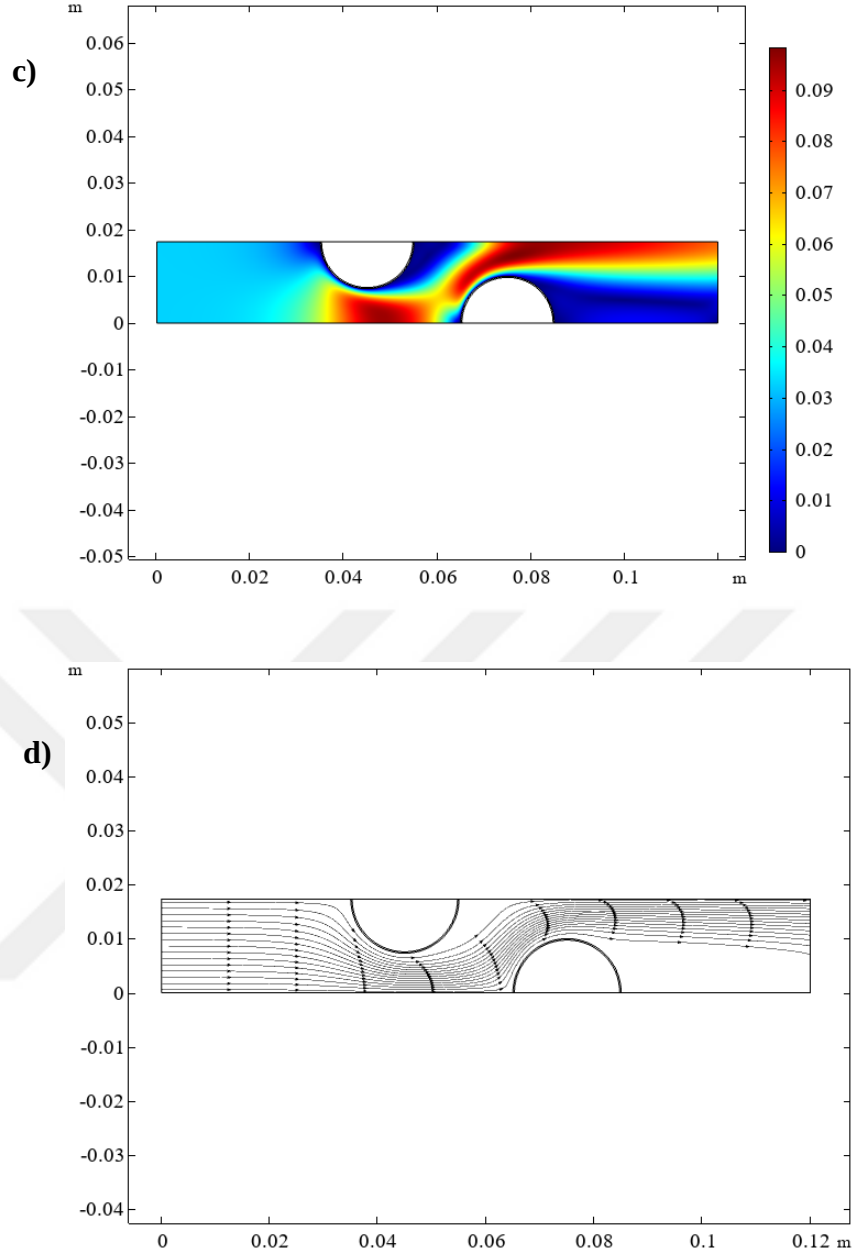


Şekil 9.5. Sıralı tip sistem için örnek ağ (mesh) yapısı

9.4. Bulgular ve Tartışma

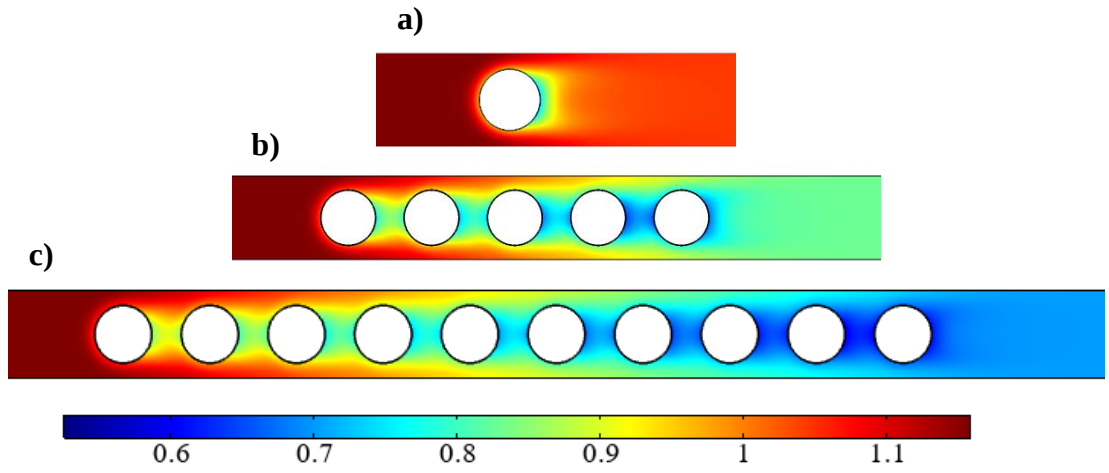
COMSOL yazılımında gerçekleştirilen sayısal analizde, daha önce söz edildiği gibi, membranlı boru sayısının (n) ve Re sayısının sistem performansına etkisi incelenmiştir. Sıralı ve saptırmalı tip sistemlerde elde edilen hız dağılımları ve hız akış çizgileri $Re=100$ ve $n=2$ için Şekil 9.6'da gösterilmiştir. Şekil 9.6a ve 9.6c'de görülen sıralı ve saptırmalı tip sistemlerdeki hız dağılımında, hız kanal girişinde yaklaşık 0,03 m/s iken kanalın en dar kesitinden geçerken 0,1 m/s değerinin üstüne çıkmıştır. Her iki sistemin akım çizgilerine bakıldığında sıralı tip sistemle saptırmalıya göre, beklenildiği gibi, daha düzgün bir akış elde edilmiştir.



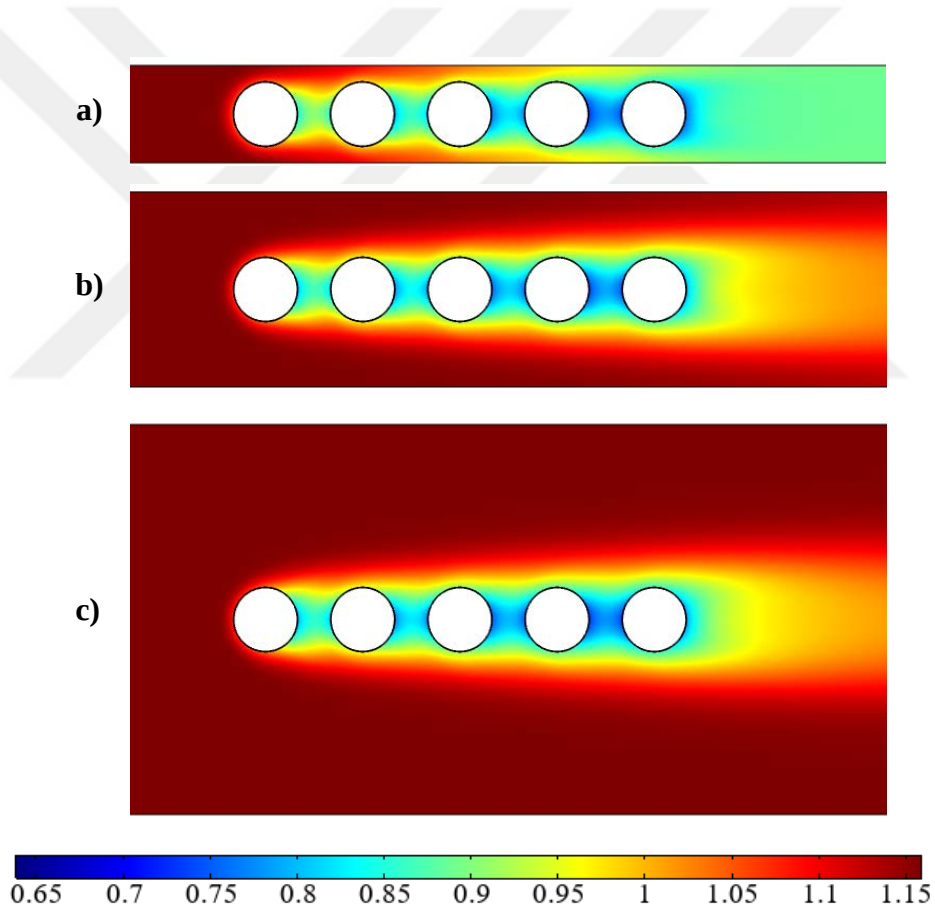


Şekil 9.6. Sıralı ve saptırmalı membranlı boru demeti sistemlerinde hız dağılımları ve akım çizgileri a-c) hız dağılımları, b-d) akım çizgileri

Şekil 9.7’de ise sıralı tip sistemde $Re=100$ için farklı boru sayılarında ($n=1,5$ ve 10) elde edilen hava su buharı konsantrasyonu dağılımları gösterilmiştir. Sistemde her üç durum için giriş konsantrasyon değeri $1,1579 \text{ mol/m}^3$ iken boru sayısı arttıkça kütle transferi temas yüzeyinin artmasından ötürü çıkış konsantrasyonu azalmaktadır. Hava çıkış su buharı konsantrasyonu $n=1$ ve 5 ’te sırasıyla yaklaşık $1,1$ ve $0,9 \text{ mol/m}^3$ olarak bulunurken $n=10$ için konsantrasyon değeri $0,7 \text{ mol/m}^3$ seviyesine kadar düşmüştür.



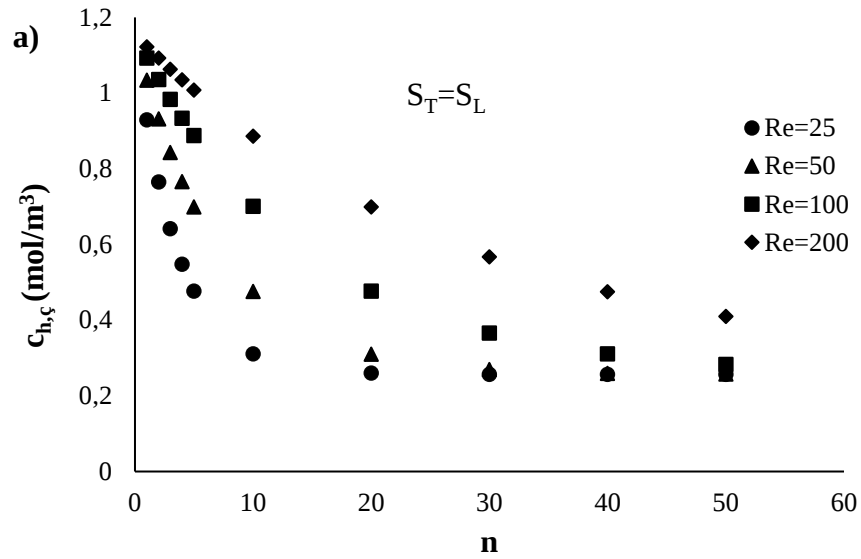
Şekil 9.7. Sıralı tip sistemde farklı boru sayılarında hava su buharı konsantrasyonu dağılımı a) $n=1$, b) $n=5$ ve c) $n=10$

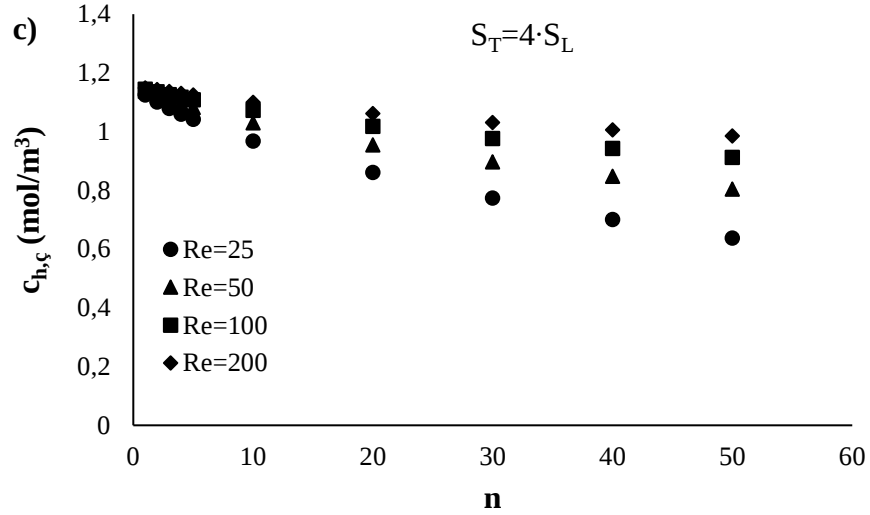
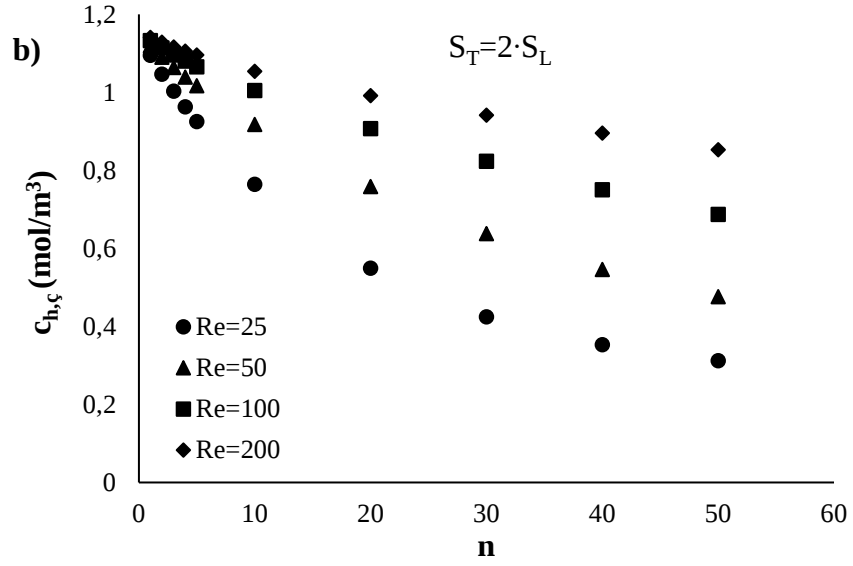


Şekil 9.8. Sıralı tip sistemde S_T 'nin hava konsantrasyon dağılımına etkisi a) $S_T=S_L$, b) $S_T=2 \cdot S_L$ ve c) $S_T=4 \cdot S_L$

Sıralı tip sistemde borular arasındaki düşey mesafenin hava çıkış konsantrasyonuna etkisi ise Şekil 9.8'de gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılabileceği gibi S_T 'nin

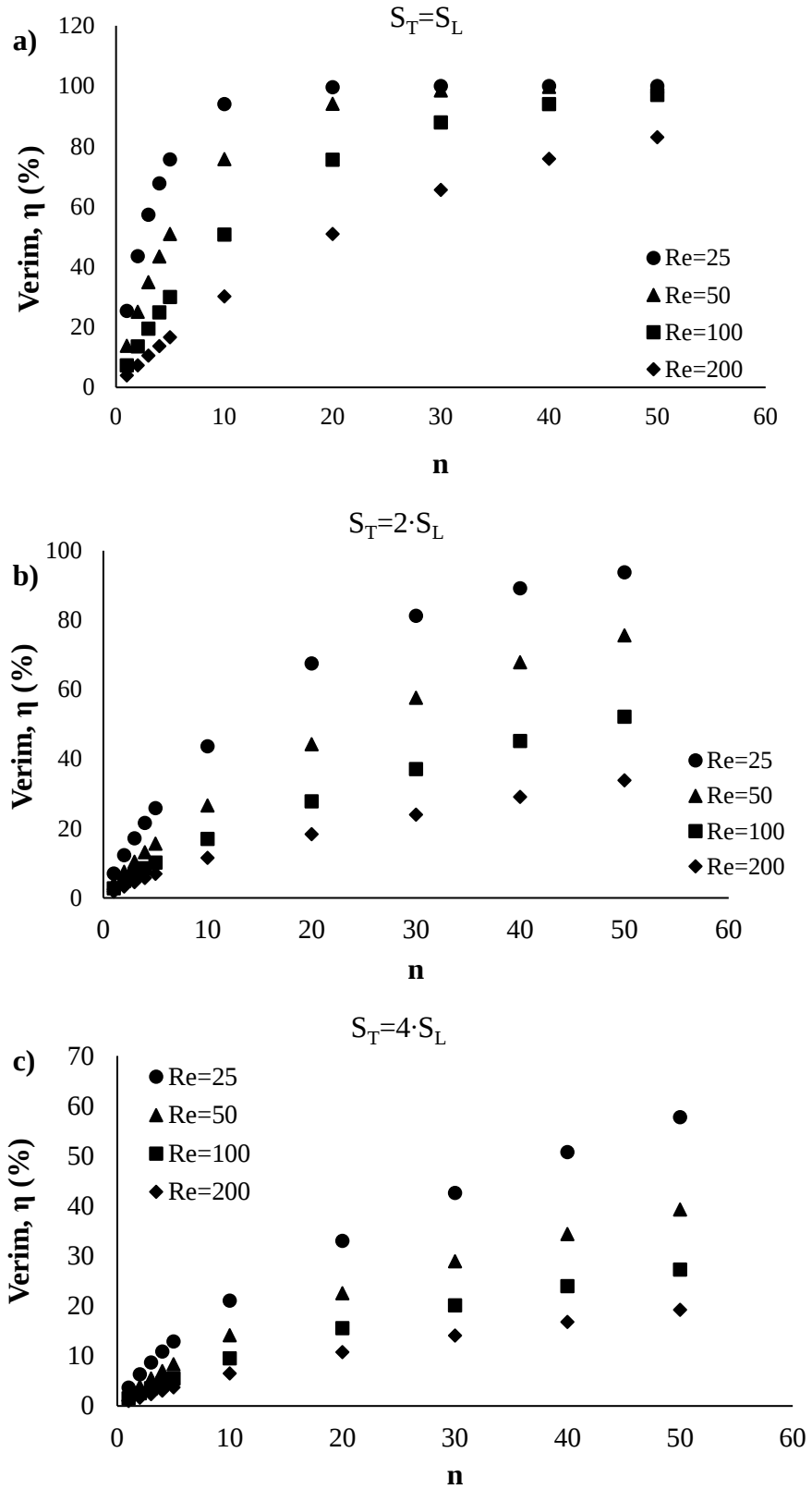
artmasıyla boruların yüzeyi ile temas eden akışkan miktarı azalacağından hava çıkış ortalama konsantrasyonu artmaktadır. Bu durum Şekil 9.9'da hava çıkış konsantrasyonlarının farklı Re sayılarında boru sayısı ile değişimi grafiğinde daha iyi anlaşılmaktadır. Şekil 9.9a'da görülebileceği gibi en düşük $Re=25$ için sistemde 20 tane membranlı boru kullanılması halinde havadaki su buharı konsantrasyonu ulaşabileceği en düşük seviye olan c_{sat} değerine ($c_{sat}=0,25611 \text{ mol/m}^3$) ulaşmaktadır. Sistemde Re sayısı arttıkça hava-desikant temas süresinin azalmasından dolayı en düşük konsantrasyon değerine ulaşılabilmesi için kullanılması gereken boru sayısı beklenildiği gibi artmaktadır. Bu sayı $Re=50$ ve $Re=100$ için sırasıyla 30 ve 50 civarında bulunurken $Re=200$ 'de havanın konsantrasyonu belirlenen maksimum boru sayısında en düşük seviyeye ulaşamamaktadır. Diğer dikey mesafe değerlerinde ise sadece $S_T=2 \cdot S_L$, $Re=25$ ve $n=50$ olması durumunda havanın su buharı konsantrasyonu en düşük seviyeye yaklaşmaktadır.





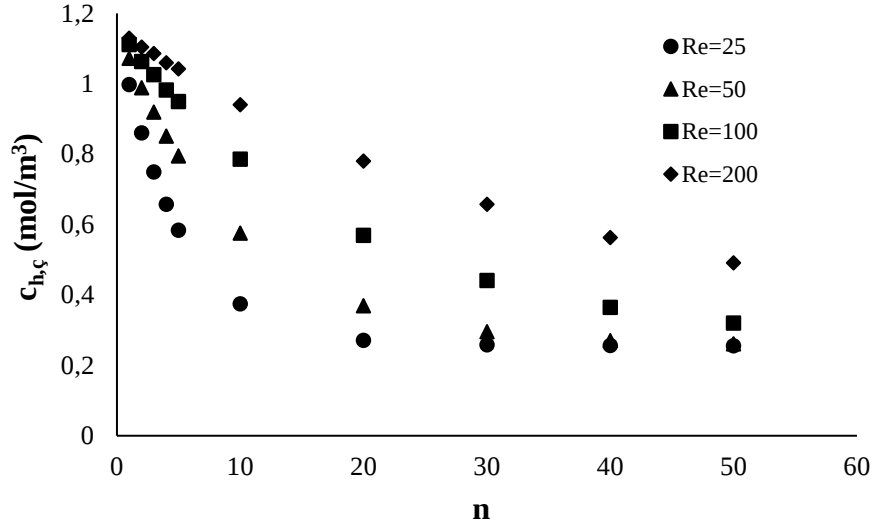
Şekil 9.9. Sıralı tip sistemde farklı S_T ve Re sayılarında hava çıkış konsantrasyonunun boru sayısı ile değişimi a) $S_T=S_L$, b) $S_T=2 \cdot S_L$ ve c) $S_T=4 \cdot S_L$

Sıralı tip sistemde farklı S_T ve Re sayılarında sistemin nem alma veriminin boru sayısı ile değişimi Şekil 9.10'da gösterilmiştir. Sistemin nem alma verimi bilindiği gibi hava çıkış konsantrasyonunun azalmasıyla artacaktır. Bu sebeple optimum durumda $S_T=S_L$ ve $Re=25$ için 20 tane boru kullanılması durumunda sistem maksimum nem alma verimi değerine ulaşmaktadır. Yüksek hava hızlarında, kullanılan boru sayısını arttırarak, sistemin nem alma performansının arttırabileceği Şekil 9.9 ve 9.10'da açıkça görülebilmektedir. Fakat sistemde membranlı boru sayısının arttırılması oluşacak basınç kaybının ve sistem maliyetinin artmasına yol açacaktır.

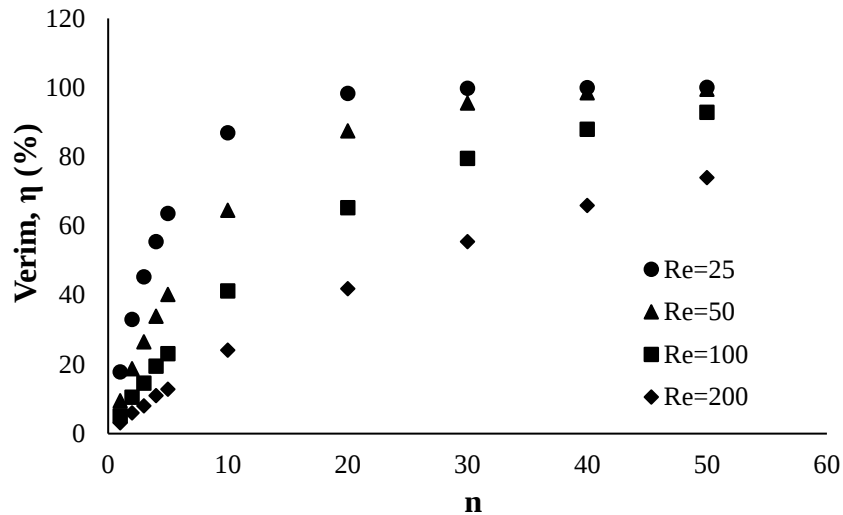


Şekil 9.10. Sıralı tip sistemde farklı S_T ve Re sayılarında nem alma veriminin boru sayısı ile değişimi a) $S_T = S_L$, b) $S_T = 2 \cdot S_L$ ve c) $S_T = 4 \cdot S_L$

Şekil 9.11’de ise saptırmalı tip membranlı boru demeti sisteminde hava çıkış konsantrasyonunun farklı Re sayılarında boru sayısı ile değişimi gösterilmiştir. Saptırmalı tip boru demeti sisteminde de en düşük Re sayısında hava çıkış konsantrasyonu denge durumuna yaklaşık 20 boru kullanılması durumunda ulaşmaktadır. Bu sistemde elde edilen sonuçların $S_T=S_L$ olan sıralı tip sisteme oldukça yakın olduğu görülebilmektedir.



Şekil 9.11. Saptırmalı tip sistemde farklı Re sayılarında hava çıkış konsantrasyonunun boru sayısı ile değişimi



Şekil 9.12. Saptırmalı tip sistemde farklı Re sayılarında nem alma veriminin boru sayısı ile değişimi

Saptırmalı tip sistemde nem alma veriminin farklı Re sayılarında boru sayısı ile değişimi Şekil 9.12’de gösterilmiştir. Yine burada da en düşük Re sayısında 20 boru kullanılması durumunda sistem %100 verime ulaşmıştır. Bu sebeple her iki sistemde de düşük Re sayısında optimum boru sayısının 20 olduğu sonucuna varılmıştır.

9.5. Sonuç

Bu çalışmada membranlı boru demeti sıvı desikant nem alma sisteminin COMSOL yazılımında 2-boyutlu modellemesi ve analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizde, sıralı ve saptırmalı olmak üzere iki farklı boru demeti sistemi oluşturularak, kullanılan membranlı boru sayısının, hava Re sayısının ve sıralı tip sistemde borular arasındaki dikey mesafenin nem alma performansına etkisi araştırılmıştır.

Çalışma sonucuna göre her iki tip sistemde aynı hava Re sayılarında, boru sayısının artması sistem performansını önemli derecede iyileştirmiştir. Düşük Re sayılarında hava-desikant temas süresinin artması sayesinde hava su buharı konsantrasyonu daha az boru sayısında ulaşabileceği minimum seviyeye ulaşmıştır. Sıralı sistemde $S_T=S_L$ olduğu durumda Re=25, 50 ve 100 için sırasıyla optimum boru sayıları 20, 30 ve 50 olarak belirlenirken $S_T=2 \cdot S_L$ olduğu durumda sadece Re=25 için belirlenen boru sayısı aralığında nem alma verimi %100 değerine yaklaşmıştır. Saptırmalı sistemde elde edilen sonuçlar ise sıralı sistemin $S_T=S_L$ olduğu duruma oldukça yakın olup optimum boru sayısı yine yaklaşık 20 olarak Re=25 için bulunmuştur.

10. ÇALIŞMA SONUÇLARI

Bu doktora tezi çalışması kapsamında Türkiye’de henüz çalışılmamış, Dünya’da ise yakın geçmişte çalışılmaya başlanmış olan membranlı nem alma sistemleri hakkında bilgiler verilmiş ve bazı membranlı nem alma sistemlerinin kuramsal analizleri yapılmıştır. Çalışmada ayrıca literatürde şu ana kadar rastlanılmamış olan membranlı boru-tipi sıvı desikant nem alma sisteminin tasarımı yapılarak farklı koşullar altında kuramsal ve deneysel analizleri başarıyla gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada ilk olarak membranlı kübik nem alma sisteminin nemli ve kuru hava akışkanları için zamana bağlı tek boyutlu modellenmesi, “COMSOL Multiphysics” yazılımında ve sonlu farklar yöntemi kullanılarak “MATLAB” yazılımında gerçekleştirilmiştir. İki yöntemle elde edilen sonuçların birbirleri ile uyumu COMSOL yazılımının sistemi hassas bir şekilde çözümlediğini göstermiştir. Ayrıca kübik sistem için yapılan analizler sayesinde membran teorisi biraz daha iyi anlaşılmış ve nispeten karmaşık sistemler için yapılan analizlerin temeli oluşturulmuştur.

İkinci çalışmada membranlı-boru tipi nem alma sisteminin zamana bağlı 2-boyutlu eksenel-simetrik olarak tasarımı COMSOL yazılımında yapılmış ve kütle transferi analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada modellenen sistemde nemli ve kuru hava akışkanları kullanılmış, nemli ve kuru hava taraflarında kütle transferi katsayıları için tasarimsal parametrelere bağlı pratik eşitlikler elde edilmiştir. Elde edilen bazı sonuçlar yine MATLAB yazılımında oluşturulan sonlu farklar modeliyle karşılaştırılmış ve COMSOL modelinin doğrulaması yapılmıştır.

Gerçekleştirilen üçüncü çalışmada, ilk çalışmada nemli ve kuru hava akışkanları için modellenen kübik nem alma sisteminin, bu kez nemli hava-sıvı desikant akışkanları için analizi yapılmıştır. Oluşturulan zamana bağlı tek boyutlu COMSOL modelinde, membranlı nem alma sisteminin sıvı desikant varlığında davranışı incelenmiştir. COMSOL modelinde elde edilen bazı bulgular yine MATLAB yazılımında oluşturulan sonlu farklar yöntemiyle karşılaştırılmış ve çözümün güvenilirliği tekrar ispatlanmıştır.

Dördüncü çalışmada ise membranlı boru-tipi sıvı desikant nem alma sisteminin nemli hava-sıvı desikant akışkanları için paralel ve karşıt akış tiplerinde modellemesi ve analizi yapılmıştır. Oluşturulan COMSOL modelinde hesaplanan hava tarafı kütle transferi katsayıları için her iki akış tipinde tasarımsal parametrelere bağlı pratik eşitlikler önerilmiştir. Analizde elde edilen sonuçlar, hem MATLAB yazılımında oluşturulan sonlu farklar modeliyle hem de literatürdeki benzer çalışmada elde edilen bulgularla oldukça iyi uyum sağlamıştır.

Beşinci çalışmada membranlı boru-tipi sıvı desikant nem alma sistemi için deney düzeneği hazırlanarak sistem pratik olarak test edilmiştir. Oluşturulan deney düzeneğinde, nispeten ucuz ve kolay temin edilebilecek, Dupont® Tyvek ve suni kılıf olmak üzere iki farklı membran kullanılarak sistemin farklı hava hızı koşulları altında verimi incelenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar, sistemin COMSOL yazılımında oluşturulan 3-boyutlu modeliyle karşılaştırılmış ve COMSOL yazılımının sistemi 3-boyutlu analizde de oldukça hassas bir şekilde analiz ettiği sonucuna varılmıştır.

Son çalışmada ise membranlı boru demeti sıvı desikant nem alma sistemin COMSOL yazılımında sayısal analizi yapılmıştır. Oluşturulan modelde sıralı ve saptırmalı olmak üzere iki farklı tasarımda, hava hızının ve sistemde kullanılan boru sayısının nem alma performansı üzerine etkisi araştırılmıştır.

Bu doktora tezi kapsamında sunulan membranlı sıvı desikant nem alma sistemleri ile elde edilen kuramsal ve deneysel sonuçlar göz önüne alındığında, bu tip sistemlerin, özellikle Türkiye gibi nemli ve sıcak iklim özelliklerine sahip bölgelerde oldukça verimli bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir. Özellikle, ilk defa bu çalışma kapsamında tasarımı ve deneysel analizi yapılan boru-tipi membranlı nem alma sistemiyle elde edilen bulgular, maliyeti düşük ve kolay tasarlanabilecek pratik sistemlerle bile tatmin edici sonuçlar alınabileceğini ortaya koymuştur. Bu durum, boru-tipi membranlı nem alma sistemi temel alınarak imal edilebilecek daha büyük kapasiteli nem alma sistemlerinin (membranlı boru demeti sıvı desikant nem alma sistemi gibi), bu alanda sağlayabileceği faydanın anlaşılması açısından büyük önem taşımaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Kavasogullari, B., Cihan, E., Demir, H., Novel packing materials for open liquid desiccant system, *Energy Procedia*, 91, 785-791, 2016.
- [2] Cihan, E., Kavasogullari, B., Demir, H., Enhancement of performance of open liquid desiccant system with surface additive, *Renewable Energy*, 114, 1101-1112, 2017.
- [3] Kavasogullari, B., Cihan, E., Demir, H., Valorization of polycarbonate board as packing material for open CaCl_2 -water desiccant system, *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 37, 1727-1735, 2018.
- [4] Ahmed, Y., S., Gandhidasan, P., Al-Farayedhi, A., A., Thermodynamic analysis of liquid desiccants, *Solar Energy*, 62, 11–18, 1998.
- [5] Isetti, C., Nannei, E., Magrini, A., On the application of a membrane air-liquid contactor for air dehumidification, *Energy and Buildings*, 25, 185-193, 1997.
- [6] Abdel-Salam, A.H., A novel liquid desiccant air conditioning system with membrane exchangers and various heat sources, University of Saskatchewan, Department of Mechanical Engineering, Doktora Tezi, 272, 2015.
- [7] Huang, S.M., Zhang, L.Z., Pei, L.X., Transport phenomena in a cross-flow hollow fibre membrane bundle used for liquid desiccant air dehumidification, *Indoor and Built Environment*, 22, 559-574, 2013.
- [8] Huang, S.M., Qin, F.G.F., Yang, M., Yang, X., Zhong, W.F., Heat and mass transfer deteriorations in an elliptical hollow fiber membrane tube bank for liquid desiccant air dehumidification, *Applied Thermal Engineering*, 57, 90-98, 2013.
- [9] Huang, S.M., Yang, M., Heat and mass transfer enhancement in a cross-flow elliptical fiber membrane contactor used for liquid desiccant air dehumidification, *Journal of Membrane Science*, 449, 184-192, 2014.
- [10] Zhang, L.Z., Huang, S.M., Pei, L.X., Conjugate heat and mass transfer in a cross-flow hollow fiber membrane contactor for liquid desiccant air dehumidification, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 8061-8072, 2012.
- [11] Abdel-Salam, A.H., Ge, G., Simonson, C.J., Thermo-economic performance of a solar membrane liquid desiccant air conditioning system, *Solar Energy*, 102, 56–73, 2014.

- [12] Abdel-Salam, A.H., Ge, G., Simonson, C.J., Performance analysis of a membrane liquid desiccant air-conditioning system, *Energy and Buildings*, 62, 559–569, 2013.
- [13] Ouyang, Y.W., Zhang, L.Z., Conjugate heat and mass transfer in a skewed flow hollow fiber membrane bank used for liquid desiccant air dehumidification, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 93, 23–40, 2016.
- [14] Keniar, K., Ghali, K., Ghaddar, N., Study of solar regenerated membrane desiccant system to control humidity and decrease energy consumption in office spaces, *Applied Energy*, 138, 121–132, 2015.
- [15] Das, R.S., Jain, S., Performance characteristics of cross-flow membrane contactors for liquid desiccant systems, *Applied Energy*, 141, 1-11, 2015.
- [16] Namwar, R., Ge, G., Simonson, C.J., Besant, R.W., Transient heat and moisture transfer characteristics of a liquid-to-air membrane energy exchanger (LAMEE) model verification and extrapolation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 66, 757-771, 2013.
- [17] Huang, S., Zhang, L., Tang, K., Pei, L., Fluid flow and heat mass transfer in membrane parallel-plates channels used for liquid desiccant air dehumidification, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 2571-2580, 2012.
- [18] Moghaddam, D.G., Testing small-scale and full-scale liquid-to-air membrane energy exchangers (LAMEEs), University of Saskatchewan, Department of Mechanical Engineering, *Doktora Tezi*, 273, 2014.
- [19] Huang, S.M., Zhong, Z., Yang, M., Conjugate heat and mass transfer in an internally-cooled membrane-based liquid desiccant dehumidifier, *Journal of Membrane Science*, 508, 73-83, 2016.
- [20] Huang, S.M., Yang, M., Longitudinal fluid flow and heat transfer between an elliptical hollow fiber membrane tube bank used for air humidification, *Applied Energy*, 112, 75-82, 2013.
- [21] Min, J., Su, M., Performance analysis of a membrane-based enthalpy exchanger: Effects of the membrane properties on the exchanger performance, *Journal of Membrane Science*, 348, 376-382, 2010.
- [22] Sabek, S., Nasr, K.B., Tiss, F., Chouikh, R., Guizani, A., Performance investigation of desiccant liquid air membrane energy exchanger: Air and

- lithium chloride effects, *International Journal of Refrigeration*, 80, 145-157, 2017.
- [23] Zhang, L., An analytical solution to heat and mass transfer in hollow fiber membrane contactors for liquid desiccant air dehumidification, *ASME Journal of Heat Transfer*, 133, 1-8, 2011.
- [24] Aslan, M., *Membran Teknolojileri, Türkiye Çevre Koruma Vakfı*, Ankara, 2016.
- [25] Woods, J., Membrane processes for heating, ventilation and air conditioning, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 290-304, 2014.
- [26] Akihiro, C., Sakurai, Y., Sakurai, K., *Dialysis Membranes-Physicochemical Structures and Features, Updates in Hemodialysis*, Hiromichi Suzuki, IntechOpen, 2015. DOI: 10.5772/59430.
- [27] Qu, M., Abdelaziz, O., Gao, Z., Yin, H., Isothermal membrane-based air dehumidification: A comprehensive review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 4060-4069, 2018.
- [28] Metz, S.J., van de Ven, W.J., Potreck, C.J., Mulder, M.H.V., Wessling, M., Transport of water vapor and inert gas mixtures through highly selective and highly permeable polymer membranes, *Journal of Membrane Science*, 251, 29-41, 2005.
- [29] Jeazet, H.B.T., Staudt, C., Janiak, C., A method for increasing permeability in O₂/N₂ separation with mixed-matrix membranes made of water-stable MIL-101 and polysulfone, *Chemical Communications*, 48, 2140-2142, 2012.
- [30] Feng, C., Khulbe K.C., Matsuura, T., Farnood, R., Ismail, A.F., Recent progress in zeolite/zeotype membranes, *Journal of Membrane Science and Research*, 1, 49-72, 2015.
- [31] Goh, P.S., Ismail, A.F., Sanip, S.M., Ng, B.C., Aziz, M., Recent advances of inorganic fillers in mixed matrix membrane for gas separation, *Separation and Purification Technology*, 81, 243-264, 2011.
- [32] Kislik, V.S., *Supported Liquid Membrane, Encyclopedia of Membranes*, Springer, Berlin, 2014.
- [33] Amini, M., Rahbar-Kelishami, A., Alipour, M., Vahidi, O., Supported liquid membrane in metal ion separation: An overview, *Journal of Membrane Science & Research*, 4, 121-135, 2018.

- [34] Kislik, V., *Liquid Membranes: Principles and Applications in Chemical Separations and Wastewater Treatment*, Elsevier, 1-15, 2010. DOI:10.1016/B978-0-444-53218-3.00001-5.
- [35] Storle, D., Abdel-Salam, M.R.H., Simonson, C.J., Performance evaluation of a three-fluid liquid desiccant membrane air-conditioning system, *ASHRAE Transactions*, 125, 558-575, 2019.
- [36] Rashizadeh, M., Pourmahmoud, N., Simonson, C.J., 3D computational fluid dynamics simulation of a 3-fluid liquid-to-air membrane energy exchanger (LAMEE), *Applied Thermal Engineering*, 153, 501-512, 2019.
- [37] Chu, J., Chen, Z., Bai, H., Zhu, J., Experimental study of liquid to air membrane energy exchanger (LAMEE) performance by measuring its temperature fields, *Thermal Science and Engineering Progress*, 10, 163-168, 2019.
- [38] Bai, H., Zhu, J., Chen, Z., Ma, L., Wang, R., Li, T., Performance testing of a cross-flow membrane-based liquid desiccant dehumidification system, *Applied Thermal Engineering*, 119, 119-131, 2017.
- [39] Chen, Z., Zhu, J., Bai, H., Performance assessment of a membrane liquid desiccant dehumidification cooling system based on experimental investigations, *Energy and Buildings*, 139, 665-679, 2017.
- [40] Poling, B.E., Prausnitz, J.M., O'Connell, J.P., *The properties of gases and liquids*, 5th Edition, Appendix A, McGraw-Hill, USA, 2001.
- [41] Geankoplis, C., J., *Transport processes and separation process principles (includes unit operation)*, 4th edition, Prentice Hall International Inc, Upper Saddle River, 2003.
- [42] Yılmaz, T., Transfer proseslerinde deneysel ve teorik bulguların yaklaşık eşitliklerle ifadesinde genel esaslar, *Isı Bilimi ve Tekniği*, 2, 41-46, 1979.
- [43] Conde, M.R., Properties of aqueous solutions of lithium and calcium chlorides: formulations for use in air conditioning equipment design, *International Journal of Thermal Sciences*, 43, 367-382, 2004.
- [44] Zhang, L.Z., Coupled heat and mass transfer in an applicationscale cross-flow hollow fiber membrane module for air humidification, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 5861–5869, 2012.
- [45] Dupont. Tyvek® Nefes Alan Su Yalıtım Örtüsü Çözümleri. <https://www.dupont.com.tr/urunler-ve-hizmetler/construction-materials/tyvek->

- [building-envelope/brands/tyvek-breather-membrane/products/tyvek-solid.html](https://www.tyvek.com/building-envelope/brands/tyvek-breather-membrane/products/tyvek-solid.html), Erişim Tarihi: 09.12.2019.
- [46] Yıldız Gıda A.Ş. <https://www.yildiz-as.com/urun-plastik-sunI-kilif-1613.html>. Erişim Tarihi: 09.12.2019.
- [47] Klein, S.A., Engineering Equation Solver, Academic Commercial Version, F-Chart Software, 2019.
- [48] Datta, A., Rakesh, V., An introduction to modeling of transport processes, Cambridge University Press, The Edinburgh Building, Cambridge (2010).
- [49] Cihan, E., Kavasogullari, B., Demir, H., Mass Transfer Correlation for Tubular Membrane-Based Liquid Desiccant Air- Conditioning System, Arabian Journal for Science and Engineering, 45, 519–529, 2020.
- [50] “Andrew Rosen, Transport Phenomena I, 2013” http://sites.tufts.edu/andrewrosen/files/2013/04/Transport_I_12_14.pdf, Erişim Tarihi: 01.07.2020.

ÖZGEÇMİŞ

1. Adı Soyadı : Barış KAVASOĞULLARI

2. Doğum Tarihi : 22.01.1988

3. Ünvanı : Makine Yüksek Mühendisi

4. Öğrenim Durumu : Yüksek Lisans

Derece	Bölüm/Program	Üniversite	Bitirme Yılı
Lisans	Makine Mühendisliği	Çukurova Üniversitesi	2012
Lisans	Otomotiv Mühendisliği	Çukurova Üniversitesi	2012
Yüksek Lisans	Makine Mühendisliği	Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi	2016

5. Akademik Ünvanlar:

Görevi	Bölümü	Kurumu	Yıl
Araştırma Görevlisi	Makine Mühendisliği	Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi	2014-

6. İş Tecrübesi:

Görev Unvanı	Görev Yeri	Yıl
AR-GE Mühendisi	TEMSA GLOBAL A.Ş.	2012-2014

7. Yayınlar:

7.1. Kavasogulları, B., Cihan, E., Demir, H., Novel packing materials for open liquid desiccant systems, Energy Procedia, 91, 785-791, 2016.

7.2. Cihan, E., Kavasogulları, B., Demir H., Enhancement of performance of open liquid desiccant system with surface additive, Renewable Energy, 114, 1101-1112, 2017.

7.3. Cihan, E., Kavasogulları, B., Energy and exergy analysis of a combined refrigeration and waste heat driven organic rankine cycle system, Thermal Science, 21 (6A), 2621-2631, 2017.

7.4. Cihan, E., Kavasogullari, B., Demir H., The design and performance improvement of liquid desiccant dehumidification system, Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32, 709-717, 2017.

7.5. Kavasogullari, B., Cihan, E., Demir H., Valorization of Polycarbonate Board as Packing Material for Open CaCl₂-Water Desiccant System, Environmental Progress & Sustainable Energy, 37 (5), 1727-1735, 2018.

7.6. Cihan, E., Kavasogullari, B., Demir, H., Mass transfer correlation for tubular membrane-based liquid desiccant air-conditioning system, Arabian Journal for Science and Engineering, 45, 519-529, 2020.

7.7. Kavasogullari, B., Cihan, E., Demir, H., Energy and Exergy Analysis of LiBr-aq and LiCl-aq Liquid Desiccant Dehumidification System, Technical Journal, 14 (1), 36-40, 2020.

7.8. Cihan, E., Kavasogullari, B., Demir, H., Performance of counter flow membrane-based annular pipe liquid desiccant air conditioner, Applied Thermal Engineering, 180, 115884, 2020.

8. Ulusal hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

8.1. Kavasogullari, B., Cihan, E., Organik Rankine Çevrimi (ORC) ile Birlikte Çalışan Buhar Sıkıştırılmalı Bir Soğutma Çevriminin Ekserji Analizi, Tesisat Mühendisliği Dergisi, 120, 74-85, 2015.

8.2. Kavasogullari, B., Cihan, E., Demir, H., Açık LiBr-su nem alma sisteminde akış hızlarının ve dolgu kanal açılarının sistem performansı üzerine etkisi, Tesisat Mühendisliği Dergisi, 169, 39-47, 2019.

9. Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında basılan bildiriler:

9.1. B. Kavasogullari, E. Cihan, Organik Rankine Çevrimi ile çalışan buhar sıkıştırılmalı soğutma çevriminin termodinamik analizi, 2. Ulusal İklimlendirme ve Soğutma Sempozyumu Sergisi (İKSES'14), Balıkesir, 23-25 Ekim 2014, Bildiriler Kitabı, 196-211.

9.2. B. Kavasogullari, E. Cihan, Organik Rankine Çevrimi (ORC) ile Birlikte Çalışan Buhar Sıkıştırılmalı Bir Soğutma Çevriminin Ekserji Analizi, 12. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 8-11 Nisan 2015, İzmir, 1745-1764.

9.3. B. Kavasogullari, E. Cihan, H. Demir, Açık LiBr-su nem alma sisteminde akış hızlarının ve dolgu kanal açılarının sistem performansı üzerine etkisi, 13. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 18-21 Nisan 2017, İzmir, 1369-1379.

11. Diğer yayınlar:

11.1. Kavasogullari, B., Cihan, E., Demir, H., Novel packing materials for open liquid desiccant systems, Solar Heating and Cooling Conference (SHC), İstanbul, 2015.

11.2. Kavasogullari, B., Cihan, E., Demir, H., Effect of channel angle of polycarbonate packing materials on performance of liquid desiccant system, Heat Powered Cycles (HPC), Nottingham/England, 2016.

11.3. Cihan, E., Kavasogullari, B., Demir H., Influence of surfactant additive on performance of open liquid desiccant system, International Sorption Heat Pump Conference (ISHPC), Tokyo/Japan, 2017.

11.4. Kavasogullari, B., Cihan, E., Demir, H., LiBr-su ve LiCl-su sıvı desikant nem alma sisteminin enerji ve ekserji analizi, International Advanced Researches and Engineering Congress (IAREC), Osmaniye/Türkiye, 2017.

11.5. Kavasogullari, B., Cihan, E., Demir, H., Dolgu kalınlıklarının ve dolgu kanal açılarının LiBr-su nem alma sisteminin performansı üzerine etkisi, International Advanced Researches and Engineering Congress (IAREC), Osmaniye/Türkiye, 2017.

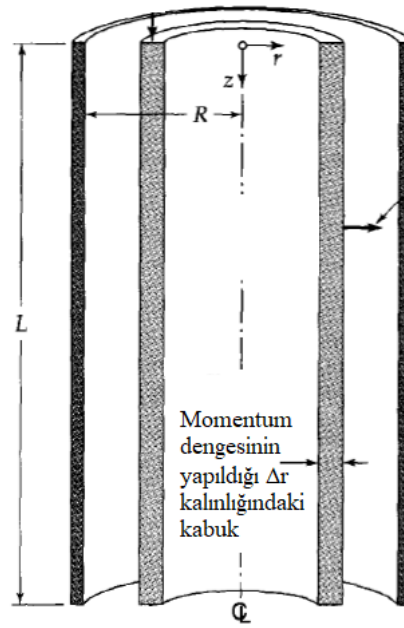
12. Projeler:

12.1. Açık Sıvı Desikant Sisteminin Tasarımının Geliştirilmesi ve Optimizasyonu, TÜBİTAK 1001 Projesi, Bursiyer: KAVASOĞULLARI BARIŞ, Araştırmacı: CİHAN ERTUĞRUL, Yürütücü: DEMİR HASAN, 15/09/2015-26/10/2017 (ULUSAL)

EKLER

A. Düşey Silindirik Boruda Hız Profiline Bulunması

Membranlı boru-tipi nem alma sisteminde kuru hava (veya desikant) kanalı dairesel kesitli bir boru olup dikey (z-yönünde) konumlandırılacaktır (Şekil A.1). Sistemde yerçekimi, momentum akısı oluşturacağından pozitif z-yönündeki hız profili aşağıdaki formüllerle bulunacaktır [50].



Şekil A.1. Düşey silindirik boru kesiti

Sistemde kuvvet dengesi aşağıdaki eşitlikle tanımlanmıştır:

$$\begin{aligned} & \left(\begin{array}{c} \text{moleküler taşıma} \\ \text{ile} \\ \text{giren momentum} \\ \text{miktarı} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{moleküler taşıma} \\ \text{ile} \\ \text{çıkan momentum} \\ \text{miktarı} \end{array} \right) \\ & + \left(\begin{array}{c} \text{sisteme} \\ \text{etkiyen} \\ \text{yerçekimi kuvveti} \end{array} \right) = 0 \end{aligned} \quad (A.1)$$

Sistemde net basınç kuvveti $PA|_{z=0} - PA|_{z=L}$, net momentum akısı $\tau_{rz}A_1|_r - \tau_{rz}A_2|_{r+\Delta r}$ ve yerçekimi kuvveti ρgV olacaktır. Bu ifadelerde, P basıncı (Pa), A boru

kesit alanını (m^2), τ_{rz} viskoz etkiyi (N/m^2), A_1 ve A_2 boru akış yüzey alanını (m^2), ρ akışkanın yoğunluğunu (kg/m^3), g yerçekim ivmesini (m/s^2) ve V boru hacmini (m^3) ifade etmektedir. Sözü geçen ifadeler eşitlik (A.1)'de yerine konulursa kuvvet dengesi aşağıdaki halini alacaktır:

$$P(2\pi r \Delta r)|_{z=0} - P(2\pi r \Delta r)|_{z=L} + \tau_{rz}(2\pi r L)|_r - \tau_{rz}(2\pi r L)|_{r+\Delta r} + \rho g(2\pi r \Delta r L) = 0 \quad (A.2)$$

Yukarıda elde edilen denklem ($2\pi L \Delta r$) ile sadeleştirilirse eşitlik (A.3) elde edilir:

$$\left(\frac{P|_{z=0} - P|_{z=L}}{L} \right) r + \frac{\tau_{rz} r|_r - \tau_{rz} r|_{r+\Delta r}}{\Delta r} + \rho g r = 0 \quad (A.3)$$

Bu eşitliğin $\Delta r \rightarrow 0$ için limiti alınır aşağıdaki denklem bulunacaktır:

$$\left(\frac{P_0 - P_L}{L} \right) r - \frac{d}{dr}(\tau_{rz} r) + \rho g r = 0 \quad (A.4)$$

Eşitlik (A.4) aşağıdaki gibi düzenlenebilir:

$$\frac{d}{dr}(\tau_{rz} r) = \left(\frac{P_0 - \rho g(0)}{L} - \frac{P_L - \rho g L}{L} \right) r \quad (A.5)$$

$P_z - \rho g z = \xi_z$ dönüşümü yapılırsa daha sade bir şekilde eşitlik (A.6) elde edilebilir:

$$\frac{d}{dr}(\tau_{rz} r) = \left(\frac{\xi_0 - \xi_L}{L} \right) r \quad (A.6)$$

Düşey borudaki akış için eşitlik (A.6) kullanılabilecektir. Dairesel bir borudaki akış için ise eşitlik (A.7) kullanılabilir:

$$\frac{d}{dr}(\tau_{rz} r) = \left(\frac{P_0 - P_L}{L} \right) r \quad (A.7)$$

Düşey boruda z-yönündeki herhangi bir r-mesafesindeki hız, eşitlik (A.8) ile bulunabilir:

$$V_z(r) = \left(\frac{\xi_0 - \xi_L}{4\mu L} \right) (R^2 - r^2) \quad (\text{A.8})$$

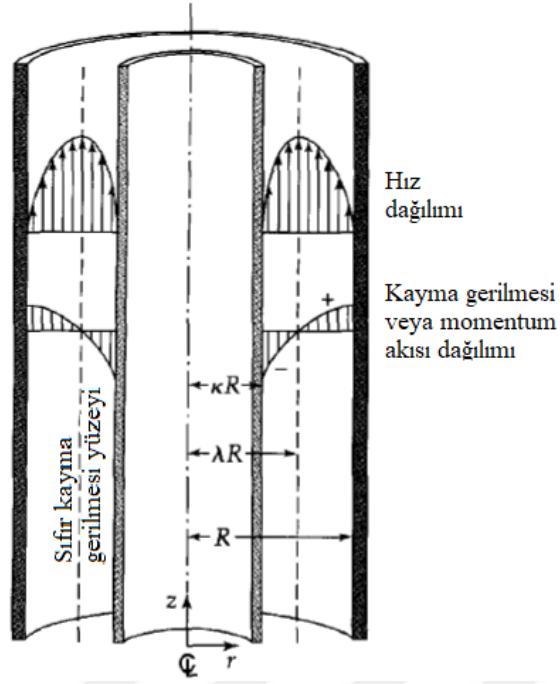
Ortalama hız ise eşitlik (A.9) ile hesaplanacaktır (Hagen-Poiseuille Denklemi):

$$V_{ave} = \left(\frac{\xi_0 - \xi_L}{32\mu L} \right) D^2 \quad (\text{A.9})$$

B. Halka Kesitli Kanalda Hız Profiline Bulunması

Membranlı boru-tipi nem alma sisteminde nemli hava akımının gerçekleştiği halka kesitli kanal Şekil B.1’de gösterilmiştir [50]. Burada şekilde görülebildiği gibi akışkan, halka şeklindeki (iki eş merkezli silindir arasındaki yüzeyden) kanal boyunca yukarı yönde akmaktadır. Şekilde R, dış silindirin yarıçapı; κR , iç silindirin yarıçapı; λR ise maksimum hızın kanal merkezine olan uzaklığıdır. Söz konusu akışta hız profiline bulunabilmesi için aşağıdaki kabullerin yapılması gerekmektedir:

- Akış sürekli rejimdedir.
- Sıkıştırılmaz akış vardır.
- Akışta hız olarak sadece V_z önemlidir.
- Akışkanın yüzeyle temas ettiği yerde kaymama şartı vardır.
- Yerçekimi etkileri önemlidir.
- V_{max} iç silindirin merkezinden λR kadar uzaklıktadır.



Şekil B.1. Halka kesitli kanal akışında hız profilinin ve kayma gerilmelerinin oluşumu

Sistemde kuvvet dengesi aşağıda tanımlanmıştır:

$$\begin{aligned} & \left(\begin{array}{c} \text{moleküler taşıma} \\ \text{ile} \\ \text{giren momentum} \\ \text{miktarı} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{moleküler taşıma} \\ \text{ile} \\ \text{çıkan momentum} \\ \text{miktarı} \end{array} \right) \\ & + \left(\begin{array}{c} \text{sisteme} \\ \text{etkiyen} \\ \text{yerçekimi kuvveti} \end{array} \right) = 0 \end{aligned} \quad (\text{B.1})$$

Sistemde net basınç kuvveti $PA|_{z=0} - PA|_{z=L}$, net momentum akısı $\tau_{rz}A_1|_r - \tau_{rz}A_2|_{r+\Delta r}$ ve yerçekimi kuvveti $-\rho gV$ (yerçekimi kuvveti, akışa zıt yönlü olduğundan işareti negatiftir.) olacaktır. Bu ifadelerde, P basıncı (Pa), A boru kesit alanını (m^2), τ_{rz} viskoz etkiyi (N/m^2), A_1 ve A_2 boru akış yüzey alanını (m^2), ρ akışkanın yoğunluğunu (kg/m^3), g yerçekim ivmesini (m/s^2) ve V boru hacmini (m^3) ifade etmektedir. Sözü geçen ifadeler eşitlik (B.1)'de yerine yazılırsa kuvvet dengesi aşağıdaki halini alacaktır:

$$P(2\pi r \Delta r)|_{z=0} - P(2\pi r \Delta r)|_{z=L} + \tau_{rz}(2\pi r L)|_r - \tau_{rz}(2\pi r L)|_{r+\Delta r} - \rho g(2\pi r \Delta r L) = 0 \quad (\text{B.2})$$

Yukarıda elde edilen denklem $(2\pi L \Delta r)$ ile sadeleştirilirse eşitlik (A.3) elde edilir:

$$\left(\frac{P|_{z=0} - P|_{z=L}}{L} \right) r + \frac{\tau_{rz} r|_r - \tau_{rz} r|_{r+\Delta r}}{\Delta r} - \rho g r = 0 \quad (\text{B.3})$$

Bu eşitliğin $\Delta r \rightarrow 0$ için limiti alınırsa aşağıdaki denklem bulunacaktır:

$$\left(\frac{P_0 - P_L}{L} \right) r - \frac{d}{dr}(\tau_{rz} r) - \rho g r = 0 \quad (\text{B.4})$$

Eşitlik (B.4) aşağıdaki gibi düzenlenebilir:

$$\frac{d}{dr}(\tau_{rz} r) = \left(\frac{P_0 - \rho g(0)}{L} - \frac{P_L + \rho g L}{L} \right) r \quad (\text{B.5})$$

$P_z + \rho g z = \xi_z$ dönüşümü yapılırsa daha sade bir şekilde eşitlik (B.6) elde edilebilir:

$$\frac{d}{dr}(\tau_{rz} r) = \left(\frac{\xi_0 - \xi_L}{L} \right) r \quad (\text{B.6})$$

Eşitlik (B.6)'nın çözümü için r 'ye göre integrali alınırsa aşağıdaki eşitlik elde edilecektir.

$$\tau_{rz} r = \left(\frac{\xi_0 - \xi_L}{2L} \right) r^2 + C_1 \quad (\text{B.7})$$

Bu denklemde her iki taraf r ile sadeleştirilirse eşitlik (B.8) bulunur:

$$\tau_{rz} = \left(\frac{\xi_0 - \xi_L}{2L} \right) r + \frac{C_1}{r} \quad (\text{B.8})$$

Burada $r = \lambda R$ için $V = V_{max}$ sınır şartı vardır. Aynı durumda momentum akısı (τ_{rz}) da sıfır olacaktır. Bu durum, eşitlik (B.8)'de yerine yazılırsa aşağıdaki eşitlik elde edilecektir:

$$0 = \left(\frac{\xi_0 - \xi_L}{2L} \right) \lambda R + \frac{C_1}{\lambda R} \quad (B.9)$$

Buradan integral sabiti C_1 aşağıdaki gibi bulunabilir:

$$C_1 = - \left(\frac{\xi_0 - \xi_L}{2L} \right) (\lambda R)^2 \quad (B.10)$$

Elde edilen C_1 değeri momentum akısı denkleminde (Eşitlik B.8) yerine konulursa eşitlik (B.11) elde edilecektir:

$$\tau_{rz} = \left(\frac{\xi_0 - \xi_L}{2L} \right) r - \left(\frac{\xi_0 - \xi_L}{2L} \right) \frac{(\lambda R)^2}{r} \quad (B.11)$$

Bu denklem aşağıdaki gibi düzenlenebilir:

$$\tau_{rz} = \left(\frac{\xi_0 - \xi_L}{2L} \right) R \left[\left(\frac{r}{R} \right) - \lambda^2 \left(\frac{R}{r} \right) \right] \quad (B.12)$$

Momentum akısının $\tau_{rz} = -\mu \cdot (dV_z/dr)$ olduğu bilinmektedir. Bu ifade eşitlik (B.12)'de yerine yazılırsa aşağıdaki denklem elde edilecektir:

$$\frac{dV_z}{dr} = - \left(\frac{\xi_0 - \xi_L}{2\mu L} \right) R \left[\left(\frac{r}{R} \right) - \lambda^2 \left(\frac{R}{r} \right) \right] \quad (B.13)$$

Bu ifadenin r 'ye göre integrali alınıp gerekli matematiksel işlemler yapılırsa eşitlik (B.14) bulunacaktır:

$$V_z = - \left(\frac{\xi_0 - \xi_L}{4\mu L} \right) R^2 \left[\left(\frac{r}{R} \right)^2 - 2\lambda^2 \ln \left(\frac{r}{R} \right) + C_2 \right] \quad (B.14)$$

Yukarıdaki eşitlikte C_2 ve λ olmak üzere iki tane bilinmeyen vardır. Bu ifadelerin bulunabilmesi için iki tane sınır şartına ihtiyaç vardır. Katı yüzeylerdeki kaymama şartı sınır şartı olarak kullanılabilir. Buna göre:

- $r = \kappa R$ için $V_z = 0$ olacaktır. Bu da eşitlik (B.14)'te yerine konulup matematiksel işlemler yapılırsa aşağıdaki eşitlik bulunur:

$$0 = \kappa^2 - 2\lambda^2 \ln(\kappa) + C_2 \quad (\text{B.15})$$

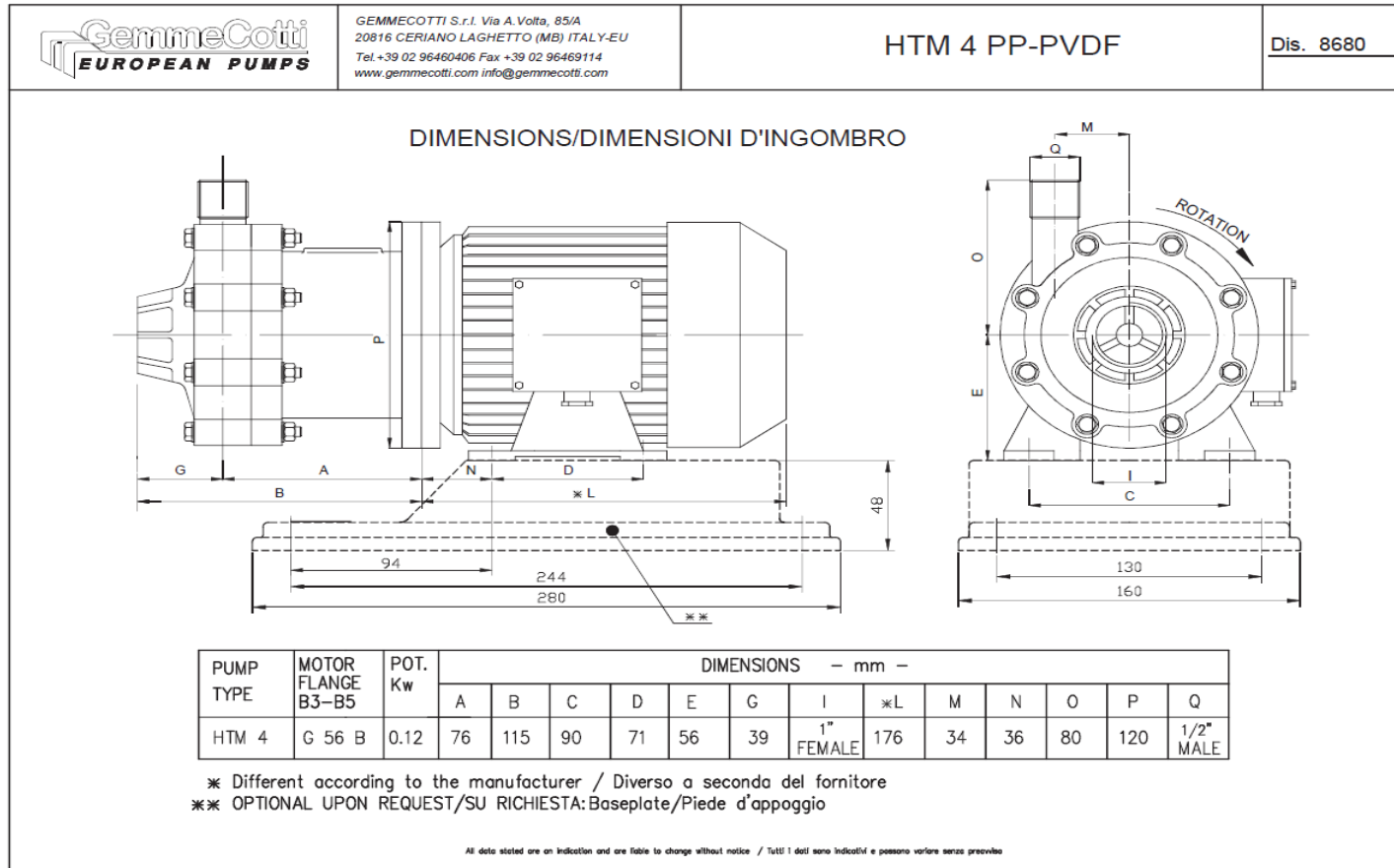
- Aynı şekilde $r = R$ için $V_z = 0$ olacaktır. Bu ifade de eşitlik (B.14)'te yerine konulursa $C_2 = -1$ olacak ve λ için aşağıdaki ifade elde edilecektir:

$$2\lambda^2 = \frac{\kappa^2 - 1}{\ln(\kappa)} \quad (\text{B.16})$$

Bu ifadeler eşitlik (B.14)'te yerine yazılırsa hız profili denklemi aşağıdaki gibi olacaktır:

$$V_z = -\left(\frac{\xi_0 - \xi_L}{4\mu L}\right) R^2 \left[\left(\frac{r}{R}\right)^2 - \left(\frac{\kappa^2 - 1}{\ln(\kappa)}\right) \ln\left(\frac{r}{R}\right) - 1 \right] \quad (\text{B.17})$$

C. Sıvı Pompası Karakteristik Eğrileri ve Teknik Özellikleri



Şekil C.1. Sıvı pompası teknik resmi

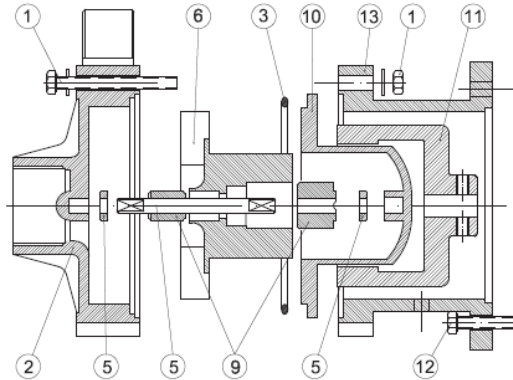
HTM 4 PP-PVDF

Dis. 8679-1

FEATURES/CARATTERISTICHE

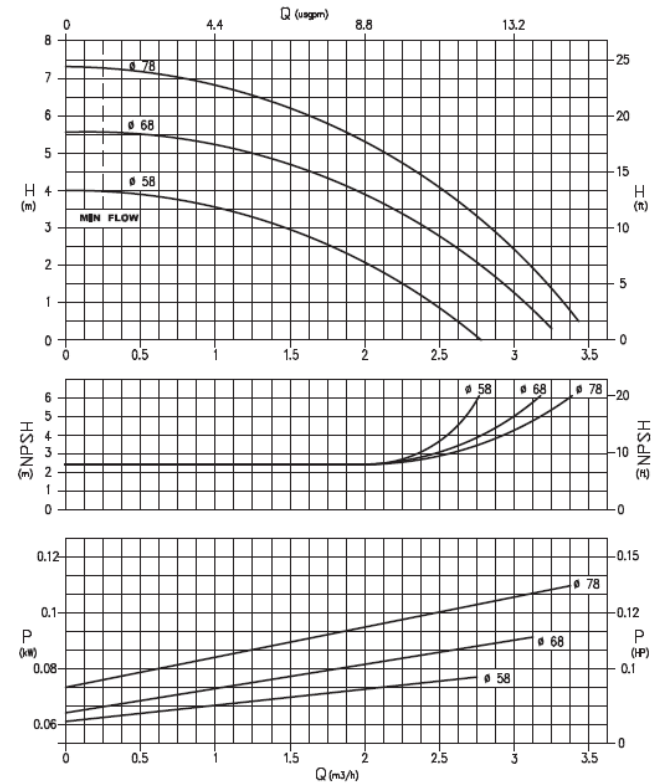
Materials available/Materiali disponibili:	PP-PVDF
Max flow/Portata massima:	3,5 m ³ /h
Max head/Prevalenza massima:	7 m
Max temperature/Temperatura massima:	PP 60°C/PVDF 90°C
Max viscosity/Viscosità massima:	200 cSt
Pressure rating/Pressione nominale massima:	NP/PN 4 @ 20°C
Pump weight/Peso pompa:	PP: 0.95 Kg PVDF: 1.05 Kg

SECTION AND PARTS LIST/SEZIONE E LISTA PARTI



POS.	1	2	3	5	6	9	10	11	12	13
PART DESCR.	SET SCREWS	PUMP HEAD	O - RING	SHAFT + RING	IMPELLER - INTERNAL MAGNET	BEARING	REAR CASING	EXT. MAGNET	SET SCREWS	BRACKET
MAT.	ALSI304	PP PVDF	EPDM VITON	AL803	PP PVDF	PTFE	PP PVDF	C40 NaFeb	ALSI304	PP

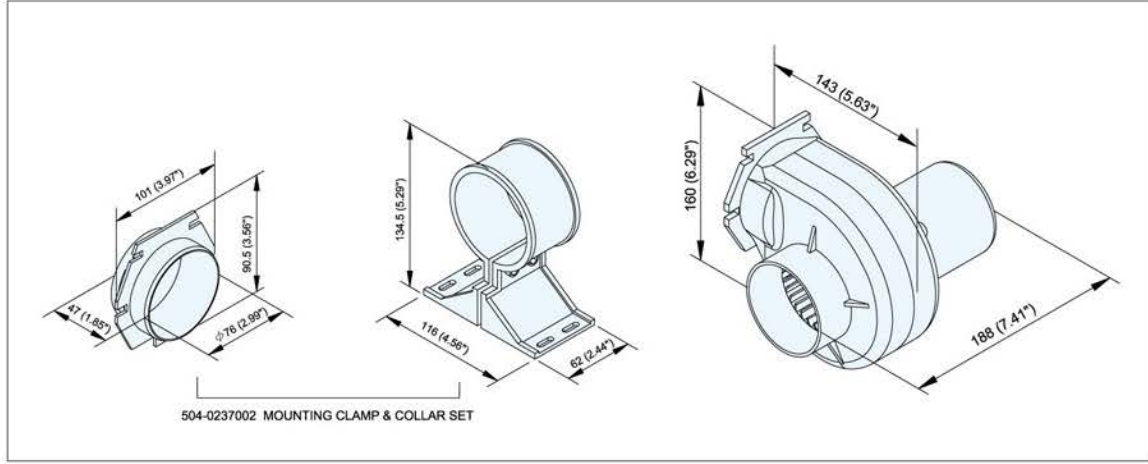
CURVES/CURVE 50HZ-2900 RPM



All data stated are an indication and are liable to change without notice / Tutti i dati sono indicativi e possono variare senza preavviso

Şekil C.2. Sıvı pompası performans eğrileri

D. Hava Fanı Teknik Özellikleri



TMC-0370203

BILGE BLOWER WITH BRACKET

MOTOR :12V / 24V
 AIR :130CFM (3.67CMM)
 AMP DRAW :5A (12V) / 2.5A (24V)
 FUSE SIZE :8A (12V) / 4A (24V)
 INTAKE PIPE. :3" (76mm)

DIMENSION :188x143x160mm
 (LxWxH) (7.41"x5.63"x6.29")
 PACKING :12pcs/ctn/2.62cuft
 MIN Q'TY :12pcs
 WEIGHT :13.2kgs/ctn

ORDER NO.
 502-3702041 12V
 502-3702042 24V
 502-3702031 12V BLOWER ONLY (130 CFM)
 502-3702032 24V BLOWER ONLY (130 CFM)
 504-0237002 MOUNTING CLAMP & COLLAR SET

Şekil D.1. Hava fanı teknik özellikleri