İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEMBRAN BİYOREAKTÖRLERDE TİTREŞİM İLE TIKANMA KONTROLÜ

DOKTORA TEZİ

Recep KAYA

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Bilimleri, Mühendisliği ve Yönetimi Programı

MAYIS 2018

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEMBRAN BİYOREAKTÖRLERDE TİTREŞİM İLE TIKANMA KONTROLÜ

DOKTORA TEZİ

Recep KAYA
(501112706)

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Bilimleri, Mühendisliği ve Yönetimi Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. İsmail KOYUNCU

MAYIS 2018

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501112706 numaralı Doktora Öğrencisi Recep KAYA, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "MEMBRAN BİYOREAKTÖRLERDE TİTREŞİM İLE TIKANMA KONTROLÜ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. İsmail KOYUNCU** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Doç. Dr. Derya Yüksel İmer** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Evren Erşahin İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Doç.Dr. Nevzat Özgü Yiğit Süleyman Demirel Üniversitesi	.....
	Prof.Dr. Halil Hasar Fırat Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : 9.05.2018
Savunma Tarihi : 29.05.2018

Kızıma, eşime ve tüm aileme,

ÖNSÖZ

Öncelikle çok değerli danışman hocam sayın Prof. Dr. İsmail Koyuncu'ya geniş bilgi ve rehberliğiyle ve sunduğu her türlü imkanla birlikte, gösterdiği sabır, hassasiyet ve desteği için teşekkür ederim. Ayrıca tez çalışmalarım kapsamında yardımlarını esirgemeyen, gösterdiği üstün hassasiyet, ilgi ve yardımlarıyla çalışmalarıma yön veren Prof. Dr. Osman Atilla Arıkan'a da teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmalarım kapsamında bana bildiği her şeyi öğreten ve deneylerimi yakından takip ederek sürekli yardımını aldığım, tezimi daha da güzelleştiren ve yüksek değer katan, birlikte çalışmaktan her zaman keyif aldığım ve alacağım Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Evren Erşahin'e ve Dr. Öğr. Üyesi Hale Özgün'e şükranlarımı sunuyorum.

Yorum ve önerileriyle bana çok yardımları dokunan Sayın Prof. Dr. Mehmet Kitiş'e ve Doç. Dr. Nevzat Özgü Yiğit'e teşekkür ederim. Ayrıca her zaman bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım ve desteğini aldığım dostane ve sıcak kalpli hocam Doç. Dr. Derya İmer'e sevgilerimi sunarım.

Tez çalışmalarımın laboratuvar ve pilot ölçekli deneyler kısmında yardımlarını aldığım Merve Yılmaz ve Nilüfer Tirol'e sevgilerimi sunuyorum. Ayrıca tez çalışmalarımın son aşamalarında karşılıksız yardımlarıyla bana destek olan Mohammed Damirchi ve Sama Al-Mutawalli kardeşlerime saygılarımı ve teşekkürlerimi sunuyorum.

Çalışmaktan büyük zevk aldığım MEMTEK ailesine ve özellikle çekirdek kadrosu olan Serkan Güçlü, Türker Türken, Börte Köse Mutlu, Reyhan Şengür Taşdemir ve Mehmet Emin Paşaoğlu'na gösterdikleri sıcak arkadaşlık sebebiyle özel sevgilerimi ve saygılarımı sunuyorum.

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) (Proje No 113Y341) finansal desteklerinden ötürü teşekkür ederim.

Tüm bunların yanında beni bugünlere kadar getiren tüm aileme, annem Afife Kaya'ya babam Ahmet Kaya'ya ve her zaman maddi ve manevi sınırsız desteklerini hissetiğim abilerim Faruk Kaya ve Fatih Kaya'ya kalbimin en derin noktasından sevgilerimi sunuyorum. Onların sağladığı sıcak aile atmosferi sayesinde herşeyin gerçekleştiğini belirtiyor ve sınırsız sabır ve desteklerinden ötürü en özel teşekkürlerimi belirtmek istiyorum.

Son olarak ise, biricik eşim, sıcak kalpli dostum ve hayat arkadaşım, Ceyda (Ceylan) Kaya'ya, saf sevgi ve kalbiyle tüm işlerimde göstermiş olduğu sabır ve manevi desteklerinden ötürü, kalbimin derinliklerinden sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunuyorum. Ayrıca küçük kızım Ayşe Bade Kaya'ya hayatıma açtığı renkli ve saf sevgi dolu pencereden ötürü en derin sevgilerimi sunuyorum.

İyi ki varsınız.

Mayıs 2018

Recep Kaya
(Çevre Yüksek Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xiii**
SEMBOLLER ..... **xv**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xvii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xxi**
ÖZET ..... **xxxi**
SUMMARY ..... **xxxiii**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Titreşimli MBR'ler: Çeşitli Dizayn Yaklaşımları ve MBR'ye Uygulanması 2
1.2 Tezin Amacı 3
1.3 Tezin Anahatları 4
2. LITERATÜR ARAŞTIRMASI **7**
2.1 Membranların Üretiminde Kullanılan Kimyasal Malzemeler 7
2.2 Membran Sürücü Kuvvetleri ve Prosesleri 9
2.2.1 Basınç sürücülü membran prosesleri 10
2.3 Membran Performansının Değerlendirilmesi 12
2.3.1 Membranlarda akı 12
2.3.2 Giderim verimi 13
2.3.3 Dirençler 14
2.3.4 Konsantrasyon polarizasyonu ve membran tıkanması 16
2.3.4.1 Konsantrasyon polarizasyonu 16
2.3.4.2 Membran tıkanması 17
2.4 Membran Temizleme Yöntemleri 20
2.4.1 Fiziksel yöntemler 20
2.4.2 Kimyasal yöntemler 20
2.5 Membran Kirlenme Kontrolü Yöntemleri 21
2.5.1 Kimyasal ilavesi 21
2.5.2 Nanomateryal katkılı membran kullanımı 22
2.5.3 Bakterilerin iletişiminin kesilmesi (Quorum Quenching) metodu 22
2.6 MBR Sistemleri ve Titreşim Uygulamaları 23
2.6.1 MBR sistemleri 23
2.6.2 Titreşimli batık MBR sistemleri ile gerçekleştirilmiş deneyler ve elde edilen sonuçlar 27
2.6.3 MBR sistemleri için titreşim konsepti 28
2.6.4 MBR modülleri için dizayn edilen titreşim sistemleri 28
2.6.4.1 Boyuna titreşimli sistemler 29
2.6.4.2 Enine titreşim sistemleri 33
2.6.4.3 Dönel titreşim sistemleri 35
2.6.4.4 Diğer salınım sistemleri 35

2.6.5 Titreşimli MBR modül sistemlerinde gerçekleştirilmiş filtrasyon çalışmaları 38
2.7 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) 45
2.7.1 Akışkanlar dinamiği 47
2.7.1.1 Kütle korunumu 48
2.7.1.2 Momentum korunumu 49
2.7.1.3 Enerji korunumu 49
2.7.2 Akış hareketlerinin korunum kanunları 50
2.7.3 Sıvı akışındaki temel korunum denklemleri 51
2.7.3.1 Üç boyutlu kütle korunumu 52
2.7.3.2 Bir akışkan parçacığını takiben ve bir akışkan elementi için değişim oranları 54
2.7.3.3 Üç boyutlu momentum denklemi 56
2.7.4 Durum denklemleri 59
2.7.5 Newtonian akışlar için navier-stokes denklemleri 60
2.7.6 Sıvı akış denklemlerinin sınıflandırılması 63
2.7.7 Ayrıklaştırma yöntemleri 64
2.7.7.1 Sonlu eleman yöntemi 64
2.7.7.2 Sonlu fark yöntemi 65
2.7.7.3 Sonlu hacim yöntemi 65
2.7.7.4 Spektral yöntem 66
2.7.8 Türbülanslı Akış ve Türbülans Modelleri 66
2.7.8.1 Genel kavramlar 66
2.7.8.2 Laminardan akıştan türbülanslı akışa geçiş 69
2.7.8.3 Laminar akışların hidrodinamik kararlılığı 69
2.7.8.4 Türbülansa geçiş 70
2.7.8.5 Basit türbülanslı akışların karakteristiği 70
2.7.8.6 Düz plaka sınır katmanı ve boru akışı 71
2.7.9 Ortalama akış özelliklerine türbülans değişimlerinin etkisi 72
2.7.10 Türbülanslı akış modellemeleri 73
2.7.10.1 Reynolds-ortalamalı Navier stokes denklemleriyle türbülans modellemeleri (RANS) 74
2.7.10.2 Doğrudan nümerik simülasyon 79
2.7.11 Türbülans modellerinin özeti 80
2.7.12 CFD problemlerinde sınır koşullarının tanımlanması 81
2.7.13 CFD modellerinde yakınsama, uygunluk ve tutarlılık 82
2.7.14 Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin (CFD) membranlarda uygulanması 83
3. TİTREŞİMLİ BATIK MBR MODÜLLERİNİN TASARLANMASI, MODELLENMESİ VE BU MODÜLLERİN ÜRETİLMESİ 137
3.1 Titreşimli Batık Lab-ölçek MBR Modülün 3 Boyutlu Tasarımı 137
3.2 Titreşimli batık lab-ölçek MBR modülün CFD yöntemi ile Modellenmesi 139
3.2.1 Çözüm noktası (Mesh) oluşturma 139
3.2.2 Model kurulumu ve sınır koşulların belirlenmesi 140
3.2.3 Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) analiz sonuçları 142
3.2.3.1 Farklı titreşim genlikleri için elde edilen kayma gerilim değerleri 142
3.2.4 Farklı titreşim frekansları için elde edilen kayma gerilim değerleri 157
3.3 Laboratuvar ve Pilot Öçekli Titreşimli Modül Sistemlerinin Üretimi 159
3.3.1 Membran üretimi ve uygun membran çeşidinin seçimi 159
3.3.1.1 Membranların üretimi ve karakterizasyonu 159

3.3.2 MWCO analizleri sonuçları 164
3.3.3 Temas açısı ölçüm sonuçları 165
3.3.4 Yüzey yükü (zeta potansiyeli) ölçüm sonuçları 167
3.3.5 Porometre deneyi sonuçları 168
3.3.6 DMA (Dinamik Mekanik Analiz) analiz sonuçları 169
3.3.7 Laboratuvar ölçekli titreşimli modül sisteminin üretimi 180
3.3.7.1 Modüllerin üretimi 180
3.3.7.2 Titreşim sistemleri 183
3.3.8 Pilot ölçekli titreşimli modül sisteminin üretimi 188
3.3.8.1 Modülün üretimi 188
3.3.8.2 Titreşim sistemi 190
4. LABORATUVAR ÖLÇEKLİ UZUN SÜRELİ DENEYSEL ÇALIŞMALAR 191
4.1 Analiz Yöntemleri ve Test Metodolojisi 191
4.1.1 Atıksu kaynağı ve karakterizasyonu 191
4.1.2 Çamur karakterizasyonu 193
4.1.3 Laboratuvar ölçekli MBR sistemi 193
4.1.4 Deneysel plan 204
4.1.5 İşletme koşulları 206
4.1.6 Analiz metotları 206
4.1.6.1 Toplam ve çözünmüş KOİ 208
4.1.6.2 Amonyum azotu (NH_4–N) 208
4.1.6.3 Nitrat azotu (NO_3-N) 208
4.1.6.4 Nitrit azotu (NO_2-N) 208
4.1.6.5 Toplam kjeldahl azotu (TKN) 208
4.1.6.6 Toplam azot (TN) analizi 208
4.1.6.7 Toplam fosfor (TP) 208
4.1.6.8 Bulanıklık 208
4.1.6.9 Askıda katı madde (AKM) 209
4.1.6.10 Uçucu askıda katı madde (UAKM) 209
4.1.6.11 Toplam çözünmüş katı madde (TÇK) 209
4.1.6.12 Çamur hacim indeksi (SVI) 209
4.1.6.13 SEM-EDS analizi 209
4.1.6.14 PSD analizi 209
4.1.6.15 Akı 209
4.1.6.16 Permeabilite deneyi 210
4.1.6.17 Kritik akının belirlenmesi 210
4.1.6.18 Membran dirençlerinin belirlenmesi 211
4.1.6.19 Membran modüllerine uygulanan temizlik prosedürü 212
4.2 Filtrasyon Performansı Değerlendirmesi 212
4.2.1 Güçlendirilmiş içi boşluklu fiber membran modüllerinin performansı 212
4.2.2 Kritik akının belirlenmesi 213
4.2.3 Uzun dönemli deneylerde TMP değişimi 215
4.2.4 İşletme sonrası filtrasyon dirençlerinin belirlenmesi 215
4.2.5 Morfolojik analiz sonuçları 219
4.3 Arıtma Performansı Değerlendirmesi 228
4.4 Farklı Frekanslarda Gerçekleştirilmiş Kritik Akı Deneyleri 238
4.5 Üst-Kritik Akı Deneyleri 242
4.5.1 Kritik akının belirlenmesi 242
4.5.2 Uzun süreli üst-kritik akı deneyi TMP profili 243

4.6 Sonuç ve Tartışma 244
5. PİLOT ÖLÇEKLİ UZUN SÜRELİ DENEYSEL ÇALIŞMALAR 249
5.1 Analiz Yöntemleri ve Test Metodolojisi 249
5.1.1 Atıksu kaynağı ve karakterizasyonu 249
5.1.2 Çamur karakterizasyonu 250
5.1.3 Pilot ölçekli MBR sistemi 250
5.1.4 Deneysel plan 256
5.1.5 İşletme koşulları 256
5.1.6 Analiz metotları 256
5.2 Filtrasyon Performansı Değerlendirmesi 259
5.2.1 Güçlendirilmiş pilot ölçekli membran modüllerinin performansı 259
5.2.2 Kritik akı deney sonuçları 259
5.2.3 TMP değişimi 260
5.2.4 İşletme sonrası filtrasyon dirençlerinin belirlenmesi 261
5.2.5 Morfolojik analiz sonuçları 262
5.2.6 Arıtma performansı 265
5.3 Sonuç ve Tartışma 274
5.3.1 Frekansın etkisi 274
5.3.2 Enerji sarfiyatı ve kimyasal maliyeti için ön hesaplamalar 274
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 277
KAYNAKLAR 281
ÖZGEÇMİŞ 289

KISALTMALAR

ACH : Alüminyum Klorhidrat
AKM : Askıda Katı Madde
BSA : Bovin Serum Albumin
CA : Seliloz Asetar
CF : Çapraz Akış
CFD : Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği
ÇO : Çözünmüş Oksijen
DKMD : Direk Temaslı Membran Distilasyon
DMA : Dinamik Mekanik Analiz
DNS : Direk Nümerik Similasyon
EPS : Hücredışı Çözünebilir Polimerik Ürünler
FS : Düz Plaka
HF : İnce Boşluklu Fiber
HRT : Hidrolik Bekleme Süresi
KOİ : Kimyasal Oksijen İhtiyacı
MBR : Membran Biyoreaktör
MD : Membran Distilasyon
MF : Mikrofiltrasyon
MMV : Manyetik Tahrikli Membran Titreşimi
MWCO : Moleküler Ağırlık Engelleme Sınırı
NF : Nanofiltrasyon
NS : Nümerik Simülasyon
OPM : Dakikadaki Osilasyon
ORP : Oksijen Redüksion Potansiyeli
PA : Poliamid
PAN : Poliakrilonitril
PDE : Kısmi Diferansiyel Denklem
PES : Polietersülfon
PISO : Basınç-Kapalı Operatörlerin Ayrıştırılması Algoritması
PSD : Partikül Boyut Dağılımı

PSf : Polisülfon

PVDF : Poliviniliden florid

RANS : Reynold Ortalamalı Nümerik Simülasyon

SCADA : Merkezi Denetleme Kontrol ve Veri Toplama

SEM : Taramalı Elektron Mikroskop

SMP : Çözünebilir Mikrobiyal Ürünler

SRT : Çamur Yaşı

SVI : Çamur Hacim İndeksi

TKM : Toplam Katı Madde

TKN : Toplam Kjeldahl Azotu

TMP : Trans-membran Basıncı

TN : Toplam Azot

TO : Ters Osmoz

TP : Toplam Fosfor

TUKM : Toplam Uçucu Katı Madde

UF : Ultrafiltrasyon

VSEP : Vibrasyonlu Kayma Gerilimi Arttırma Prosesi

SEMBOLLER

μ	: Sıvı viskozitesi
$<\alpha>$	: Özgül kek direnci
M_x, M_y, M_{xy}	: Moment Bileşenleri
ΔP	: Basınç Farkı
t	: Zaman
u,v	: Yer değiştirme vektörü bileşenleri
w	: Açısal hız
τ	: Kayma gerilimi (Stress Tensor)
ε	: Dağılım oranı (Türbülans)
α	: Asal gerilme doğrultusundan sapma açısı
ρ	: Yoğunluk
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}$	: Vektörel kayma gerilmeleri
∇	: Iraksama

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Farklı taşınımlar için kullanılan akı denklemleri ve itici kuvvetler (Beier,2008). **13**
Çizelge 2.2 : Farklı titreşim sistemlerinin karşılaştırılması. **37**
Çizelge 2.3 : Momentum denklemi bileşenleri ve enerji denklemleri. **56**
Çizelge 2.4 : Akışkan akışının temel kategorilerinin sınıflandırılması. **63**
Çizelge 2.5 : RANS modellerinin ek taşınım denklemlerine göre sınıflandırılması. **75**
Çizelge 2.6 : Model girdileri (Huang ve Morrissey, 1998). **110**
Çizelge 2.7 : Biyolojik parametrelerin ölçüm ve simülasyon karşılaştırılmaları, (Wintgens ve diğ., 2003)). **133**
Çizelge 3.1 : Modül özellikleri. **137**
Çizelge 3.2 : Modelde kullanılan sınır koşulları. **140**
Çizelge 3.3 : CFD modelleme çalışmalarında kullanılan frekans ve genlikler. **141**
Çizelge 3.4 : Farklı frekanslarda pik noktalardaki toplam kayma gerilimleri. **159**
Çizelge 3.5 : Geçirgenlik deneyinde kullanılan membranların özellikleri. **163**
Çizelge 3.6 : PES membranın (hava boşluğu = 0) akı ve permeabilite değerleri. ... **163**
Çizelge 3.7 : PAN membranın (hava boşluğu = 0) geçirgenlik değerleri. **164**
Çizelge 3.8 : Üretilen PES ve PAN membranların MWCO analiz sonuçları tablosu. **165**
Çizelge 3.9 : Üretilen PES (hava boşluğu=0) membranın temas açısı sonuçları. ... **166**
Çizelge 3.10 : Üretilen PES (hava boşluğu=2,5) membranın temas açısı sonuçları. **166**
Çizelge 3.11 : Üretilen PAN membranın temas açısı sonuçları. **166**
Çizelge 3.12 : Porometre deneyi sonuç tablosu. **168**
Çizelge 3.13 : PES (hava boşluğu=0) membranın mekanik dayanım testi sonuçları. **169**
Çizelge 3.14 : PES (hava boşluğu=2,5) membranın mekanik dayanım testi sonuçları. **169**
Çizelge 3.15 : PAN membranın mekanik dayanım testi sonuçları. **169**
Çizelge 3.16 : PES modülleri permeabilite ve membran direnci değerleri. **174**
Çizelge 3.17 : PAN modülleri permeabilite ve membran direnci değerleri. **178**
Çizelge 3.18 : Mekanik titreşim sisteminde kullanılan yayın (Rosta AB15) özellikleri. **185**
Çizelge 3.19 : Mekanik titreşim sisteminde kullanılan titreşim motorunun teknik özellikleri. **185**
Çizelge 3.20 : Manyetik sürücü teknik özellikleri. **188**
Çizelge 3.21 : Modül Özellikleri. **189**
Çizelge 4.1 : Sentetik evsel atıksu kompozisyonu (Agtas ve diğ., 2016). **192**
Çizelge 4.2 : Sentetik atıksu karakterizasyonu. **192**
Çizelge 4.3 : Aşı çamuru karakterizasyonu. **193**
Çizelge 4.4 : MBR sisteminin teknik özellikleri. **197**

Çizelge 4.5 : Farklı aşamalarda manyetik ve mekanik titreşim sistemlerinde test edilen frekans değerleri. **205**
Çizelge 4.6 : Kritik akı deneylerinde uygulanan frekanslar. **205**
Çizelge 4.7 : MBR sisteminin işletme parametreleri. **206**
Çizelge 4.8 : Laboratuvar ve pilot ölçekli MBR sistemlerinin işletiminde ölçülen parametreler, ölçüm noktaları ve ölçüm sıklıkları. **207**
Çizelge 4.9 : 1., 2. ve 3. aşama deneylerinde kullanılan güçlendirilmiş membran modüllerine ait permeabilite ve direnç sonuçları. **213**
Çizelge 4.10 : Modüllerin laboratuvar ölçekli çalışma öncesi kritik akı deney sonuçları. **213**
Çizelge 4.11 : Membran yüzeyindeki elementlerin ağırlıkça yüzdesel dağılımı. **227**
Çizelge 4.12 : MBR içindeki çamurun AKM ve UAKM deney sonuçları. **228**
Çizelge 4.13 : Titreşimsiz, manyetik titreşimli ve mekanik titreşimli membran modüllerinde süzüntü akımlarında AKM değerleri ve giderim verimleri. **230**
Çizelge 4.14 : Titreşimsiz, manyetik titreşimli ve mekanik titreşimli membran modüllerinde süzüntü akımlarında KOİ konsantrasyonları ve giderim verimleri. **231**
Çizelge 4.15 : Süzüntü akımında ortalama NO_3-N, NO_2-N, NH_4-N, TKN ve TP konsantrasyonları. **231**
Çizelge 4.16 : Titreşimsiz, manyetik titreşimli ve mekanik tireşimli modül süzüntülerinde ölçülen ortalama bulanıklık değerleri. **232**
Çizelge 4.17 : Tüm işletme boyunca yapılan PSD analizlerinin sonuçları. **233**
Çizelge 4.18 : Kritik akı grafiklerinden elde edilmiş akılar. **242**
Çizelge 4.19 : Tüm modüllerde deney boyunca ortalama TMP değerleri. **244**
Çizelge 4.20 : Mekanik ve manyetik titreşimli sistemlerin kayma gerilimindeki değişimler. **245**
Çizelge 5.1 : Ham evsel atıksu karakterizasyonu. **249**
Çizelge 5.2 : Aşı çamuru karakterizasyonu. **250**
Çizelge 5.3 : Pilot ölçekli MBR sisteminin teknik özellikleri. **253**
Çizelge 5.4 : Pilot sistemde uygulanan deneysel plan. **256**
Çizelge 5.5 : MBR sisteminin işletme parametreleri. **257**
Çizelge 5.6 : Laboratuvar ve pilot ölçekli MBR sistemlerinin işletiminde ölçülen parametreler, ölçüm noktaları ve ölçüm sıklıkları. **258**
Çizelge 5.7 : Manyetik titreşimli ve titreşimsiz çalışma öncesinde ölçülen permeabilite ve direnç değerleri. **259**
Çizelge 5.8 : Membran yüzeyindeki elementlerin ağırlıkça yüzdesel dağılımı. **265**
Çizelge 5.9 : MBR içindeki çamurun AKM ve UAKM deney sonuçları. **266**
Çizelge 5.10 : Manyetik titreşimli ve titreşimsiz membran modüllerinde süzüntü akımlarında AKM değerleri ve giderim verimleri. **267**
Çizelge 5.11 : Manyetik titreşimli ve titreşimsiz membran modüllerinin süzüntü akımlarında ölçülen KOİ konsantrasyonları ve giderim verimleri. **269**
Çizelge 5.12 : Süzüntü akımında ortalama NO_3-N, NO_2-N, NH_4-N, TKN ve TP konsantrasyonları. **269**
Çizelge 5.13 : Süzüntü akımlarında ölçülen bulanıklık değerleri. **270**
Çizelge 5.14 : Tüm işletme periyodu boyunca çamur, besleme ve süzüntü akımlarında yapılan PSD analizlerinin sonuçları. **270**
Çizelge 5.15 : Metreküp arıtılan su başına kimyasal ve enerji maliyetleri **275**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Literatürdeki denenmiş titreşim frekansları ve genlikleri. **3**
Şekil 2.1 : Basınç sürücülü membran prosesler (Baker, 2004)..... **10**
Şekil 2.2 : Filtrasyon spektrumu (Osmonics Inc. USA). **11**
Şekil 2.3 : Toplanan süzüntü hacmine karşılık zaman/hacim grafiği. **15**
Şekil 2.4 : Konsantrasyon polarizasyonu (Eren, 2006). **16**
Şekil 2.5 : MBR'larda tıkanmayı etkileyen faktörler (Judd, 2001; Chang ve diğ., 2002). **19**
Şekil 2.6 : MBR membran modülü (MEMTEK Araş. Merk. & MEMSİS Çevre Tekn. 2017). **24**
Şekil 2.7 : Membran modülünün tank içinde yerleştirilmiş hali. (MEMTEK Araş. Merk. & MEMSİS Çevre Tekn. 2017). **24**
Şekil 2.8 : Tipik bir entegre batık MBR sistemi akım şeması. **25**
Şekil 2.9 : MBR türleri (Yiğit, 2007). **27**
Şekil 2.10 : Boyuna titreşimli membran sistemi (Low ve diğ., 2005). **29**
Şekil 2.11 : Beier ve diğ. (2006) tarafınan kullanılan titreşimli sistemi. **30**
Şekil 2.12 : Li ve diğ. (2013) tarafından kullanılan deney düzeneği. **31**
Şekil 2.13 : Genkin ve diğ. (2006) tarafından kullanılan laboratuvar ölçekli dahili membran titreşim ünitesi. **32**
Şekil 2.14 : Levha membranlı dahili titreşimli sistem (Gomaa ve diğ., 2011). **32**
Şekil 2.15 : Li ve diğ. (2013)'nin kullandığı enine titreşim düzeneği. **33**
Şekil 2.16 : Kola ve diğ. (2014) tarafından kullanılan enine titreşim sistemi a) Membran test düzeneği, b) Çalkalama vasıtasıyla titreşim c) Modüle uygulanan enine titreşim. **34**
Şekil 2.17 : Dönel titreşim düzeneği (Low ve diğ., 2005). **35**
Şekil 2.18 : Harici MBR modülü olarak kullanılan VSEP sistemi (Low ve diğ., 2005). **36**
Şekil 2.19 : Manyetik MBR sisteminin şematik gösterimi a) MBR sistemi, b) Modül haznesi, c) Modülün yandan görünümü (Bilad ve diğ., 2011). **36**
Şekil 2.20 : Kritik akının ortalama yüzey kayma gerilimi ile değişimi (Beier ve diğ., 2008). **38**
Şekil 2.21 : Kritik akı ve ortalama kayma gerilim oranının frekans ile değişimi (Genkin ve diğ., 2006). **39**
Şekil 2.22 : Farklı titreşim frekansı ve genlik değerleri için kritik akının değişimi (Beier ve diğ., 2006). **39**
Şekil 2.23 : Farklı titreşim genlik ve frekans değerleri için kritik akının değişimi (Genkin ve diğ., 2006). **40**
Şekil 2.24 : Titreşim genliğinin filtrasyon akısına etkisi (Gomaa ve diğ., 2011)..... **41**
Şekil 2.25 : Titreşim genliğinin kek tabakası kalınlığına etkisi (Gomaa ve diğ., 2011). **41**
Şekil 2.26 : Titreşim frekansının filtrasyon akısına etkisi (Gomaa ve diğ., 2011). ... **42**

Şekil 2.27 : Filtrasyon frekansının kek tabakasına etkisi (Gomaa ve diğ., 2011). **.... 42**
Şekil 2.28 : Koagülant (alüminyum klorhidrat, ACH) ilavesinin kritik akıya etkisi (Genkin ve diğ., 2006). **..... 43**
Şekil 2.29 : Yıkanmış ve yıkanmış maya ile üst faz için elde edilen TMP değerleri (yıkanmış ve yıkanmamış maya konsantrasyonu 4 g/L, üst faz konsantrasyonu 1 g/L, 5x5 fiber demeti, fiber uzunluğu 18 cm, akı 25 L/m^2.sa, enine titreşimli, titreşim genliği 16 mm, titreşim frekansı 2 Hz) (Li ve diğ., 2013). **..... 44**
Şekil 2.30 : Yıkanmış ve yıkanmamış maya için yarı kritik akı (30 L/m^2-sa) filtrasyonu boyunca TMP değişimi (4 g/L maya konsantrasyonu, titreşim frekansı 25 Hz, genlik 0,7 mm) (Beier ve Jonsson, 2008)..... **44**
Şekil 2.31 : Enine ve boyuna titreşimli membranların tıkanma oranı (5x5 fiber demetleri, fiber uzunluğu 18 cm, akı 25 L/m^2-sa, titreşim frekansı 1Hz ve yıkanmamış maya konsantrasyonu 4 g/L) (Li ve diğ., 2013). **..... 45**
Şekil 2.32 : Objenin bölümlendirilmesi (Meshing) (Liu, 2007). **..... 46**
Şekil 2.33 : Örnek çözdürülmüş bir akış profili (Liu, 2007). **..... 47**
Şekil 2.34 : Koruma kanunları için akışkan elementi (Versteeg ve Malalakasekara, 2007). **..... 51**
Şekil 2.35 : Akışkan elementin içinde ve dışında kütle akışları. **..... 53**
Şekil 2.36 : Akışkan elementin üç yüzeyindeki gerilme bileşenleri (Versteeg ve Malalakasekara, 2007). **..... 57**
Şekil 2.37 : x-yönünde gerilme bileşenleri. **..... 58**
Şekil 2.38 : a)Hücre-merkezli, b)hücre-noktalı örgü planı (Blazek, 2001). **..... 65**
Şekil 2.39 : Türbülanslı akıştaki noktasal hız ölçümleri. **..... 67**
Şekil 2.40 : Türbülans sınır tabakasının görsel hali. **..... 67**
Şekil 2.41 : Bölümlenmiş parçalardan birindeki türbülans akışın enerji dağılımı. **..... 68**
Şekil 2.42 : a) viskoz olmayan tutarsızlığa b) viskoz tutarsızlığa sahip hız profilleri. **..... 70**
Şekil 2.43 : 2 boyutlu türbülans akışta kontrol hacmi. **..... 73**
Şekil 2.44 : Çalışmadan kullanılan geometri,(Ghidossi ve diğ. ,2006). **..... 84**
Şekil 2.45 : (sol üst)- farklı geçirgenlik değerleri için giriş basıncındaki değişikliklere bağlı basınç düşüşlerindeki değişimler (d = 1 mm, L = 1.2 m, v=1ms^{-1}), (sağ üst)- farklı geçirgenlik değerleri için membran uzunluğuna bağlı olarak membran boyunca meydana gelen basınç düşüşlerindeki değişimler (d = 1 mm, L = 1.2 m, v=1ms^{-1}), (sol alt)- farklı giriş basınçları için geçirgenliğe bağlı basınç düşüşlerindeki değişimler (d = 1 mm, L = 1.2 m, v=1ms^{-1}), (sağ alt)-tıkanan hollow fiber yüzdesine bağlı olarak uygulanması gereken pompa gücündeki değişimler (Lp =100Lh^{-1} m^{-2} bar^{-1}, v=1ms^{-1}, Pi = 150 kPa, d = 1 mm, L = 1.2 m, Qinlet = 200m^3 h−1, 35,000 hollow fibers), (Ghidossi ve diğ., 2006). **..... 85**
Şekil 2.46 : Nümerik çözümlerden ve deneyler sonucu farklı giriş basınçları için elde edilen basınç düşüşlerinin karşılaştırılması, (Ghidossi ve diğ. ,2006).. **85**
Şekil 2.47 : (Üst)- SEPA CF membran filtrasyon hücresinin şematik gösterimi, (Alt)- Mesh yapısı,(Tarabara ve Wiesner, 2003). **..... 86**
Şekil 2.48 : Kanalın alt duvarındaki düzlem için kayma oranlarının üç boyutlu dağılımı,(Tarabara ve Wiesner, 2003). **..... 87**
Şekil 2.49 : Deneysel düzenek 1)besleme tankı, 2)pompa, 3)akı ölçer, 4)membran, 5)basınç ölçer, 6)vana, 7)örnek alma vanası, 8)süzüntü kabı, 9)tartı, 10)PC/yazılım,(Marcos ve diğ., 2009)..... **88**

Şekil 2.50 : Membran geçiş basıncı 27580Pa'da iken protein ekstraksiyon konsantrasyonu için basıç değişimi (Marcos ve diğ., 2009). **89**
Şekil 2.51 : Çalışmada kullanılan mesh görüntüsü (Chong ve diğ., 2012). **90**
Şekil 2.52 : Çalışmada kullanılan modül geometrileri (Yang ve diğ.,2012). **90**
Şekil 2.53 : Mesh görüntüsü (Yang ve diğ., 2012). **91**
Şekil 2.54 : (a) dalgalı dizaynlar için bölgesel akış bölgeleri (b) Dalgalı 01, 5.0/1.0, b=0.8, (c) dalgalı 02, 2.5/2.0, b=0.5, (e) dalgalı 04, 1.25/1.0 , b=0.7, (f) dalgalı 05, 2.5/1.0, b=0.5, (g) dalgalı 06, alternatif 5.0/1.0, b=0.8, (h) dalgalı 07, alternatif, 1.25/1.0 , b=0.7, (i) dalgalı 08, alternatif 2.5/1.0, b=0.5 ve (b) tek fiberli modüllerin bölgesel basınç ve sıcaklık dağılımlarının karşılaştırılması (i)orjinal düz fiber; (ii)dişli fiber (C=8.0x10^{-7} kg/m^{2}sPa ve Cn (dişli)=6.4x10^{-7} kg/m^{2}sPa, L=0.25 m, T_{fi}=327.15 K, T_{pi}=293.85 K, u_{fi}=0.06 m/s, u_{pi}=0.417 m/s) (Yang ve diğ., 2012). **92**
Şekil 2.55 : (a)- Membran modülü şematik gösterimi, (b)- boşluklu disk tipi membran modüllerinin geometrik parametreleri, (c)- farklı TMP'lerde saf su akısı (Li ve diğ., 2011). **93**
Şekil 2.56 : Boşluk kalınlığının R_{tube}=5mm ve 15mm iken ve TMP=1bar iken geçirgenlik değerlerine etkisi(Li ve diğ., 2011). **94**
Şekil 2.57 : Kanal geometrisi (Alexiadis ve diğ., 2007). **95**
Şekil 2.58 : Çapraz akışlı hücre kanalı içinde liflerin düzenlenmesi. (a) şeklinde lifler kontollü aralıklarla kanala sabitlenmiştir. (b) şeklinde ise, lifler kanalın merkezinde sabitlenmiş ve her destede 4 ve 8 lif demetleri içermektedir. Kanal boyutu 4 mm kanalın genişliği 24 ve 8 mm olarak belirlenmiştir. c) 24 ve 8 mm lik kanallarda ki farklı çap düzenlemeleri ile 90 dakika filtrasyon için akı azalımı (Chang ve Fane, 2001). **96**
Şekil 2.59 : Simülasyonda kullanılan hücreler; (sol) sabit akışlı hesaplamar için, (sağ) değişken akışlı hesaplamalar için (Hellström ve Lundström, 2006). ... **97**
Şekil 2.60 : Modelin şematik gösterimi (Ahmed ve diğ., 2011). **98**
Şekil 2.61 : a)perdeleri duvarda olan, b)boş tüp, c)perdeleri çubukta olan membran kanalları boyunca hız büyüklükleri (m/s) (Ahmed ve diğ., 2011). **99**
Şekil 2.62 : a)perdeleri duvarda olan, b)boş tüp, c)perdeleri çubukta olan membran uzunlukları boyunca statik basınç dağılımı (Pa) (Ahmed ve diğ., 2011). **99**
Şekil 2.63 : a)Yüksek ve düşük paketleme yoğunluğuna sahip hekzagonal ve b) 4 komşu kenarı birleştirerek elde edilen eşkenar dörtgen meshin şematik gösterimi (Günther ve diğ., 2010). **101**
Şekil 2.64 : Fiber yarıçapı ve uzunluğunun optimum kombinasyonları. Simülasyon sırasında kullanılan koşullar : *Jmi/Jcr*= 0.85, *Jcr*= 5.56x10^-6 *m/s, Rm*=10^11 (l/m), *h*=0.5 m, δ= 0.00035 m, g=9.8 *m/*s^2, ρ=1,000 kg/m^3, μ=0.001 Ns/m^2 (Chang ve diğ., 2002). **102**
Şekil 2.65 : Boşluk fraksiyonu ve dış çap için iki farklı besleme suyu hızındaki net akış oranlarındaki değişimler. a) Q_{feed}=0.8m^3/h, b) Q_{feed}=0.95m^3/h (Serra ve diğ., 1998). **103**
Şekil 2.66 : Modül geometrisi (Khor ve diğ., 2009). **103**
Şekil 2.67 : Kaset modül (Gehlert ve diğ., 2004). **104**
Şekil 2.68 : UF modüllerin alt bölümleri (Gehlert ve diğ., 2004). **105**
Şekil 2.69 : Re= 2700, TMP_{av}= 185 kPa, TS= 9 g/l, t=1679 s için modül uzunluğu üzerinde ileri filtrasyon boyunca basınç profili (Gehlert ve diğ., 2004). **106**

Şekil 2.70 : Re= 2700, TS= 9 g/l, t= 1799 s için basınç ayarlı ve ayarsız modül uzunluğu üzerinde geri yıkama boyunca basınç profili (Gehlert ve diğ., 2004). **106**
Şekil 2.71 : Re= 2700, TMP_{av}= 185 kPa, TS= 9 g/l, t=1679 s ve hemen geri yıkamadan hemen sonra t= 1801 s için modül uzunluğu üzerinde süzüntü akısı (Gehlert ve diğ., 2004). **107**
Şekil 2.72 : Re= 2700, TMP_{av}= 185 kPa, TS= 9 g/l, t=1679 s s ve hemen geri yıkamadan hemen sonra t= 1801 s için modül uzunluğu üzerinde kek kütle profili (Gehlert ve diğ., 2004). **107**
Şekil 2.73 : Modellemenin yapıldığı geometri ve geometride kullanılan mesh (Sanaeepur ve diğ., 2012). **108**
Şekil 2.74 : Deneysel ve model verilerinin karşılaştırılması (Sanaeepur ve diğ., 2012). **108**
Şekil 2.75 : Sistemin deney düzeneği (Huang ve Morrissey, 1998). **109**
Şekil 2.76 : Modelde kullanılan mesh görüntüsü (Huang ve Morrissey, 1998). **109**
Şekil 2.77 : Hem dikey hem de yatay düzlemde kanal içerisindeki konsantrasyon polarizasyonu (Huang ve Morrissey, 1998). **110**
Şekil 2.78 : Çalışmada kullanılan model geometrisi (Oxarango ve diğ., 2003). **111**
Şekil 2.79 : Çözüm noktası sayısının basınç profili üzerine göreceli etkisi (Oxarango ve diğ., 2003). **111**
Şekil 2.80 : Çalışmada kullanılan deney düzeneği (Geissler ve diğ., 2004)..... **112**
Şekil 2.81 : İkinci Modelde kullanılan yapay sinir ağı (Geissler ve diğ., 2004). **113**
Şekil 2.82 : MBR pilot tesisindeki geçirgenlik değerlendirmesi (Geissler ve diğ., 2004). **113**
Şekil 2.83 : Çalışmada kullanılan sarmal ve düz hollow fiber membran modüllerini içeren mikrofiltrasyon deney düzeneği (Luque ve diğ., 1998). **114**
Şekil 2.84 : Artan giriş debisi ile farklı TMP nin süzüntü akısı üzerindeki etkisi. (a) 0.1 kuru wt% maya süspansiyonu. Düz modül için 14 kPa, 28kPa, ve 42 kPa. Açık semboller ise sarmal modül için. (b) 0.5 kuru wt% maya süspansiyonu. Düz modül için 14 kPa, 28kPa, ve 42 kPa. Açık semboller ise sarmal modül için (Luque ve diğ., 1998). **115**
Şekil 2.85 : CFD simülasyonlarında kulanılan tek fiberli modüllerin örnek tasarımlar şemaları (Yang ve diğ., 2012). **116**
Şekil 2.86 : Değişik türbülans oluşturucuların bulunduğu modüllerdeki yerel akım çizgilerinin görselleştirilmesi. ($C=8.0x10^{-7}$ kg/m^2sPa, L=0.25 m, ufi=0.06 m/s, upi=0.417 m/s, Tfi=327.15 K, Tpi=293.85 K) (Yang ve diğ., 2012). **117**
Şekil 2.87 : 2B'lu mikrofiltrasyon sisteminin planı, Siyah çizgiler katı duvarları, gri çizgiler ise basınç sınırlarını göstermektedir (Kromkamp ve diğ., 2005). **118**
Şekil 2.88 : Zamana bağlı fonksiyon olarak uzunluk ortalamalı trans membran basıncının değişimi (Kromkamp ve diğ., 2005). **118**
Şekil 2.89 : (a)1180 Pa, (b) 1780 Pa, (c) 2980 Pa ve (d) 4180 Pa transmembran basıncında membran üzerindeki akış ve konsantrasyon dağılımı (Kromkamp ve diğ., 2005). **119**
Şekil 2.90 : Membran modülü içerisindeki sıcaklık dağılımı (Yu ve diğ., 2011). **120**
Şekil 2.91 : Proses düzeneğinin taslak görüntüsü (Brannock ve diğ., 2010). **121**
Şekil 2.92 : Önerilen CFD modelinin bileşenlerinin şematik gösterimi (Brannock ve diğ., 2010). **121**

Şekil 2.93 : Hıza bağlı oluşturulmuş akış çizgileri. (sol) bölmeler sırası ile düz plaka mbr dizayn görünümü; 1. Anaeobik bölge, 2. Salınan havalandırma bölgeleri 3. Havalandırma bölgesi, 4. Membran filtrasyon tankı, a) Ana giriş , b) Taşma savağı, c) Dip savağı, d) Karıştırıcı, e) Havalandırıcı, (sağ)- bölmeler sırası ile hollow fiber MBR dizayn görünümü; 1) Anoksik bölge, 2) Havalandırma bölgesi, 3) Membran filtrasyon tankı, 4) Tekrar Havalandırma bölgesi, a) Ana giriş, b) Karıştırıcı, c) Taşma savağı, d) Havalandırıcı, e) Dip savağı (Brannock ve diğ., 2010)..... **122**
Şekil 2.94 : Simüle edilen ve deneysel olarak ölçülen boyutsuz bekleme süresi dağılımları. Üst taraftaki grafikler düz plaka MBR modüllerine, alt taraftaki grafikler ise hollow fiber MBR modülüne aittir (Brannock ve diğ., 2010). **123**
Şekil 2.95 : Silindirik bir koordinat sistem ile bir tübular membranda laminer akışın gösterimi (Damak ve diğ., 2003). **124**
Şekil 2.96 : V_{max} / Vz_0 oranının deneysel ve teorik değerleri(Damak ve diğ., 2003). **124**
Şekil 2.97 : Şekil 1.96'da gösterilen hız alanına karşılık gelen hız konturleri (Damak ve diğ., 2003). **125**
Şekil 2.98 : 10^{-8} poroz duvar geçirgenliği, Re=300 ve Re_w= 0,3 ile tüpteki akış alanları (Damak ve diğ., 2003). **125**
Şekil 2.99 : z-ekseni boyunca boyutsuz gradyan basıncın çizimi (Damak ve diğ., 2003). **125**
Şekil 2.100 : Deneysel düzeneğin şematik gösterimi (Yang ve diğ., 2012). **126**
Şekil 2.101 : Bir gaz yumruğu etrafındaki kayma gerilmesi (Yang ve diğ., 2012). **127**
Şekil 2.102 : Farklı faz hızları ve partikül boyutları((kırmızı: yüksek K_l, mavi: düşük K_l). Soldan sağa doğru: V_{gaz}= 0,74 m/s(birinci: d_p= 1μm; ikinci: d_p= 100μm) ve V_{gaz}= 0,5 m/s (üçüncü: d_p= 1μm; dördüncü: d_p= 100μm)). için bir gaz yumruğu etrafındaki kütle transfer katsayısı (K_l) (Yang ve diğ., 2012). **127**
Şekil 2.103 : Simülasyonlar için kullanılan akış kanalının geometrik modeli (Wiley ve Fletcher, 2002). **128**
Şekil 2.104 : Değişken süzülme oranı için (α_0=0,27, β=1) CFX ve Brain verilerinin karşılaştırılması (Wiley ve Fletcher, 2002)..... **128**
Şekil 2.105 : Şekil EK-1.107'de gösterilen şartlar için ayırıcıların konsantrasyon polarizasyonuna etkileri (Wiley ve Fletcher, 2002)..... **129**
Şekil 2.106 : Döner Sepet Modülü'nün şematik diyagramı (Sarkar ve diğ., 2012). **129**
Şekil 2.107 : Farklı çaplarda ve farklı dönüş hızlarındaki modüllerde (r=0,03 m, 0,08 m, 0,11m) hız alanları (Sarkar ve diğ., 2012). **130**
Şekil 2.108 : Boşluk oluşturucu filamentlerin membranlar içerisine yerleştirilme stilleri (a:kenarda, b:ortalanmış, c:zigzag) ve bu filamentler arasından akışlar.(akım yönü soldan sağa olup, ölçü barı 0-0,5 ms^{-1}'dir) (Subramani ve diğ., 2006). **131**
Şekil 2.109 : Deney düzeneğinin şematik görünümü. Oklar ölçüm noktalarını göstermektedir. Bütün ölçüm noktaları data toplayıcı bir bilgisayara bağlıdır (Schausberger ve diğ., 2009). **132**
Şekil 2.110 : 1 saat boyunca standart koşullarda membran akısına uygulanan resistanslar (Schausberger ve diğ., 2009). **132**
Şekil 2.111 : Permabilite değerlerinin ölçüm ve simülasyon olarak karşılaştırılması (Wintgens ve diğ., 2003)..... **133**

Şekil 2.112 : a. Aynı eksenli fiber yerleşimi, b. Çapraz eksenli fiber yerleşimi (Zamani ve diğ., 2013). **134**
Şekil 2.113 : 2 komşu fiber arasında ki mesafenin 1,4 mm olduğu düz ve çapraz eksenli konfigürasyonlar için mesh ve sınır şartlar (Zamani ve diğ., 2013). .. **135**
Şekil 2.114 : Fiber desteleri için duvar kayma gerilmesi(Zamani ve diğ., 2013).... **135**
Şekil 2.115 : Fiberler arasındaki farklı mesafeler için titreyen fiberlerin yüzeyi üzerinde kayma gerilmesi dağılımı; fiberler arasındaki mesafeler; a) çapraz 0.12mm, b) aynı eksenli-0.12mm, c) çapraz-0.4mm, d) aynı eksenli-0.4mm, e) çapraz-1mm, f) aynı eksenli-1mm (Zamani ve diğ., 2013). **136**
Şekil 3.1 : Modülün üç boyutlu görünümleri. **138**
Şekil 3.2 : Membran modüllerin teknik detayı. **138**
Şekil 3.3 : Modül geometrisi. **139**
Şekil 3.4 : a) Modül ve etrafındaki sıvı kütlesinin genel olarak element dağılımı, b) ZX eksenindeki kesit görünümü, c) ZX ekseninde sıvı kütlesiyle beraber modül kesit görünümü. **140**
Şekil 3.5 : 60 Hz frekansta fiberler üzerinde oluşan toplam (a), ortalama (b), maksimum (c), minimum (d) kayma geriliminin değişimi. **143**
Şekil 3.6 : 50 Hz frekansta fiberler üzerinde oluşan toplam (a), ortalama (b), maksimum (c), minimum (d) kayma geriliminin değişimi. **144**
Şekil 3.7 : 40 Hz frekansta fiberler üzerinde oluşan toplam (a), ortalama (b), maksimum (c), minimum (d) kayma geriliminin değişimi. **145**
Şekil 3.8 : 30 Hz frekansta fiberler üzerinde oluşan toplam (a), ortalama (b), maksimum (c), minimum (d) kayma geriliminin değişimi. **147**
Şekil 3.9 : 20 Hz frekansta fiberler üzerinde oluşan toplam (a), ortalama (b), maksimum (c), minimum (d) kayma geriliminin değişimi. **148**
Şekil 3.10 : 15 Hz frekansta fiberler üzerinde oluşan toplam (a), ortalama (b), maksimum (c), minimum (d) kayma geriliminin değişimi. **149**
Şekil 3.11 : 15 Hz frekansta fiberler üzerinde oluşan toplam (a), ortalama (b), maksimum (c), minimum (d) kayma geriliminin değişimi. **150**
Şekil 3.12 : 5 Hz frekansta fiberler üzerinde oluşan toplam(a) ve ortalama (b) kayma geriliminin değişimi. **151**
Şekil 3.13 : 5 Hz frekansta fiberler üzerinde oluşan maksimum(a) ve minimum(b) kayma geriliminin değişimi. **152**
Şekil 3.14 : 60 ve 50 Hz frekansta fiberler üzerindeki kayma gerilimi dağılımının görselleştirilmiş hali. **153**
Şekil 3.15 : 60 ve 50 Hz frekansta fiberler üzerindeki kayma gerilimi dağılımının görselleştirilmiş hali. **154**
Şekil 3.16 : 20 ve 15 Hz frekansta fiberler üzerindeki kayma gerilimi dağılımının görselleştirilmiş hali. **155**
Şekil 3.17 : 10 ve 5 Hz frekansta fiberler üzerindeki kayma gerilimi dağılımının görselleştirilmiş hali. **156**
Şekil 3.18 : Sabit 10 mm genlikteki ve farklı frekans (5 – 20 Hz) değerlerindeki titreşimlerin oluşturduğu toplam kayma gerilimleri. **158**
Şekil 3.19 : Sabit 10 mm genlikteki ve farklı frekans (20 – 60 Hz) değerlerindeki titreşimlerin oluşturduğu toplam kayma gerilimleri. **158**
Şekil 3.20 : Çözelti hazırlama düzeneği. **160**
Şekil 3.21 : (a) PES (hava boşluğu=0), (b) PES (hava boşluğu=2,5) membranların basınç-akı grafikleri. **164**
Şekil 3.22 : PAN membranının basınç-akı grafiği. **164**

Şekil 3.23 : PES ve PAN membranların MWCO değerleri. **165**
Şekil 3.24 : PES (hava boşluğu=0) membranının yüzey yükü analizi sonuç grafiği. **167**
Şekil 3.25 : PES (hava boşluğu=2,5) membranının yüzey yükü analizi sonuç grafiği. **167**
Şekil 3.26 : PAN membranının yüzey yükü analizi sonuç grafiği. **168**
Şekil 3.27 : PES (hava boşluğu=0)(a), PES (hava boşluğu=2,5) (b) membranların stereo mikroskobu görüntüleri. **170**
Şekil 3.28 : PAN membranının stereo mikroskobu görüntüleri. **170**
Şekil 3.29 : 2 Tip PES membranına (h.b.=0) (a), (h.b.=2,5) (b) ait SEM görüntüleri. **170**
Şekil 3.30 : PAN membranına ait SEM görüntüleri. **171**
Şekil 3.31 : PES membranlardan üretilmiş MBR modülleri. **172**
Şekil 3.32 : PES modüllerde gerçekleşen kırılma ve bükülmeler. **172**
Şekil 3.33 : Poliüretan yapıştırıcının membranı disk deliklerinde sıkıştırması. **173**
Şekil 3.34 : Poliüretan yapıştırıcının modül üzerinde görünümü. **173**
Şekil 3.35 : PES modüllerine ait TMP ve süzüntü miktarı değişimi. **175**
Şekil 3.36 : PAN membranlarından üretilmiş MBR modülleri. **176**
Şekil 3.37 : PAN modüllerde gerçekleşen kırılma ve bükülmeler. **177**
Şekil 3.38 : Poliüretan yapıştırıcının modül üzerinde görünümü. **177**
Şekil 3.39 : PAN 1-6 modüllerine ait TMP ve süzüntü miktarı değişimi. **179**
Şekil 3.40 : Epoksi (önde) ve poliüretan (arkada) yapıştırıcıların A, B bileşenleri. **181**
Şekil 3.41 : İçi boşluklu fiber membranların dizilimleri. **182**
Şekil 3.42 : Bağlantıları yapılmış kullanıma hazır laboratuvar ölçekli MBR modülü. **183**
Şekil 3.43 : Osilasyon yayı (A) ve iki kutuplu titreşim motoru (B). **184**
Şekil 3.44 : Mekanik titreşim sisteminin teknik detayları. **184**
Şekil 3.45 : Mekanik titreşim sisteminin kontrol panosu. **186**
Şekil 3.46 : Motor kutbu (A) ve kutup içerisindeki ağırlıkların birbirlerine göre farklı konumları (B). **186**
Şekil 3.47 : Manyetik sürücü (a) ve sürücü devresi (b). **187**
Şekil 3.48 : Manyetik titreşim sisteminin teknik detayları. **188**
Şekil 3.49 : Bağlantıları yapılmış kullanıma hazır pilot ölçekli MBR modülü. **190**
Şekil 3.50 : Bağlantıları yapılmış kullanıma hazır pilot ölçekli MBR modülünün farklı açıdan görüntüsü. **190**
Şekil 3.51 : Pilot ölçekli modül için kullnılan amplifikatör devresi (a) ve manyetik sürücü (b). **190**
Şekil 4.1 : Laboratuvar ölçekli MBR sisteminin akım şeması. **195**
Şekil 4.2 : Laboratuvar ölçekli MBR sisteminin boş (üstte) ve aşı çamuru doldurulduktan sonraki genel görünümü (altta). **196**
Şekil 4.3 : Laboratuvar ölçekli MBR sisteminin genel görünümü. **197**
Şekil 4.4 : Çözünmüş oksijen probunun ve havalandırma vanalarının görünümü. **198**
Şekil 4.5 : pH probunun görünümü. **198**
Şekil 4.6 : Asit ve baz pompalarının görünümü. **199**
Şekil 4.7 : Sıcaklık (solda) ve ORP (sağda) probunun görünümü. **199**
Şekil 4.8 : Basınç ölçerlerin (solda) ve iletkenlik probunun (sağda) görünümü. **200**
Şekil 4.9 : Terazilerin görünümü. **200**
Şekil 4.10 : Vakum pompalarının görünümü. **201**
Şekil 4.11 : Besleme pompasının ve seviye sensörünün görünümü. **202**
Şekil 4.12 : MBR Sistemi SCADA ana ekran görünümü. **203**

Şekil 4.13 : Hasar görmüş mekanik titreşim sistemine ait görünümler. **204**
Şekil 4.14 : (A) Titreşimsiz modül, (B) Manyetik titreşimli modül ve (C) Mekanik titreşimli modülün titreşimler kapalı iken krtik akı grafikleri..... **214**
Şekil 4.15 : Titreşimsiz, manyetik ve mekanik titreşimli modüllerde TMP profili (Kaya R. ve diğ. 2017). **216**
Şekil 4.16 : Aşama 3 ve maksmum frekans deneylerinin karşılaştırmalı TMP profili.. ..... **217**
Şekil 4.17 : Modüllerin yıkama aşamalarından sonra elde edilmiş direnç değerleri, 1. aşama, 2. Aşama ve 3. Aşama. **218**
Şekil 4.18 : 1. aşamada kullanılmış modüllerdeki membranların fiziksel ve kimyasal yıkama sonrası SEM görüntüleri. **220**
Şekil 4.19 : 2. aşamada kullanılmış modüllerdeki membranların fiziksel ve kimyasal yıkama sonrası SEM görüntüleri. **221**
Şekil 4.20 : 3. aşamada kullanılmış modüllerdeki membranların fiziksel ve kimyasal yıkama sonrası SEM görüntüleri. **222**
Şekil 4.21 : 1. aşamada kullanılmış titreşimsiz, manyetik ve mekanik titreşimli modüllerde gerçekleştirilen EDS analizi spektrumu. **224**
Şekil 4.22 : 2. aşamada kullanılmış titreşimsiz, manyetik ve mekanik titreşimli modüllerde gerçekleştirilen EDS analizi spektrumu. **225**
Şekil 4.23 : 3. aşamada kullanılmış titreşimsiz, manyetik ve mekanik titreşimli modüllerde gerçekleştirilen EDS analizi spektrumu. **226**
Şekil 4.24 : MBR'daki çamurda AKM ve UAKM konsantrasyonlarının değişimi (Kaya R. ve diğ. 2017). **228**
Şekil 4.25 : Titreşimsiz, manyetik ve mekanik titreşimli membran modüllerinin süzüntü akımında elde edilen AKM konsantrasyonlarının değişimi. . **229**
Şekil 4.26 : Titreşimsiz, manyetik ve mekanik titreşimli membran modüllerinde süzüntü akımında elde edilen KOİ değerlerinin değişimi. **230**
Şekil 4.27 : Titreşimsiz, manyetik ve mekanik titreşimli membran modüllerinde süzüntü akımında ölçülen bulanıklık değerlerinin değişimi. **232**
Şekil 4.28 : 1. aşama reaktör içi çamur numunesinde ölçülen PSD sonuçları. **233**
Şekil 4.29 : 2. aşama reaktör içi çamur numunesinde ölçülen PSD sonuçları. **234**
Şekil 4.30 : 3. aşama reaktör içi çamur numunesinde ölçülen PSD sonuçları. **234**
Şekil 4.31 : 1. aşamada titreşimsiz modülün süzüntü akımında ölçülen PSD sonuçları. **234**
Şekil 4.32 : 2. aşamada titreşimsiz modülün süzüntü akımında ölçülen PSD sonuçları. **235**
Şekil 4.33 : 3. aşamada titreşimsiz modülün süzüntü akımında ölçülen PSD sonuçları. **235**
Şekil 4.34 : 1. aşamada manyetik titreşimli modülün süzüntü akımında ölçülen PSD sonuçları. **235**
Şekil 4.35 : 2. aşamada manyetik titreşimli modülün süzüntü akımında ölçülen PSD sonuçları. **236**
Şekil 4.36 : 3. aşamada manyetik titreşimli modülün süzüntü akımında ölçülen PSD sonuçları. **236**
Şekil 4.37 : 1. aşamada mekanik titreşimli modülün süzüntü akımında ölçülen PSD sonuçları. **237**
Şekil 4.38 : 2. aşamada mekanik titreşimli modülün süzüntü akımında ölçülen PSD sonuçları. **237**
Şekil 4.39 : 3. aşamada mekanik titreşimli modülün süzüntü akımında ölçülen PSD sonuçları. **237**

Şekil 4.40 : Deney seti 1' de titreşimsiz, manyetik ve mekanik titreşimli modüllere ait kritik akı grafikleri. **238**
Şekil 4.41 : Deney seti 2'de titreşimsiz, manyetik ve mekanik titreşimli modüllere ait kritik akı grafikleri. **239**
Şekil 4.42 : Deney seti 3'te titreşimsiz, manyetik ve mekanik titreşimli modüllere ait kritik akı grafikleri. **240**
Şekil 4.43 : Deney seti 4'te titreşimsiz, manyetik ve mekanik titreşimli modüllere ait kritik akı grafikleri. **241**
Şekil 4.44 : Manyetik, mekanik ve titreşimsiz modüllerin titreşim sistemleri devredeyken elde edilen kritik akı grafiği. **243**
Şekil 4.45 : Üst-kritik akı deneyi TMP profili. **244**
Şekil 4.46 : Mekanik ve manyetik titreşimli sistemlerin tıkanma mekanizmasının karşılaştırması. **246**
Şekil 5.1 : Pilot ölçekli MBR sisteminin yerleştirildiği konteynerin görünümü. **251**
Şekil 5.2 : Pilot ölçekli MBR sisteminin görünümü; A) Sistemin yandan görünümü, B) Sistemin önden görünümü, C) Aklimasyon süreci başlatılmış aktif çamur içeren sistemin görünümü. **252**
Şekil 5.3 : Pilot ölçekli MBR Sistemi SCADA ana ekran görünümü. **255**
Şekil 5.4 : Kritik akı deneyi akıya bağlı TMP değişimi. **260**
Şekil 5.5 : Manyetik titreşimli (30 Hz), titreşimsiz ve manyetik titreşimli (150 Hz) modüllerde basınç profili. **260**
Şekil 5.6 : Modüllerin yıkama aşamalarından sonra elde edilmiş direnç değerleri. **261**
Şekil 5.7 : Manyetik 30 Hz titreşimli modülden alınan membranların fiziksel ve kimyasal yıkama sonrası SEM görüntüleri. **262**
Şekil 5.8 : Titreşimsiz modülden alınan membranların fiziksel ve kimyasal yıkama sonrası SEM görüntüleri. **262**
Şekil 5.9 : Manyetik 150 Hz titreşimli modülden alınan membranların fiziksel ve kimyasal yıkama sonrası SEM görüntüleri. **263**
Şekil 5.10 : Manyetik titreşimli (30 Hz - 150 Hz) ve titreşimsiz modüllerde gerçekleştirilen EDS analizi spektrumu. **264**
Şekil 5.11 : Reaktördeki AKM-UAKM konsantrasyonlarının değişimi. **266**
Şekil 5.12 : . Süzüntüdeki AKM konsantrasyonunun değişimi. **267**
Şekil 5.13 : Süzüntü akımında TKM konsantrasyonunun değişimi. **268**
Şekil 5.14 : Reaktörün işletildiği süreç boyunca süzüntüde KOİ konsantrasyonları. **268**
Şekil 5.15 : Süzüntü akımında ölçülen bulanıklık değerleri. **269**
Şekil 5.16 : Manyetik titreşimli (30 Hz) modülün besleme akımında ölçülen PSD sonuçları. **271**
Şekil 5.17 : Titreşimsiz modülün besleme akımında ölçülen PSD sonuçları. **271**
Şekil 5.18 : Manyetik titreşimli (150 Hz) modülün besleme akımında ölçülen PSD sonuçları. **271**
Şekil 5.19 : Manyetik titreşimli (30 Hz) modülün işletildiği süreçte çamurda ölçülen PSD sonuçları. **272**
Şekil 5.20 : Titreşimsiz modülün işletildiği süreçte çamurda ölçülen PSD sonuçları. **272**
Şekil 5.21 : Manyetik titreşimli (150 Hz) modülün işletildiği süreçte çamurda ölçülen PSD sonuçları. **272**
Şekil 5.22 : Manyetik titreşimli (30 Hz) modülün süzüntü akımında ölçülen PSD sonuçları. **273**
Şekil 5.23 : Titreşimsiz modülün süzüntü akımında ölçülen PSD sonuçları. **273**

Şekil 5.24 : Manyetik titreşimli (150 Hz) modülün süzüntü akımında ölçülen PSD sonuçları. **273**
Şekil 5.25 : Maliyetlerin yüzdesel dağılımı ve karşılaştırılması. **275**

MEMBRAN BİYOREAKTÖRLERDE TİTREŞİM İLE TIKANMA KONTROLÜ

ÖZET

Membran Biyoreaktörlerde (MBR) tıkanmanın geciktirilmesi çeşitli hidrolik yöntemlerle gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemler, hava ile sıyırma ve periyordik geri yıkama ve periyodik bekletme olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Hava ile sıyırma membran yüzeyindeki kayma gerilmesini bir miktar arttırarak gözenekleri tıkayıcı paritüllerin membrandan uzak durmasını sağlamaktadır. Bunun dışında geliştirilmekte olan bir diğer teknolojisi titreşim ile membranların tıkanmasının geciktirilmesidir. Titreşim sayesinde direk membran yüzeyinin kendisini titreşmesi sağlanarak çok yüksek kayma gerilimi oluşturulmakta ve böylece membran tıkayıcı partiküllerin membran yüzeine çarparak uzaklaştırılması hedeflenmektedir.

Bu tez çalışmasında öncelikle konu ile ilgili litertür taraması yapılmış ve literatürdeki başarılı örnekler incelenmiştir. Literatürdeki sistemlerin çoğunluğu laboratuvar ölçeğinde uygulanabilir sistemler olup gerçek ölçekli ve pilot uygulamaya uygun değildir. Bunun yanı sıra organik ve inorganik olmak üzere laboratuvar ortamında hazırlanmış süspansiyonlar kullanılarak batık MBR sistemi modellenmeye çalışılmıştır. Literatürde kullanılan sistemler mekanik olarak, membranların itme çekme hareketiyle çeşitli yönlerde hareket ettirilmesine dayanmakta olup bir kaç tanesi manyetik transduser yardımıyla yüksek frekans düşük genlik kullanılarak gerçekleştirilen deneylerden ibarettir.

Bu çalışmada öncelikle hem pilot olarak hem de laboratuvar ölçeğinde kullanılacak modüller 3 Boyutlu olarak SOLIDWORKS programı ile tasarlanmış ve labortuavar ölçekli modül ise Computational Fluid Dynamics (CFD) yöntemiyle ANSYS FLUENT programı kullanılarak modellenip simülasyonu yapılmıştır. Bu simülasyonlarda çeşitli frekans değerleri ve genlikleri modele girilerek, membran yüzeyinde oluşturacağı kayma gerilimleri karşılaştırılmıştır. Daha sonra polyetersülfon (PES) ve poliakrilonitril (PAN) bazlı ince boşluklu membranlar üretilmiş fakat bunların titreşimli batık MBR modülü için dayanıksız olacağı yapılan deneylerle görülmüştür. Bunun üzerine güçlendirilmiş ince boşluklu PVDF (polivinil floriden) bazlı membranlar sipariş edilmiş ve bu ticari membranlar kullanılarak titreşimli membran modülleri üretilmiştir. Membran modüllerinin yerleştirileceği titreşim sistemleri ise manyetik ve mekanik sistemler olarak tasarlanmış, sanayide üretimi gerçekleştirilmiş ve üretim aşamaları açıklanmıştır.

Modül ve titreşim sistemlerinin üretimi tamamlandıktan sonra mekanik ve manyetik tahrikli titreşimlerin batık MBR modülleri üzerindeki etikisinin incelenmesi amacıyla laboratuva ve pilot ölçekli uzun dönemli deneyler gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar ölçekli deneylerde hem kısa süreli kritik akının belirlenmesi deneyleri hem de uzun dönemli filtrasyon deneyleri sentetik atıksu beslemesi ile gerçekleştirilmiştir. Titreşimsiz kontrol modülü, mekanik titreşimli modül ve manyetik titreşimli modül laboratuvar ölçekli MBR sisteminde paralel olarak işletilmiş ve arıtma ve filtrasyon

performansları takip edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, manyetik titreşimli modülün tıknmayı en iyi geciktirdiği, mekanik titreşimli modülün ise titreşimsiz modüle göre daha erken tıkandığı gözlemlenmiştir. Laboratuvar öleçeğinde en iyi sonucu veren titreşim sistemi ise pilot ölçekli deneyler için seçilmiş ve uzun dönemli deney pilot ölçekli olarak gerçek atıksu ile gerçekleştirilmiştir.

Pilot ölçeğinde manyetik titreşimli modül ve titreşimsiz kontrol modülü sırayla çalıştırılmış ve elde edilen arıtma ve filtrasyon performansı verileri karşılaştırılmıştır. Manyetik titreşimli sistem 150 Hz frekans ile en iyi filtrasyon performasını sağlamıştır. Arıtma performansı olarak incelendiğinde ise hem titreşimli hem de titreşimsiz modüller birbirinin aynı sonuçları göstermiştir.

FOULING CONTROL OF MEMBRANE BIOREACTORS BY VIBRATION

SUMMARY

Fouling control on Membrane Bioreactors (MBR) can be done by various hydraulic methods. These methods are generally air scouring, periodic backwashing and periodic retention. Air scouring increases the shear stress on the membrane surface, thereby ensuring that the pores are secured from the plugging particles. Another technology that has been developed apart from these is the retardation of membrane fouling by vibratory shear stress. High and equally distrubuted shear stress is created by moving the membrane walls directly, thus aiming the membrane blocking particles off the membrane surface.

In this research thesis, a broad literature research from Comptutational Fluid Dynamics (CFD) apllications to vibratory membrane processes was completed. Most of the systems in the literature are applicable on laboratory scale and are not real scale and not suitable for pilot application. In addition, the submerged MBR system was modeled using suspensions prepared in the laboratory environment which are organic and inorganic suspensions. Most of the systems used in the literature are mechanical vibration systems based on moving the membranes in various directions by push-pull movements, and some of them are magnetically induced systems using high frequency low amplitude oscillation with the help of a magnetic transducer.

Before the experiments, the modules to be used both as pilot and laboratory scale were designed with 3D software program called SOLIDWORKS and laboratory scale module was modeled and simulated with Computational Fluid Dynamics (CFD) method using ANSYS FLUENT program. In these simulations, various frequency values and amplitudes are modeled and the shear stresses which are to be formed on the membrane surface are compared. Later, thin-film membranes based on polyethersulphone (PES) and polyacrylonitrile (PAN) have been produced but have been shown to be non-usable for submerged vibratory MBR modules. On this, reinforced PVDF (polyvinyl fluoride) based hollow fiber membranes were ordered and vibrating membrane modules were produced using these commercial membranes. The vibration systems in which the membrane modules are to be placed are designed as magnetic and mechanical systems, the production steps are planned and completed in the industry.

In the ANSYS FLUENT simulations, 5-10-15-30-40-50-60 Hz frequencies and 1-5-10 mm amplitudes were modeled. Based on the results, increase of frequency values are more effective than the amplitude increments on the shear stress profile of the membrane surface.

For laboratory scale experiments, a mechanical vibratory system and a magnetically induced vibration system were designed and built. Machanical vibration system consists two industrial vibration motors with frequency inverter and magnetically induced system consists two I beam magnetic transducer with a stereo amplifier. Mechanical vibration system is limited to 30 Hz frequency while the magnetic system

can produce as high as 150 Hz vibration fequency. The amplitude values for the mechanical and magnetic vibration systems are 0.5-5 mm and 0.01-1 mm, respectively. Special oscillation springs used in both vibration systems which can oscillate membrane modules up 20 kg. The control module was non-vibrated module which has isolation springs from the ground and vibration systems did not affect the control module during the experiments.

Laboratory scale MBR with three parallel vacuum pump is used to compare all three modules simultaneously. The laboratory scale MBR plant was fed with sythetic domestic wastewater. Seed sludge was taken from a real scale wastewater plant and vacinated to activated sludge tank. Vacuum pumps and all other equimpents was connected to a SCADA which controls the valves, pumps and filtration-backwashing sequence. SCADA computer were recorded trans-membrane pressures, membrane fluxes, dissolved oxygen, oxygen reduction potential, pH and temperature values of the system.

Long-term laboratory experiments were completed in three stages. Before every stage new modules were produced and modules which are having similar permeabilities were used. Critical fluxes were determined and 26 $l/m^2.h$ were chosen as operation flux during the stages. In the first stage, machanical vibration system was set to the 5 Hz and magnetic vibration system was set to 30 Hz. In the second and third stage magnetic vibration system set again to 30 Hz but mechanical vibration system set to 30 and 20 Hz, respectively. The mechanically vibrated module, magnetically vibrated module and non vibrated module operated under these conditions in the same reactor. All TMP datas were recorded and compared. Chemical oxygen demand (COD), turbidity, total khjeldal nitrogen (TKN), NO_3-N and NO_2-N analysis of the influent and effluent waters were done. Mixed liquior suspended solids (MLSS) and mixed liquor volatile suspended solids (MLVSS) analysis were also done in the MBR reactor, weekly. All the data obtained from the MBR system were evaluated and performances of three modules based on treatment and filtration were compared.

The long-term experiments were comleted in three stages during 130 days. In all stages machanically vibrated module average vacuum pressure was 188,2±113,6 mbar, magnetically vibrated module average vacuum pressure was 66,8±27,6 mbar and non-vibrated control module average vacuum pressure was 80,1±43,5 mbar. After the stages, addtional expreiments were done with 150 Hz magnetic vibration and 30 Hz mechanical vibrations. These tests were completed in 20 days. Mechanically vibrated module vacuum pressure was 41,6±18,9 mbar, and magnetically vibrated module vacuum pressure was 11,1±4,9 mbar during these tests. The lowest TMP profile achieved with the magnetically vibrated module in all stages and additional experiments. Magnetically vibrated module with 150 Hz frequency get the best TMP results when compared to 30 Hz frequency tests.

Mechanically vibrated module TMP profile was even higher than the non-vibrated control module during 3 stage tests. In mechanical vibration system, amplitude values were in between 1 – 5 mm, thus the system created very high shear stress near the membrane wall and this caused destructive force for the big flocs near the membrane wall, which was protecting the membrane pores from smaller particles. When compared to magnetic vibration system, amplitude values of magnetically vibrated module were much lower than the mechnically vibrated module, which is approximately 0,01 mm.

After long term experiments comleted, resistance analysis for all three module in three stages were completed. Based on the results, mechanicallyvibrated module has the lowest cake resistance and highest irrecoverable resistance which caused by pore plugging. Magnetically vibrated module has the highest cake resistance and lowest irrecoverable membrane resistance compared the mechanically vibrated module and non-vibrated control module. This results explains why the mechanically vibrated module gets highest TMP profile during the long term experiments. This also explains why the magnetically vibrated module get the best TMP performance when compared the other two modules. Magnetic vibration with high frequency (30-150 Hz) and low amplitude (0,01 mm) were kick-backed the small pore plugging particles near the membrane wall, while weren't damaging the big flocs around the hollow fiber membrane surfaces.

MLSS and MLVSS values were measured between 6027-10061 mg/L and 3885-6288 mg/L during the long term experiments. COD removal rates were in between 96-98% for all three module permeates. Turbidity values for non-vibrated, mechanically vibrated and magnetically vibrated modules were between 0.27-0.56 , 0.48-0.71 and 0.28-0.53 NTU, respectively. In other words, there were no significant differenc between all three modules based on treatment performance datas.

For pilot scale experiments, bigger module then laboratory scale membrane module produced which has 200 pieces of 50cm long hollow fiber PVDF membranes with 0.40 m^2 total surface area. Magnetic vibration system was chosen as vibraion source for pilot scale tests, based on the lab-scale experiment results. Two I beam magnetic transducer with stereo amplifier were used as vibration equipment.

Pilot scale experiments were completed in three stages, first 30 Hz magnetic vibration were tested, second non-vibrated module tested and third 150 Hz magnetic vibration were tested under same condition with real domestic wastwater feed. Pilot MBR module was operated during 24 days in every stage total of 72 days.

Critical flux test were done with pilot scale module and 26 $L/m^2.h$ were chosen as operational flux. Pilot MBR module TMP profile and water quality analysis were recorded during the experiments. Magnetically vibrated module at 30 Hz were reached 161 mbar, non-vibrated module were reached 228 mbar and magnetically vibrated module at 150 Hz were reached 69 mbar maximum during the experiments.

Laboratory scale and pilot scale experiments with different type of vibration systems with different vibration frequency were proved that, mechanical vibration created very high shear stress near membrane wall which could be destructive for the cake layer. Thus, pore plugging particles may easily penetrate inside the membrane pores without blocked by big flocs and cake layer. Magnetically induced membrane vibration has very low amplitude (0,01 mm) values when compared to mechanical vibration (1-5 mm). Magnetically induced membrane vibration system can also produce frequency values as high as 150 Hz which is impossible by the mechanical vibration system. From this perspective, frequency and amplitude values affects membrane fouling differently. With high frequency and low amplitude smaller particles which plugs the memrbrane pores can be blocked, while maintaning loose cake layer near the membrane wall.

1. GİRİŞ

Bu tezde, MBR sistemleri için, tıkanma kontrolü ve akı sürekliliğini sağlamak amacıyla, yenilikçi titreşimli membran modüllerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Öncelikle membran teknolojileri ile ilgili literatür bilgileri verilmiştir. Bu kapsamda membran üretiminde kullanılan malzemeler, membran performansı, membran tıkanması ve konsantrasyon polarizasyonu, MBR sistemleri, titreşim uygulamaları ile hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) incelenmiştir. Daha sonra titreşimli modül sisteminin CFD modellemesi sonuçları ortaya konmuştur. Tez kapsamında yapılan laboratuvar ve pilot ölçekli çalışmalarda kullanılan sistemler ve modüller açıklanmış, çalışmalardan elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde irdelenmiştir.

Batık membran biyoreaktör (MBR) sistemleri, atık su arıtma ve su geri kazanımı tesislerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, membran kirlenmesi MBR'lerin performansını sınırlayan kritik bir konudur. Membran yüzeyindeki kayma gerilmesinin hava sıyırma veya çapraz akış uygulamaları ile arttırılması, periyodik membran geri yıkaması, membran kirlenmesini azaltmak için sıklıkla kullanılan yöntemlerdir. Bununla birlikte, bu kirlenmeyi azaltan uygulamların sahada uygulanması, maliyet unsurları ile sınırlıdır (Verrecht ve diğ. 2006). Çoğu MBR sistemi membran yüzeyindeki membran kirlenmesini azaltmak için hava ile sıyırmayı kullanır. Hava ile sıyırma sadece sınırlı akı iyileştirmesi sağlar ve MBR işletmesinin toplam enerji maliyetinin yaklaşık % 70'ine karşılık gelebilir (Judd, 2006). Bu nedenle, hem etkili hem de uygun maliyetli bir kirlenme kontrol stratejisine açık bir ihtiyaç vardır. Titreşim sistemleri bu konuda tıkanmanın geciktirilmesi için yenilikçi bir yaklaşım olabilir.

Titreşim sistemleri, rotasyonel, enine veya boyuna olmak üzere motor tahrikli veya manyetik tahrikli olmak üzere çeşitli "itme çekme" sistemlerine dayanmaktadır. Potansiyel maliyet tasarrufu, kirlenmenin meydana geldiği membran yüzeyinde en yüksek kayma geriliminin sağlanmasıyla gerçekleşebilmektedir. Bu tez çalışmasında, titreşimli MBR sistemlerinde son zamanlarda yapılan araştırmalar gözden

geçirilmekte ve kirlenme kontrolünün titreşim sistemleri ile sağlandığı MBR modüller karşılaştırılmaktadır.

1.1 Titreşimli MBR'ler: Çeşitli Dizayn Yaklaşımları ve MBR'ye Uygulanması

Membranın kendisini hareket ettirmek, yüzeyinde kayma gerilimi oluşturmanın verimli bir yöntemi olarak düşünülmektedir. Bu nedenle araştırmacılar çeşitli titreşim sistemleri ile membran yüzeyine hareket vererek güçlü bir kayma gerilimi oluşturmak istemişlerdir.

Titreşim hareketi 4 farklı tipte gerçekleştirilebilmektedir. Bunlar:

1) Uzunlamasına hareket oluşturan boylamsal titreşim sistemleri
2) Membranların enlemesine hareket ettirildiği enine titreşim sistemleri
3) Dairesel olarak hareketin sağlandığı rotasyonel sistemler
4) Rastgele titreşim hareketi oluşturan diğer sistemler

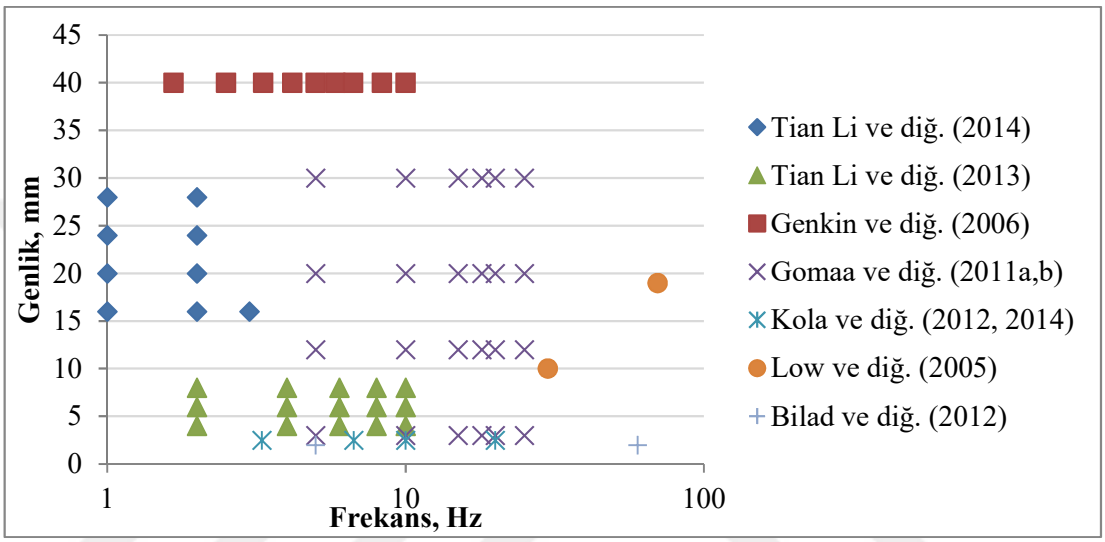
Tireşim hareketinin sağlanmasında genel olarak, elektrik motorları ve elektrik motorun dairesel hareketini itme çekmeli titreşim hareketine çevirecek bir krank mili kullanılmaktadır. Bunun yanında, ses dalgası ile sürülen manyetik tahrikli titreşim sistemleride kullanılmıştır.

Titreşim hareketinin membran yüzeyine uygulanmasının göze çarpan ilk örneği, Armando ve diğ. tarafından ortaya konan Vibratory Shear Enhanced Proces (VSEP) yani Titreşimle Kayma Gerilimini Artırma Prosesi teknolojisidir (Armando ve diğ. 1992). Bu sistem tarafından oluşturulan titreşim, 70 Hz'e kadar rezonans frekanslarına sahip olmaktadır. VSEP sistemi kullanılan bir MBR sistemi Low ve diğ. Tarafından test edilmiş olup, burada VSEP modülü bir harici MBR sistemi olarak kullanılmıştır (Low ve diğ. 2005).

Literatürdeki titreşim sistemleri, frekans ayarı için değişken hız kontrolüne sahip bir elektrik motoru ve titreşimlerin genliğini ve yönünü ayarlamak için bir krank mili mekanizması kullanır. Bu tip sistemler çoğunlukla süspansiyon filtrasyonu veya enzim ayırımı için kullanılmış olup, farklı frekans koulları altında çeşitli besleme süspansiyonları ile incelenmiştir. Bu titreşim sistemleri, uzunlamasına, enine ve rotasyonel olmak üzere farklı yönlere sahip olabilir.

Manyetik olarak indüklenen membran titreşim (MMV) sistemi, ilk olarak Bilad ve ark. tarafından denenmiş batık bir MBR modülüdür. MMV MBR sistemi, bir ses yazılımı ile bir amplifikatör sürücü cihazı tarafından kontrol edilen bir titreşim motorunu içerir. 60 Hz'e kadar titreşim frekansları ayarlanabilir ve genlik 1 mm ile sınırlıdır.

Titreşimin frekansı ve genliği, uygulama ve sistem özelliklerine bağlı olarak değişebilmektedir. İncelenen literatürdeki titreşimli MBR sistemlerinin frekansı ve genlik varyasyonları Şekil l.1'de özetlenmiştir.



Şekil 1.1 : Literatürdeki denenmiş titreşim frekansları ve genlikleri.

Burada özetlenen çalışmalar temel olarak batık MBR modül titreşimine odaklanmıştır. Farklı tipte osilasyon sistemlerine sahiptirler, ancak tasarım prensipleri benzerdir. Bu listedeki en farklı titreşim sistemi Bilad ve diğ. tarafından test edilmiş manyetik titreşimli sistemdir. Şekil 1.1'deki mekanik yapılı titreşim sistemlerinde genlikler 2 mm'den 40 mm'ye kadar değişirken, sadece Bilad ve diğ. tarafından kullanılan manyetik titreşimli sisteminde genlikler 1 mm'nin altında kalmaktadır. Frekans değeri ise diğer sistemlerin ulaşmakta güçlük çektiği 60-70 Hz değerlerine ulaşabilmektedir.

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında denenen titreşimli sistemler mekanik ve manyetik olarak ikiye ayrılmış olup, titreşimsiz kontol modülü ile karşılaştırılmıştır. Mekanik titreşimli sistemde endüstriyel bir vibrasyon motoru kullanılmıştır, manyetik titreşim sisteminde ise ses dalgasını rezonansa çeviren transdüserler kullanılmıştır. Bu sistemler paralel

çalışan labaratuvar ölçekli batık MBR sisteminde ve pilot ölçekli MBR sisteminde denenmiştir.

Tez çalışmasında aşağıdaki konular üzerine odaklanılmış olup tamamlanmaya çalışılmıştır:

- Modül üzerindeki titreşimin CFD (Computational Fluid Dynamics) yöntemiyle modellenmesi ve membran yüzeylerinde oluşacak kayma gerilimlerinin hesaplanması.
- Titreşim sistemlerinin laboratuvar ölçeğinde paralel olarak model atıksu ile denenmeesi
- Manyetik ve mekanik titreşimli sistemlerin batık MBR modülü üzerinde denenmesi ve tıkanmayı en iyi geciktiren sistemin belirlenmesi
- Titreşim sistemlerinin MBR'de kritik akı üzerindeki etkisinin belirlenmesi
- En iyi sonucu veren titreşim sisteminin pilot ölçekli MBR sistemi ile denenmesi

1.3 Tezin Anahatları

Yukarıda açıklanan amaçların sonuçlarının açıklandığı beş bölüm oluşturulmuş ve anahatlarıyla aşağıda açıklanmıştır.

Bölüm 2'de konu ile ilgili kapsayıcı bir literatür araştırması yapılmış, membranlar ile ilgili genel bilgiler verildikten sonra MBR sistemleri kısaca açıklanmış, daha sonra litertürde kullanılmış titreşim sistemleri ayrıntılı birşekilde incelenmiştir. Ayrıca bu titreşim sistemlerinden elde edilen sonuçları özet halinde verilmiştir.

Bölüm 3'te ise laboratuvar ölçeğinde kullanılacak modülün 3 Boyutlu tasarımı gerçekleştirilmiş olup, CFD modellemesi yapılmıştır. Çeşitli frekanslardaki titreşimin oluşturduğu kayma gerilimleri hesaplanmış ve grafik olarak sunulmuştur. Daha sonra tasarımı ve modellenmesi tammalanmış membran modüllerinin nasıl üretildiği açıklanmıştır. Öncelikle PES ve PAN bazlı membranlar kullanılarak yapılan modüller incelenmiş daha sonra PVDF bazlı güçlendirilmiş membran kullanılarak üretilen modüllerin deneyler için uygun olacağı görülmüştür. PVDF bazlı güçlendirilmiş membran kullanılarak üretilen laboratvuvar ve pilot ölçekli modüllerin özellikleri açıklandıktan sonra kullanılan titreşim sistemleri ve titreşim salınımı için dizayn edilen

salınım iskeletinin yapımı ve teknik özellikleri açıklanmıştır. Titreşim sistemlerinde kullanılan ekipmanların teknik özellikleri verilmiştir.

Bölüm 4'te laboratuvar ölçekli MBR sisteminde paralel olarak işletilen farklı titreşim sistemlerine sahip MBR modüllerinin performansları karşılaştırılmıştır. Öncelikle sistem tanıtılmış, ardından analiz metodları ve işletme parametleri sunularak elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. Sentetik evsel atıksu model solüsyon hazırlanarak sistem beslenmiştir. Manyetik titreşim sistemi, mekanik titreşim sistemi ve titreşimsiz kontrol modülü birlikte çalıştırılmış ve vakum basınçları takip edilmiştir. Farklı frekanslarda yapılan uzun dönemli deneylerde hangi sistem ve frekansın en iyi TMP performansını verdiği belirlenmiştir.

Bölüm 5'te pilot ölçekli çalışmalar sunulmuştur. Pilot ölçekli MBR sistemi tanıtılmış ve işletme parametleri sunulmuştur. Geçrekleştirilen analizler laboratuvar ölçekli çalışmalarla aynıdır. Besleme suyu ise gerçek atıksu kaynağı olup, pilot sistem İSKİ Baltalimanı atıksu arıtma tesisi içerisinde konuşlandırılmıştır. Laboratuvar ölçekli sistemde elde edilen sonuçlara göre en iyi performansı sergileyen titreşim sistemi ve frekansı burada gerçek atıksu ile pilot ölçekli modül kullanılarak denenmiş ve sonuçları sunulmuştur.

Bölüm 6'da ise tüm çalışmalardan elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirilmiş ve genel sonuçlar paylaşılmıştır. CFD ölçeinde elde edilen sonuçlar, laboratuvar ölçekli uzun dönemli deneyler ve pilot ölçekli uzun dönemli deneyler ve sonuçları burada özet olarak verilmiştir.

2. LITERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde membran üretiminde kullanılan malzemeler, membran sürücü kuvvetleri ve prosesleri, membran performansı, membran tıkanması ve konsantrasyon polarizasyonu, MBR sistemleri ve literatürde kullanılmış titreşimli MBR modülleri hakkında bilgi verilmiştir.

2.1 Membranların Üretiminde Kullanılan Kimyasal Malzemeler

Mebran üretiminde çeşitli polimerik, kompozit veya inorganik maddeler kullanılmaktadır. İnorganik malzeme olarak çeşitli kimyasal yapılarda seramik malzemeler kullanılmaktadır.

Memrablarda daha çok polimer bazlı kimyasallar kullanılmaktadır. Polimer malzemenin tercih edilme sebebi, membran üretiminin kolay ve maliyetinin düşük olmasıdır. Membran üretiminde kullanılan polimerik kimyasallar şunlardır; polietersülfon (PES), polisülfon (PSF), polivinilidenflorit (PVDF) ve poliakrilonitril (PAN)'dir (Chou ve diğ., 2005).

Seramik membranlar; düşük gözenek çapı dağılımı, yüksek gözeneklilikleri, ayırma etkinliği, mekanik ve kimyasal dayanımları gibi özellikleri açısından polimerik membranlara göre daha avantajlıdır. Seramik membranlarda sıklıkla kullanılan malzemeler zirkonyum, silika, alumina vb. malzemelerdir (Pendergast ve Hoek, 2011). Seramik membranların uzun kullanım süreleri vardır; fakat yüksek maliyetli olmalarından dolayı fazla tercih edilmemektedirler.

Kompozit membranlara örnek olarak ince film kaplama membranlar verilebilir. Bu membranların ince film kısmını poliüre ve poliamid gibi malzemeler oluştururken, destek tabakası bölümü polisülfon, PES, PAN vb. malzemelerden yapılmaktadır (Pendergast ve Hoek, 2011).

Organik membranlar polietersülfon (PES), polisülfon (PSf), poliakrilonitril (PAN), selüloz asetat (CA), poliamid (PA) ve polivinildenflorür (PVDF) ve benzeri çeşitli polimerlerden üretilirken, işlenebilirlik açısından kolaylık sağladığı için su ve atıksu

arıtımında en çok polimerik membranların kullanımı tercih edilmektedir. Ancak polimerik membranların çeşitli proseslerde pH, sıcaklık, serbest klor kaynaklı kullanım limitleri söz konusudur. Son yıllarda bu tarz yüksek sıcaklık ve yüksek pH içeren proseslerde inorganik (seramik ve metal) membranların kullanımı tercih edilmeye başlanmıştır. Seramik ve metal esaslı membranların kullanım ömürleri polimerik membranlara göre daha uzundur (Uyak V. ve diğ., 2018).

İnorganik membranların üretiminde alüminyum oksitler (g-Al_2O_3, a-Al_2O_3), zirkonyum dioksit (ZrO_2), titanyum dioksit (TiO_2), seryum dioksit (CeO_2), silisyum dioksit (cam) (SiO_2) gibi seramik malzemeler ve sinterlenmiş çelik fiberler ve tozlar gibi metal malzemeler kullanılmaktadır. Şekil 2.9'da seramik bir membrana ait SEM görüntüsü verilmiştir. İnorganik membranlar 100°C üzeri sıcaklıklara dayanabilmekte ve çok düşük ve çok yüksek pH koşullarında çalışabilmektedir. Ancak seramik membranların yüksek üretim maliyetlerinden dolayı kullanımı kısıtlıdır. Seramik membran endüstrisi geliştikçe üretim maliyetleri azalmakta ve kullanım alanı gün geçtikçe artmaktadır (Uyak V. ve diğ., 2018).

Seramik membranların çeşitli üstünlükleri özet halinde aşağıda sıralanmıştır (Uyak V. ve diğ., 2018):

- Gözenek çapı dağılımı oldukça düzgündür.
- Sıcaklığa karşı çok yüksek dirençleri vardır. Örneğin, seramik membranlar 350°C'ye kadar dayanabilmektedir.
- Zor çözelti şartlarına karşı dayanıklı olup kimyasal dayanımları yüksektir. Daha geç bozunurlar ve ömürleri uzundur. Örneğin seramik membranlar HF ve H_3PO_4 dışında çoğu kimyasala karşı inert bir yapı göstermektedir. Geniş bir pH aralığında stabillerdir. Örneğin seramik membranlar 1-13 pH aralığında uzun süreli çalışabilirler.
- Katalitik reaksiyonlara veya elektrokimyasal aktivitelere karşı dayanıklıdırlar.
- İnorganik membranlar kuvvetli kimyasal yıkama prosedürlerine karşı dayanıklıdır. Örneğin kuvvetli kimyasallar, buhar sterilizasyonu, geri yıkama ve ultrasonik temizlik teknikleri uygulanabilir.
- Mikrobiyal maddelere karşı düşük hassasiyetleri olduğu için biyolojik bozunmaya karşı dayanıklıdırlar.

İnorganik membranların gösterdiği bu üstünlükler yanında çeşitli mahsurları mevcuttur. Bu mahsurlar da aşağıda sıralanmıştır (Uyak V. ve diğ., 2018):

- Üretim prosesindeki zorluklar
- Doğal olarak kırılgan yapıda olması
- Polimerik membranlara göre daha ağır ve kapladıkları alanın daha fazla olması
- Maliyetlerinin yüksek olması.

Literatürde yapılan çalışmalarda yenilikçi membran malzemeleri olarak zeolitli, katalitik, nano-kompozit, biyo-benzetimli membranlar öne çıkmaktadır. Zeolitli membranlarda farklı zeolit hammaddeleri kullanılmaktadır. Katalitik membranlarda sıklıkla kullanılan malzemeler ise titanyum dioksit, çinko oksit, demir oksittir. Nanokompozit membranlarda gümüş, silika, alüminyum, magnezyum, titanyum, karbon ve grafen gibi nano parçacıklar kullanılmaktadır (Ng ve diğ., 2010; Mishra ve Ramaprabhu, 2011; Pendergast ve Hoek, 2011; Goh ve diğ.,2012; Buonomenna, 2013). Bu membranlar düşük maliyetli, kolay üretilebilir ve yüksek mekanik dayanıma sahip olmalarından dolayı avantajlıdır.

Biyolojik özellik içeren membranlar yüksek kullanım potansiyeline sahiptir. Ancak, bu membranların ticari ölçekte üretimi halihazırda yapılmamaktadır. Aquaporin bazlı, dikey yerleştirilmiş karbon nanotüp ve blok kopolimerler kullanılarak üretilmiş membranlar bu grup içerisinde yer almaktadır (Pendergast ve Hoek, 2011).

2.2 Membran Sürücü Kuvvetleri ve Prosesleri

Membran prosesleri genelde uygulanan sürücü kuvvete göre farklı sınıflara ayrılmaktadır. Membranlardaki sürücü kuvvetler dört farklı grupta incelenebilir:

1. Konsantrasyon farkı sürücülü
2. Sıcaklık sürücülü
3. Elektrik potansiyeli sürücülü
4. Basınç sürücülü

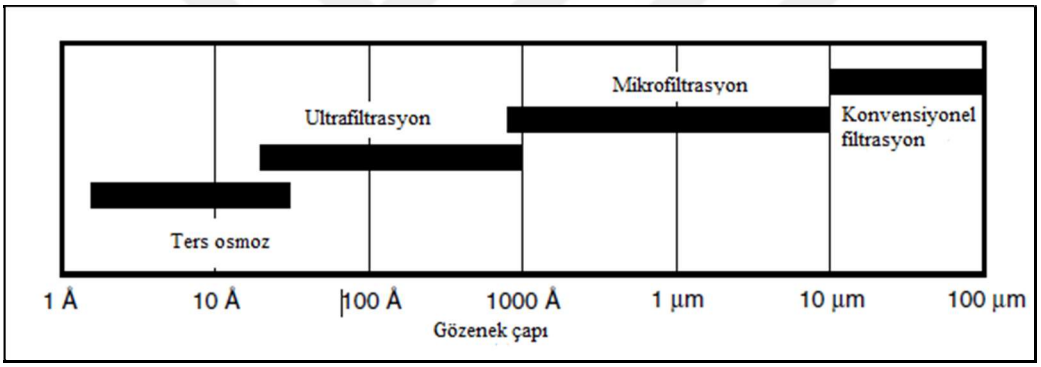
Konsantrasyon farkını sürücü kuvvet olarak kullanan membranlarda uygulanan prosesler; diyaliz, membran ekstraksiyonu ve ileri osmozdur. Sıcaklık sürücülü membran proseslerde, sıcaklık farkına göre ayırma işlemi gerçekleştirilir. Membran

distilasyonu bu tip proseslere örnek olarak verilebilir. Elektrik potansiyelini sürücü kuvvet olarak kullanan membran prosesler ise elektrodiyaliz, elektroforez ve membran elektrozudur.

Basınç sürücülü membranlarda membranların bir yüzeyine sürücü kuvvet olarak basınç verilir. Böylece besleme suyu süzüntü ve konsantre olarak ayrılabilir. Basıncın sürücü kuvvet olarak uygulandığı prosesler; ultrafiltrasyon (UF), mikrofiltrasyon (MF), nanofiltrasyon (NF) ve ters osmoz (TO)'dur (Bruggen ve diğ., 2003). Basınç sürücülü kuvvetleri kullanan prosesler hakkında daha detaylı bilgi aşağıda verilmiştir.

2.2.1 Basınç sürücülü membran prosesleri

Su arıtımı için geliştirilmiş basınç sürücülü membranlar; MF, UF, NF ve TO olmak üzere dört farklı prosese ayrılmaktadır. Bu prosesler arasındaki fark, gözenek çaplarının farklı olmasıdır (Şekil 2.1 :).

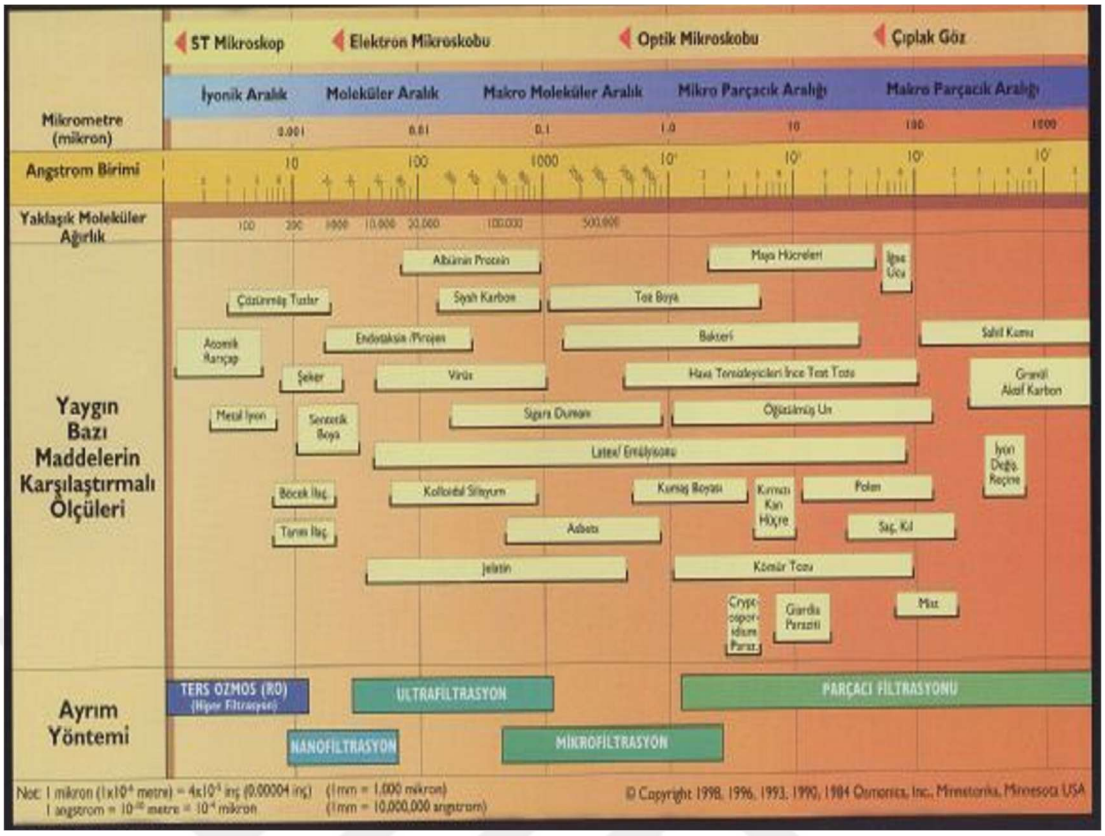


Şekil 2.1 : Basınç sürücülü membran prosesler (Baker, 2004).

Mikrofiltrasyon (MF)

MF membranlarının gözenek çapı 0,05-10 µm arasında değişir. Kolloidal maddeler ve bakterilere kadar olan parçacıklar bu membranlar ile tutulabilir (Şekil 2.2 :). Partikül çapları membranın gözenek çapından daha büyük olan maddeler membrandan geçemez. Eğer membran çapıyla aynı boyutta partikül olursa, bu parçacıklar da membran gözenekleri tarafından tutulur.

MF membranlarıyla kolloidal maddeler ve bakteriler dışında yağ molekülleri ve hücreler de ayrılabilir. Konvansiyonel içme suyu arıtma tesislerinde mikroorganizmaları sistemden uzaklaştırmak için yüksek miktarda dezenfektan kullanılır. MF kullanılması durumunda dezenfaktan kullanımına bağlı yan ürün oluşma olasılığı azalır (Türken, 2013).



Şekil 2.2 : Filtrasyon spektrumu (Osmonics Inc. USA).

Ultrafiltrasyon (UF)

UF membranlarıyla makro moleküller ve virüsler sudan yüksek verimle ayrılabilir (Şekil 2.2 :). Bu membranlardaki gözenek çapı 10-1000 Å aralığında değişmektedir. UF membranlarının sınıflandırılmasında moleküler ağırlık engellemesi (MWCO) parametresi kullanılır. Buna göre UF membranları 1000-500000 Da aralığında olan moleküler ağırlığa sahip parçacıkları tutabilir (Türken, 2013).

UF membranları genel olarak TO membranlarının ömürlerini uzatmak amacıyla, bu prosesten önce konsantrasyon polarizasyonu ve tıkanmayı önlemek için ön arıtma amacıyla kullanılır (Eren, 2006).

Nanofiltrasyon (NF)

NF'de, gözenek çapı UF ile TO arasındadır (Şekil 2.2 :). Dolayısıyla her iki prosesin de özelliklerini taşımaktadır. NF prosesiyle bulanıklık, mikroorganizmalar, sertlik ve çözünmüş tuzların bir kısmı tutulabilir. En temel uygulama alanı içme suyu teminidir. Fakat atıksu arıtımı, desalinasyon, yüzey ve yeraltı suyu arıtımında da kullanılır. NF prosesinin daha düşük basınçlarda çalıştırılabilmesi ve daha az enerji tüketimi, TO prosesine göre üstünlüğüdür.

Ters osmoz (TO)

TO prosesi, suyun yarı geçirgen bir membrandan doğal osmotik basınca karşı gelinerek geçirilmesidir. Suyun membrandan geçmek için zorlanmasıyla birlikte çözünmüş tuzların çok büyük bir kısmı ve sudaki diğer birçok kirletici uzaklaştırılmış olur (Şekil 2.2 :). Nispeten saf su kalitesinde bir süzüntü elde edilir. TO membranların gözenek çapı 1 nm civarındadır. TO; su arıtımında, desalinasyonda ve su geri kazanımında uygulanan en etkili prosestir (Baker, 2004).

2.3 Membran Performansının Değerlendirilmesi

Membran performansı, akı ve giderme verimi parametreleri kullanılarak değerlendirilir. Akı denklem (2.1)'le ifade edilir (Mulder, 1996).

$$J = -A.\frac{dX}{dx} \tag{2.1}$$

İtici kuvveti ekseni taşıma yönü boyunca X gradyanı (konsantrasyon, sıcaklık, hız, basınç veya gerilim) olarak ifade edilir. A (orantı sabiti), farklı taşıma çeşitleriyle alakalı bir katsayıdır (Beier, 2008). Farklı taşınımlar için kullanılan akı denklemleri ve itici kuvvetler 'de verilmektedir.

2.3.1 Membranlarda akı

Akı, birim zamanda membranın birim alanından geçen akım miktarı olarak tarif edilir. Akı için m3/m2.sn veya L/m2.sa gibi birimler kullanılmaktadır. Filtrasyon başlangıcında temiz su akısı Darcy Kanunu'na göre aşağıdaki ilişki ile ifade edilmektedir (Denklem 2.2). Çeşitli taşınım türleri için akı denklemleri Çizelge 2.1'de verilmiştir.

$$J = \frac{\Delta P}{\mu . Rm} \tag{2.2}$$

J : Akı

ΔP : Membrandaki basınç farkı

μ : Akışkan vizkositesi

R_m : Membran direnci

Çizelge 2.1 : Farklı taşınımlar için kullanılan akı denklemleri ve itici kuvvetler (Beier,2008).

Taşınım	İtici Kuvvet	Akı denklemi	Katsayı	Akı birimi	Yaygın ismi
Kütle	Konsantrasyon gradyanı	$J_m = -D.\frac{dc}{dx}$	Difüzyon katsayısı D (m^2/s)	$\left[\frac{kg}{m^2.s}\right]$	Fick difüzyon kanunu
Enerji/ Sıcaklık	Sıcaklık gradyanı	$J_h = -K.\frac{dT}{dx}$	Isıl iletkenlik K (J/s.K.m)	$\left[\frac{J}{m^2.s}\right]$	Fourier ısı iletimi kanunu
Momentum	Hız gradyanı	$J_n = -\mu.\frac{dV}{dx}$	Dinamik viskozite μ (Pa.s)	$\left[\frac{kg.(m.s)}{m^2.s}\right]$	Newton'un viskozite kanunu
Hacim	Basınç gradyanı	$J_v = -L_p.\frac{dP}{dx}$	Geçirgenlik katsayısı L_p (m^2/Pa.s)	$\left[\frac{m^3}{m^2.s}\right]$	Darcy kanunu
Elektriksel	Gerilim gradyanı	$J_e = -\sigma.\frac{dE}{dx}$	Elektriksel iletim Σ (C^2/s.J.m)	$\left[\frac{C}{m^2.s}\right]$	Ohm kanunu

Denklem 2.2'den anlaşılacağı üzere membran filtrasyonunda, membrandan geçen süzüntü akısı, membrana uygulanan basınç (ΔP) ile doğru orantılıdır.

Kritik akı ise sürdürülebilir membran permeabilitesindeki (sabit akı ve TMP) işletme limitini temsil eder. Kritik akının üzerindeki işletmede TMP artar. Çok sık periyodik geri yıkama ve/veya temizleme gerekir (Germain ve diğ., 2005; Le Clech ve diğ., 2006). Geri yıkanabilir gözenekli fiber membran tipleri için, kritik akının üzerinde nispeten kısa devirlerde çalışmak maliyet açısından daha avantajlıdır. Geri yıkanamayan düz tabakalı tipler için ise kritik akının altında çalışmak gerekir. Her iki tip için kritik akıyı arttırabilmek maliyet açısından avantajlıdır. Bu duruma sistem hidrodinamiği iyileştirilerek ulaşılır (Judd, 2001, 2002b; Zhang ve diğ., 2006).

2.3.2 Giderim verimi

Giderim verimi, bir kirleticinin membran tarafından tutulan kısmının bir ölçüsüdür ve "%" olarak ifade edilmektedir. Membranlarda giderim verimi R ile gösterilir ve

boyutsuzdur. Bu ifade “0” ile “1” arasında değişmektedir. “0” bütün çözünmüş maddelerin membrandan geçtiğini, “1” ise membranın hiçbir madde geçişine izin vermediğini göstermektedir (Koyuncu, 2001).

Membran proseslerde iki farklı giderim verimi söz konusudur. Bunlar; gözlenen giderim verimi ve gerçek giderim verimidir. Gözlenen giderim verimi, tutulmak istenen maddenin süzüntü akımındaki konsantrasyonu ile besleme akımı konsantrasyonu arasındaki farka bağlıyken, (R_0) (2.3) gerçek giderim verimi ise tutulmak istenen maddenin süzüntü akımı konsantrasyonu ile membran yüzeyindeki konsantrasyonu arasındaki ilişkiden hesaplanır (R_g) (2.4).

$$R_0=\frac{(cf-cp)}{cf}=1-\frac{cp}{cf} \quad (2.3)$$

$$R_g=\frac{(cm-cp)}{cm}=1-\frac{cp}{cm} \quad (2.4)$$

cp : Süzüntü akımı konsantrasyonu

cf : Besleme suyu konsantrasyonu

cm : Membran yüzeyindeki konsantrasyon

2.3.3 Dirençler

Membran direnci: Membran direnci; membran materyali, por çapı, yüzey porozitesi ve membran kalınlığından kaynaklanmaktadır (Judd, 2006).

Kek direnci: Kek direnci belirli hacimde homojen MBR çamur numunesinin, Buchner hunisine dökülüp sabit vakumda süzülmesi ve zamana karşı toplanan süzüntü hacminin ölçülmesiyle belirlenir.

t zamanına karşı elde edilen süzüntü hacim (V) değerleri kullanılarak t/V-V grafiği çizilir (Şekil 2.3) ve daha sonra aşağıdaki “Parabolik Filtrasyon Denklemi” ile değerlendirme yapılır (2.5).

$$\frac{t}{V}=\frac{\mu c\langle\alpha\rangle}{2A^2\Delta P}V+\frac{\mu R_m}{A\Delta P} \quad (2.5)$$

t : Zaman (sn)

V : Süzüntü hacmi (ml)

μ : Süzüntü viskozitesi ($N.s/m^2$)

c : Çamur konsantrasyonu (mg/L)

A : Süzmede etkili alan (m^2)

ΔP : Uygulanan vakum (Pa)

$<\alpha>$: Özgül kek direnci (m/kg)

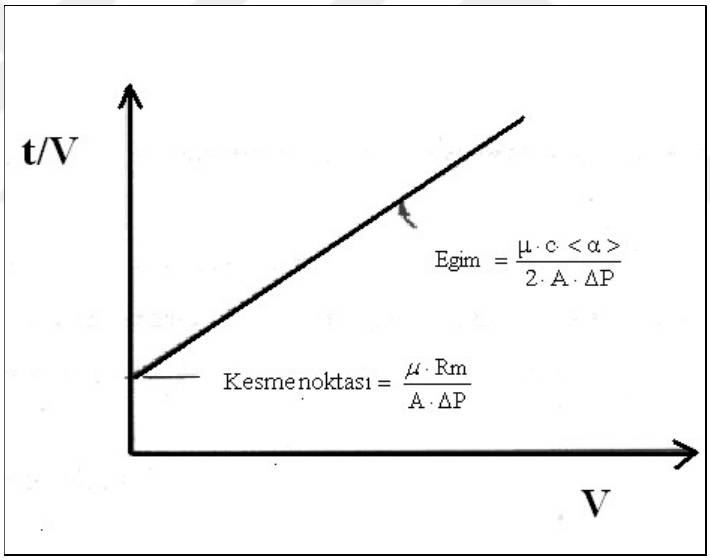
R_m : Membran direnci (1/m)

Kısaca aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\frac{t}{V} = bV + a$$

$$a = \frac{\mu R_m}{A\Delta P}$$

$$b = \frac{\mu c\langle\alpha\rangle}{2A^2\Delta P}$$



Şekil 2.3 : Toplanan süzüntü hacmine karşılık zaman/hacim grafiği.

t/V'nin V'ye karşılık çizilmesiyle elde edilen doğrunun eğimi b'ye, doğrunun t/V eksenini kestiği nokta ise a'ya eşittir. Çizilen doğrudan b değerinin elde edilmesiyle özgül kek direnci elde edilir (2.6):

$$\langle\alpha\rangle = \frac{2A^2 b\Delta P}{\mu C} \qquad (2.6)$$

Toplam direnç aşağıdaki denklemle bulunur (2.7):

$$R_t = R_m + R_p + R_{ef} + R_{if} \quad (2.7)$$

R_m : Membran direnci

R_p : Konstrasyon polarizasyonu farkından oluşan direnç

R_{ef} : Membran yüzeyindeki katıların fiziksel-kimyasal etkileşiminden oluşan kek tabakası üstünde dışardan gelen direnç

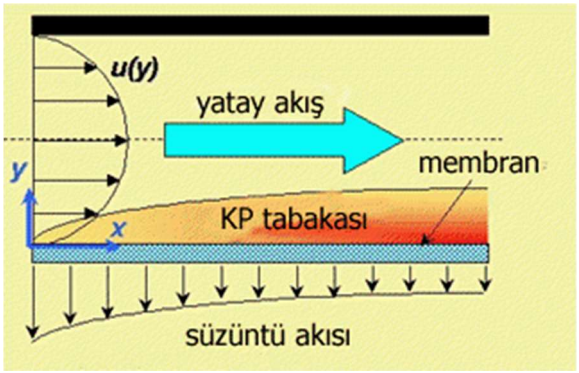
R_{if} : Adsorbsiyon veya por tıkanması nedeniyle oluşan membranın iç direnci

2.3.4 Konsantrasyon polarizasyonu ve membran tıkanması

Membran performansını yüksek tutabilmek için konsantrasyon polarizasyonu ve membran tıkanmasına dikkat edilmelidir. Bu hususlar aşağıda açıklanmıştır.

2.3.4.1 Konsantrasyon polarizasyonu

Membran ayırma proseslerinde genelde beslemedeki bileşikler süzüntü kısmına farklı hızlarda geçtiği için membran yüzeyinde membran yüzeyinden geçemeyen veya çok yavaş geçen bileşikler birikme yapar. Bu da zamanla membran yüzeyinde konsantrasyon artışına sebep olur. Yatay akışlı membranlarda membrana yakın kısımlarda hız azalır. Bu hız azalışı viskoziteye bağlı olarak kayma geriliminden kaynaklanır. Sınır tabakası olarak varsayılan membran yüzeyinde hız sıfıra düşmektedir. Burada oluşan konsantrasyon artışına konsantrasyon polarizasyonu denilmektedir (Şekil 2.4 :) (Koyuncu, 2001; Eren, 2006).



Şekil 2.4 : Konsantrasyon polarizasyonu (Eren, 2006).

Membran tıkanması, konsantrasyon polarizasyonu ile başlar. Membran filtrasyonu sırasında çözünmüş katılar membran yüzeyinde ve yakınlarında yoğunlaşmaya başlar.

Bu yoğunlaşan tabakaya sınır bölgesi adı verillir. Bu bölge, kütle transferi için bir direnç oluşturmaya başlar (Rif). Buradaki yoğunluk bir süre sonra artar ve bir jel tabakası oluşmaya başlar. Bu jel tabakası özellikle filtre edilen çözeltide protein varsa oluşur. Bu aşamadan sonra bazı moleküller por açıklıklarını tıkar. Bazıları ise por içinde adsorbe olurlar. Bunların neticesinde sırasıyla konsantrasyon polarizasyonu farkından kaynaklanan direnç (Rp) ve membran yüzeyindeki katıların fiziksel-kimyasal etkileşiminden oluşan kek tabakası üstüne dışardan gelen direnç (Ref) oluşur (Mulder, 1996). Tüm bu dirençlerin yanında membranın iç direnci (Rm) de dikkate alınmalıdır.

Konsantrasyon polarizasyonu, çapraz akışlı işletim esnasında oluşan konsantrasyon sınır tabakasını veya sıvı filmi boyunca oluşan membran-çözelti arafazındaki çözünenin birikme eğilimini belirler. Bu tabakada sıvı faz durguna oldukça yakındır ve membran yüzeyinde hız sıfıra düşer. Bu durum taşınımın sadece difüzyon ile gerçekleştiği anlamına gelir. Böylelikle taşınım hızı da çözelti bölgesine nazaran iki kat daha düşük hızda gerçekleşir.

Membrandan geçemeyen maddeler, membrana bitişik bir bölgede çözelti fazına oranla daha yüksek konsantrasyonda birikmeye başlarlar. Bu noktada konsantrasyonun artış hızı akı artışı ile eksponansiyel olarak artar. Sınır tabakasının kalınlığı ise tamamen sistem hidrodinamiği ile ilişkilidir. Örneğin; artan türbülans ile sınır tabakası azaltılabilir (Judd, 2006).

2.3.4.2 Membran tıkanması

Membranların işletim sırasında tıkanması, MBR'ların kentsel ve endüstriyel atıksu arıtımında daha yaygın uygulanmalarındaki en önemli engellerden biridir. Tıkanma membran permeabilitesini sınırlandırır. Diğer bir deyimle; birim TMP'ye karşılık membrandan geçen akının, dolayısıyla da, birim membran alanı başına arıtılmış temiz su miktarının azalmasına neden olur (Stephenson ve diğ., 2000; Chang ve diğ., 2001; Judd, 2001; Water Environment Federation, 2001; Cho ve Fane, 2002; Hong ve diğ., 2002; Le Clech ve diğ., 2006; Yang ve diğ., 2006; Yun ve diğ., 2006). Membran tıkanmaları mekanik olarak ikiye ayrılır: Geri dönüşümlü (yüzeyde oluşan jel ve kek tabakasının havalandırma veya fiziksel geri yıkama ile giderilmesi) ve geri dönüşümsüz (çözünmüş veya kolloidal maddelerin adsorbsiyonu sonucu gözenek içinde birikimi ve gözeneği tıkamasının kimyasal temizleme ile giderilmesi). Geri

dönüşümsüz tıkanmalarda, azalan süzüntü suyu akısı tekrar orijinal miktarlara yükseltilemez (Zenon Env. Inc, 2002).

MBR'lardaki membran tıkanmaları; fiziksel, inorganik, organik veya biyolojik kökenli olabilir. Fiziksel tıkanma, membran porlarının kolloidal taneciklerle tıkanması ile ilgilidir. Böylece membran yüzeyinin belirli bir kısmı kaplanıp etkisiz hale gelir. İnorganik ve organik tıkanma genellikle membran yüzeyinde biriken kirleticilere ve makromoleküllere bağlıdır. MBR'lardaki inorganik tıkanmanın daha çok anaerobik sistemlerde (sütrivit kaynaklı) söz konusu olduğu tespit edilmiştir (Choo ve Lee, 1996; Cicek ve diğ., 1999b; Yoon ve diğ., 1999; Judd, 2001; Chua ve diğ., 2002; Le Clech ve diğ., 2006; Yang ve diğ., 2006; Yiğit, 2007). Konvansiyonel aerobik proseslerde MF membranların kalsiyum karbonat çökeleği ile tıkanması, düz tabakalı ve gözenekli fiber MBR'larda gözlenmiştir. Bu tür çökeleklerin kontrolü ve giderimi oldukça zordur. Tıkanma kontrolü için asit dozlama çok tercih edilmeyebilir. Çünkü pH ayarlaması sistem mikrobiyolojisine zarar verip, hücre dışı polimerik makromoleküllerin oluşmasını arttırabilir. Atıksu karakterizasyonundaki değişimler, kimyasal yapının heterojen olması ve kalsiyum karbonat çökeleğinin kompleks yapısı kimyasal dozlama kontrolünü ve optimizasyonunu zorlaştırır. Membran tıkanmaları için uygulanabilecek çözümler membranların sistemden çıkartılıp harici olarak asitle temizlenmesi veya giriş suyundaki tıkanmaya sebep olabilecek kirleticilerin uygun ön arıtma yöntemleriyle giderilmesi olarak sıralanabilir.

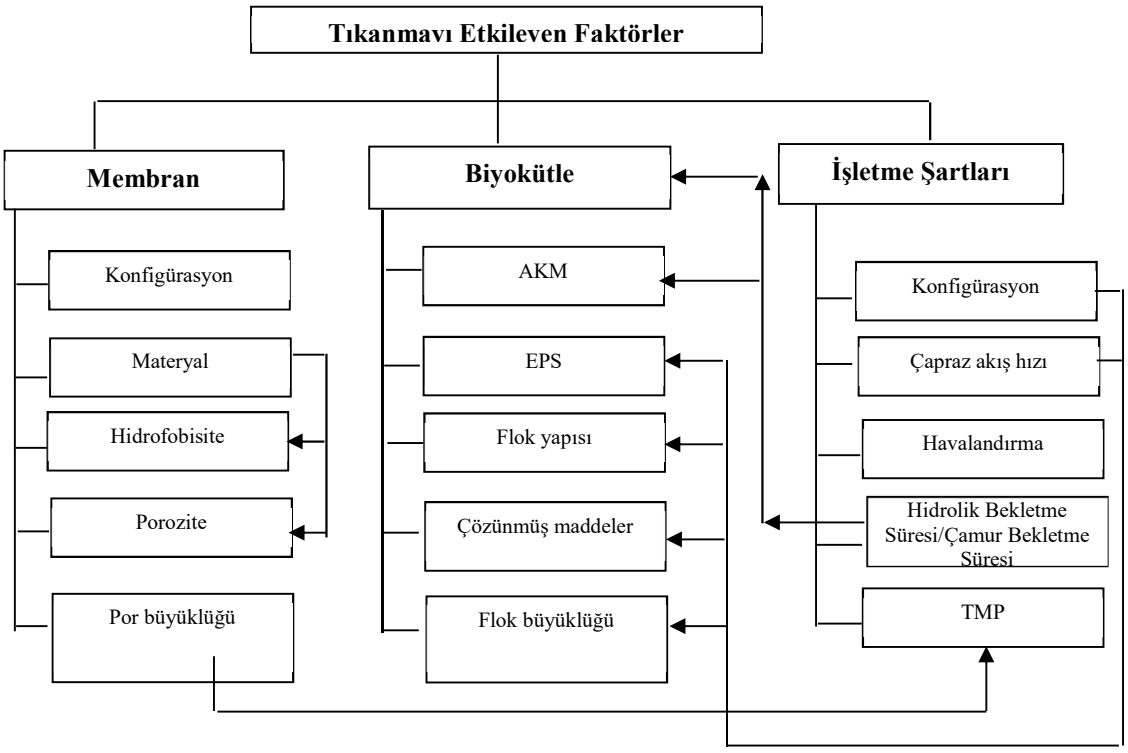
MBR'lardaki organik ve biyolojik tıkanma, inorganik tıkanmanın aksine daha fazla çalışılmış ve karakterize edilmiştir. Membranlardaki tıkanmaların hemen hemen yarısının biyofilm oluşumundan kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Aslında biyofilmlerin canlı kalabilmeleri için çok az miktarlarda nütriente ihtiyaç duymaları bunların ultra saf su sistemlerinde dahi varlıklarını sürdürebilmelerini sağlar. Biyofilmler membranların 8–18 g/L'lik biyokütle konsantrasyonları ile temas halinde olduğu yüzeylerde kolayca oluşabilir (Chang ve diğ., 2001; Judd, 2001). Diğer taraftan, membran yüzeylerinde oluşan biyofilmler özellikle dahili (batık) proseslerde membranları koruyabilirler. Bunun nedeni biyofilmlerin membranın kendisine göre daha çok seçici olması ve daha geniş bir spektrumdaki kirleticilerin membrandan geçişini engellemesidir.

Tıkanma üzerine etkili olan dört ana faktör vardır (Chang ve diğ., 2001, 2002; Judd, 2001; Le-Clech ve diğ., 2006).

- Proses konfigürasyonu
- Membran materyali ve konfigürasyonu (geometrisi)
- Proses işletimi (sistem hidrodinamiği)
- Biyokütle konsantrasyonu ve kompozisyonu

Membran tıkanmalarına doğrudan etki eden 3 ana faktör; biyokütle özellikleri, işletim şartları ve membranın fizikokimyasal karakteristiğidir. MBR'larda tıkanmayı etkileyen faktörler Şekil 2.5 :'de gösterilmiştir (Chang ve diğ., 2002; Le-Clech ve diğ., 2003a). Genel olarak proses performansı ana kirleticilerin giderimi ve enerji talebi ile belirlenir. Tıkanma, membranın hidrolik performansını (permeabiliteyi) düşürerek enerji masraflarını doğrudan etkiler.

Membran tıkanmasını önlemek için istenmeyen adsorbsiyon ve yapışma olaylarının önlenmesi gerekir. Böylece kolloidlerin ve diğer tıkanmaya sebep olan maddelerin birikimi önlenmiş olur. Bunu sağlayabilmek için; ileri ön arıtma (aktif karbon kullanımı, pH ayarlanması vb.), membran yüzey modifikasyonu (nanoparçacık ekleyip yüzey hidrofilikliğinin arttırılması vb.), kimyasal veya fiziksel yöntemlerle temizleme yapılabilir (Ng ve diğ., 2010).



Şekil 2.5 : MBR'larda tıkanmayı etkileyen faktörler (Judd, 2001; Chang ve diğ., 2002).

2.4 Membran Temizleme Yöntemleri

Membranlar kirlenme nedeniyle temizlenmeye ihtiyaç duyar. Bu durum sadece başlangıç akısını yeniden geri kazanmak veya onu korumak için değil, bazı durumlarda belirli bir seçiciliği kazanmak için de gereklidir. Membranların temizlenmesi, fiziksel ve kimyasal yöntemler uygulanarak yapılabilir. Bu yöntemler aşağıda açıklanmıştır.

2.4.1 Fiziksel yöntemler

MBR'larda fiziksel yöntemlerle temizlik, geri yıkama veya durdurma ile yapılır. Geri yıkamada süzüntü suyunun küçük bir bölümü ile membran porlarından ters yönlü bir akış ile temizlik sağlanır. Durdurmada ise süzüntü üretimi durdurulur. Bu esnada hava sıyırması devam ederken artan geri akış taşınımı etkileri ile tıkanma hızının azalması sağlanır (Judd, 2006). Fiziksel yöntemler; membran yüzeyinde sıyırma etkisi oluşturularak biriken partiküllerin giderilmesi prensibi ile gerçekleştirilir. Fiziksel yöntemler, kimyasal yöntemlere nazaran daha kısa süre içinde yapılmakta ve membrana zarar verilmemektedir. Ayrıca kimyasal kullanılmadığı için çevre dostu yöntemlerdir. Ancak adsorbe olmuş veya por içinde mevcut tıkayıcıların fiziksel olarak temizlenmesi birçok durumda mümkün olmaz. Bu gibi durumlarda kimyasal yöntemlerin kullanılması gerekir (Geilvoet, 2010). Fiziksel yöntemlerle yapılan temizlikte, tersinir veya geçici tıkanmayı yaratan membran yüzeyindeki büyük katıların giderimi hedeflenir. Kimyasal yöntemlerde ise tersinir olmayan veya kalıcı tıkanmayı oluşturan kirlilikler giderilir.

2.4.2 Kimyasal yöntemler

Kimyasal yöntemlerle membran temizliği, mineral veya organik asitler, bazı bazlar ve sodyum hipoklorür gibi oksidantlar ile yerinde (in-situ) veya reaktör dışında (ex-situ) yapılabilir (Judd, 2006). Kimyasal yöntemler, en kuvvetli temizleme yöntemidir. Fiziksel yöntemlerle giderilemeyen kirliliklerin giderilmesi hedeflenir. Kullanılan kimyasal madde kirliliği giderebilmeli, membrana az zarar vermeli ve düşük maliyetli olmalıdır. MBR'larda en yaygın organik tıkanma türü, protein ve polisakkaritlerin adsorbsiyonuna bağlı olarak gerçekleşir. Sodyum hidroksit gibi bazlar bu organikleri gevşetmek için kullanılır, sodyum hipoklorür veya hidrojen peroksit gibi oksitleyiciler

ise organikleri parçalar. Tuz ve demir çökeltileri için asitler kullanılabilir. Protein tıkanmalarında, konvansiyonel baz ve oksitleyiciler yetersiz kalır ise proteaz kullanılabilir (Munoz-Aguado ve diğ., 1996; Te Poele ve Van der Graaf, 2005; Jiang, 2007). Kimyasal konsantrasyonu, temas süresi, sıcaklık, çapraz akış hızı ve TMP temizleme verimliliğine doğrudan etki eder (Bird ve Bartlett, 2002). Kimyasal katkılı geri yıkama, düşük konsantrasyonlu yerinde (tank içi) ve yüksek konsantrasyonlu olarak dışarıda (tank dışı) yapılabilir. Kimyasal yöntemlerin çevreye bazı zararları söz konusudur (Brepols ve diğ., 2008). Fiziksel veya kimyasal yöntemlerle yapılan temizliklerin periyodunu belirleyen ana etken işletme akısıdır. Kimyasal yöntemlerle temizleme, tıpkı fiziksel yöntemlerdeki gibi membranın kullanılmamış haldeki ilk permeabilitesine ulaşmada başarılı olamayabilir. Nihai tıkanma, fiziksel veya kimyasal yöntemlerle giderilemeyebilir. Bu tıkanma türü membranın ekonomik ömrünü de belirler.

2.5 Membran Kirlenme Kontrolü Yöntemleri

2.5.1 Kimyasal ilavesi

Son yıllarda öne çıkan tıkanma kontrolü stratejilerinden biri kimyasallar ile biyokütle modifikasyonudur. Kimyasallar ile yapılan çalışmalarda iki ana mekanizma üzerinden tıkanma kontrolü gerçekleşir. Bunlardan ilki genellikle metal tuzları ve polimerlerin kullanıldığı flokülasyon mekanizması, diğeri ise genellikle toz aktif karbonun kullanıldığı adsorpsiyon mekanizmasıdır. Bu çalışmalarda öne çıkan hedef çözünmüş mikrobiyal ürünler (SMP) gibi tıkanmaya neden olan organik maddelerin floklar içinde tutulması veya adsorban bir madde üzerine adsorplanarak sıvı ortamından uzaklaştırılması yolu ile membran porları içerisinde oluşabilecek tıkanmayı azaltmaktır (Yoon ve diğ., 2005; Ji ve diğ., 2008; Arabi ve Nakhla, 2009; Malamis ve diğ., 2009b; Ngo ve Guo, 2009; Remy ve diğ., 2009).

Yoon ve diğ. (2005)'nin katyonik bir polimerin MBR çamurunun filtre edilebilirliği üzerindeki etkilerini açıklamasından sonra kimyasallar daha fazla kullanılmaya başlanmıştır. Literatürdeki çalışmalara genel olarak bakıldığında, bir veya iki kimyasalın kullanıldığı görülebilir. Ancak daha kapsamlı çalışmalar da yapılmıştır (Iversen ve diğ., 2007; Iversen ve diğ., 2008; Iversen ve diğ., 2009). Kimyasallar SMP adsorpsiyonu, koagülasyon, floklar ve/veya SMP arasındaki çapraz bağlar gibi mekanizmaların tekil veya çoklu etkisi ile çalışırlar. Lee ve diğ. (2007) katyonik bir

polimer ile yaptıkları çalışmada çözünmüş kirleticilerin çözelti fazından flok bünyesine geçtiğini bulmuşlardır. Membran yüzeyinde oluşan biyofilmin porozitesi ve hacmi ile alakalı yapılan incelemeler neticesinde katyonik polimer eklenmesinin biyofilm porozitesini arttırdığı ve böylece filtrasyon performansında da artışa neden olduğu belirlenmiştir. Aktif karbon ve demir tuzlarının içme suyu arıtımındaki kullanımı göz önüne alınarak, bunların MBR proseslerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu adsorban ve koagülanlardan demir hidroksitin tıkanmayı azaltıcı özellikleri olduğu, ancak pH'ı düşürdüğü ve yüksek dozlarda mikrobiyal aktivitede azalmaya neden olduğu bulunmuştur (Zhang ve diğ., 2004). Demir klorür ve alum ile yapılan çalışmada her iki kimyasalın fosfor giderimini arttırdığı bulunmuştur (Song ve diğ., 2008). Aktif karbon eklenmesinin; reaktör performansı üzerinde kirletici giderim veriminin artışı veya stabil kalması, mikrobiyal aktivitede artış, membran tıkanmasının azalması gibi olumlu etkileri bulunmaktadır (Guo ve diğ., 2006; Munz ve diğ., 2007; Sagbo ve diğ., 2008). Kimyasalların kütle transferi ve biyokimyasal ortamdaki etkileri açısından maliyetlerinin ve optimum dozlarının belirlenmesi önem taşımaktadır.

2.5.2 Nanomateryal katkılı membran kullanımı

Nanoteknoloji alanında gözlenen gelişmeler sonucu MBR kirlenme kontrolü çalışmalarında nanomateryal kullanımı artmaktadır. Fullerene C60 (Chae ve diğ., 2009), gümüş bazlı (Fabrega ve diğ., 2009), magnezyum veya titanyum oksit ile bakır bazlı nanopartiküller (Chae ve diğ., 2009) bu amaçla kullanılmaktadır.

2.5.3 Bakterilerin iletişiminin kesilmesi (Quorum Quenching) metodu

Mikroorganizmalar biyofilm oluşturmak için kendi aralarında sinyal molekülleri (Acyl homoserin lactone, AHL) aracılığıyla iletişimde bulunurlar. Yeon ve diğ. (2009a) bu iletişimin filtrasyonun ilk aşamalarında zayıf, TMP'nin eksponansiyel olarak arttığı durumlarda ise kuvvetli olduğunu bulmuştur. Araştırmacılar ortama asilaz ekleyerek amid bağlarının kırılması yolu ile AHL'yi etkisiz hale getirmişlerdir. Ayrıca serbest enzim kullanımının sınırlamalarını aşabilmek için manyetik enzim taşıyıcıları geliştirmişlerdir (Yeon ve diğ., 2009b). Bu araştırmalar sonucunda tıkanma kontrolünde önemli gelişmeler olmuştur (Drews, 2010).

2.6 MBR Sistemleri ve Titreşim Uygulamaları

2.6.1 MBR sistemleri

Son yıllarda polimer ve membran teknolojisindeki gelişmelerle üretim maliyetinin azalması sebebiyle gerek içme suyu gerekse de atıksu arıtma alanlarında membran prosesleri (özellikle MF ve UF) konvansiyonel sistemlerle maliyet açısından rekabet edebilir hala gelmiş ve geniş çapta uygulanmaya başlanmıştır. MBR'lar, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde son on yılda eksponansiyel bir artışla arıtma tesislerinde devreye alınmıştır. Önümüzdeki yıllarda birçok konvansiyonel atıksu arıtma tesisinde mevcut teknolojilerin MBR'lara dönüştürüleceği ve özellikle de son çökeltim havuzlarının ortadan kalkacağı ABD ve Avrupa'daki uzmanlar tarafından tahmin edilmektedir (Yiğit, 2007).

Konvansiyonel aktif çamur prosesinde iki ayrı tankta gerçekleşen biyokimyasal oksidasyon (havalandırma tankında) ve sıvı/biyokütle ayrımı (sedimentasyon ile çökeltim tankında) MBR'larda tek tankta gerçekleşmektedir. Bu tank içerisinde aktif çamur havalandırılmakta, tankın içinde dahili olan membran kasetlerindeki fiberlerin veya düz tabaka membranların çok küçük gözeneklerinden vakum uygulanarak arıtılmış su çekilmekte ve biyooksidasyon ile karbon giderimini yapan biyokütle tank içerisinde kalmaktadır. Şekil 2.6 'da membran fiberlerini içeren bir kaset, Şekil 2.7 'de ise bir membran kasetinin tankın içinde yerleştiriliridikten sonra çekilen fotoğrafı verilmektedir.

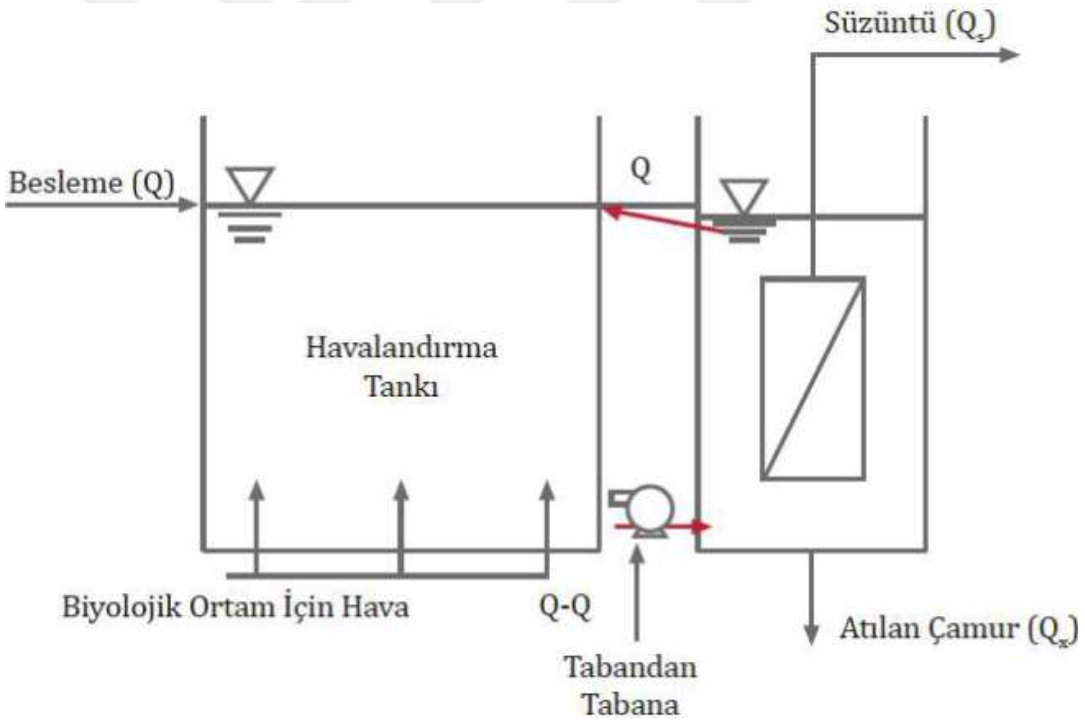
Şekil 2.6 : MBR membran modülü (MEMTEK Araş. Merk. & MEMSİS Çevre Tekn. 2017).

MBR'larda genellikle MF (yaklaşık 0,2 µm gözenek çapı) veya UF (yaklaşık 0,04 µm gözenek çapı) membranları kullanılmaktadır. Arıtma sırasında zamanla fiberler üzerinde oluşan kek tabakası, bu gözenekleri daha da küçültmekte ve sıvı/biyokütle ayrımını, askıda katı madde ve mikroorganizma giderim verimini arttırmaktadır (Yiğit, 2007).

Türkiye'de bir arıtma tesisinde hizmete alınan MBR ünitesinin üstten görünüşü Şekil 2.7'de verilmektedir. Atıksuda bulunan ve membranları tıkayabilecek büyük çaplı malzemeleri (bez, plastik, kağıt parçaları gibi) ayırmak için kaba ve ince ızgaradan (1–2 mm çaplı) geçen atıksu doğrudan ön çökeltime gerek olmadan doğrudan MBR tankına verilmektedir. Ancak giriş AKM konsantrasyonu nispeten fazla olan atıksularda MBR ünitesinden önce ön çökeltim de uygulanabilmektedir. Daha küçük çaplı (≈0,1–1 mm) ve daha yüksek tutma kapasitesi olan döner tambur ızgaralar genellikle MBR sistemlerinde konvansiyonel ızgaraların yerine tercih edilmektedir. MBR tankının giriş bölümü kapalı ve havalandırmasız yapılarak anoksik şartlar sağlanıp denitrifikasyon uygulanabilir.

Şekil 2.7 : Membran modülünün tank içinde yerleştirilmiş hali. (MEMTEK Araş. Merk. & MEMSİS Çevre Tekn. 2017).

Bunun için havalandırma tankında nitrifikasyon ile oluşan nitrat, biyokütle geri devri ile anoksik tanka geri pompalanır. Böylece isteğe bağlı olarak organik karbon gideriminin yanında azot giderimi de sağlanabilir. Eğer fosfor giderimi de amaçlanıyorsa tankın giriş kısmına havasız (anaerobik) bölüm eklenip fosfor giderimi de sağlanabilir. Dolayısıyla MBR prosesi biyolojik nütrient giderimi için de uygun hale getirilebilir. Bazı sentetik toksik organik maddelerin, fosforun (kimyasal olarak giderim için) veya ağır metallerin giderimi istenirse opsiyonel olarak koagülasyon/flokülasyon işlemi için koagülantlar da suya eklenebilir. Tüm bu özellikler MBR'ları çok esnek bir arıtma prosesi haline getirir. Vakum ile membran fiber gözeneklerinden çekilen arıtılmış su, konvansiyonel sistemlere göre çok daha yüksek kalitededir. Oluşan atık çamur diğer konvansiyonel sistemlerde olduğu gibi nihai bertarafa gönderilir. Gübre olarak tarım ve rekreasyon arazilerinde kullanılabilir (Yiğit, 2007). Tipik bir MBR ünitesi akım şeması Şekil 2.8'de, verilmiştir.



Şekil 2.8 : Tipik bir entegre batık MBR sistemi akım şeması.

MBR'lar kompakt sistemler olduğu için konvansiyonel sistemlere göre çok daha az arazi ihtiyacı gerektirir. Dahili sistem MBR'larda tüm arıtma aşamaları (havalandırma, sıvı/biyokütle ayrımı ve fiziksel dezenfeksiyon) tek bir tankta gerçekleşmektedir. Mevcut işletimde olan konvansiyonel aktif çamur sistemleri, kolaylıkla MBR sistemlerine dönüştürülebilmektedir. Havalandırma tankına dahili membranlar yerleştirilerek bu işlem gerçekleştirilebilmektedir (Yiğit, 2007).

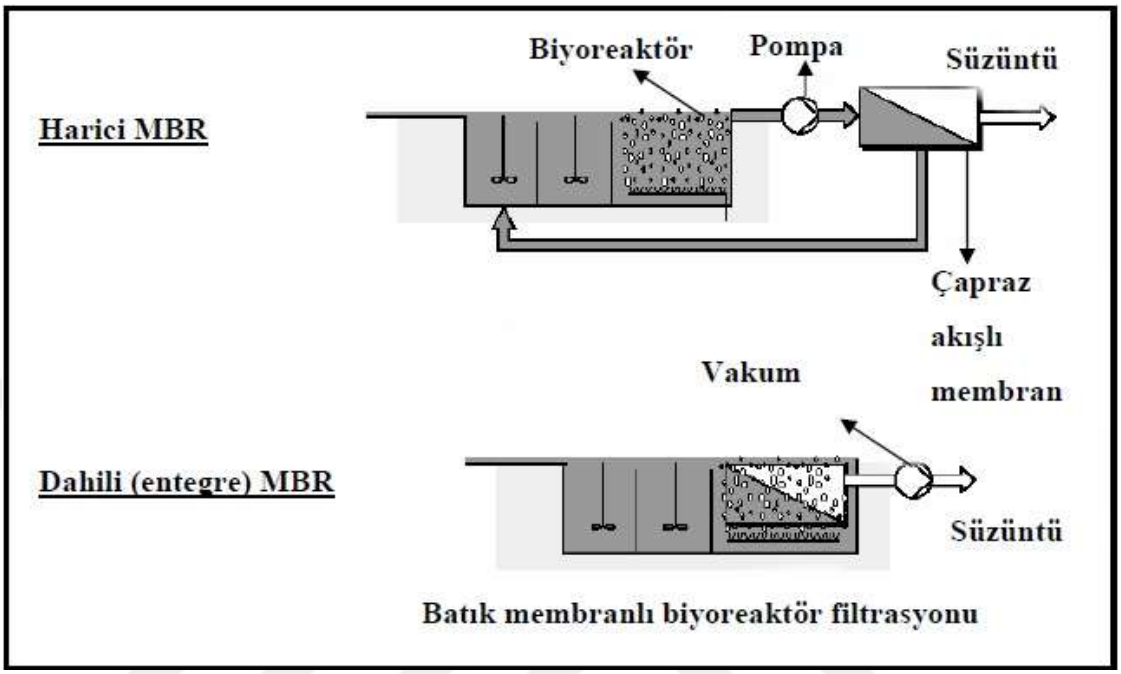
MBR sistemlerinin avantajları:

- Diğer konvansiyonel arıtma sistemleriyle karşılaştırıldığında, daha küçük alan ihtiyacı gereksinimi MBR sistemlerine büyük bir avantaj kazandırmaktadır (Visvanathan, 2000).
- MBR prosesi bulanıklık, AKM, besi maddesi ve KOİ açısından yüksek verimde giderim sağlar. MBR'lar ayrıca UF ve MF kullanarak, 0,005 - 2 µm arasında değişen düşük gözenek çapı ile dezenfeksiyon fırsatı sunar (Dijk ve diğ., 1997, Le-Clech ve diğ., 2006).
- MBR sistemleri konvansiyonel arıtma sistemleri ile karşılaştırıldığında; daha uzun çamur yaşı ve yüksek biyokütle konsantrasyonlarında (20000 mg/L'ye kadar) düşük çamur üretimi, yüksek KOİ ve BOİ giderimi yapabilecek şekilde işletilebilir (Defrance ve diğ., 1999).
- MBR kullanımı; havalandırma, çöktürme ve dezenfeksiyon gibi konvansiyonel arıtma sistemlerinde kullanılan birçok arıtma ünitesinin kullanımını ortadan kaldırabilmektedir (Rosenberger ve diğ., 2002; Kitis ve diğ., 2005; Karakulski ve diğ., 1998; Gryta ve diğ., 2001).

MBR sistemlerinin dezavantajları:

- MBR sistemlerinin en önemli dezavantajı konvansiyonel sistemlere nazaran yüksek işletme ve bakım maliyetidir.
- İşletme akısı, membran alanıyla orantılı olarak yeterli seviyelere yükseltilemezse, artan enerji sarfiyatı yüzünden MBR tam kapasitede çalıştırılamaz.
- Membran yüzeyinde zaman içerisinde kirleticilerin birikimi sonucunda oluşan membran tıkanması; akı değerinin, membran süzme performansının düşmesine neden olmaktadır (Metcalf&Eddy, 2003; Stephenson ve diğ., 2000; Marrot, 2004; Merz ve diğ., 2007).
- MBR'larda tıkanma, membran dizaynı ve işletilmesi açısından önemli bir problemdir. Çünkü tıkanmayla birlikte, temizleme gereksinimi ilave maliyete sebep olmaktadır. Bu durum, membran işletme koşullarını ve performansını etkilemektedir (Jefferson ve diğ., 2000, Tomaszewska ve diğ., 2005).

MBR sistemleri, harici (sıvı/biyokütle ayrımının çapraz akışlı membran filtrasyonu ile ayrı bir ünitede gerçekleştiği) ve dahili (sıvı/biyokütle ayrımının biyoreaktör içinde dahili membranlar ile gerçekleştiği) olmak üzere 2 ana konfigürasyonda sınıflandırılabilirler (Şekil 2.9).



Şekil 2.9 : MBR türleri (Yiğit, 2007).

Dahili MBR'larda farklı amaçlar için genellikle iki tür havalandırma uygulanır. Reaktör tabanındaki difüzörlerden verilen kaba hava kabarcıklı havalandırma ile biyokütlenin oksijen ihtiyacı karşılanır. Öte yandan membran yüzeyine uygulanan ince hava kabarcıklı havalandırma ile membran yüzeyinde maddelerin birikip akıyı azaltması engellenmeye çalışılır. Yükselen hava kabarcıkları membran yüzeyinde türbülanslı karşı akım oluşturup (yaklaşık 1 m/sn), materyallerin birikmesini azaltır. Böylece sistem daha etkin şekilde çalışır. Reaktördeki türbülanslı karışım ve reaktör hidroliğinden dolayı, iki havalandırma türü de pratikte temizleme ve oksijen ihtiyacı açısından kullanılabilir. Diğer bir deyişle uygulamada iki tip havalandırmanın da sonuçlarının ayırt edilmesi zordur. Atıksu arıtımında genellikle dahili MBR'lar daha sık uygulanmaktadır (Yiğit, 2007).

2.6.2 Titreşimli batık MBR sistemleri ile gerçekleştirilmiş deneyler ve elde edilen sonuçlar

Dahili membran modülleri ile çalışan MBR sistemleri atıksu arıtma proseslerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla beraber membran kirlenmesi, membran

sistemlerinin performansını düşüren kritik bir problemdir. Hava kabarcıklı, çapraz akışlı ve süzüntü geri yıkaması ile kayma gerilimi arttırılması sıklıkla kullanılan kirlilik azaltma yöntemleridir. Yine de bunların sahada uygulanması yüksek maliyetli olabilmektedir. MBR sistemlerinin çoğu membran yüzeyindeki kirlenmeyi önlemek için kabarcıklı havalandırma yöntemini kullanır. Kabarcıklı havalandırma yöntemi sınırlı akı artışı sağlar ve toplam enerji tüketiminin %70'ini oluşturur. Dolayısıyla membran kirlenmesini azaltmak için son yıllarda yeni yöntemler üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır. Bu yöntemlerden biri de titreşimli sistemlerdir. Bu sistemlerin dönel, çapraz ve boyuna motor sürücülü veya manyetik sürücülü olan farklı türleri vardır. Titreşim sistemleri, membran yüzeyindeki kayma gerilimini arttırma prensibiyle geliştirilmiştir. Partiküllerin porlardan filtrasyon çözeltisine geri transferi sonucu daha yüksek kayma gerilimi ve daha düşük kirlenme olur. Membran yüzeyinde oluşan hız kritik akıyı arttırır ve kirlenmeyi azaltır.

2.6.3 MBR sistemleri için titreşim konsepti

Titreşimle zenginleştirilmiş proses (VSEP), en çok bilinen titreşimli membran konsepti olup, Armando ve diğ. (1992) tarafından geliştirilmiştir. Bu proseste egzantrik ağırlıklı bir motor, burulma yayı ile sismik bir kütleye bağlanmıştır. Bu sistem ile oluşturulan titreşimlerin frekansı 70 Hz'e kadar çıkabilmektedir. VSEP modüllerinin MBR sistemlere entegrasyonu ile VSEP ve MBR teknolojileri birlikte çalışabilmektedir. Dahili MBR sistemlerinde kullanılan diğer bir titreşim sistemi ise, frekans ayarı için hız kontrolörü içeren bir elektrik motorunun tanktaki membran modülüne bağlanması şeklinde uygulanmaktadır. Dahili membranlarda kullanılan bu tarz sistemler daha çok farklı frekansların denenmesi ve farklı süspansiyonların filtrasyonu için kullanılmaktadır. Titreşimli dahili membranlar için kullanılan yeni bir teknoloji manyetik titreşim sistemleri olup, Bilad ve diğ. (2011) tarafından geliştirilmiştir. Sistem, ses yazılımı ve kontrol üniteli bir manyetik titreşim motorundan oluşur.

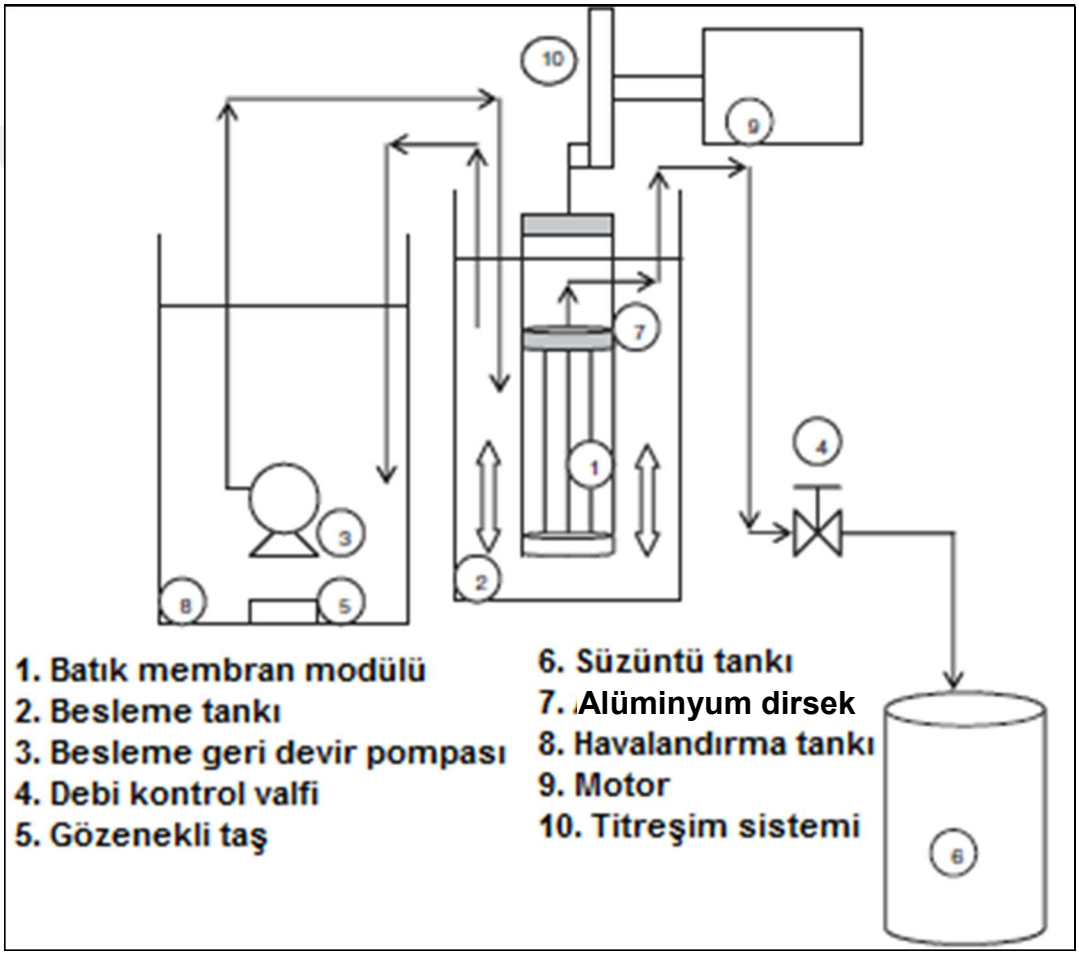
2.6.4 MBR modülleri için dizayn edilen titreşim sistemleri

Titreşim sistemli dahili membranlar dönel, boyuna veya yatay titreşim doğrultularında çalışabilirler. Bu sistemlerin frekans ve genlikleri uygulamalara ve sistem kapasitelerine göre değiştirilebilir.

2.6.4.1 Boyuna titreşimli sistemler

Boyuna titreşimli sistemler, ince boşluklu (hollow fiber) veya levha membranlarla kullanılabilir. Bu sistemlerde MF ve UF membranlar kullanılmaktadır.

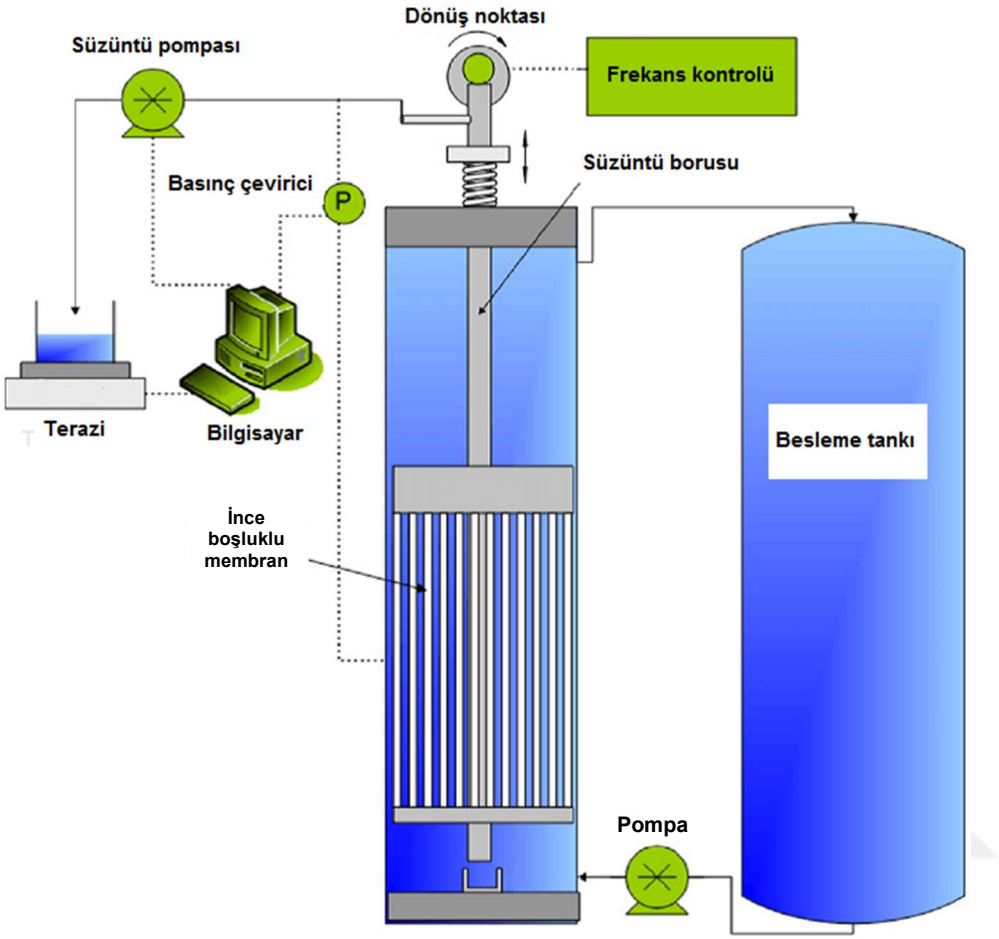
Low ve diğ. (2005)'nin kullandığı dahili MBR modüllerinin boyuna titreşimli sistemleri Şekil 2.10'da görümektedir. Sistemin frekansı 30 Hz, genliği ise 0,1 mm'dir. Modül 1800 ve 2000 mg/L arasında AKM içeren aktif çamur sistemine yerleştirilmiştir. Modülde 610 adet ince boşluklu membran vardır ve bunlar 1,4 m uzunluğundadır. Modülün toplam yüzey alanı 7,2 m^2'dir.



Şekil 2.10 : Boyuna titreşimli membran sistemi (Low ve diğ., 2005).

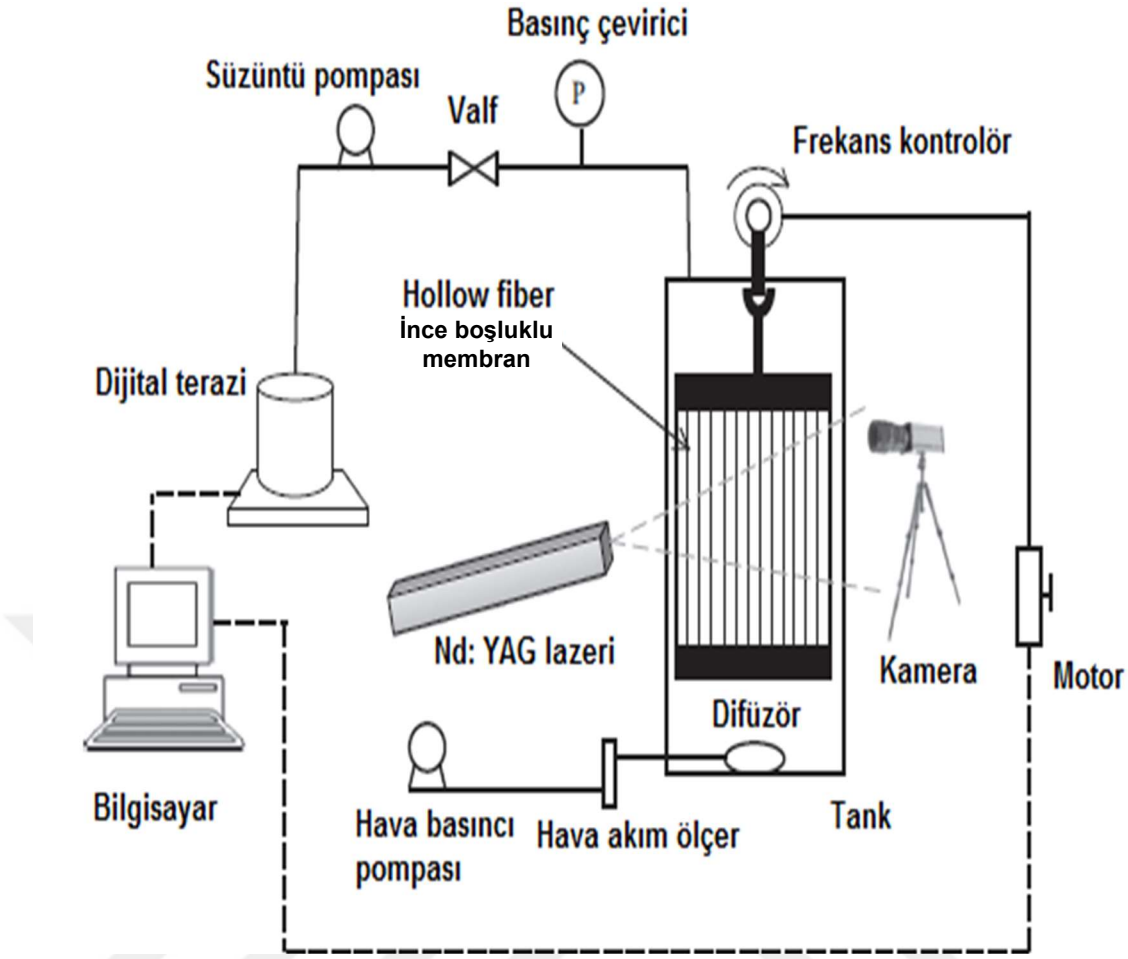
Beier ve diğ. (2006), farklı frekans ve genliklerin test edilebildiği bir deney düzeneği kullanmıştır (Şekil 2.11). Sistemde, uzunluğu 12 cm olan paralel fiberlerden oluşan toplam 256 cm^2 yüzey alanına sahip bir modül bulunmaktadır. İnce boşluklu membranlar, PES materyalinden üretilmiştir. Modül elektrik motoruna bağlı dönel bir başlığa bağlanmıştır. Dönel başlık ve modül arasında güçlü bir yay vardır. Dönel başlıklar 0,2 mm, 0,7 mm ve 1,175 mm ölçülerinde dönme genliklerine sahiptir. 0-30

Hz arasında frekansta çalışabilen elektrik motorlarıyla farklı frekanslar elde edilebilmektedir.



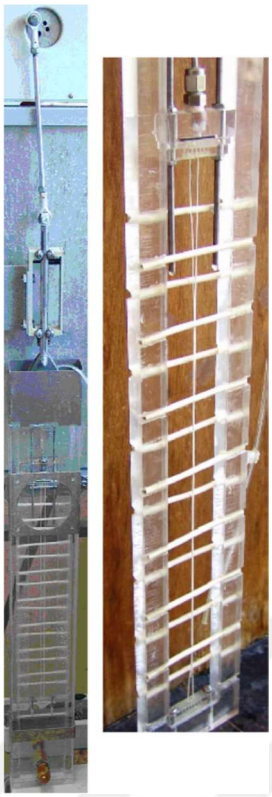
Şekil 2.11 : Beier ve diğ. (2006) tarafınan kullanılan titreşimli sistemi.

Benzer bir sistemi Li ve diğ. (2013) tıkanma kontrol çalışmalarında kullanmıştır (Şekil 2.12). Geniş ve farklı fiber dizilimlerinde titreşim çalışmaları yapılmıştır. Titreşim frekansı 0-15 Hz ve genlik 0-12 mm arasında ayarlanabilmektedir. Aynı düzenek, enine ve boyuna titreşimlerin karşılaştırıldığı başka bir çalışmada da kullanılmıştır (Li ve diğ., 2014).

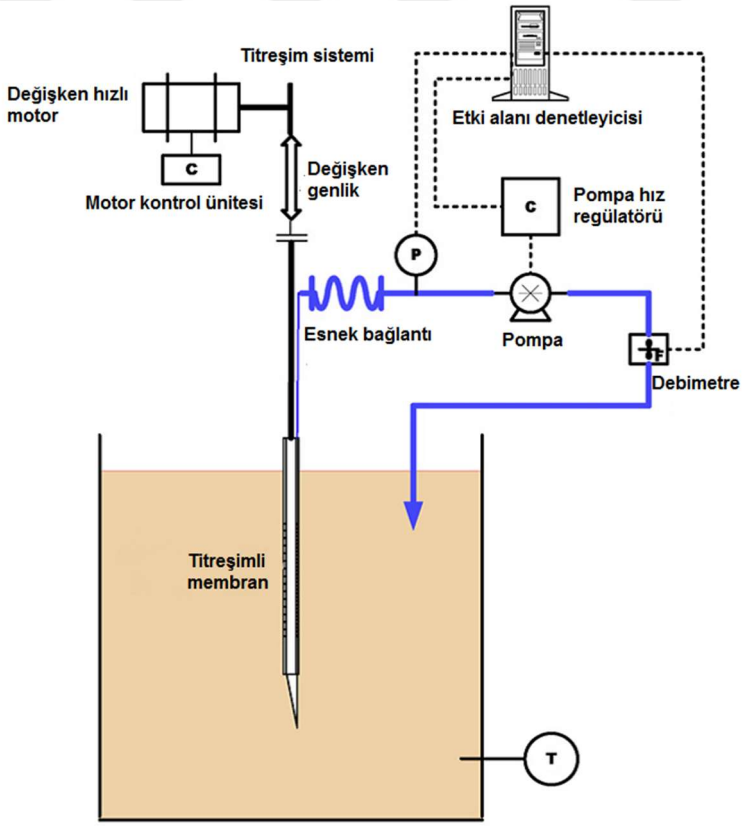


Şekil 2.12 : Li ve diğ. (2013) tarafından kullanılan deney düzeneği.

Genkin ve diğ. (2006), dahili ince boşluklu membran modüllerini boyuna titreşimli sistemlerde denemişlerdir (Şekil 2.13). Çalışmada 250 w değerinde bir düz akım motoru ve 4 cm genlikli, 10 Hz frekansa çıkabilen bir sistem kullanılmıştır. Motor ile modül arasında kranklı bir aktarma sistemi bulunmaktadır. Başka bir dahili membran sistemi de Gomaa ve diğ. (2011) tarafından kullanılmıştır. Sistem 40 litrelik bir tanka batırılmış olan MF levha membran modülünden oluşmaktadır (Şekil 2.14). Titreşim genliği olarak 3, 12, 20, 30 mm ve frekans olarak 5, 10, 15, 18, 20, 25 Hz değerleri test edilmiştir. Titreşim frekansı hız motoru tarafından kontrol edilmiştir. Dahili titreşimli membran sisteminin görünümü Şekil 2.14'da verilmiştir. Süzüntü akışı bir debimetre ve basınç ölçer ile kontrol edilmektedir. Kek oluşumunun sebep olacağı basınç değişimlerini engellemek ve sabit TMP'yi sağlamak amacıyla vakum pompasını kontrol için bir geri besleme kontrol düzeneği monte edilmiştir.



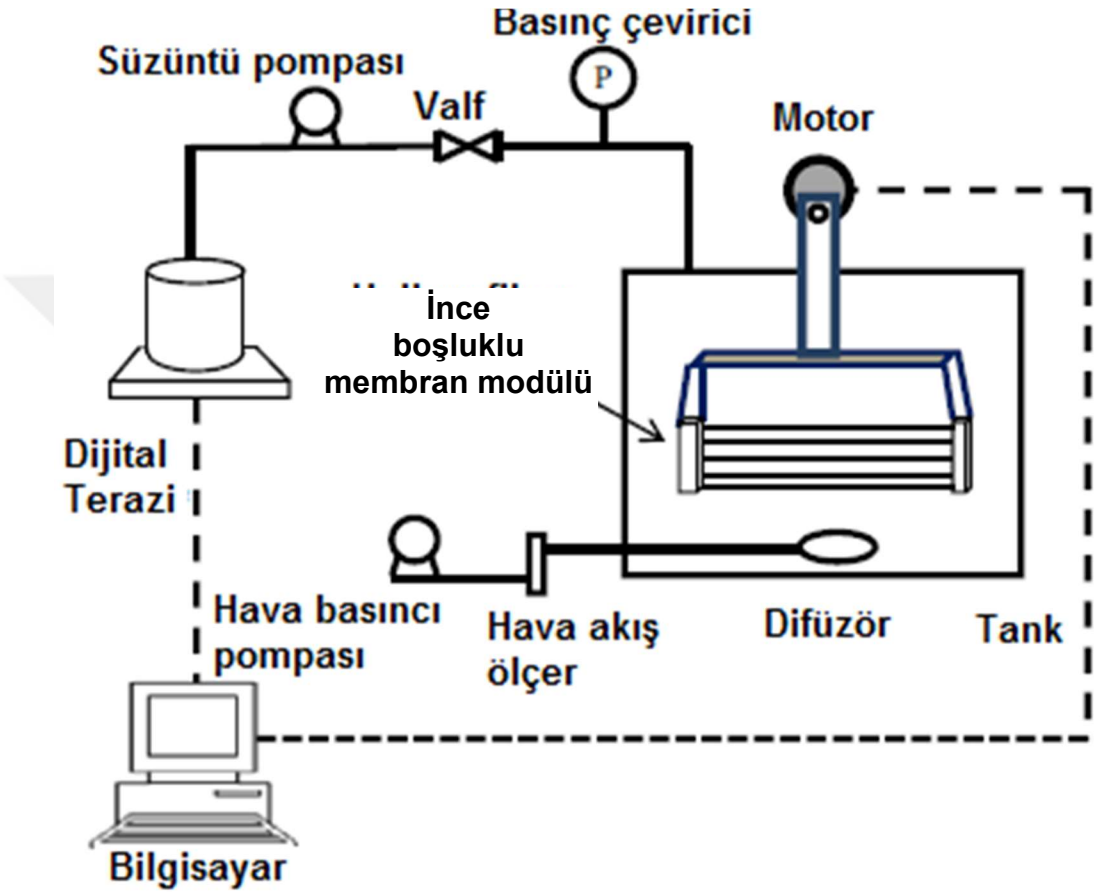
Şekil 2.13 : Genkin ve diğ. (2006) tarafından kullanılan laboratuvar ölçekli dahili membran titreşim ünitesi.



Şekil 2.14 : Levha membranlı dahili titreşimli sistem (Gomaa ve diğ., 2011).

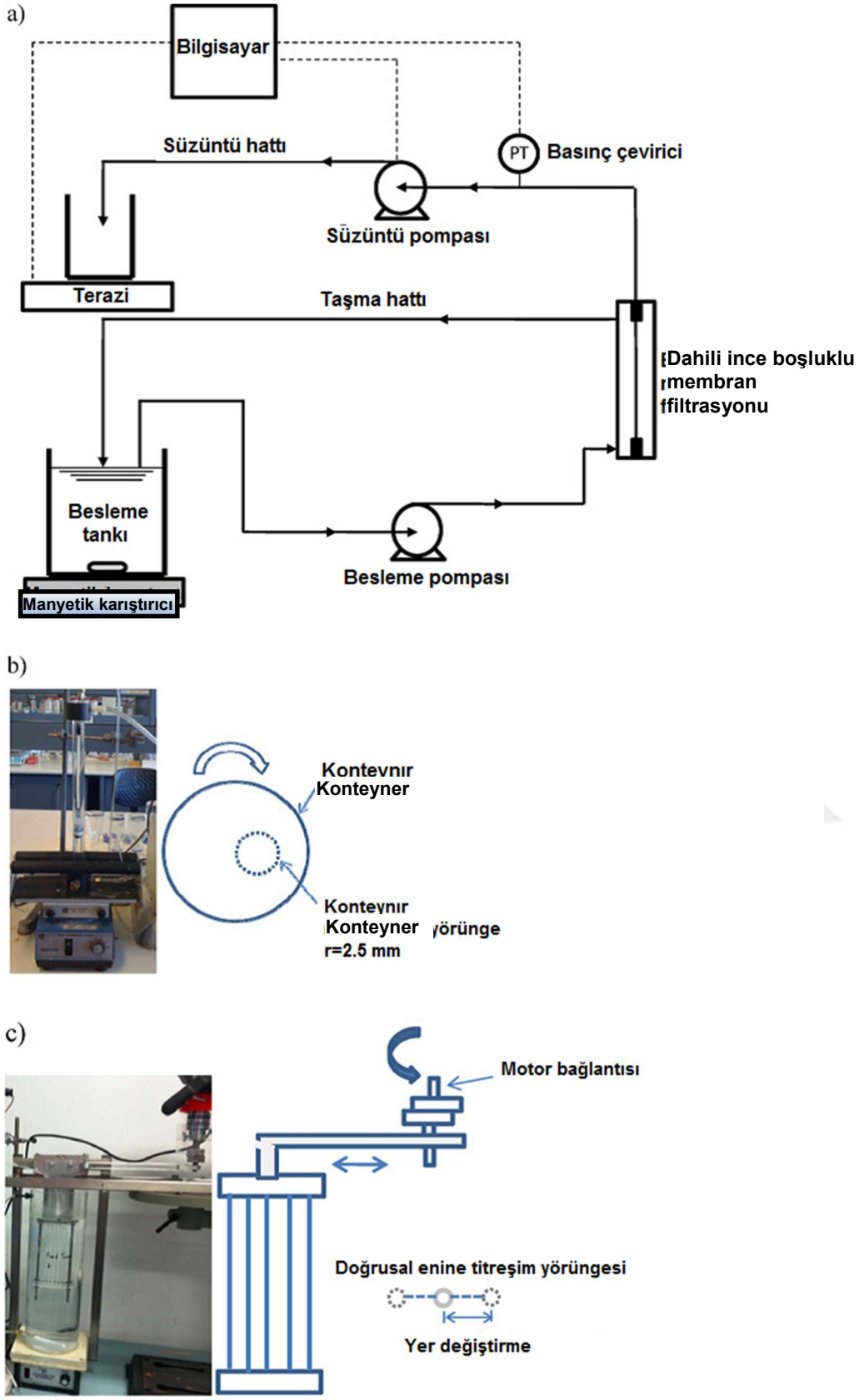
2.6.4.2 Enine titreşim sistemleri

Li ve diğ. (2013), ince boşluklu membranları tanka yatay olarak yerleştirmiş ve membran yüzeyinde enine titreşim oluşturmuştur (Şekil 2.15). Modül, düz akım motorun krank mekanizması vasıtasıyla gönderdiği titreşim ile salınım yapmıştır. Genlik 0-28 mm (4 mm aralıklarla), frekans 0-10 Hz arasında ayarlanabilmektedir.



Şekil 2.15 : Li ve diğ. (2013)'nin kullandığı enine titreşim düzeneği.

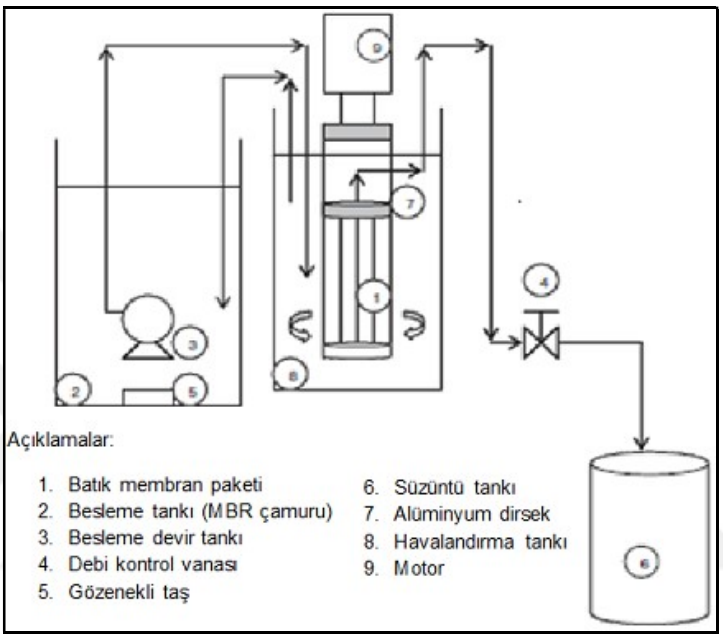
Diğer bir enine titreşimli MBR düzeneği Kola ve diğ. (2014) tarafından kullanılmıştır. Bu sistemde enine titreşimli membran sistemleri için iki farklı konfigürasyon bulunmaktadır. Birincisi çalkalama plakaları vasıtasıyla sıvının titreşim kazanması, ikincisi ise modülün titreştirilmesidir. Sıvının titreştirildiği metotta, 2,5 mm yarıçapında silindirik hareketlerle filtre tüpüne titreşim uygulanmaktadır. Sistemin titreşimi 0-2200 OPM (dakikada gerçekleşen titreşim) aralığında ayarlanabilmektedir. Diğer konfigürasyonda ise modüle enine titreşim uygulanmaktadır (Şekil 2.16). Titreşim ünitesi genliği 0,5-5 mm, motor frekansı ise 220 ile 3480 OPM arasında değiştirilebilmektedir.



Şekil 2.16 : Kola ve diğ. (2014) tarafından kullanılan enine titreşim sistemi a) Membran test düzeneği, b) Çalkalama vasıtasıyla titreşim c) Modüle uygulanan enine titreşim.

2.6.4.3 Dönel titreşim sistemleri

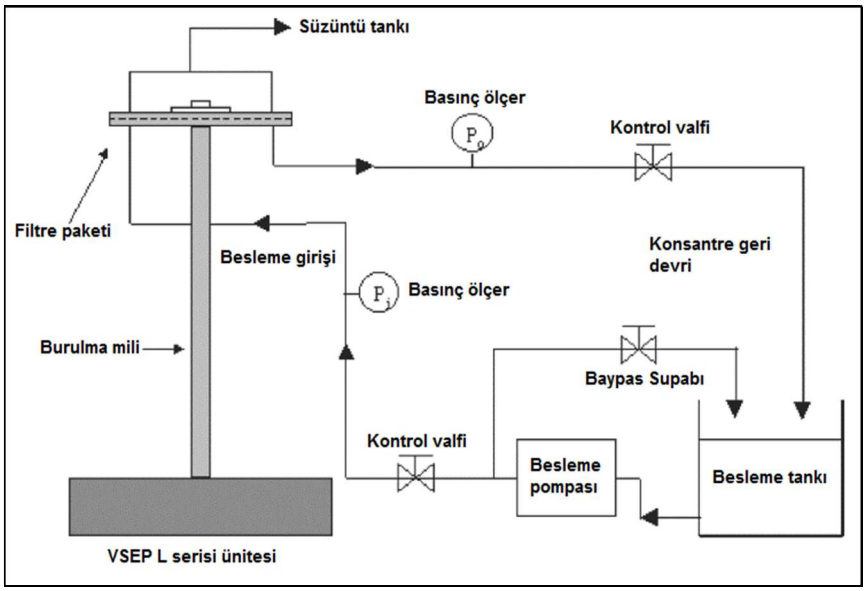
Dönel titreşim sistemi, dahili MBR sistemlerinin performansının arttırılması amacıyla Low ve diğ. (2005) tarafından kullanılmıştır (Şekil 2.17). Sistem, uzunlukları 1,4 m olan 610 adet ince boşluklu membran modül paketlerinden oluşmaktadır. Çapraz dönel titreşim sistemi, 30 rpm salınım ve 180 °C açısal genliğe sahiptir. Çapraz titreşim, membran yüzeyi üzerinde yüksek kayma gerilimi oluşturabilmek için membran modülü üzerinde bulunan motor yardımı ile ileri geri hareket etmektedir.



Şekil 2.17 : Dönel titreşim düzeneği (Low ve diğ., 2005).

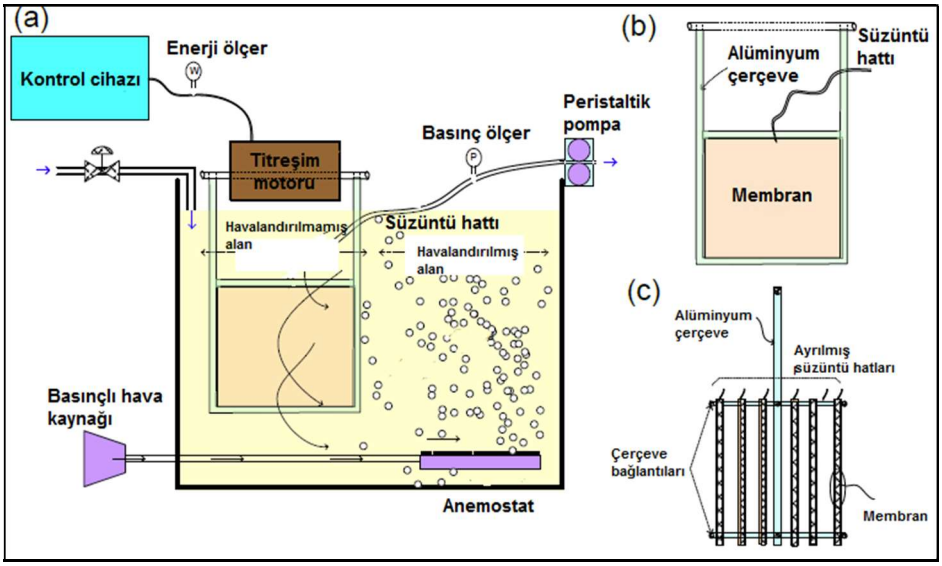
2.6.4.4 Diğer salınım sistemleri

Low ve diğ. (2005), VSEP sistemi ile birleştirilmiş harici bir MBR sistemi kullanmıştır. Çalışmada, 3 farklı sistem test edilmiştir: Çapraz (dairesel) salınımlı dahili MBR, boyuna titreşimli ve VSEP sistemi (Low ve diğ., 2005). Kullanılan VSEP sisteminde, tek bir halka şeklinde donatılmış 0,058 m^2 etkin alana sahip membranlar kullanılmıştır (Şekil 2.18). Atıksu, tek bir düz tabaka PAN UF membranı içeren VSEP modülünün besleme tankına verilmektedir. VSEP modülü, 19-32 mm arasında bir genlikle sallanmaktadır. 53 Hz'lik salınım frekansında elde edilen kayma şiddeti yaklaşık 150,000 s^{-1} civarındadır. 2,2 cm'lik disk grubu, ileri geri hareket eden bir bükülme yayı üzerinde dışarıya doğru döndürülmektedir. Çalışmada 5,3 m/s salınım hızı, 1,9 cm genlik ve 70 Hz frekans değerleri kullanılmıştır.



Şekil 2.18 : Harici MBR modülü olarak kullanılan VSEP sistemi (Low ve diğ., 2005).

Bilad ve diğ. (2011) ile Mezohegyi ve diğ. (2012) çalışmalarında manyetik kaynaklı membran titreşim sistemini kullanmışlardır. Bu uygulamada, doğrudan dahili düz levha membran modülü tankına paralel bağlı olan bir manyetik itme çekme cihazı takılmıştır (Şekil 2.19). Sistemin havalandırmalı ve havalandırmasız olarak iki farklı bölmesi vardır. Titreşim sisteminde, sürücü ve ses yazılımı tarafından kontrol edilen manyetik bir motor bulunmaktadır. Titreşim frekansı 0-60 Hz arasında ayarlanabilmekte, genliği ise maksimum 2 mm'ye çıkabilmektedir.



Şekil 2.19 : Manyetik MBR sisteminin şematik gösterimi a) MBR sistemi, b) Modül haznesi, c) Modülün yandan görünümü (Bilad ve diğ., 2011).

İncelenen titreşim sistemleri karşılaştırmalı olarak Çizelge 2.2'te verilmiştir.

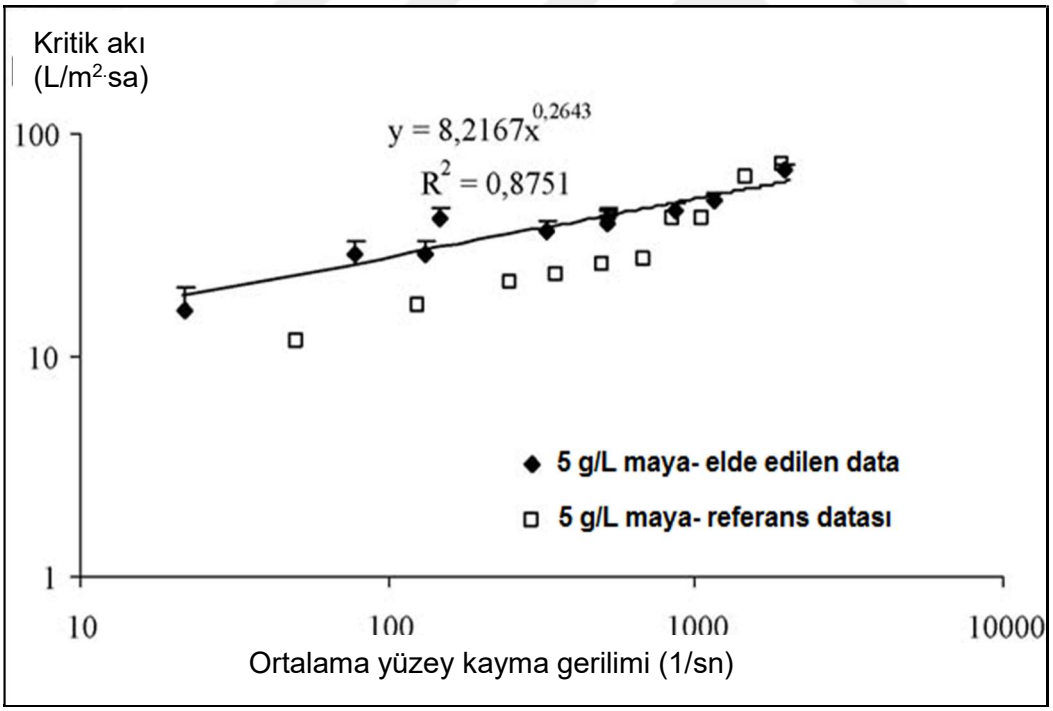
Çizelge 2.2 : Farklı titreşim sistemlerinin karşılaştırılması.

Salınım Tipi	Titreşim Sistemi	Frekans Aralığı, Hz	Genlik, mm	Membran Tipi	Referans
Uzunlamasına	Motor sürücülü yaylı mil	0 to 30	0.2, 0.7, 1.175	İçi Boşluklu Fiber	Beier ve diğ.
	Motor driven mechanical shaft	30 (sabit)	100 (sabit)		Low ve diğ.
	Krank milli DC motor	0 to 15	0 to 12		Li ve diğ.
	Krank milli DC motor	0 to 10	40 (sabit)		Genkin ve diğ.
	Değişken hızlı motor ve salınım mekanizması	5, 10, 15, 18, 20, 25	3, 12, 20, 30	Düz Plaka	Gomaa ve diğ..
Enine	Krank milli DC motor	0 to 10	0 to 28 (4mm aralıklarla)	İçi Boşluklu Fiber	Li ve diğ.
	Sabit milli motor	3,5 – 50	0.5 to 5		Kola ve diğ.
	Dairesel hareketli salınım tablası	0 – 35	2.5 (sabit)		Kola ve diğ.
Dairesel	İleri geri hareketli sabit motor	0.5 Hz (30 rpm)	Sabit 180°	İçi Boşluklu Fiber	Low ve diğ.
	Burulma yaylı egzantirik ağırlıklı motor	70	19 to 32	Düz Plaka	Low ve diğ.
Rastgele	Manyetik sürücülü titreşim sistemi	60	0-1(Maks)	Düz Plaka	Bilad ve diğ. Mezohegyi ve diğ.

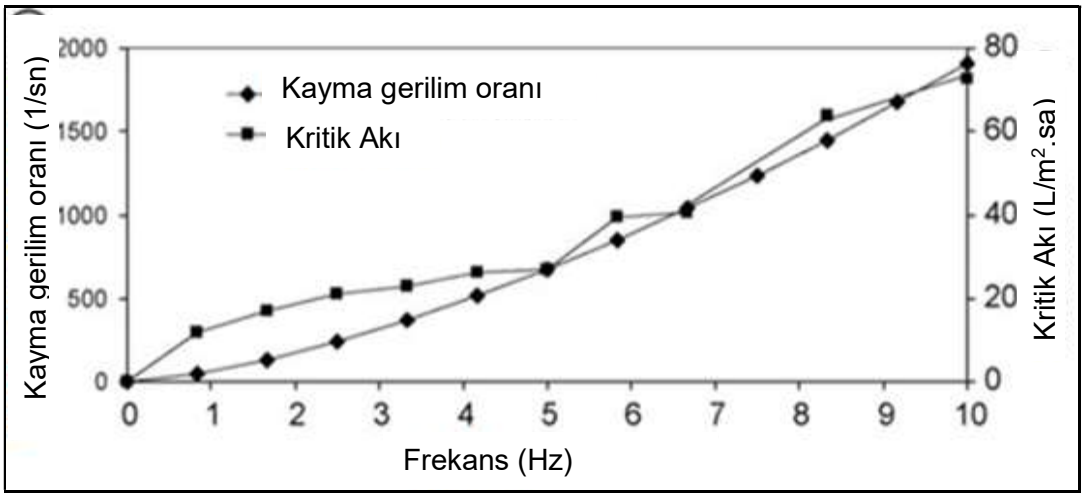
2.6.5 Titreşimli MBR modül sistemlerinde gerçekleştirilmiş filtrasyon çalışmaları

Literatürde, MBR sistemleri kullanılarak maya ve biyokütle süspansiyonlarının filtrasyonu ile ilgili çok sayıda çalışma bulunmaktadır.

MBR'ların geçirgenliğini arttırmak ve kirliliklerini azaltmak için yaygın olarak kullanılan bir yaklaşım, hava kabarcıklarının kullanımı ve membran yüzeyine gaz püskürtülmesidir (Cui ve diğ., 2001; Judd, 2006; Xia ve diğ., 2006; Zhang, 2009; Yamanoi ve diğ., 2010). Membran modülü salınımı olan MBR tanklarında, membran yüzeyindeki kayma gerilmesi tıkanmayı azaltmak için kullanılmaktadır. Titreşimli MBR sistemleri, maya çözeltilerinin filtrasyonuyla çeşitli araştırmacılar tarafından test edilmiştir (Beier ve diğ., 2006; Genkin ve diğ., 2006; Gomaa ve diğ., 2011; Anusha ve diğ., 2012; Li ve diğ., 2014). Kritik akının ortalama yüzey kayma gerilimi ile değişimi Şekil 2.20'de (Beier ve diğ., 2008), frekans ile değişimi Şekil 2.21'te verilmiştir (Genkin ve diğ., 2006).

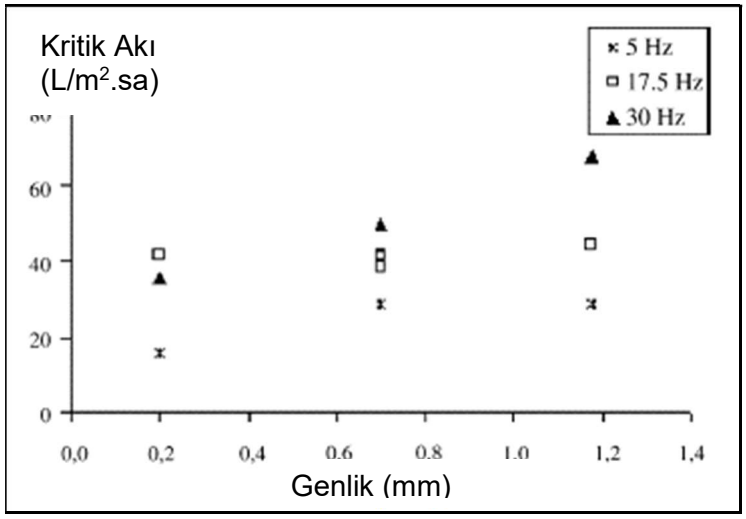


Şekil 2.20 : Kritik akının ortalama yüzey kayma gerilimi ile değişimi (Beier ve diğ., 2008).

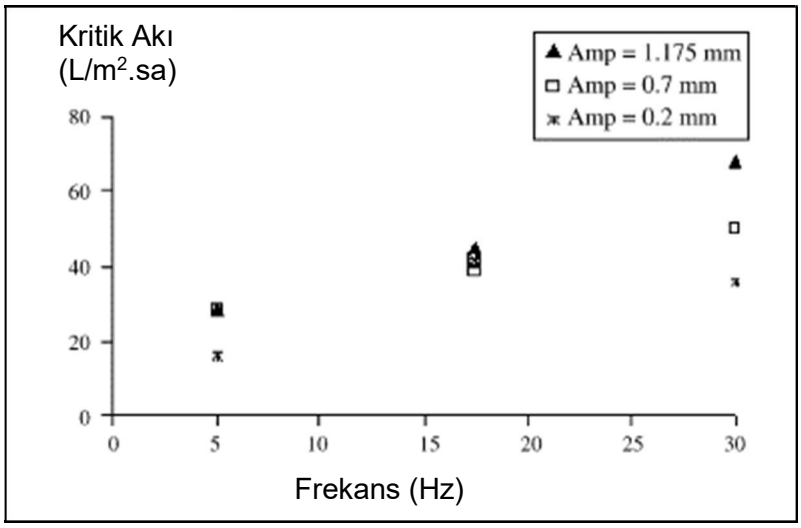


Şekil 2.21 : Kritik akı ve ortalama kayma gerilim oranının frekans ile değişimi (Genkin ve diğ., 2006).

Kayma gerilim oranı parametresi farklı çalışmaları karşılaştırmada önemli bir parametredir. Beier ve diğ. (2006), farklı frekanslar (5, 17,5, 30 Hz) ve genliklerde (0,2, 0,7, 1,175 mm) maya çözeltisinin filtrasyonunu test etmiştir. Diğer bir çalışmada düşük frekanslar (0-10 Hz) ve 40 mm'den büyük genlikler uygulanmıştır (Genkin ve diğ., 2006). Her iki araştırmada da 5 mg/L konsantrasyonda yıkanmamış maya çözeltisi kullanılmıştır. Çalışma sonuçları; kesme oranının, frekans ve genlik parametrelerine göre kritik akıya etkisinin daha büyük olduğunu göstermiştir. İlave olarak, frekanstaki artış (5'den 30 Hz'e), genlikteki artışa (0,2'den 1,175'e) göre kesme oranı üzerinde daha fazla etkili olmuştur. Dolayısıyla frekanstaki artışın genlikteki artışa göre, kritik akı değerinde daha fazla etkili olması beklenmektedir (Şekil 2.22 ve Şekil 2.23).

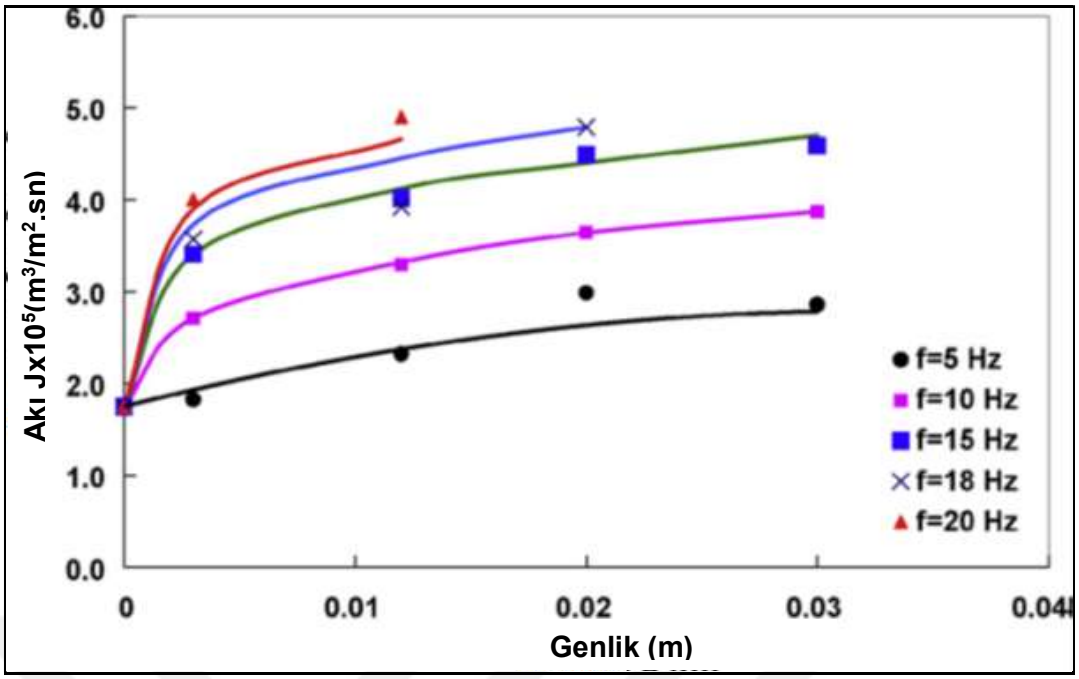


Şekil 2.22 : Farklı titreşim frekansı ve genlik değerleri için kritik akının değişimi (Beier ve diğ., 2006).

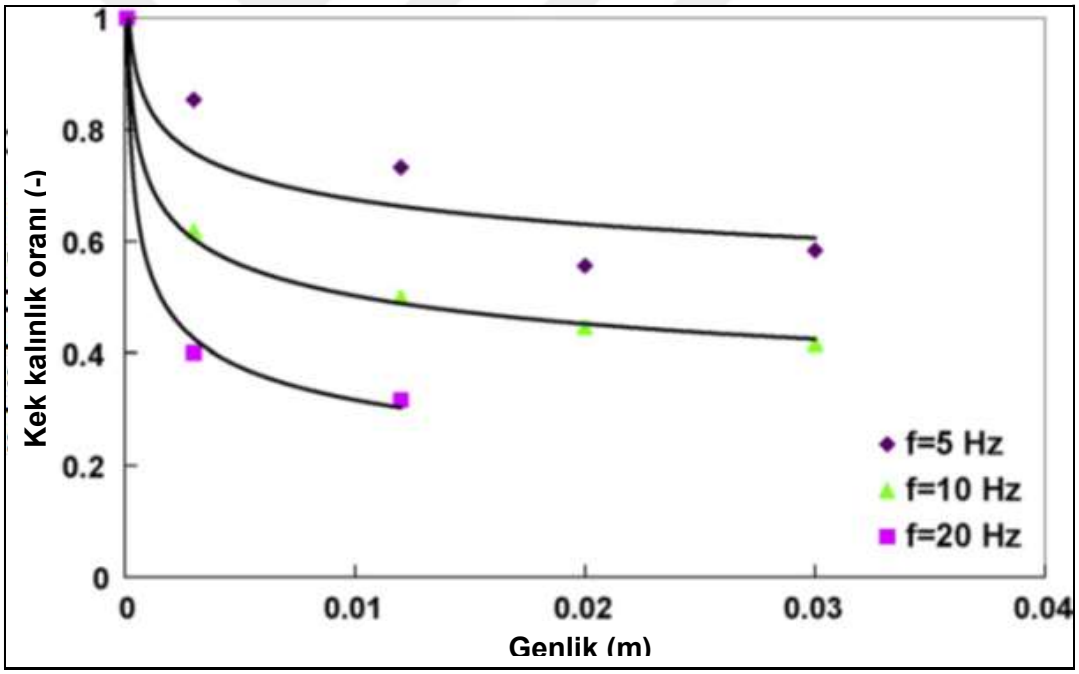


Şekil 2.23 : Farklı titreşim genlik ve frekans değerleri için kritik akının değişimi (Genkin ve diğ., 2006).

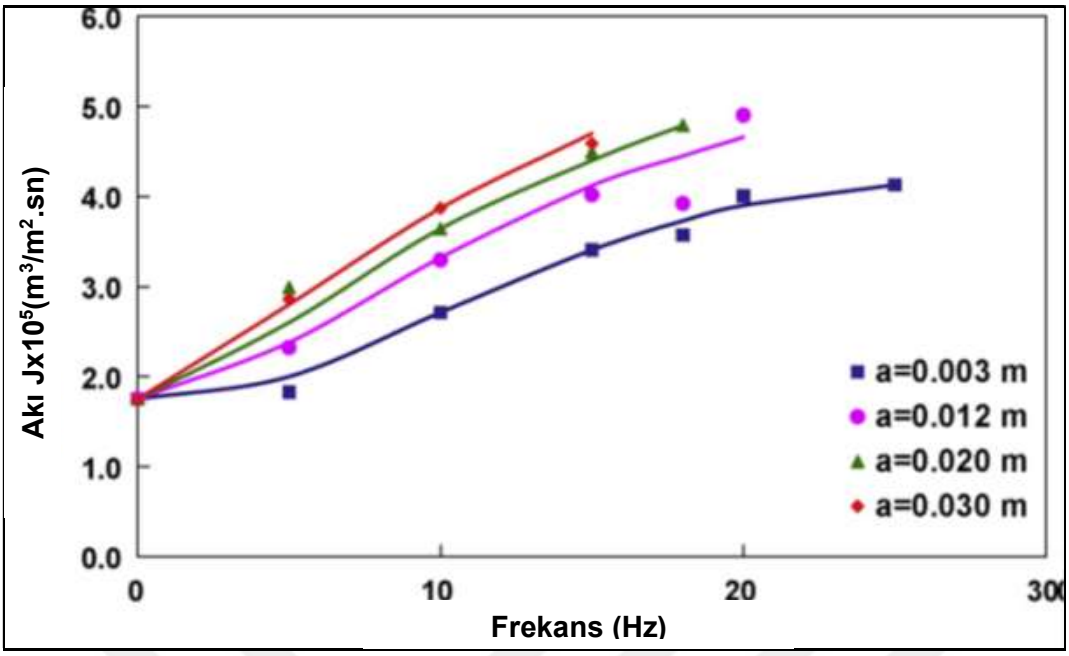
Gomaa ve diğ. (2010) salınım genliği ve frekansının maya çözeltisinin filtrasyonuna etkilerini incelemiştir. Bu çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak, düz plaka MF membranı kullanılmıştır. Membran yüzeyindeki kek tabakası oluşumu, kek kalınlık oranı ile genlik ve frekans etkisi karşılaştırılmıştır. Çalışmada genliğin filtrasyon akısı üzerindeki etkisinin yüksek frekanslarda daha belirgin olduğu gözlenmiştir (Şekil 2.24). Bu artış kek kalınlığının azalması ile ilgilidir (Şekil 2.25). Örneğin; 0,012 m genlik ve 20 Hz frekansta salınım yapan membran yüzeyinin kek kalınlığı, salınım yapmayan membran yüzeyindeki kek kalınlığına göre %30 daha azdır. Bununla birlikte, sabit frekansta genlik değerinin arttırılmasının kek kalınlığına önemli bir etkisi olmadığı gözlenmiştir. (Şekil 2.26-Şekil 2.27). Titreşim frekansının arttırılması genliğin arttırılmasından daha etkilidir (Gomaa ve diğ., 2010).



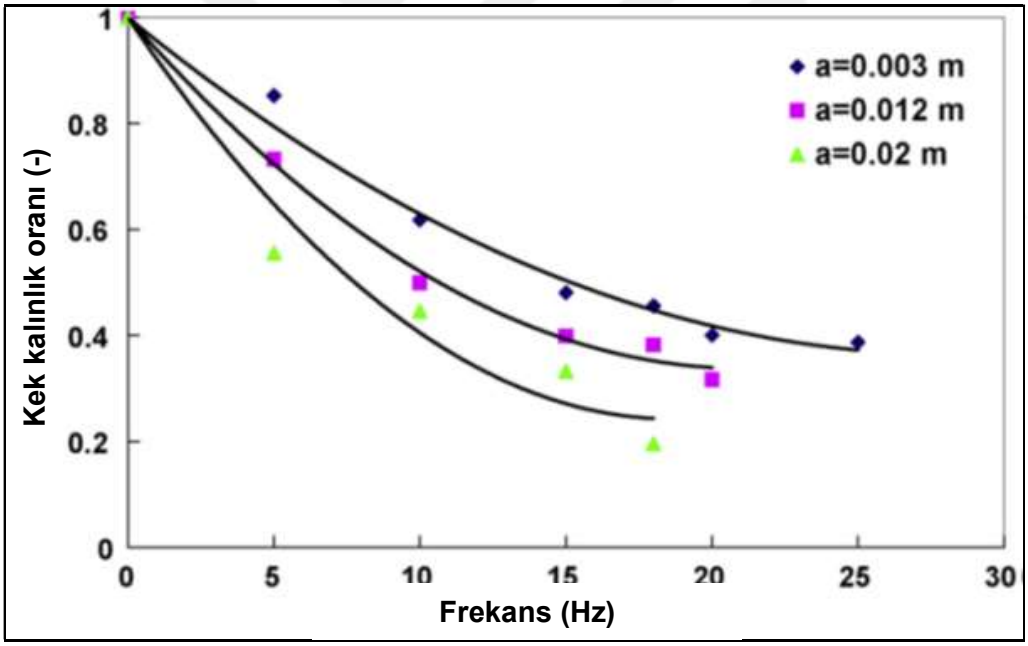
Şekil 2.24 : Titreşim genliğinin filtrasyon akısına etkisi (Gomaa ve diğ., 2011).



Şekil 2.25 : Titreşim genliğinin kek tabakası kalınlığına etkisi (Gomaa ve diğ., 2011).



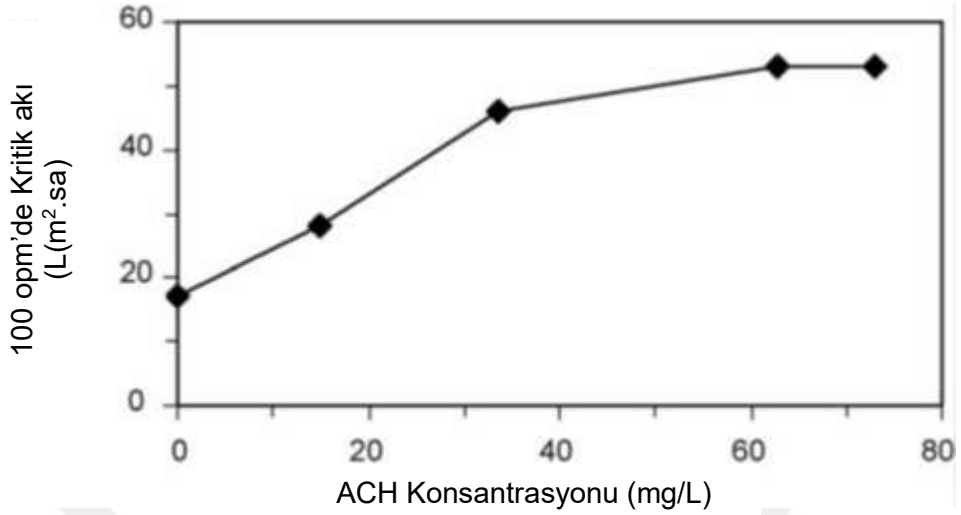
Şekil 2.26 : Titreşim frekansının filtrasyon akısına etkisi (Gomaa ve diğ., 2011).



Şekil 2.27 : Filtrasyon frekansının kek tabakasına etkisi (Gomaa ve diğ., 2011).

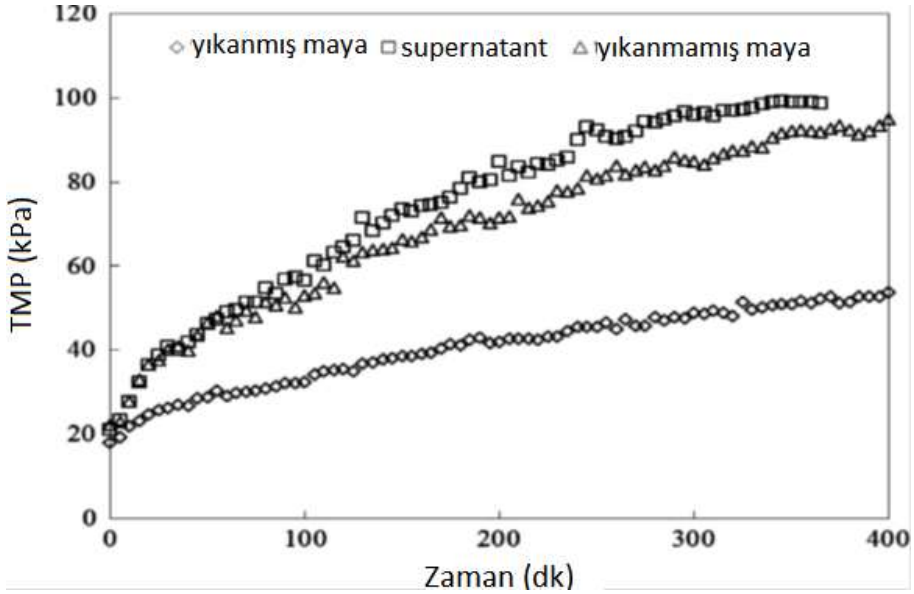
Genkin ve diğ. (2006), maya çözeltisi filtrasyonu boyunca 10 Hz frekansta ve 4 cm genlik ile kullanılan titreşimli dahili ince boşluklu membran sistemlerinde kritik akı değişimini incelemişlerdir. Çalışmada, koagülant ilavesinin kritik akıya önemli derecede etki ettiğini görmüşlerdir. Titreşim frekansı (1,7 Hz) ve genlik (4 cm) sabit tutularak, 34 mg/L alüminyum klorhidrat (ACH) ilavesiyle, kritik akının 17 L/m^2.sa'den 46 L/m^2.sa değerine arttığı bulunmuştur (Şekil 2.28). Kogülant eklenen 1,7 Hz'deki kritik akı ile 6,7 Hz'deki kogülant kullanılmayan kritik akı yaklaşık

aynıdır. Bununla birlikte ACH, kritik akıyı 1,7 Hz'de %170 arttırırken, 10 Hz'de sadece %8 arttırmıştır.

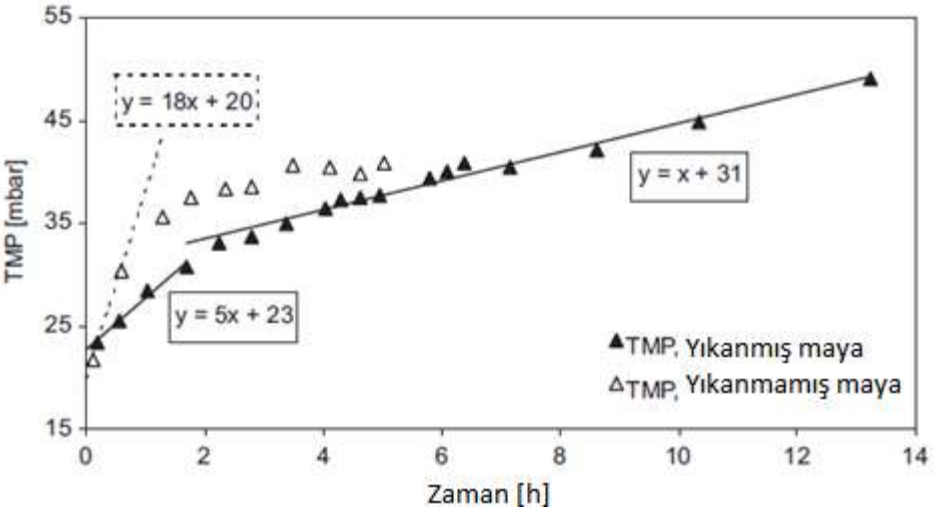


Şekil 2.28 : Koagülant (alüminyum klorhidrat, ACH) ilavesinin kritik akıya etkisi (Genkin ve diğ., 2006).

Li ve diğ. (2013) sabit akı ve enine titreşim ile membran filtrasyonu testi gerçekleştirmişlerdir. Bu deneyler 4 g/L konsantrasyonunda yıkanmış ve yıkanmamış maya ve 1 g/L üst faz ile gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde 18 cm uzunluğunda, 5 mm aralıklı 5x5 lik membran modülü kullanılmış olup, titreşim frekansı 2 Hz ve genlik ise 16 mm olarak uygulanmışıtr. Elde edilen TMP değerleri Şekil 2.29'da gösterilmiştir. Çalışma sonunda elde edilen TMP değerleri yıkanmış maya, yıkanmamış maya ve üst faz için sırasıyla 36 kPa, 73 kPa ve 78 kPa olarak elde edilmiştir. Bu çalışmanın benzeri, Beier ve Jonsson (2008) tarafından yıkanmış ve yıkanmamış maya için (4 g/L konsantrasyonda) 0,7 mm genlik ve 25 Hz frekansta 30 L/m^2-sa akı ile yapılmıştır. Bu iki deneysel çalışma arasındaki farklar, titreşim doğrultusu ve kullanılan membranların por çapıdır. Li ve diğ. (2013) 0,1 mikron boyutunda fiber kullanırken, Beier ve Johnsson (2008) 0,5 mikron por boyutunda ince boşluklu membran kullanmıştır. Beier ve Jonsson (2008)'ın çalışmasında yıkanmış ve yıkanmamış maya çözeltileri için 5 saat sonunda elde edilen TMP değerleri arasında önemli bir fark elde edilmemiştir (Şekil 2.30). Ayrıca TMP değerleri, Li ve diğ. (2013) tarafından ölçülen TMP'nin yaklaşık %10'u civarındadır. Bunun sebebi farklı por boyutlarının kullanılmış olmasıdır.



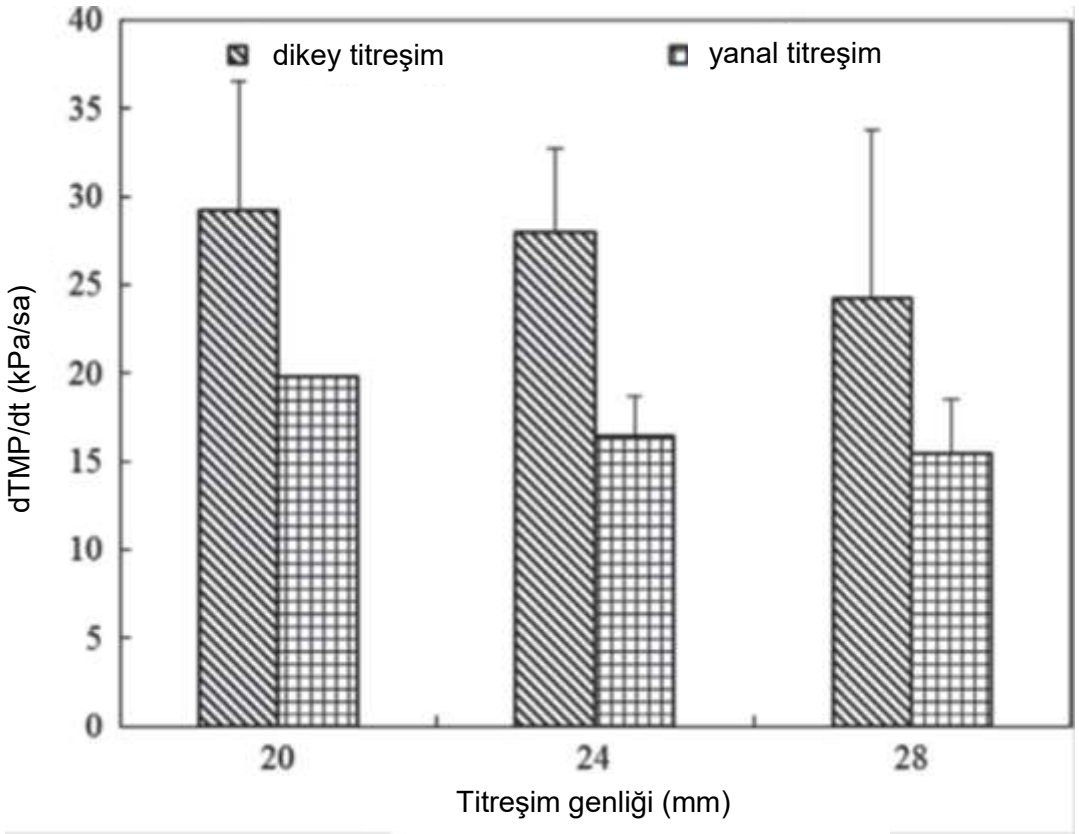
Şekil 2.29 : Yıkanmış ve yıkanmış maya ile üst faz için elde edilen TMP değerleri (yıkanmış ve yıkanmamış maya konsantrasyonu 4 g/L, üst faz konsantrasyonu 1 g/L, 5x5 fiber demeti, fiber uzunluğu 18 cm, akı 25 L/m^2.sa, enine titreşimli, titreşim genliği 16 mm, titreşim frekansı 2 Hz) (Li ve diğ., 2013).



Şekil 2.30 : Yıkanmış ve yıkanmamış maya için yarı kritik akı (30 L/m^2-sa) filtrasyonu boyunca TMP değişimi (4 g/L maya konsantrasyonu, titreşim frekansı 25 Hz, genlik 0,7 mm) (Beier ve Jonsson, 2008).

Li ve diğ. (2013) enine ve boyuna titreşimli sistemleri karşılaştırmıştır. Elde edilen titreşimsiz ve titreşimli (10Hz, 600 OPM) filtrasyon akıları sırasıyla 10 ve 35 L/m^2.sa'dir. Beier ve diğ. (2006), 0,2'den 1,175 mm'ye kadar uygulanan genlik ve 5'den 30 Hz frekansa kadar 5 g/L'lik maya çözeltisi filtrasyonunda %81-325 oranında akı artışları rapor etmiştir. Partikül ve makromolekül halindeki kirleticiler arasındaki farkı görmek için bentonit (inorganik çözünmeyen partikül) ve alginate (model poliakarid) ilavelerinin etkisi de araştırılmıştır. 4 g/L'lik maya çözeltisi için titreşimli

sıvı (10 Hz, 2,5 mm) ile kritik akı 35 L/m^2.sa bulunurken; enine titreşimli membran modülünde yine aynı frekans değerinde 40 L/m^2.sa değeri elde edilmiştir.



Şekil 2.31 : Enine ve boyuna titreşimli membranların tıkanma oranı (5x5 fiber demetleri, fiber uzunluğu 18 cm, akı 25 L/m^2-sa, titreşim frekansı 1Hz ve yıkanmamış maya konsantrasyonu 4 g/L) (Li ve diğ., 2013).

Şekil 2.31, 1 Hz gibi çok düşük bir frekans değerindeki tıkanma oranlarını göstermektedir. Enine titreşim, boyuna titreşimden daha iyi sonuç vermektedir. Enine titreşimle fiber yüzeyinde oluşan hareket ile membran tıkanması azalmaktadır. Buna ilaveten enine titreşimle yüzeyde artan kayma gerilimi ile oluşan vorteksler vasıtasıyla ikinci bir akış kanalı oluşabilmektedir. Fakat enine titreşimli sistemlerde yüksek titreşim ve genlikte oluşan fazla stres ve hareketten dolayı membranın kırılma riski boyuna titreşimli sisteme göre daha fazladır. Oluşan hareketten ileri gelen kırılma riskine başka çalışmalarda da değinilmiştir (Yamanoi ve diğ., 2010; Mezohegyi ve diğ., 2012). Bu yüzden uygulamadan önce hasar potansiyeli incelenmelidir.

2.7 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD)

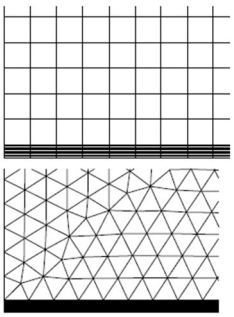
Hesaplamalı akışkanlar mekaniği (CFD); ısı transferi, akışkan akışı veya buna benzer konuları (kimyasal reaksiyonlar) bilgisayar bazlı simülasyonlarla analiz eden bir

sistemdir (Versteeg ve Malalakasekara, 2007). Genel olarak CFD yarı ampirik formülllerden doğru bir şekilde performans tahmini yapar. CFD simülasyonunun maliyeti kullanılan bilgisayar donanımı ve yazılımlarından dolayı yüksek olsa da gerçek ölçekli düzeneklerin maliyetiyle ve elde edilebilecek sonuçlar ile karşılaştırınca simülasyon oldukça düşük kalmaktadır.

Birçok CFD programı üç elementten oluşur. Bunlar ön-işlemci, çözücü ve son-işlemcidir. Ön-işlemci, herhangi bir CFD modellemesinin ilk basamağıdır ve modellenecek objenin geometrisini oluşturur. Üstüste binmeyecek şekilde bölümlendirme (Mesh) kısmı (Şekil 2.32), bilgisayar destekli CAD programlarına benzer şekilde objenin geometrisini parçalara ayırır. Bölümlendirme kısmı bittikten sonra çözüm yapılabilmesi için modellenecek geometrinin sınır koşulları belirlenir. Bu alan koşulları; akışkan özelliklerinin belirtilmesi; çevresel koşullar; fiziksel ve kimyasal olmak üzere; sınır koşullarının sisteme tanıtılmasıyla belirlenir. CFD'deki çözücü nümerik bir algoritmadır. Genellikle 4 farklı ayrıklaştırma yöntemini kullanır. Bu yöntemler aşağıda sıralanmaktadır;

- Sonlu hacim
- Sonlu fark
- Spektral yöntem
- Sonlu eleman

Yöntemlerin esası cebirsel denklemlerin parçalı diferansiyel denklem kullanarak olası değerini bulmaya dayanır.



Şekil 2.32 : Objenin bölümlendirilmesi (Meshing) (Liu, 2007).

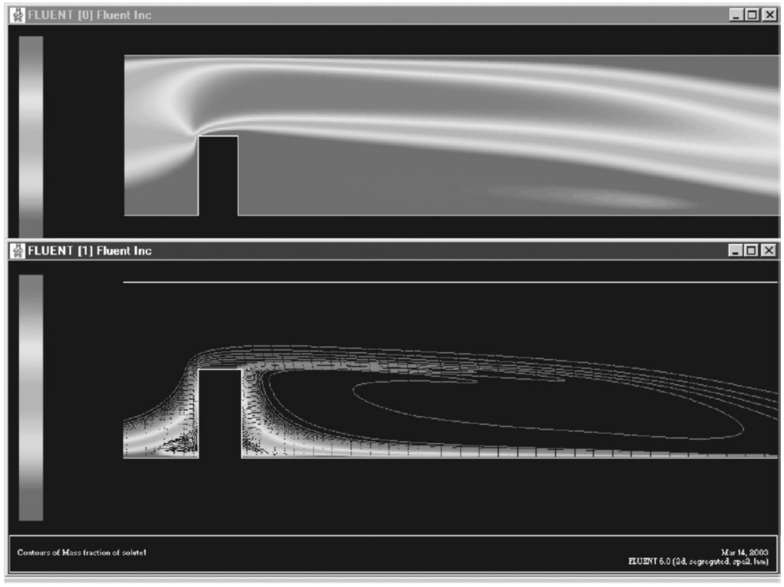
Sonlu hacim yöntemi CFD kod programcıları tarafından en çok kullanılan yöntemdir. Her bölümlenmiş hücreye ait cebirsel denklem kabul edilebilir bir yakınsama elde ettiğinde, bu yakınsama CFD nümerik çözüm olarak kabul edilir. Çözücüyü başarılı

bir biçimde istenilen akışkan problemine uygulayabilmek için üç matematiksel konsepti iyi kavramak gerekir:

- Yakınsama
- Uygunluk
- Tutarlılık

Yakınsama, cebirsel denklemin nümerik sonucunun, bölümlendirilmiş hücrenin boyutunun sıfıra düştüğü zaman yani kesin çözüme yaklaşıldığı duruma en yakın sonucun elde edildiği zamanı gösteren özelliktir.

Uygunluk, nümerik algoritmalar kullanılarak üretilen cebirsel denklemlerin gerçek sistemdeki baskın olan denklemlerle ne kadar benzer olduğunun gösterilmesiyle ilgilidir. Tutarlılık ise, bölümlendirme (mesh) işlemi sonucu oluşabilecek hataların ne oranda azaltılıp en iyi şekilde çözüm yaptırabileceğinin sağlanmasıyla alakalıdır. Aynı anda bütün bu konseptleri CFD çözümlerinde sağlamak zordur. Tutarlı ve doğru bir sonuç daha sonrasında son-işlemciye gönderilir. Son-işlemci çözümü görselleştirecek kısımlardan oluşmaktadır. Bunlar; bir vektörün, gradyanın veya bir hattın basit iki boyutlu grafik çiziminden üç boyutlu resmini çizmeye uzanan yolları içerir (Şekil 2.33) (Liu, 2007).



Şekil 2.33 : Örnek çözdürülmüş bir akış profili (Liu, 2007).

2.7.1 Akışkanlar dinamiği

Akışkanlar dinamiği, yukarıda bahsedildiği üzere akışkanların hareketini incelemektedir. Akışkan sistemlerini temel mühendislik problemlerinde kullanmak

için akışkan davranışlarını matematiksel olarak tanımlamak gerekmektedir. Bu matematiksel denklemlerin oluşturulmasında sistemin daha kolay anlaşılabilmesi için belirli yaklaşımlar gereklidir. Akışkanların genel durum denklemlerini oluşturmak için genel fizik kanunları olan kütlenin korunumu kanunu, momentumun korunumu kanunu ve enerjinin korunumu kanununu belirten denklem takımları kurulmalıdır.

Akışkanlar dinamiği; daha önce de bahsedildiği gibi sıvıların hareketli haldeki durumlarını inceleyen akışkanlar mekaniğinin bir bölümüdür. Newton hareket yasalarına göre bir cisme etkiyen kuvvet; kütlesi ve ivmesinin çarpımıdır. Akışkan mekaniğinde kullanılan denklemler 3 yasa üzerine kurulmuştur (Versteeg ve Malalakasekara, 2007):

- Kütlenin korunumu
- Momentum korunumu
- Enerjinin korunumu

2.7.1.1 Kütle korunumu

Kütlenin korunumu maddenin zaman boyunca kütlesinin değişmemesi olarak tanımlanabilir (2.8).

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla . v = 0 \tag{2.8}$$

Sıkıştırılamayan akışkanlar için yoğunluk sabit kalır ve hacmin değişimi 3 boyutlu olarak aşağıdaki şekilde gösterilebilir (2.9).

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \times \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}\right) = 0 \tag{2.9}$$

Debi ifadesinden; Kütle sistemi, S kabul edilerek kütle korunumu ve sıkıştırılabilir akışkanlar devre dışı bırakılırsa, 2.10 demklemi kapalı bir sisteme dönüşür.

$$S = \rho \times v \tag{2.10}$$

Sonra 2.11 denklemi olarak ifade edilir.

$$\frac{\partial S}{\partial x} = 0 = \frac{\partial \rho}{\partial x} \times v + \rho \times \frac{\partial v}{\partial x} \tag{2.11}$$

$$\frac{\partial S}{\partial y} = 0 = \frac{\partial \rho}{\partial y} \times v + \rho \times \frac{\partial v}{\partial y}$$

$$\frac{\partial S}{\partial z} = 0 = \frac{\partial \rho}{\partial z} \times v + \rho \times \frac{\partial v}{\partial z}$$

Eksenel yoğunluk değişimi 0 olacağından; 3 eksen için de toplam değişim aşağıdaki (Denklem 2.12) şekilde belirlenir (Versteeg ve Malalakasekara, 2007).

$$0 = \rho \times \frac{\partial v}{\partial x} + \rho \times \frac{\partial v}{\partial y} + \rho \times \frac{\partial v}{\partial z} \tag{2.12}$$

2.7.1.2 Momentum korunumu

Momentum korunumlu bir vektörel niceliktir ve bir maddenin kütlesi ile hızının çarpımı olarak verilmektedir. Momentumun korunumu kapalı bir sistemde denklem 2.13'da verilmektedir.

$$p = m \times v \tag{2.13}$$

Bu ifadenin zamana göre türevi alındığında aşağıdaki denklem (2.14) elde edilir.

$$\sum F = \frac{dp}{dt} = m \times \frac{dv}{dt} + \frac{dm}{dt} \times v \tag{2.14}$$

Kütlenin zamana göre değişimi 0 (sıfır) kabul edildiğinde toplam kuvvet, aşağıdaki denklem 2.15 ile ifade edilir (Versteeg ve Malalakasekara, 2007).

$$\sum F = \frac{dp}{dt} = m \times \frac{dv}{dt} \tag{2.15}$$

2.7.1.3 Enerji korunumu

Kapalı bir sistemde, potansiyel enerjinin kinetik enerjiye veya kinetik enerjinin potansiyel enerjiye dönüşümünde, her birindeki artış, diğerindeki azalmaya eşittir. Kapalı bir sistemde enerji korunacağından sabit bir değeri vardır. Dolayısıyla enerjideki değişim sıfırdır. Enerji vardan yok, yoktan var edilemez. Ancak farklı enerjilere dönüşerek korunur.

$\Delta E = \Delta T + \Delta U$

$\Delta T = -\Delta U$

T kinetik enerji, U potansiyel enerjidir.

$T_2 - T_1 = U_1 - U_2$ veya diğer bir şekilde ifade edilirse,

$T_1 + U_1 = T_2 + U_2$ enerji korunum yasası olur.

Enerji korunumu kanunun akışkanlar dinamiği denklemlerinde ifadesi ısı transferlerini baz alır. Çünkü momentum korunumu denklemleri kinetik ve potansiyel enerjinin korunumunu kapsamaktadır (Versteeg ve Malalakasekara, 2007).

2.7.2 Akış hareketlerinin korunum kanunları

Bu bölümde kütle, momentum ve enerji korunumu temel ilkelerinden akışkan akışı için matematik temeli geliştirilmiştir. Bu bağlamda ele alınan başlıca konular aşağıda sıralanmaktadır:

- Kartezyen (x, y, z) koordinatlarında akışları yöneten kısmi türevli diferansiyel denklemler (PDE) sisteminin türevi
- Termodinamik durum denklemleri
- Viskoz gerilmelerinin Newtonian modeli
- Yöneten PDE ve taşınım denklemi tanımı arasındaki benzerlikler
- Sonlu bir zaman aralığında taşınım denklemlerinin birleşik formları ve sonlu kontrol hacmi
- Fiziksel davranışların 3 kategori içerisinde sınıflandırılması: Eliptik, parabolik ve hiperbolik
- Her kategori için uygun sınır şartları
- Akışkan akışlarının sınıflandırılması
- Viskoz akışkan akışları için yardımcı koşullar
- Sınır şartıyla problemlerin yüksek Reynolds sayısı ve yüksek Mach sayısı akışlarında tanımlanması (Versteeg ve Malalakasekara, 2007)

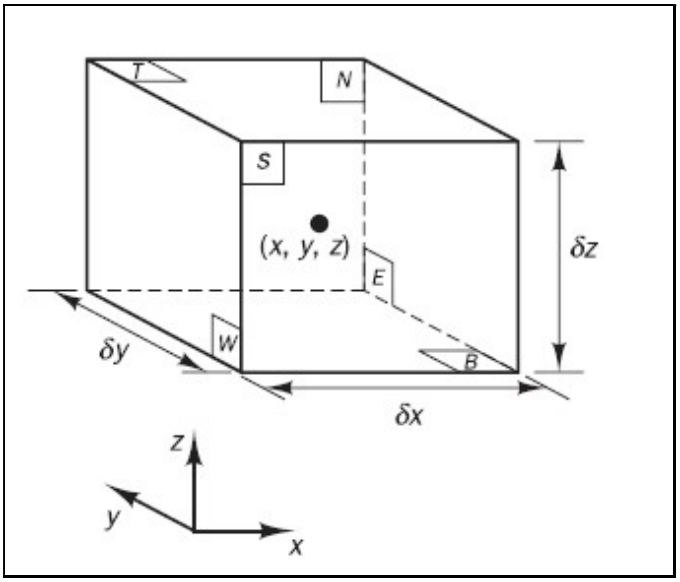
2.7.3 Sıvı akışındaki temel korunum denklemleri

Akışkan akışının korunum denklemleri fizik koruma kanunlarının matematiksel ifadelerini temsil eder:

- Bir akışkanın kütlesi korunur.
- Momentum değişim oranı, bir akışkan parçacığı üzerindeki kuvvetlerin toplamına eşittir (Newton'un 2. kanunu).
- Enerji değişim oranı, ısı ilavesi oranının ve bir akışkan parçacığı üzerinde yapılan işin oranının toplamına eşittir (Termodinamiğin 1. kanunu).

Akışkan bir süreklilik olarak kabul edilecektir. Makroskobik ölçek boyutunda (>1μm) akışkan akışlarının analizi için maddenin moleküler yapısı ve moleküler hareketler göz ardı edilebilir. Zaman türevleri, boşluk, sıcaklık, yoğunluk, hız ve basınç gibi makroskobik özellikleri açısından akışkanın davranışı tanımlanmıştır. Bu, ortalamının üzerindeki uygun büyüklüğe sahip molekül sayıları olarak düşünülebilir. Mümkün olan en küçük akışkan elementi, bir akışkan parçacığı veya akışkanda bir noktanın makroskobik özellikleri ayrı ayrı moleküller tarafından etkilenmez.

Bu kadar küçük bir akışkan elementi $\delta x, \delta y \; ve \; \delta z$ kenarları ile Şekil 2.34 'daki gibi gösterilebilir.



Şekil 2.34 : Koruma kanunları için akışkan elementi (Versteeg ve Malalakasekara, 2007).

Altı yüz Kuzey (N), Güney (S), Doğu (E), Batı (W), Üst (T) ve Alt (B) olarak etiketlenmiştir. Pozitif yönler boyunca koordinat eksenleri de verilmiştir. Konum (x, y, z) de elementin merkez yeri saptanmıştır. Sınırları boyunca akışkan akışı nedeniyle ve uygun olduğunda elementin içindeki kaynakların davranışı nedeniyle akışkan elementinin; kütle, momentum ve enerji değişikliklerinin sistematik bir hesabı akışkan akışı denklemlerine yol açar.

Bütün akışkan özellikleri boşluk ve zaman fonksiyonlarıdır. Bu yüzden sırasıyla yoğunluk, basınç, sıcaklık ve hız vektörleri için $\rho(x,y,z,t)$, $p(x,y,z,t)$, $T(x,y,z,t)$ ve $u(x,y,z,t)$'yu yazmak gerekir. Gereksiz notasyonu önlemek için bu vektörle, boşluk koordinatları ve zamana bağlı olarak açık bir şekilde belirtilmemiştir. Örneğin, bir akışkan elementin t zamanında merkezdeki yoğunluğu ρ ile gösterilir veya x eksenindeki t zamanında olan basınç $\frac{\partial p}{\partial x}$ ile gösterilir. Bu uygulama diğer bütün akışkan özellikleri için de takip edilir.

Elementlerin çok küçük boyutlu olması göz önüne alındığında Taylor serisi açılımının ilk iki terimi yüzeydeki akışkan özelliklerini doğrulamak için yeterlidir. Bu nedenle örneğin, element merkezine $\frac{1}{2}\delta x$ kadar uzaklıkta olan W ve E yüzeylerindeki basınç aşağıdaki gibi ifade edilebilir (2.16) (Versteeg ve Malalakasekara, 2007).

$$p - \frac{\partial p}{\partial x}\frac{1}{2}\delta x \qquad ve \qquad p + \frac{\partial p}{\partial x}\frac{1}{2}\delta x \tag{2.16}$$

2.7.3.1 Üç boyutlu kütle korunumu

Kütle korunum denkleminin türevinde birinci adım, akışkan element için bir kütle dengesidir:

Akışkan elementte kütle artış oranı	=	Akışkan element içinde kütle akış

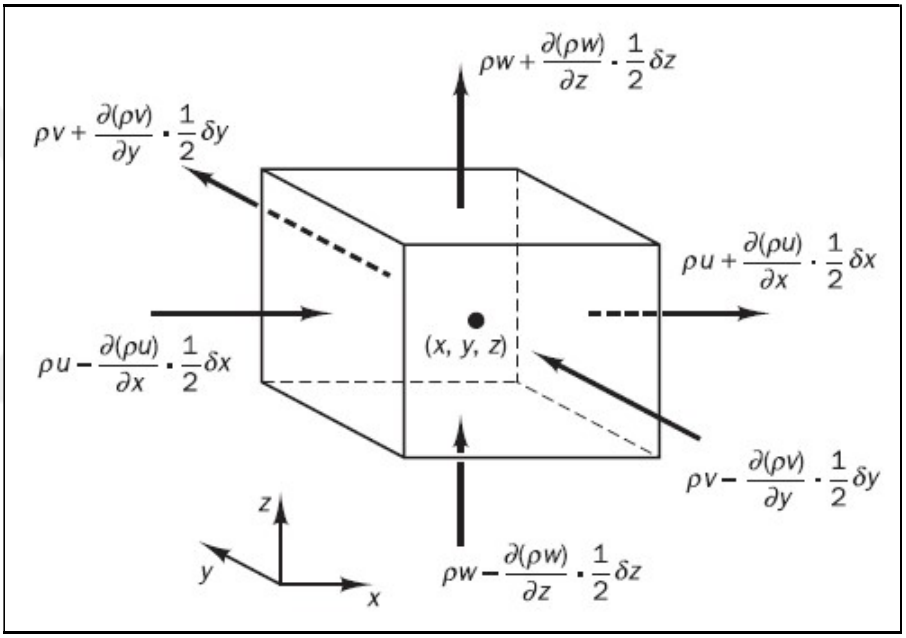
Akışkan elementte kütle artış oranı (2.17) ile ifade edilir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\delta x\delta y\delta z) = \frac{\partial \rho}{\partial t}\delta x\delta y\delta z \tag{2.17}$$

Elementin bir yüzü boyunca kütle debisinin de açıklanması gerekir. Şekil 2.35'den görülebileceği gibi sınırlar boyunca elementin içindeki kütle akışının net oranı (2.18) olarak verilebilir.

$$\left(\rho u - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x}\frac{1}{2}\delta x\right)\delta y\delta z - \left(\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x}\frac{1}{2}\delta x\right)\delta y\delta z + \left(\rho v - \frac{\partial(\rho v)}{\partial x}\frac{1}{2}\delta y\right)\delta x\delta z - \left(\rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial x}\frac{1}{2}\delta y\right)\delta x\delta z + \left(\rho w - \frac{\partial(\rho w)}{\partial x}\frac{1}{2}\delta z\right)\delta x\delta y - \left(\rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\partial x}\frac{1}{2}\delta z\right)\delta x\delta y \tag{2.18}$$

Elementin içindeki direkt akışlar element içinde kütle artışı sağlar ve pozitif işaret alır. Elementten ayrılan akışlar ise negatif işaret alır.



Şekil 2.35 : Akışkan elementin içinde ve dışında kütle akışları.

Elementin içindeki kütle artış oranı; elementin yüzleri boyunca, element içindeki kütle akış net oranına eşittir. Ortaya çıkan kütle dengesinin bütün terimleri eşittir ve denklemin sol tarafına dizilmiştir ve ifade element hacmi (δxδyδz) tarafından bölünmüştür. Böylece (2.19) elde edilmiş olur.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \tag{2.19}$$

Kompakt vektör gösteriminde (2.20) kullanılır.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathrm{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \tag{2.20}$$

Sıkıştırılabilir bir akışkan içinde bir nokta için yukarıdaki denklem; kararsız, 3 boyutlu kütle korunumu veya süreklilik denklemidir. Sol taraftaki ilk terim yoğunluğun zamana göre değişimi oranını ifade etmektedir. İkinci terim ise element sınırları boyunca elementin dışındaki kütlenin net akşını tanımlamaktadır ve iletme terimi olarak adlandırılmaktadır.

Sıkıştırılamayan bir akışkan için yoğunluk sabittir ve denklem aşağıdaki halini alır.

div **u** = 0

Diğer bir gösterimle (2.21) olarak da ifade edilebilir (Versteeg ve Malalakasekara, 2007).

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \tag{2.21}$$

2.7.3.2 Bir akışkan parçacığını takiben ve bir akışkan elementi için değişim oranları

Momentum ve enerji korunum kanunları bir akışkan parçacığı özelliklerinin değişikliğiyle ilgili bilgi vermektedir. Buna Lagrangian yaklaşımı denir. Parçacığın her özelliği parçacığın konumu (x, y, z) ve zamanın bir fonksiyonudur. Birim kütle başına bir özelliğin değeri $\emptyset$ ile ifade edilirse, bir akışkan parçacığının zamana göre toplam veya asli türevi (2.22) ile gösterilebilir:

$$\frac{D\emptyset}{Dt}=\frac{\partial\emptyset}{\partial t}+\frac{\partial\emptyset}{\partial x}\frac{\partial x}{\partial t}+\frac{\partial\emptyset}{\partial y}\frac{\partial y}{\partial t}+\frac{\partial\emptyset}{\partial z}\frac{\partial z}{\partial t} \tag{2.22}$$

Bir akışkan parçacığı akışı takip eder. Bu yüzden $dx/dy = u,\ dy/dt = v\ ve\ \ dz/dt = w$ olur. Böylece $\emptyset$ nin asli türevi (2.23) şeklinde elde edilir.

$$\frac{D\emptyset}{Dt}=\frac{\partial\emptyset}{\partial t}+u\frac{\partial\emptyset}{\partial x}+v\frac{\partial\emptyset}{\partial y}+w\frac{\partial\emptyset}{\partial z}=\frac{\partial\emptyset}{\partial t}+\mathbf{u}\,.\,\text{grad}\,\emptyset \tag{2.23}$$

$D\emptyset/Dt$ birim kütle başına özelliğin ($\emptyset$) değişim oranını tanımlar. Langrangian yaklaşımı ele alınarak akışkan akış hesaplamaları için nümerik metotların geliştirilmesi mümkündür.

Kütle korunum denkleminde olduğu gibi birim hacimde değişim oranı için denklemlerin geliştirilmesiyle ilgilenilmiştir. Bir akışkan parçacığı için birim hacimde

özelliğin ($\emptyset$) değişim oranı, $D\emptyset/Dt$ ve yoğunluğun (ρ) bileşkesine göre aşağıda verildiği gibidir (2.24).

$$\rho \frac{D\emptyset}{Dt} = \rho \left(\frac{\partial \emptyset}{\partial t} + \mathbf{u} \,.\, \text{grad}\, \emptyset \right) \tag{2.24}$$

Akışkan akış hesaplama için korunum kanunlarının en kullanışlı formu, boşlukta sabit olan bir akışkan elementi için bir akış özelliğinin değişimiyle ilgilidir. Bir akışkan elementinin $\emptyset$ asli türevi ile $\emptyset$ değişim oranı geliştirilmiştir.

Kütle korunum denklemi, korunmuş miktar olarak birim hacim başına kütle içerir. Bir akışkan elementi için zamanla yoğunluğun değişim oranının ve kütle korunum denklemindeki iletme teriminin toplamı aşağıdaki şekilde ifade edilir (2.25).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) \tag{2.25}$$

İsteğe bağlı korunan bir özellik için bu terimlerin genellemesi aşağıda verilmiştir (2.26).

$$\frac{\partial (\rho \emptyset)}{\partial t} + \text{div}(\rho \emptyset \mathbf{u}) \tag{2.26}$$

Bu denklem birim hacim başına $\emptyset$ nin zamanla değişim oranınıyla birim hacim başına akışkan elementinin dışındaki $\emptyset$ nin net akışının toplamını ifade etmektedir. $\emptyset$ nin asli türeviyle olan ilişkisini göstermek için denklem yeniden aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$\frac{\partial (\rho \emptyset)}{\partial t} + \text{div}(\rho \emptyset \mathbf{u}) = \rho \left[\frac{\partial \emptyset}{\partial y} + \mathbf{u} \,.\, \text{grad}\, \emptyset \right] + \emptyset \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) \right] = \rho \frac{D\emptyset}{Dt}$$

Kütle korunumu avantajı sayesinde $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0$ dır. Yukarıdaki denklem genel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

Akışkan elementin $\emptyset$ sinin artış oranı	+	Akışkan elementin dışındaki $\emptyset$ nin akışının net oranı	=	Bir akışkan parçacığı için $\emptyset$ nin artış oranı

Momentum denkleminin bileşenlerini, enerji denklemini, ayrıca birim hacim/değişim oranlarını aşağıdaki gibi tanımlamak mümkündür (Çizelge 2.3).

Çizelge 2.3 : Momentum denklemi bileşenleri ve enerji denklemleri.

x – momentum	U	$\rho\frac{Du}{Dt}$	$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u\mathbf{u})$
y – momentum	V	$\rho\frac{Dv}{Dt}$	$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v\mathbf{u})$
z – momentum	W	$\rho\frac{Dw}{Dt}$	$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w\mathbf{u})$
enerji	E	$\rho\frac{DE}{Dt}$	$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \text{div}(\rho E\mathbf{u})$

Değişim oranının korunumlu ve korunumsuz formu, bir fiziksel miktarın korunumunu ifade etmek için alternatif olarak kullanılabilir (Versteeg ve Malalakasekara, 2007).

2.7.3.3 Üç boyutlu momentum denklemi

Newton'un ikinci kanunu; bir akışkan parçacığın momentum değişim oranının, parçacık üzerindeki kuvvetlerin toplamına eşit olduğunu belirtmektedir:

Akışkan parçacığın momentum artış oranı	=	Akışkan parçacık üzerindeki kuvvetlerin toplamı

Bir akışkan parçacığın birim hacim başına x-, y- ve z-momentum artış oranları aşağıda verildiği gibidir (2.27).

$$\rho\frac{Du}{Dt} \qquad \rho\frac{Dv}{Dt} \qquad \rho\frac{Dw}{Dt} \tag{2.27}$$

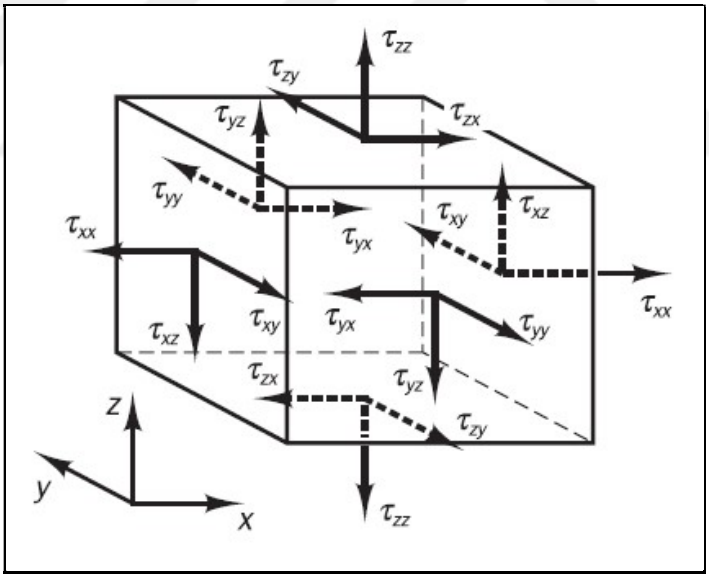
Akışkan parçacıklar üzerindeki kuvvetler aşağıda sıralanmaktadır:

- Yüzeysel kuvvetler
- Basınç kuvvetleri
- Viskoz kuvvetler
- Yerçekimi kuvveti

- Gövde kuvvetleri
- Merkezkaç kuvveti
- Koriyolis kuvveti
- Elektromanyetik kuvvet

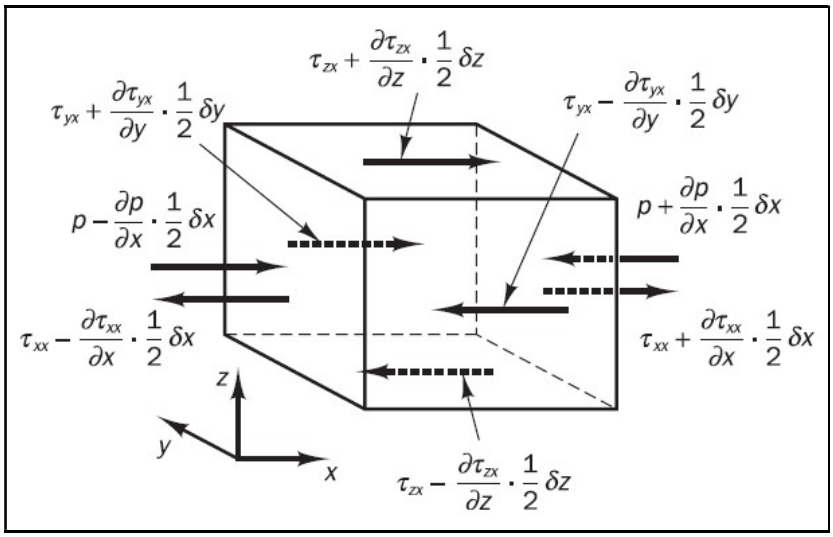
Momentum denkleminde, ayrı terimler olarak yüzeysel kuvvetlerden kaynaklanan katkıları vurgulamak yaygın bir uygulamadır ve kaynak terimleri olarak gövde kuvvetlerinin etkilerini de içermektedir.

Bir akışkan elementin gerilme durumu Şekil 2.36'de gösterilen, basınç terimi ve dokuz viskoz gerilme bileşenleri tarafından tanımlanmıştır. p ile ifade edilen basınç normal bir gerilmedir. Viskoz gerilmeler ise τ ile ifade edilmiştir. Her zamanki son ek gösterimi τ_{ij} viskoz gerilmelerin yönünü belirtmek için kullanılır. τ_{ij} deki i ve j, gerilme bileşeninin i-yönüne dik bir yüzey üzerinde j-yönünde hareketini belirtmektedir.



Şekil 2.36 : Akışkan elementin üç yüzeyindeki gerilme bileşenleri (Versteeg ve Malalakasekara, 2007).

Öncelikli olarak kuvvetlerin x-bileşenlerinden dolayı Şekil 2.37'da gösterilen basınç (p) ve gerilme bileşenleri (τ_{xx} , τ_{yx} ve τ_{zx}) dikkate alınmıştır. Yüzey gerilmesinden kaynaklanan kuvvetin büyüklüğü, gerilme ve alan bileşkesidir. Kuvvetler pozitif işarete sahip koordinat ekseninin yönü ile hizalanmıştır ve ters yönde iken eksi işaretlidir. x-yönündeki net kuvvet, akışkan elemente bu yönde etki eden kuvvet bileşenlerinin toplamdır.



Şekil 2.37 : x-yönünde gerilme bileşenleri.

Yüzeyler çiftinde (E,W) (2.28) ile ifade edilir.

$$\begin{aligned}\left[\left(p - \frac{\partial p}{\partial x}\frac{1}{2}\delta x\right) - \left(\tau_{xx} - \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x}\frac{1}{2}\delta x\right)\right]\delta y\delta z \\ + \left[-\left(p + \frac{\partial p}{\partial x}\frac{1}{2}\delta x\right) + \left(\tau_{xx} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x}\frac{1}{2}\delta x\right)\right]\delta y\delta z \\ = \left(-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x}\right)\delta x\delta y\delta z\end{aligned} \tag{2.28}$$

Yüzeyler (N,S) çiftinde x-yönündeki net kuvvet (2.29) ile gösterilir.

$$-\left(\tau_{yx} - \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y}\frac{1}{2}\delta y\right)\delta x\delta z + \left(\tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y}\frac{1}{2}\delta y\right)\delta x\delta z = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y}\delta x\delta y\delta z \tag{2.29}$$

Son olarak, T ve B yüzeylerinde x-yönündeki net kuvvet aşağıda verildiği gibidir (2.30).

$$-\left(\tau_{zx} - \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}\frac{1}{2}\delta z\right)\delta x\delta y + \left(\tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}\frac{1}{2}\delta z\right)\delta x\delta y = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}\delta x\delta y\delta z \tag{2.30}$$

Bu yüzeysel gerilmelerden dolayı akışkan üzerindeki birim hacim başına toplam kuvvet yukarıdaki denklemlerin toplamlarının hacim ($\delta x\delta y\delta z$) ile bölünmesine eşittir (2.31):

$$\frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \tag{2.31}$$

Daha ayrıntılı olarak gövde kuvvetleri dikkate alınmadan, bunların genel etkisi birim zamanda birim hacim başına x-momentumunun bir kanyağı (S_{Mx}) tanımlanarak dâhil edilebilir.

Momentum denkleminin x-bileşeni; akışkan parçacığın x-momentum değişim oranının, yüzeysel gerilmelerden dolayı elementin x-yönündeki toplam kuvvette artı kaynaklardan dolayı x-momentumunun artış oranına eşitliğinden (2.32) bulunmuştur (Versteeg ve Malalakasekara, 2007).

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \tag{2.32}$$

Momentum denkleminin y-bileşeni (2.33) ile ifade edilir.

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \tag{2.33}$$

Momentum denkleminin z-bileşeni (2.34) ile gösterilir.

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p + \tau_{yz})}{\partial z} + S_{Mz} \tag{2.34}$$

2.7.4 Durum denklemleri

Üç boyutlu bir akışkan hareketi 5 tane kısmi türevli diferansiyel denklemli bir sistem ile tanımlanmıştır. Bu denklemler; kütle korunumu, x-, y- ve z-momentum denklemleri ve enerji denklemleridir. Bilinmeyenler arasında 4 termodinamik değişken vardır: ρ, p, i ve T. Termodinamik değişkenler arasındaki ilişkiler, termodinamik denge varsayımı ile elde edilebilir. Akışkan hızları büyük olabilir. Ancak bir akışkan parçacığı özellikleri bir yerden diğer bir yere hızla değişse bile genellikle yeterince küçüktür. Akışkan çok hızlı bir şekilde yeni şartlara termodinamik açıdan uyum sağlar. Böylece akışkan her zaman termodinamik dengede kalır. Tek istisna, güçlü şok dalgalarıyla belirli akımlardır.

Termodinamik dengede, sadece iki değişken tarafından bir maddenin durumu tanımlanabilir. ρ ve T değişkenleri kullanılarak, basınç (p) ve özgül içsel enerji (i) durum denklemleri aşağıdaki gibi olur (2.35).

$$p = p(\rho, T) \qquad ve \qquad i = i(\rho, T) \tag{2.35}$$

İdeal bir gaz için aşağıdaki durum denklemi yazılabilir (2.36).

$$p = \rho RT \qquad ve \qquad i = C_v T \tag{2.36}$$

Termodinamik denge varsayımı, iki termodinamik durum değişkenleri dışında hepsini elimine etmektedir. Sıkıştırılabilir akışkanların akışında durum denklemleri, bir taraftan enerji denklemi, diğer taraftan kütle korunumu ve momentum denklemleri arasında bağlantı sağlamaktadır. Bu bağlantı, akış alanında sıcaklık ve basınç değişimlerinin bir sonucu olarak olası yoğunluk değişimleri aracılığıyla ortaya çıkmaktadır.

Düşük hızlarda akan sıvılar ve gazlar, sıkıştırılamaz akışkanlar gibi davranır. Yoğunluk değişimleri olmadan enerji denklemi, kütle korunumu ve momentum denklemleri arasında bir bağlantı yoktur. Akış alanı genellikle sadece kütle korunumu ve momentum denklemleri dikkate alınarak çözülebilir. Eğer problem ısı transferi içeriyorsa; enerji denkleminin, diğerlerinin yanı sıra çözülmesi gerekir (Versteeg ve Malalakasekara, 2007).

2.7.5 Newtonian akışlar için navier-stokes denklemleri

Korunum denklemleri daha bilinmeyen viskoz gerilme T_{ij} gibi bileşenleri içerir. Akışkan akışı için en kullanışlı korunum denklemleri, viskoz gerilmeleri T_{ij} için uygun bir model tanıtımı ile elde edilmiştir. Birçok akışkan akışında viskoz gerilmeleri lokal deformasyon oranının veya gerilme oranının işlevi olarak ifade edilebilir. Üç boyutlu akışta lokal deformasyon oranı, lineer deformasyon oranı ve hacimsel deformasyon oranından oluşmuştur.

Akışkan elementin lineer deformasyon oranı üç boyutlu düzlemde dokuz tane bileşene sahiptir. Bu bileşenlerin üç tanesi bir boyutta olan deformasyonlardır. Diğer altı tanesi ise iki boyutu kapsayan deformasyonlardır. Bunların gösterimi ise aşağıdaki gibidir (2.37).

$$S_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad S_{yy} = \frac{\partial v}{\partial x} \quad S_{zz} = \frac{\partial w}{\partial x} \tag{2.37}$$

$$S_{xy} = S_{yx} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)$$

$$S_{yz} = S_{zy} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right)$$

$$S_{xz} = S_{zx} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)$$

Hacimsel deformasyon ise denklem (2.38) ile gösterilir.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = div\, \boldsymbol{u} \tag{2.38}$$

Newtonian akışta viskoz gerilmeleri deformasyon oranı ile orantılıdır. Orantılanabilir iki sabiti içeren sıkıştırılabilir akışların Newton viskozite kanundaki üç boyutlu formu: Birinci (dinamik) viskozite, μ, lineer deformasyonla ilişkili gerilim; ikinci viskozite, λ, hacimsel deformasyonla ilişkili gerilimdir. Dokuz viskoz gerilim bileşeni aşağıda verilmektedir (2.39).

$$\tau_{xx} = 2\mu\frac{\partial u}{\partial x} + \lambda\, div\, \boldsymbol{u} \quad \tau_{yy} = 2\mu\frac{\partial v}{\partial y} + \lambda\, div\, \boldsymbol{u} \quad \tau_{zz} = 2\mu\frac{\partial w}{\partial z} + \lambda\, div\, \boldsymbol{u} \tag{2.39}$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) \quad \tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right) \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right)$$

İkinci viskozite λ hakkında fazla bir bilgi bulunmamaktadır. Çünkü bu viskozitenin etkisi pratikte küçüktür. Gazlar için iyi bir çalışma yaklaşımı $\lambda = -\frac{2}{3}\mu$ değeri alınarak elde edilebilir. Sıvılar sıkıştırılamaz. Bu nedenle kütle korunum eşitliği div **u** = 0 ve viskoz gerilimleri lokal lineer deformasyon oranın iki katıyla dinamik viskozitenin çarpımıdır.

Yukarıdaki kayma gerilimlerinin momentum denklemlerine eklenmesiyle Navier – Stokes denklemleri elde edilmektedir (2.40).

$$\rho\frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left[2\mu\frac{\partial u}{\partial x} + \lambda\, div\, \boldsymbol{u}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\mu\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\mu\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)\right] + S_{Mx} \tag{2.40}$$

$$\rho\frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left[\mu\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[2\mu\frac{\partial v}{\partial y} + \lambda\, div\,\boldsymbol{u}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\mu\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)\right] + S_{My}$$

$$\rho\frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}\left[\mu\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\mu\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[2\mu\frac{\partial w}{\partial z} + \lambda\, div\,\boldsymbol{u}\right] + S_{My}$$

Genellikle viskozite gerilim terimlerini aşağıdaki gibi düzenlemek kullanışlıdır (2.41).

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial x}\left[2\mu\frac{\partial u}{\partial x} + \lambda\, div\,\boldsymbol{u}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\mu\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\mu\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)\right] &= \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial z}\right) \\ &+ \left[\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu\frac{\partial w}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial x}(\lambda\, div\,\boldsymbol{u})\right] \\ &= div(\mu\, grad\, u) + [S_{Mx}]\end{aligned} \tag{2.41}$$

y ve z düzlemindeki denklemlerde viskoz gerilimleri benzer şekilde değiştirilebilir.

Navier – Stokes denklemleri sonlu hacim metodu gelişimi için aşağıdaki gibi yazılabilir (2.42).

$$\begin{aligned}\rho\frac{Du}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + div(\mu\, grad\, u) + S_{Mx} \\ \rho\frac{Dv}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + div(\mu\, grad\, v) + S_{My} \\ \rho\frac{Dw}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial z} + div(\mu\, grad\, w) + S_{Mz}\end{aligned} \tag{2.42}$$

İç enerji denkleminde viskoz gerilimi için Newtonian model kullanılırsa aşağıdaki denklem elde edilir (2.43).

$$\rho\frac{Di}{Dt} = -p\, div\,\boldsymbol{u} + div(k\, grad\, T) + \emptyset + S_i \tag{2.43}$$

Bu iç enerji denkleminde viskoz gerilimler sebebiyle oluşan bütün etkiler dağılım fonksiyonu $\emptyset$ ile tanımlanmaktadır. Bu dağılım fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilebilir (2.44).

$$\emptyset = \mu\left\{2\left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2\right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right)^2\right\} + \lambda(div\ \boldsymbol{u})^2 \quad (2.44)$$

Dağılım fonksiyonu sadece karesi alınmış terimleri içerdiğinden ve akışkan partikülü üzerindeki deformasyondan kaynaklanan iç enerji kaynağını temsil ettiğinden negatif değildir (Versteeg ve Malalakasekara, 2007).

2.7.6 Sıvı akış denklemlerinin sınıflandırılması

İkiden fazla bağımsız değişkenli birinci dereceden kısmi türevli diferansiyel denklemler sistemi matriks formuna benzer çıkarılmıştır. İkinci dereceden kısmi türevli diferansiyel denklem veya birinci ve ikinci dereceden kısmi türevli diferansiyel denklemlerin karışımı bu metot ile sınıflandırılabilir. Metodun ilk basamağı her bir ikinci dereceden denklemin birinci dereceden denklemler olarak ifade edildiği ek değişkenler bilgisini içerir. Seçilen ek değişkenlerin çıkan matrisi tekil olmayan formda tutması önemlidir.

Navier-Stokes denklemi ve indirgenmiş formları bu matris yaklaşımı kullanılarak sınıflandırılabilir. Çizelge 2.4'da ana sonuçlar verilmiştir.

Çizelge 2.4 : Akışkan akışının temel kategorilerinin sınıflandırılması.

	Düzenli akış	**Düzensiz akış**
Viskoz akış	Eliptik	Parabolik
Viskoz olmayan akış	M < 1, eliptik M > 1, hiperbolik	Hiperbolik
İnce kesme tabakalar	Parabolik	Parabolik

Çizelge 2.4'daki sınıflandırmalar akış denklemlerinin şekilsel olarak sınıflandırılmasıdır. Pratikte birçok akışkan akışı karmaşık bir şekilde davranır. Kararlı

Navier-Stokes denklemleri ve enerji denklemleri şekil olarak eliptiktir. Buna karşın kararsız denklemler paraboliktir.

Viskoz olmayan akış denklemlerinin matematiksel sınıflandırılması, yüksek dereceden terimlerin olmaması sebebiyle Navier-Stokes ve enerji denklemlerinden farklıdır. Ortaya çıkan denklemin sınıflandırılması Mach sayısına (M) göre yapılır. Viskoz olmayan akışların eliptik yapısı, Mach sayısının basıncın etkisiyle 1'in altında olmasından kaynaklanmaktadır. Eğer M<1 ise, akış hızından çok daha hızlı olan ses hızında basınç düzensiz olarak yayılabilir. Fakat eğer M>1 olursa akışkan hızı düzensizliklerin yayılma hızından daha büyük olur ve basınç akıntıya karşı yöndeki olaylara etki edemez. Etki bölgesinde kısıtlamalar hiperbolik olgunun önemli bir özelliğidir. Bu nedenle süpersonik viskoz olmayan akış denklemleri hiperboliktir.

İnce kesme tabaka akışlarında akış yönündeki (x- ve z-) bütün hız türevleri, bunların akışa dik yönüne (y-) göre oldukça küçüktür. Sınır tabakaları, karışım tabakaları ve girdaplar tam gelişmiş kanal akışlarıyla birlikte bu kategoridedir. Bu koşullarda korunum denklemleri sadece bir tane difüzyon terimi içermektedir ve bu nedenle parabolik olarak sınıflandırılmaktadır (Versteeg ve Malalakasekara, 2007).

2.7.7 Ayrıklaştırma yöntemleri

Navier-Stokes denklemlerinin nümerik çözümlerine ulaşabilmek için birçok metot geliştirilmiştir. Bu ayrıklaştırma yöntemleri; sonlu fark, sonlu eleman, sonlu hacim ve spektral metottur (Blazek, 2001).

2.7.7.1 Sonlu eleman yöntemi

Sonlu eleman yöntemi Euler/Navier-Stokes denklemlerini üçgen veya dört yüzlü elementlere ayırıp çözmekle başlar. Eleman türü ve istenilen hassaslığa göre eleman içerisinde veya sınırlarda belirli sayıda eleman belirlenir. Bu noktalar iki ile çarpılıp serbestlik derecesine karar verilir. Sonrasında bir eleman içindeki çözümleri belirten şekil fonksiyonları tanımlanır. Pratikte lineer elemanlar kullanılır.

Sonlu eleman metodunda baskın gelen denklemleri onlara eşdeğer integral hâle çevirmek gerekir. Denklemlerin integral hâle çevrimi "değişimsel presnsip" ve "ağırlıklı kalan veya zayıf formülasyon" ile çözülebilir. Ağırlıklı kalan fiziksel sınır içerisinde sıfıra eşdeğerdir. Kalan elemanlar, çözüme yaklaşırken karşılaşılan hatalar olarak görülür. Genelde zayıf formülasyon kullanılır (Blazek, 2001).

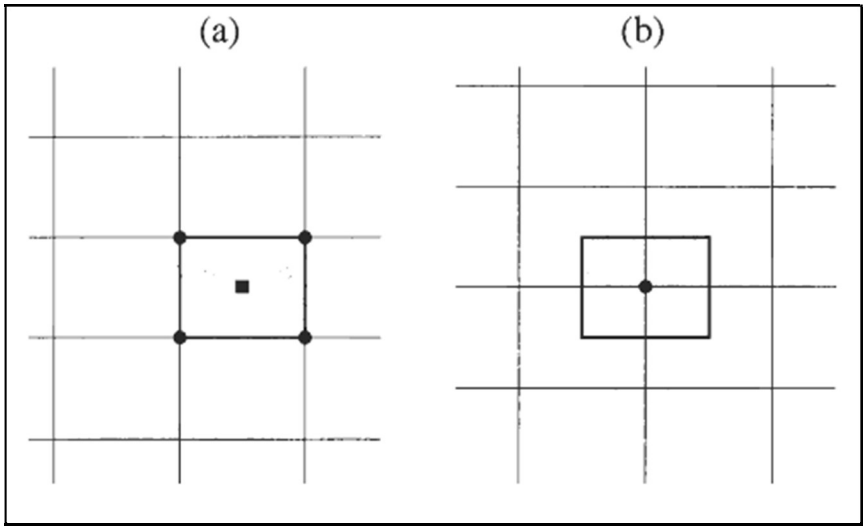
2.7.7.2 Sonlu fark yöntemi

Sonlu fark yöntemi doğrudan baskın gelen denklemlerin diferansiyel hâllerine uygulanır. Akış değişkenlerinin türevinin ayrıklaştırmasını Taylor serisi açılımı kullanarak yapar. Basit olması, doğru yaklaşımlarda bulunması ve hassaslığı avantajlarıdır. Metodun dezavantajı sadece kartezyen koordinat sistemindeyken çözüm bulabilmesidir. Bu yüzden de sadece basit geometrilere uygulanabilir endüstriyel ölçekte bir uygulaması yoktur (Blazek, 2001).

2.7.7.3 Sonlu hacim yöntemi

Sonlu hacim yöntemi, korunum yasaları kullanarak Navier-Stokes/Euler denklemlerini formülize eder. Sonlu hacim yönteminde problemi oluşturan baskın denklemleri gelişigüzel sayıda çok yüzlü hacimlere ayırır. Sonrasında her konrol hacmini oluşturan yüzlerden geçen akışın toplamı yakınsatılır. Ayrıklaştırmanın doğruluğu akışın değerlendirildiği belirli planlara bağlıdır.

Örgüler (Grid) göz önüne alındığında kontrol hacminin konumu ve şeklini belirlemek için birkaç olasılık vardır. Bunlar, hücre-merkezli ve hücre-noktalı planlardır (Şekil 2.38). Hücre-merkezli planda örgü hücreleri birbirinin aynısıdır. Oysa hücre-noktalı planda kontrol hacmi, aynı noktayı paylaşan bütün hücreler veya bir nokta etrafında olan hacimlerde olabilir.



Şekil 2.38 : a)Hücre-merkezli, b)hücre-noktalı örgü planı (Blazek, 2001).

2.7.7.4 Spektral yöntem

Bu yöntemde sonlu eleman yönteminin geometrik esnekliği ile yüksek dereceli doğruluğu birleştirilir. Hızlı bir şekilde yakınsama sağlanır. Çözümün yüksek dereceli

polinom çözümleri Galerkin sonlu eleman yöntemiyle birleştirilir. Spektral eleman yöntemi sıkıştırılamaz akışkanlarda veya yüksek dereceli düzene uygun problemlerin çözümü içindir. Özellikle girdap benzeri akışlara sahip akışlarda kullanılır. Spektral yöntemin avantajı konvenksiyon operatörünü ve konveksiyon-difüzyon sınır katmanlarını iyi tahmin etmesidir. Geometrik ve fiziksel açıdan karmaşık problemleri yüksek dereceli düzenlilik koşulunu sağlar. Dezavantajı ise sonlu hacim yöntemine nazaran sayısal olarak daha fazla hesaplama gerektirmesidir (Blazek, 2001).

2.7.8 Türbülanslı Akış ve Türbülans Modelleri

2.7.8.1 Genel kavramlar

Akışkanın laminar veya türbülanslı akış olduğu Reynolds sayısına göre belirlenir. Eğer Reynolds sayısı, 2000'den küçükse laminar akış, büyükse türbülanslı akış olduğu anlaşılır (2.45).

$$\mathrm{Re}=\frac{\rho.V.L}{\mu} \qquad (2.45)$$

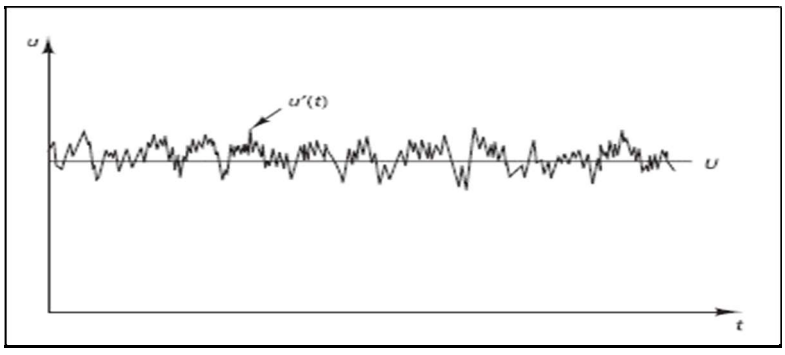
ρ: Akışkanın yoğunluğu

v: Akışkanın hızı

L: Hidrolik çap

μ: Kinematik vizkozite

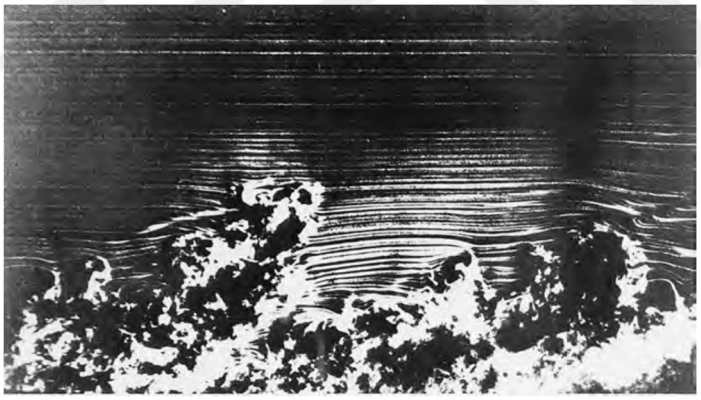
Reynolds sayısının kritik olarak tanımlandığı noktada akış düzgündür. Eğer sınır koşulları zamanla değişmiyorsa akış sabittir. Bu durum ***laminar akış*** olarak tanımlanır. Reynolds sayısının kritik değerin üstünde olduğu durumlarda akış karakteristiğinde değişiklikler olur. En son durumda akış düzensiz olur. Bu durum ise ***türbülanslı akış*** olarak tanımlanır (Şekil 2.39). Ortalama değer U ile gösterilir.



Şekil 2.39 : Türbülanslı akıştaki noktasal hız ölçümleri.

Akışlardaki ortalama hız ve basınçlar sadece bir veya iki boyutlu bile olsa, türbülans dalgalanmaları her zaman üç boyutlu olur. Ayrıca türbülanslı akışı görselleştirirken elde edilen rotasyonel akış şekilleri, türbülans girdapları oldukça geniş bir uzunluk değerine sahiptir. Şekil 2.40'de düz bir plakta türbülans akış koşullarına sahip bir sıvının yanal kesiti görülmektedir. Türbülans girdapları sınırdaki akışla, küçük ve orta boyuttaki girdaplarla karşılaştırılabilecek durumdadır.

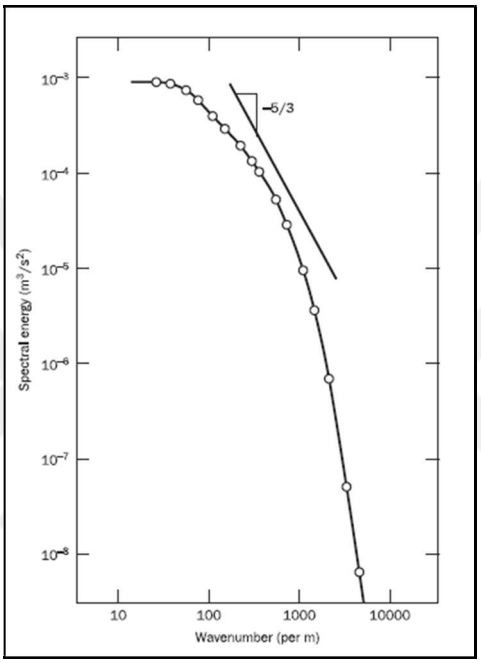
Türbülanslı akıştaki girdaplardan faydalanılarak uzun mesafelerle birbirinden ayrılmış akışkanlar birbirine yaklaştırılabilir. Sonuç olarak ısı, kütle ve momentum arası geçiş etkili bir biçimde sağlanabilir. Örneğin, renkli bir boya türbülanslı akışa damlatıldığında, akış yönünde hızlı bir biçimde dağılır. Bu kadar etkin bir karıştırma sağlanması kütle, momentum ve ısı sabitleri arasındaki geçişleri kolaylaştırır. "***Girdap çekmesi***" denen kavram ortalama akıştan geniş çaplı türbülans girdaplarının etkileşime girip enerji çıkarması demektir. Yatay akışlarda ortalama hız gradyanlarının olması rotasyonel türbülans girdaplarını bozar. Bu yüzden de girdaplar çekilip bir tarafının diğer tarafına göre daha hızlı hareket etmesi sağlanır (Versteeg ve Malalakasekara, 2007).



Şekil 2.40 : Türbülans sınır tabakasının görsel hali.

Geniş girdapların karakteristik hız (υ) ve uzunlukları (l), ortalama akışın U ve L'si ile aynıdır. Bu yüzden "geniş girdaplarda" Reynolds sayısı $Re_l = \upsilon l/\upsilon$ yüksek olur. Buna göre geniş girdaplarda eylemsizlik önemlidir. Geniş girdaplar viskoz değildir ve açısal momentumları "girdap çekmesi" sırasında korunur. Bu yüzden rotasyon hızları artar, yanal alanlarının çapları düşer. Proses az zaman aralığında küçük enine akışlar sağlar. Geniş girdapları çekme işi türbülansı koruyacak enerjiyi sağlar. Küçük girdaplarınsa ortalama akış tarafından çekilmeleri zor olup, geniş girdaplar tarafından çekilir. Kinetik enerjinin geniş girdaplardan küçük girdaplara dağılması prosesine "***enerji***

kaskadı" adı verilir. Türbülans akışın bu şekilde dalgalanmalar göstermesi geniş spektrumlu frekans veya dalga sayısı şeklinde enerjiyi içermesini sağlar. Bu durum Şekil 2.41'de gösterilmiştir. Diyagrama göre düşük dalga boylarındaki pikler enerji içerir. Yani geniş girdaplar en yüksek enerjiye sahiptir ve bu enerjiyi ortalama akışla yaptıkları etkileşimlerle elde ederler. Enerji dalga boyu arttıkça düşer. Bu da küçük girdapların enerjisinin az olduğunu gösterir. 0,1-0,01 mm dalga boyuna ve 10 kHz frekansa sahip olan türbülans akışı viskoz etkiler sonucunda oluşur (Versteeg ve Malalakasekara, 2007).



Şekil 2.41 : Bölümlenmiş parçalardan birindeki türbülans akışın enerji dağılımı.

En küçük girdapların hızına bağlı olarak elde edilen Reynolds sayısı, $Re_{\eta,}$ dir. Bu skalada türbülans akış atalet ve viskoz etkilerden eşit olarak etkilenir. Bu skalalarda iş, viskoz streslere karşı yapılır. Yani küçük girdaplara bağlı olan enerji dağılıp, termal iç enerjilere dönüşür. Bu dağılım türbülans akışta ***artan enerji kayıplarına*** sebep olur. Geniş ve küçük girdapların uzunluk, zaman ve hız oranlarını bulmak için boyutsal analiz kullanılabilir. Buna göre bulunmuş denklemler aşağıda verilmektedir.

- Boy-ölçek oranı : $\frac{\eta}{l} \approx Re_l^{-3/4}$
- Zaman-ölçek oranı : $\frac{\Pi}{T} \approx Re_l^{-1/2}$
- Hız-ölçek oranı: $\frac{\upsilon}{v} \approx Re_l^{-1/4}$

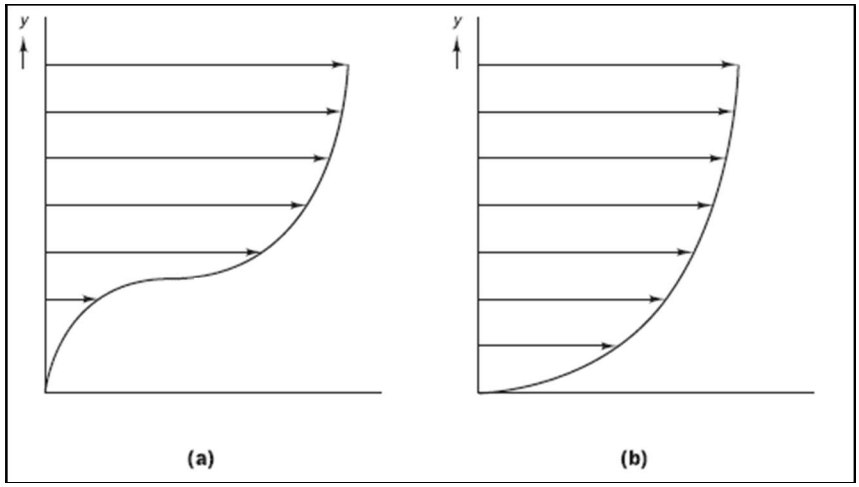
Re_l'nin genelde aldığı değer 10^3-10^6 arasındadır. Yani küçük dağılan girdapların hız, zaman ve boy ölçekleri, geniş enerjili girdaplara göre daha küçüktür ve aralarındaki fark Re_l arttıkça artar. Geniş girdaplar viskoziteden bağımsız olup hız ve boy ölçeklerine bağlıdır. Buna göre geniş girdapların yapısının oldukça anizotropik olması ve problemin sınır koşullarından etkilenmesi beklenir. Oysa küçük girdapların enerjisi sadece enerji dağılımının oranına bağlıdır, diğer değişkenlerden etkilenmez. Bu da küçük girdapların isotropik olmasına sebep olur (Versteeg ve Malalakasekara, 2007).

2.7.8.2 Laminardan akıştan türbülanslı akışa geçiş

Laminar akıştan türbülanslı akışa geçiş küçük düzensizliklerde laminar akışın stabilitesi dikkate alınarak açıklanabilir. Birçok çalışmada hidrodinamik kararsızlık çalışılmıştır. Hidrodinamik kararlılık, düzensizliklerin kuvvetlendirilmesini sağlayacak durumları bulmaya çalışır.

2.7.8.3 Laminar akışların hidrodinamik kararlılığı

İki farklı temel kararsızlık mekanizması vardır. Bunlar ana akıştaki iki boyutlu laminar hız profilinin şekliyle alakalıdır. Eğer Reynolds sayısı yeterince büyükse, dönüm noktası Şekil 2.42'de görüleceği gibi sonsuz küçük düzensizliklere bağlı olarak akışın hız dağılımını tutarsız yapar. Bu tutarsızlık oluşumu, viskoz olmama durumunu varsayarak türetilmiş denklemlerle açıklanabilir. Viskozitenin etkisinin çok az olduğu bu tarz tutarsızlıklara ***viskoz olmayan tutarsızlık*** adı verilir. Öte yandan Şekil 2.42'te görüleceği üzere dönüm noktası içermeyen laminar hız dağılımları ***viskoz tutarsızlığa*** bağlıdır (Versteeg ve Malalakasekara, 2007).



Şekil 2.42 : a) viskoz olmayan tutarsızlığa b) viskoz tutarsızlığa sahip hız profilleri.

2.7.8.4 Türbülansa geçiş

Tutarsız akışın oluştuğu ilk nokta türbülanslı akışa geçişin olduğu noktanın üst kısmıdır. Reynolds sayısının düzensizliklerinin arttıpı yerle, $R_{ex,crit}$, geçiş yaşandığı yerdeki Reynolds sayısının $R_{ex,tr}$, elde edildiği mesafe tutarsız düzensizliklerin artmasına bağlıdır. Tutarsızlığın olduğu nokta ile geçişin olduğu kısım hidrodinamik tutarsızlıkla tahmin edilebilir.

Boru akışındaki geçişler, dönüm noktası içermez. Bu tarz akışlardaki tüm Reynolds sayıları, sonsuz küçük düzensizliklerde hidrodinamik tutarlılıktaki viskoz teoriye göre tutarlı olarak tahmin edilir. Pratikte geçiş aralığı Re=2000-105'tir. Teorinin hata vermesinin sebebi, giriş hız profilinde gerçekleşen çarpıklık ve giriş etkilerine bağlı olarak kuvvetlenen sonlu düzensizliklerdir. Boru akışlarında türbülans akışlar duvara yakın bölgelerde elde edilir.

Geçiş prosesinde önemli olan birkaç husus vardır. Bunlar; küçük düzensizliklerin kuvvetlendirilmesi, rotasyonel bölgelerin geliştirilmesi, küçük boyutlu yoğun hareketlerin oluşturulması ve bu alanların genişletilmesidir. Türbülanslı akışa geçiş; basınç gradyanından, düzensizliğin boyutundan, duvar pürüzlülüğünden ve ısı transferinden etkilenir (Versteeg ve Malalakasekara, 2007).

2.7.8.5 Basit türbülanslı akışların karakteristiği

Türbülans hakkındaki çoğu teori ince katmanlardaki türbülansların incelenmesiyle elde edilmiştir. Bu tarz akışlarda hız, ince bölgelerde toplanmıştır. Sıkıştırılamaz iki boyutlu türbülans akışlar karışma katmanında, jet akışta, düz plaka sınır katmanında ve boru akışlarında elde edilebilir. Düz plaka sınır katmanı ve boru akışı hakkında detaylı bilgi aşağıda verilmiştir.

2.7.8.6 Düz plaka sınır katmanı ve boru akışı

Katı sınırın, akış ve türbülansın olması önemlidir. Türbülanslı akışın olduğu düz katmanlarda akış ataletten viskoz kuvvetlere göre daha fazla etkilenir. Atalet kuvvetleri duvardan daha uzaktaki akışlarda etkilidir. Duvara olan mesafe sıfır olursa, buna bağlı olan Reynolds sayısı da sıfır olur. Yani katı sınırla arasındaki akışlarda ataletin etkin olduğu bir alt bölge (duvardan uzakta) ve viskoz etkilerin etkin olduğu ince bir katman vardır. Duvara yakın yerlerde viskoz etkiler etkilidir ve bu yerler akıntı parametrelerinden etkilenmez. Ortalama akış (U) duvardan belirli bir uzaklıktan (y),

akışkan yoğunluğundan (ρ), viskoziteden (μ) ve duvarın kayma geriliminden (τ_w) etkilenir (2.46 ve 2.47).

$$U= f(y, \rho, \mu, \tau w) \tag{2.46}$$

$$u^+ = \frac{U}{u_\tau} = f\left(\frac{\rho u_\tau y}{\mu}\right) = f(y^+) \tag{2.47}$$

Yukarıdaki denklem "duvar denklemi" olarak bilinir ve iki tane önemli boyutsuz grubun, u^+ ve y^+, tanımını içerir. Duvardan uzak bir noktada, bir noktadaki hız viskoziteden değil, duvar boyunca duvardaki kayma stresinden kaynaklanır (2.48). Buradaki uzunluk ölçeği sınır tabaka kalınlığından (δ) etkilenir (2.48, 2.49).

$$U= f(y, \delta, \mu, \tau w) \tag{2.48}$$

$$u^+ = \frac{U}{u_\tau} = g(\frac{y}{\delta}) \tag{2.49}$$

Lineer veya viskoz alt katmanlar – pürüzsüz duvarla temas halinde olan akışkan katmanı

Katı yüzeyinde akışkan sabittir. Duvara yakın bölgelerde türbülans girdapları durmak zorundadır ve akışkan davranışını viskozite etkiler. Bu viskoz ara katman pratikte oldukça incedir. Bu yüzden kayma gerilimini duvar kayma gerilimine eşit almak mümkündür.

Lag-law katmanı – pürüzsüz duvara yakın türbülans bölgesi

Viskoz ara katmanın dışında viskoz ve türbülansın etkili olduğu bir bölge bulunmaktadır. Duvardan uzaklaştıkça kayma gerilimi değişkenlik gösterir. İç kısımlarda sabit olup duvarın kayma gerilimine eşit olduğu varsayılır. Bu bağlamda aşağıdaki denklem (2.50) elde edilmiştir.

$$u^+ = \frac{1}{\kappa}\ln(y^+) + B = \frac{1}{\kappa}\ln(Ey^+) \tag{2.50}$$

K: Von Karman sabiti, B ise diğer bir sabittir. Duvar pürüzlülüğü B değerini düşürür. K ve B yüksek Reynolds sayılarında pürüzsüz duvarlardan geçen bütün türbülans akışlar için geçerlidir. Denklemde logaritmik sonuçlar olduğu için ismine log-law denilmiştir.

Dış katman- duvardan uzakta ataletin etkili olduğu bölge

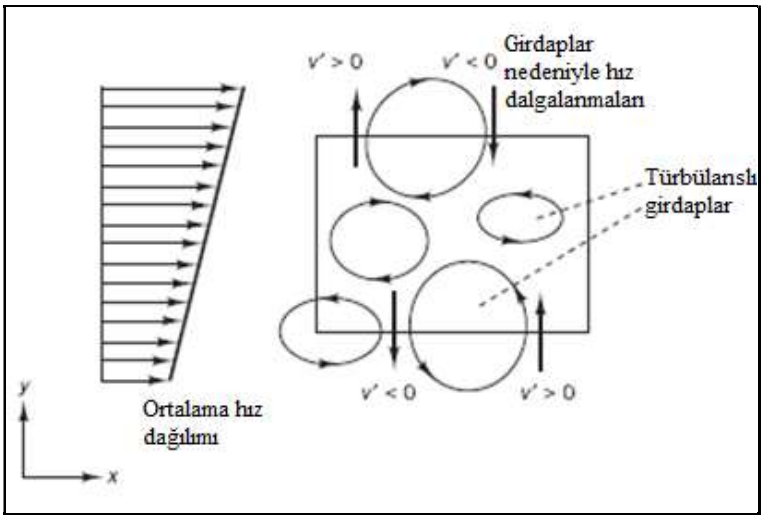
Bu bölgede aşağıda verilen formül (2.51) geçerlidir.

$$\frac{U_{max} - U}{u_\tau} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{y}{\delta}\right) + A \tag{2.51}$$

Türbülans ortalama akıştaki kayma sayesinde korunur. Kaymanın yüksek olduğu yerlerde hız dalgalanmaları ve türbülans yüksek olur, ayrıca dağılımları anizotropiktir. Kayma olmadan türbülans söner ve sistem izotropik olur. Bu genel özellikler dışında türbülans akışa oldukça bağlıdır. Duvara yakın bölgelerde kayma duvar sürtünmesine bağlıdır ve türbülans hızındaki kayıp sınır koşullarına diktir. Bu da duvara yakın bölgelerde bulunan dar alanlarda ortalama ve değişen hız bileşenlerinde hızlı değişimlere sebep olup karmaşık akış yapıları oluşturur. Birçok mühendislik problemi sınır koşullarını içerdiğinden türbülans da ortam geometrisine bağlıdır. Akış hesaplamalarını yaparken tüm bunlara dikkat edilmelidir (Versteeg ve Malalakasekara, 2007).

2.7.9 Ortalama akış özelliklerine türbülans değişimlerinin etkisi

Bu bölümde türbülans akışın özelliklerini zamana bağlı olarak değiştiren durumlar açıklanmıştır. Şekil 2.43'te y eksenin ortalama hız gradyanına sahip, x eksenindeyse iki boyutlu türbülans akışa sahip bir kontrol hacmi incelenmiştir.



Şekil 2.43 : 2 boyutlu türbülans akışta kontrol hacmi.

Şekil 2.43'e göre dikey girdaplar güçlü karıştırma oluşturur. Kontrol hacmi boyunca rastgele akımlar oluşur. Bu devirdaim olan akımlar kütle oluşturamaz. Aynı zamanda yok edilemez. Ama girdaplar tarafından taşınan akışkan parselleri momentum ve

enerjiyi kontrol hacmi içine veya dışına taşıyabilir. Şekil 2.43 :'e göre hız gradyanlarının olması, üst sınırda y-hızında negatif değişimler oluşturur ve alt sınır boyunca da kontrol hacmindeki akışı bir bölgeye taşır. Y-hızındaki pozitif değişimler akışkanı yüksek hızlı bölgelere taşır. Elde edilen net sonuç momentum değişimidir. Sonuç olarak akışkan katmanlarında ilave türbülans kayma stresleri olur. Bunlar Reynolds gerilimi olarak bilinir. Eğer ısı ve konsantrasyon gradyanları varsa o zaman bu durumda kontrol hacmi boyunca türbülans ısı veya konsantrasyon akıları oluşur (Versteeg ve Malalakasekara, 2007).

2.7.10 Türbülanslı akış modellemeleri

Türbülans, girdap akışının farklı zaman ve uzunluk skalalarındaki etkileşimi sonucunda ortaya çıkar. Türbülans konusu oldukça önemli olduğu için, türbülansı ve etkilerini hesaplamak için birçok yöntem oluşturulmuştur. Bu yöntemler aşağıdaki gibi gruplandırılabilir (Versteeg ve Malalakasekara, 2007):

Reynolds-ortalamalı Navier stokes denklemleriyle türbülans modellemesi (RANS)

Burada ortalama akış ve türbülansın bu ortalama akış üzerinde etkileri önemlidir. Navier stokes denklemleri zaman ortalamalıdır. Bazen çeşitli türbülans dalgalanmalarına bağlı olarak akışkan denkleminde yeni parametreler ortaya çıkabilir. Bu ilave parametreler klasik türbülans modelleri arasında en çok bilinenlerden ikisi olan k- Ɛ modeli ve Reynolds stres modeliyle modellenir. Modelleme sırasında akış hesaplama yaparken ortalama bir kaynak kullanımı ihtiyacı olduğundan ve doğru sonuçları verdiğinden yaklaşık 30 yıldır bu modeller kullanılmaktadır.

Geniş girdap simülasyonu

Bu model geniş girdapların davranışını inceleyen türbülans modelidir. Metotta filtreleme vardır. Bu sayede geniş girdaplar filtreden geçerken küçük girdaplara takılır. Geniş girdapları da içeren ortalama akışa küçük girdapların alt parçalama modeli olarak dahil edilmesiyle oluşan etki önemlidir. Küçük girdapların oluşturduğu akış denklemleri çözülmelidir. Bu yüzden hesaplama yapılırken bilgisayarın hafızası ve diskinin kullanılması daha yüksek oranlarda olur. Bu yöntem kompleks geometrili CFD problemleri çözmede kullanılmaya başlanmıştır.

Doğrudan nümerik simülasyon (DNS)

Bu simülasyonlarda ortalama akış ve bütün türbülans dalgalanmaları hesaplanır. Düzensiz Navier Stokes denklemleri enerji dağılımlarını ve en hızlı dalgalanmaları dahi hesaplayabilecek kadar 3 boyutlu parçalarda çözdürülür. Hesaplamalar bilgisayar kullanımı açısından ekonomik olmadığından endüstride kullanılmaz.

2.7.10.1 Reynolds-ortalamalı Navier stokes denklemleriyle türbülans modellemeleri (RANS)

Çoğu mühendislik uygulamasında türbülans dalgalanmalarının detaylarını çözdürmek önem taşımaz. Birçok CFD kullanıcısı ortalama akış, basınç, stres vb. gibi parametreler hakında bilgi sahibi olmakla ilgilenir. Bu sebeple RANS modelleri türbülans modellemesinden sonra en çok kullanılan modellerdir. Türbülansın ortalama akış üzerinde etkisi önemlidir. Çünkü ani dalgalanmalarda akışın göstereceği değişiklikleri zaman ortalamalı momentum denklemleri göstermez. Daha önceki bölümlerde açıklandığı gibi bu olay altı tane ek Reynolds gerilimi oluşturur. Bunlar -$\rho\overline{u'^2}$, -$\rho\overline{v'^2}$, -$\rho\overline{w'^2}$, -$\rho\overline{u'v'}$, -$\rho\overline{u'w'}$, -$\rho\overline{w'v'}$'dır. Benzer olarak zaman-ortalamalı ek denklemler ise $\overline{\varphi'v'}$, $\varphi'w'$'dir.

RANS denklemleriyle türbülanslı akışı hesaplayabilmek için Reynolds gerilimini ve ortalama akış denklemlerini birbirine yaklaştıran tahminlerde bulunabilen türbülans modelleri geliştirilmesi gerekir. Türbülans modelinin kullanışlı olabilmesi için CFD kodlarının geniş uygulanabilirliğe sahip olması, doğru sonuç vermesi ve çalıştırılması uygun malliyetli olmalıdır. En çok kullanılan RANS türbülans modelleri RANS akış denklemlerine ek olarak çözdürülmesi gereken ek taşınım denklemleri olup olmamasına göre sıralandırılmıştır (Çizelge 2.5). Bu modeller şu anda kullanımda olan standard CFD kodlarında kullanılan türbülans hesaplamalarını oluşturur (Versteeg ve Malalakasekara, 2007).

Çizelge 2.5 : RANS modellerinin ek taşınım denklemlerine göre sınıflandırılması.

Ek Taşınım Denklemi Sayısı	Modelin İsmi
Sıfır	Karışım mesafesi modeli
Bir	Spalart-Almaras modeli
İki	k- ε model
	k- ω model
	Cebirsel stres modeli
Yedi	Reynolds stres model

Girdap viskozitesi ve dağılımı

Çizelge 2.5'deki modeller içerisinde karışım mesafesi ve *k*–ε modeli en çok kullanılan ve geçerli olan iki modeldir. Her iki modelde ortalama akışa Reynolds ve viskoz streslerin etki ettiği varsayımını kullanır. Her iki streste momentum denklemlerinde sağ tarafta bulunur.

Momentum, ısı ve kütlenin türbülansta taşınımı girdap karışım mekanizmasına göre olduğundan türbülans dağılımının da (Γ_t) türbülans viskozitesine yakın değerde olacağı düşünülür. Bu varsayım Reynolds benzerliği olarak bilinir.

$$\sigma_t=\frac{\mu t}{\Gamma t}$$

Birçok gerçekleştirilen değerde bu oran neredeyse sabit kalmıştır. CFD prosedüründe bu durum varsayılarak σ_t civarındaki değerler kullanılır.

Karışım mesafesi modelinde gerilimler pozisyonun fonksiyonu olarak basit cebirsel formüllerle (μt) verilmiştir. *k*–ε modelinde ise türbülansın tanımı, taşınım ve yayılımdan kaynaklanan türbülans özelliklerinin etkilerini ve türbülansın oluşup yok olmasının etkilerini görmeye izin verecek şekilde yapılmıştır. Bir tanesi türbülansın kinetik enerjisi k yi gösteren, bir tanesi de türbülansın kinetik enerjisinin dağılımını gösteren ε için olmak üzere iki taşınım denklemi (PDE) de çözdürülür.

k–ε modeli

İki boyutlu ince katmanlarda akışın yönünde oluşan değişimler çok yavaştır. Bu sebeple türbülans kendini yerel durumlara adapte eder. Taşınım ve yayılmanın akışlarda türbülans oluşumu ve yok olması adına önemli farklar oluşturduğu akışlarda karışım mesafesi modeli işe yaramamaktadır. Bu durumda yapılması gereken türbülans dinamiklerini dikkate almaktır. *k*– ε modeli türbülansın kinetik enerjisini değiştiren mekanizmaları inceler. Ama öncesinde bazı tanımlamaların yapılması gerekir. Türbülans akışında aniden oluşan kinetik enerji k(t) ortalama akış kinetik enerjisi (K) ve türbülans kinetik enerjisinin (k) toplamıdır.

$$K(t)=K+k$$

Ortalama akış kinetik enerjisi (K) için baskın olan denklemler

Ortalama kinetik enerji (K), Reynolds denkleminin x-komponentindeki U, y-komponentindeki V ve z-komponentindeki W ile çarpılarak elde edilir. Sonuçları

toplayıp, akışın ortalama kinetik enerjisine etkiyen zamana bağlı ortalama denklem aşağıdaki gibi gösterilir (2.52).

$$\frac{\partial(\rho K)}{\partial t}+\text{div}(\rho K\mathbf{U})=\text{div}(-P\mathbf{U}+2\mu\mathbf{U}S_{ij}-\rho\mathbf{U}\overline{u_i'u_j'})-2\mu S_{ij}.S_{ij}+\rho\overline{u_i'u_j'}.S_{ij} \quad (2.52)$$

(I) (II) (III) (IV) (V) (VI) (VII)

Ortalama kinetik enerjideki değişim, K, (I) + konveksiyonla K'nın taşınımı (II)= Basınçla K'nın taşınımı (III) + Viskoz gerilimlerle K'nın taşınımı (IV)+ Reynolds gerilimleriyle K'nın taşınımı (V) – K viskoz dağılım oranı (VI) – türbülans oluşumundan dolayı K'nın yok olması (VII) şeklinde hesaplanır.

(III), (IV) ve (V)'teki taşınım terimleri div ile karakterize edilir ve toplu olarak parantez içine alınır. Viskoz etkilerin K üzerine etkisi ikiye ayrılır: Viskoz gerilimlerle K'nın taşınımı (IV) ve K viskoz dağılım oranı (VI). Her iki terim türbülans etkilerine karşılık olan Reynolds gerilimini $\rho\overline{u_i'u_j'}$ içerir. (V) nolu terim Reynolds gerilimleriyle K'nın türbülanslı taşınımını (VII) nolu terim ise türbülans oluşumuna Reynolds gerilimlerinin yaptığı katkı yüzünden K'da oluşan deformasyonu ifade eder. Yüksek Reynolds sayısına sahip akışlar (V) ve (VII)'nin karşılıkları (IV) ve (VI)'dır.

Türbülans kinetik enerjisi (k) için baskın olan denklemler (2.53)'da gösterilmiştir.

$$\frac{\partial(\rho\kappa)}{\partial t}+\text{div}(\rho\kappa\mathbf{U})=\text{div}(-\overline{p'\boldsymbol{u}'}+2\mu\overline{\boldsymbol{u}'}\text{Sij}+ -\rho 1/2\overline{u_i'u_i'u_j'})-2\mu\overline{S_{ij}'S_{ij}'}.+\rho\overline{u_i'u_j'}.S_{ij} \quad (2.53)$$

(I) (II) (III) (IV) (V) (VI) (VII)

Ortalama kinetik enerjideki değişim, κ, (I) + konveksiyonla κ'nın taşınımı (II)= Basınçla κ'nın taşınımı (III) + Viskoz gerilimlerle κ'nın taşınımı (IV)+ Reynolds gerilimleriyle κ'nın taşınımı (V) – κ dağılım oranı (VI), κ'nın üreme oranı (VII)'dır.

Her iki denklem birbirine oldukça benzemekle birlikte, κ -denkleminin sağ kısmındaki türbülans kinetik enerjisindeki değişimlerin türbülans arasındaki etkileşimden kaynaklandığı görülür. Denklemin en son parametresi (VII) her ikisinde de eşittir, fakat zıt işaretlidir. İki boyutlu kayma katmanlarında eğer $\frac{\partial(U)}{\partial y}$ pozitifse Reynolds gerilimi, $\rho\overline{u_i'u_j'}$ genellikle pozitiftir. Bu yüzden (VII) nolu terim κ denkleminde pozitif sonuç verir. Ama K denkleminde işaret negatiftir. Çünkü terim ortalama kinetik enerji

akışını yok eder. Ortalama kinetik enerji, türbülans kinetik enerjisine aşağıdaki gibi çevrilir (2.54).

$$-2\mu\overline{S'_{ij}S'_{ij}}=-2\mu(\overline{S'^2_{11}}+\overline{S'^2_{22}}+\overline{S'^2_{33}}+\overline{S'^2_{12}}+\overline{S'^2_{13}}+\overline{S'^2_{23}}) \quad (2.54)$$

Türbülansın kinetik enerjisinin dağılım oranı viskoz gerilimlere karşı küçük girdapların yaptığı işe denk gelmektedir. Hacim başına dağılım oranı normalde yoğunluk ve kütle başına düşen türbülans kinetik enerjisi dağılım oranı (ε) olarak yazılır (2.55).

$$\varepsilon=2\nu\overline{S'_{ij}S'_{ij}} \quad (2.55)$$

ε' nin birimi m^2/s^3'tür. Türbülans dinamiği çalışmalarında bu birimin çok büyük bir önemi vardır. Bu birim türbülans kinetik enerji denklemindeki yıkım birimine, aynı oranda oluşma birimine denk gelir ve asla göz ardı edilemez (Versteeg ve Malalakasekara, 2007).

k – ε model denklemleri

Viskoz dağılım oranı ε gibi diğer türbülanslar için benzer taşınım denklemleri geliştirmek mümkündür. Standard k-ε modelinde biri k, biri de ε için iki model denklem vardır. Büyük boyutlu türbülansın hız (ν) ve uzunluk (l) skalasını tanımlamak için k ve ε kullanılır. Buna göre aşağıdaki denklem elde edilir (2.56).

$$\nu=k^{1/2}\ ,\ l=\frac{k3/2}{\varepsilon} \quad (2.56)$$

ε, küçük girdapların büyük girdapları modellemek için kullanılmasının doğruluğu sorgulanabilir. Modelin doğruluğu kanıtlanabilir.

Boyutsal analiz kullanıldığında, girdap viskozitesi aşağıdaki gibi tanımlanabilir (2.57).

$$\mu_t= C\nu\rho l=\rho C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.57)$$

C_μ burada boyutsuz sabittir.

Standart k-ε denklemleri, aşağıdaki taşınım denklemlerini kullanır (2.58).

$$\frac{\partial(\rho\kappa)}{\partial t}+\text{div}(\rho\kappa\mathbf{U})= \text{div}[\frac{\mu_t}{\sigma k} grad\ \kappa] + 2\mu_t S_{ij}.S_{ij} - \rho\varepsilon \quad (2.58)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\text{div}(\rho\varepsilon\mathbf{U})= \text{div}[\frac{\mu_t}{\sigma\varepsilon} grad\ \varepsilon] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{\kappa}2\mu_t S_{ij}.S_{ij} - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon 2}{\kappa}$$

Yani κ veya Ɛ'deki değişim oranı + κ veya Ɛ'deki konveksiyonla taşınım = κ veya Ɛ'nin difüzyonla taşınımı + κ veya Ɛ'nin oluşum oranı - κ veya Ɛ'nin yıkım oranı'dır.

Denklem 5 tane ayarlanabilir katsayı içermektedir: C_μ, σ_k, σ_ε, $C_{1\varepsilon}$ve $C'_{2\varepsilon}$ Türbülans akışlar için bu katsayılar aşağıdaki gibidir:

C_μ=0,09, σ_k=1,00, σ_ε=1,30, $C_{1\varepsilon}$=1,44, $C_{2\varepsilon}$=1,92

Türbülans kinetik enerjisinin oluşumu ve yok olması her zaman birbiriyle bağlantılıdır. k nın üretiminin yüksek olduğu yerlerde dağılım oranı ε de yüksektir. Reynolds gerilimlerini hesaplamak için Boussinesq ilişkisi (2.59) kullanılır (Versteeg ve Malalakasekara, 2007):

$$\rho\overline{u'_i u'_j}= \mu_t(\frac{\partial U_i}{\partial x_j}+\frac{\partial U_j}{\partial x_i})\text{-}2/3\rho\kappa\delta_{ij} =2\ \mu_t S_{ij} - 2/3\rho\kappa\delta_{ij} \quad (2.59)$$

Lineer olmayan κ-ε modelleri

Bu modelin mantığı Reynolds gerilimlerine ek etkilerin tanıtılmasında matematiksel ve fiziksel açıdan düzgün bir form oluşturabilmektir. Bu ilişki türbülans karakteristiğinin sadece yerel durumlara bağlı olduğunu gösterir.

Modelin düzgün sonuç verebilmesi, türbülans modelinin CFD hesaplarında kullanılan koordinat sisteminden bağımsız olarak matematiksel hale getirilmesi, k, ε gibi türbülans parametrelerinin negatif olmaması gibi durumlara bağlıdır (Versteeg ve Malalakasekara, 2007).

k-ε modeli performans değerlendirmesi

Sadece başlangıç sınır koşullarıyla çalıştırılabilen en basit türbülans modelidir. Birçok endüstriyel akışta kullanılabilecek yüksek performansa sahiptir. En çok kabul gören

türbülans modeli olması bu modelin avantajları arasında sıralanabilir. Modelin dezavantajları ise karışım mesafesi modelinden daha yüksek maliyetli olması (iki ekstra PDE çözdürülmesinden dolayı), sınırlandırılmamış akış, kıvrımlı sınır koşullarına sahip akış, dönen akış gibi durumlarda uygulanabilirliğinin zayıf olması şeklinde sıralanabilir (Versteeg ve Malalakasekara, 2007).

2.7.10.2 Doğrudan nümerik simülasyon

Anlık süreklilik ve Navier-Stokes denklemleri ve sıkıştırılamaz türbülans akış dört bilinmeyenli (u,v,w,p) dört farklı denklem seti oluşturur. Türbülans akışın doğrudan nümerik simülasyonu (DNS) bu denklem setini başlangıç noktası olarak ele alır. En küçük türbülans girdaplarını ve en hızlı dalgalanmaları da çözebilecek yeterli sayıda küçük zaman aralıklarına sahip yeterince hassas üç boyutlu bir mesh atarak bir geçiş çözümü oluşturur. Reynolds, Moin ve Mahesh (1998) DNS'nin olası avantajlarını aşağıdaki gibi özetlemiştir.

- Herhangi bir noktadaki akışın türbülans parametrelerinin kesin detayları, taşınımları ve maliyeti DNS ile hesaplanabilir. Bunlar yeni türbülans modelleri geliştirip geçerli kılmak açısından kullanışlıdır.
- Çözümler enstrümentasyon kullanmadan hemen elde edilebilir. Anlık türbülans yapıları görselleştirilebilir. Örneğin RSM modellerindeki basınç-uzama doğrulama terimleri ölçülemez, ama doğru değerler DNS ile hesaplanabilir.
- İleri deneysel teknikler denenebilir ve DNS akış bölgelerinde değerlendirilebilir.

Akışların doğru çözümü türbülans akışlarda girdapların oluşması sebebiyle geniş oranda uzunluk ve zaman ölçeklerinde olmalarından dolayı zordur. En küçük ve uzun boyut ölçeğine sahip türbülans çözmek için Reynolds sayısı 10^4 olan bir akış için her koordinatta 10^3'lük bir türbülans akışının doğrudan simülasyonunun yapılması gereklidir. Türbülans akışlar doğal olarak üç boyuta sahip olduklarından, tüm boyut ölçeklerindeki prosesleri tanımlamak için 10^9'luk grid noktalarına sahip meshlerin hesaplanması gereklidir. Pratikte yüksek aralıklı zaman basamakları anlamlı ortalama türbülans akışı ve türbülans istatistikleri elde etmek için gereklidir.

Speziale (1991) Reynolds sayısı 500000 olan türbülans boru akışını doğrudan hesaplayabilmek için varolan bilgisayarların kapasitesinin 10 milyon daha fazla olması gerektiğini tahmin etmiştir. Moin ve Kim (1997) Reynolds sayısı 10^4 ile 10^6 arasında olan bir türbülans akışını hesaplamak için son derece yüksek kapasiteli bir bilgisayarla dahi 100 saat ile 300 yıl gerekebileceği tahmin edilmektedir (Versteeg ve Malalakasekara, 2007).

2.7.11 Türbülans modellerinin özeti

Türbülansa bağlı akış dalgalanmaları ek momentum, ısı ve kütle transferi olmasına neden olur. Mühendisler ortalama akış davranışlarının tahminiyle ilgilenir, fakat türbülans da göz ardı edilemez. Çünkü dalagalanmalar ortalama akışta ekstra Reynolds gerilimlerinin ortaya çıkmasına sebebiyet verir. Endüstriyel CFD'lerde bu ilave gerilimler modellenmelidir. Fakat bu türbülans etkilerini tahmin etmek en küçük sınır koşullarında bile birçok zaman ve uzunluk ölçeği girmek zorunda olunduğu için oldukça güçtür. Bu bakımdan RANS türbülans modelleri tek uzunluk ve zaman skalası tanımlandığından türbülans akışlarını hesaplamakta başarılıdır. Standard κ-ε modeli endüstride hala iç akış hesaplamalarında kullanılan yöntemdir.

Geniş girdap simülasyonlarının endüstriyel ölçekli uygulamalarda kullanılması için geliştirilmeye ihtiyacı vardır. Fakat geniş girdap simülasyonlarıyla laboratuvarda ölçülemeyecek türbülans akış özellikleri elde edilebilir. Bazı ticari CFD kodlarında geniş girdap simülasyonları çözülebilir. Özellikle zamana bağlı bazı akış özelliklerini bulmakta bu önemli bir rol oynar. DNS ise yakın gelecekte türbülans araştırmalarında önemli bir yere sahip olacaktır (Versteeg ve Malalakasekara, 2007).

2.7.12 CFD problemlerinde sınır koşullarının tanımlanması

Bütün CFD problemleri ilk ve sınır koşulları tanımlandıktan sonra çözülebilir. O yüzden sınır koşullarının belirlenmesi büyük önem taşır. Geçici problemlerde akış değişkenlerinin ilk değerleri akış alanı içerisinde belirtilmelidir. Sonlu hacim yönteminde sıklıkla tanımlanması gereken sınır koşulları aşağıdaki gibidir (Versteeg ve Malalakasekara, 2007).

- Giriş
- Çıkış
- Duvar

- Belirlenmiş basınç
- Simetri
- Periyod

Giriş sınır koşulları belirlenirken tüm akışkanların değişkenlerinin giriş sınırları içerisinde belirtilmesi gerekir. Bunlardan bazıları, hızların belirtilmesi, referans basınç verilmesi, kinetik enerji (κ) ve de dağılım oranıdır (ε). Çıkış sınır koşullarının belirlenmesi giriş sınır koşullarına bağlıdır. Eğer çıkış, girişe göre yeterince uzak bir mesafedeyse akış yönünde bir değişiklik olmadığı varsayılabilir. Çıkış için basınç düzenlemesi yapılmasına gerek yoktur. Duvar sınır koşullarının belirlenmesi en çok karşılaşılan durumdur. Eğer bir duvardaki hız biliniyorsa burada basınç ayarlaması yapılmasına gerek yoktur. Duvarda sınır koşulları için akışın türü önemlidir. Akım, laminar veya türbülans akım da olsa sistemde duvara yakın kısımların akışları laminar seçilir. Türbülans akımı olması durumunda optimum duvara yakın kısımdaki akışı bulmak için çeşitli denklemler kullanılır. Bu denklemler hareket etmeyen, pürüzsüz duvarlar içindir. Daha farklı bir duvar koşulu olduğunda bazı modifikasyonlar yapılması gerekir. Türbülans akımında duvara yakın kısımlardaki akışı hesaplamada kullanılan denklemler şunlardır:

- Duvara teğet momentum denklemi

Duvar kayma gerilmesi $\tau_w = \rho C_\mu^{1/4} k_p^{1/2} u_p / u^+$

Duvar kuvveti $F_s = -\tau_w A_{Cell} = -(\frac{\rho C_\mu^{1/4} k_p^{1/2} u_p}{u^+}) A_{Cell}$

- Duvara dik momentum denklemi

Dik hız = 0

- Türbülanslı kinetik enerji denklemi

Birim hacim başına net k-kaynağı = $(\tau_w u_p - \rho C_\mu^{3/4} k_p^{3/2} u_p / u^+) \Delta V / \Delta y_p$

- Dağılım oranı denklemi

Düğüm değerini ayarlamak $\varepsilon_p = C_\mu^{3/4} k_p^{3/2} u_p / (\kappa \Delta y_p)$

- Sıcaklık veya enerji denklemi

Duvar ısı akısı $q_w = -C_p \rho C_\mu^{1/4} k_p^{1/2} (T_p - T_w)/T^+$

Belirlenmiş basınç sınır koşulları akış dağılımının detaylarının kesin olarak bilinmediği, basınç sınır koşulunun bilindiği durumlarda kullanılır. Simetri sınırı için şartlar sınır boyunca akış olmaması ve yönsüz akışın olmaması ile gerçekleşir.

2.7.13 CFD modellerinde yakınsama, uygunluk ve tutarlılık

Sonlu hacim yönteminde Navier-Stokes denklemlerindeki alan integralleri her kontrol hacmi için bir şekilde yakınsar. Bu yakınsama sırasında kontrol hacminde 3 boyutlu ayrıklaştırma hataları ortaya çıkar. Ayrıklaştırma işleminin düzgün yakınsaması, uygun olması ve tutarlı olması esastır.

Bir ayrıklaştırma işleminin yakınsaması ayrıklaştırılan diferansiyel denklemlerin zaman basamaklarının ve grid boyutunun sıfıra yaklaşması demektir. Yakınsayan bir sonuç elde edildiğinde sistemdeki esas denklemler çözülebilmektedir. Sayısal bir denklemin yakınsadığını anlamak için fonksiyonlar Taylor serisi olarak genişletilir. Sonrasında bu denklemler ayrık denklemlere yerleştirilip, diferansiyel denklemler sadeleştirilir. Bu işlem sonrası "yuvarlama hatası" elde edilir. Yakınsayan sonuçlarda bu yuvarlama hatası zaman ve griddeki azalmayla birlikte sıfıra yaklaşmalıdır.

Uygunluk, nümerik algoritmalar kullanılarak üretilen cebirsel denklemlerin gerçek sistemdeki baskın olan denklemlerle ne kadar benzer olduğunun gösterilmesiyle ilgilidir. Ayrıklaştırmanın uygunluğu da yuvarlama hatasıyla alakalıdır. Yuvarlama hatasını daha kompleks problemlerde Taylor serisi açılımıyla bulmak zordur. Bu sebeple de yuvarlama hatasını bulmak için gridleri genişletme, daha düşük veya yüksek dereceden ayrıklaştırma yapmak, aynı gridde cebirsel değerlendirmelerin yapılmasıyla da bulunabilir (Blazek, 2001).

Tutarlılık ise, bölümlendirme (mesh) işlemi sonucu oluşabilecek hataların hangi oranda azaltılıp en iyi şekilde çözüm yaptırabileceğinin sağlanmasıyla ilişkilidir. Aynı anda bütün bu konseptleri CFD çözümlerinde sağlamak zordur. Tutarlı ve doğru bir sonuç daha sonrasında son-işlemciye gönderilir. Son-işlemci çözümü görselleştirecek kısımlardan oluşmaktadır. Bunlar; bir vektörün, gradyanın veya bir hattın basit iki

boyutlu grafik çiziminden üç boyutlu resmini çizmeye uzanan yollarını içerir (Liu, 2007).

2.7.14 Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin (CFD) membranlarda uygulanması

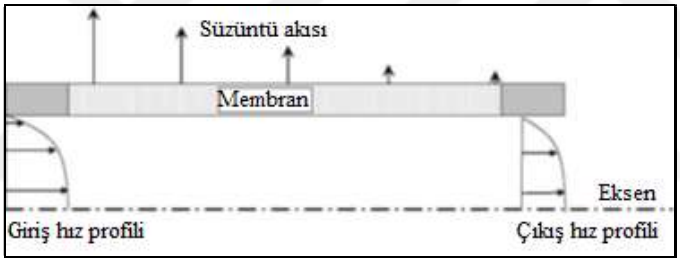
Membran prosesler en çok konsantrasyon polarizasyonu (membran yüzeyi ile besleme suyu arasında oluşan membran akısını düşüren konsantrasyon gradyanı) ve tıkanmadan etkilenir. Çoğu membranda bu iki durum kaçınılmazdır. Membran tıkanması sadece akıyı etkilemez, aynı zamanda tür ayrımı baz alındığında membran seçiciliğini de etkiler. Optimum bir membran en yüksek akıyı verirken, aynı zamanda iyi bir seçici geçirgenliğe de sahip olmalıdır. İşletme ve yatırım maliyetlerinin de düşük seviyede olması istenir. Bu maliyeti azaltmanın en iyi yolu da konsantrasyon polarizasyonu ve tıkanmayı önlemekten geçmektedir. Konsantrasyon polarizasyonunu azaltmak için membran sistemlerindeki akı profilini ve çözünen konsantrasyon dağılımını öncesinde ve sonrasında bilmek proses değerlendirmesi ve geliştirmesi açısından önem taşır. Hesaplamalı akışkanlar mekaniği (CFD) yaklaşımı kullanılarak membran modülleri için sıkça karşılaşılan dar membran kanalları içerisindeki akış profili modellenebilir. Ayrıca membranın sınır tabakasındaki kütle transferi, konsantrasyon polarizasyonu gibi karakteristikler de tahmin edilebilir. Membran içindeki akışkanlar mekaniği ve kütle transferi hakkında bilgi sahibi olarak ayrıca dizayn prosesini daha ekonomik hale getirmek mümkün olabilir.

Membran teknolojilerinin CFD kullanımına uygun olması aşağıda verilen nedenlere bağlıdır.

- Birçok membran sisteminin basit ve modüler bir yapıya sahiptir.
- Birçok membran prosesi faz değişimi içermediğinden enerji gereksinimi azdır. Proses faz değişimi içerse bile enerji ihtiyacı konvansiyonel sistemlerin enerji ihtiyaçlarından daha düşük olmaktadır.
- Membran sistemler kesikli ve sürekli olarak çalıştırılabilir.
- Konsantrasyon polarizasyonu ve tıkanma performansta azalmaya neden olur.
- Çoğu polimerik membranlar yüksek sıcaklık, pH, klor ve solvent konsantrasyonlarında mekanik dayanıklılığını koruyamaz,
- Bazı durumlarda yeterli ayırım sağlanamayabilir.

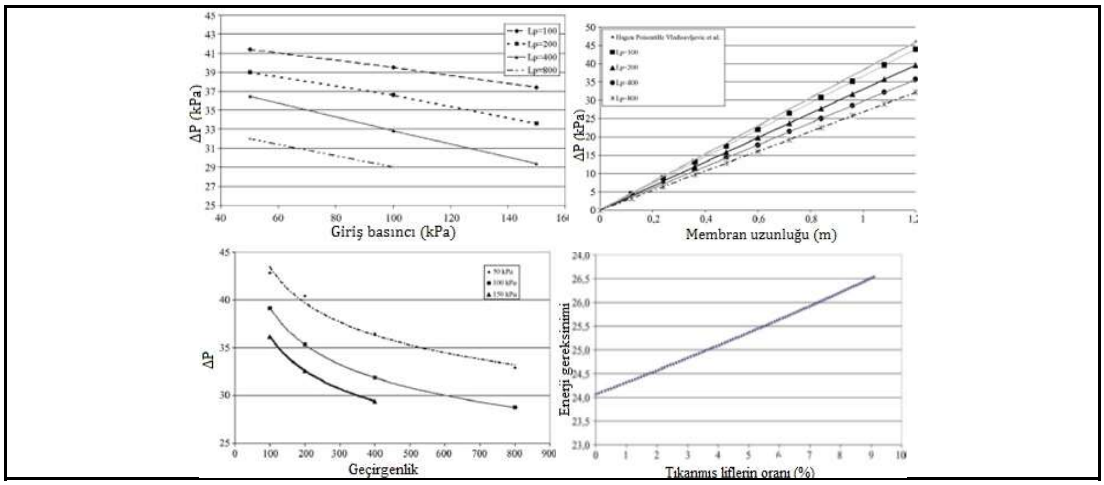
Membran ayırımının ideal bir teknoloji olduğu düşünülmemelidir. Fakat diğer temel proseslere göre daha avantajlı bir prosestir. Bu yüzden de teknik ve ekonomik olarak uygulanabilir, doğru tahmin yapabilen güvenilir fiziksel bir modelin olması önemlidir. Böyle bir modelin olması ayrıca proses optimizasyonu yapabilmek, yeni membran materyalleri ve modülleri geliştirip bunların membran uygulamalarındaki avantaj ve dezanavantajlarını görebilmek açısından önemlidir.

Ghidossi ve diğ. (2006), akış karakteristiklerini kontrol ederek içi boşluklu membran modülünün performans değerlendirmesini CFD kullanarak yapmıştır. Çalışmanın amacı işletme koşulları ve membran karakteristiklerinin modüldeki basınç düşüşüne bağlılığı basitleştirilmiş model denklemler kullanılarak belirlenmiştir. Ticari CFD pakedi olarak FLUENT kullanılmıştır Çalışmada işletme koşulları ve membran karakteristiklerinin modülde gerçekleşecek basınç değişimlerine etkileri laminar akışa sahip sıkıştırılamaz Newtonian akışkan için Navier- Stokes denklemleri kullanılarak modellenmiştir. Modelde kullanılan geometri Şekil 2.44'de verilmiştir.

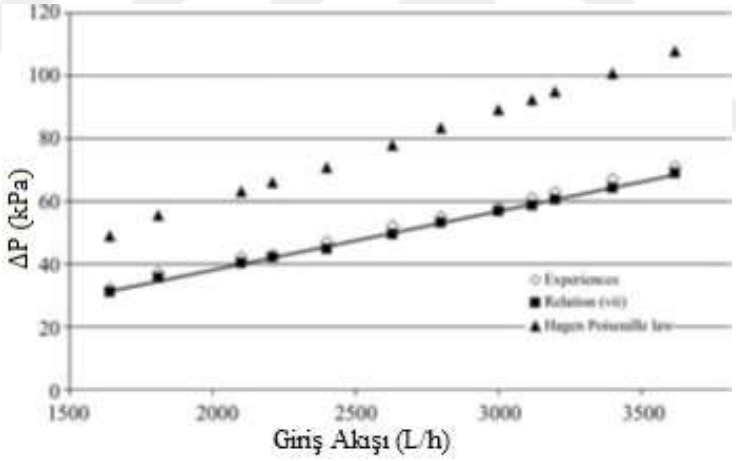


Şekil 2.44 : Çalışmadan kullanılan geometri,(Ghidossi ve diğ. ,2006).

Çalışmanın sonunda suyun giriş hızının, membran uzunluğunun ve bulunduğu yerin basınç düşüşlerine etkisi olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 2.44). Tıkanma hesabını yaparlarken bir fiberdeki tıkanmanın tüm membranlardaki tıkanmayla aynı olacağı varsayılıp modelleme yapılmıştır ve tıkanma yüzünden içi boşluklu membranlarda enerji tüketimi yaklaşık olarak %7-10 arasında artış gösterdiği bulunmuştur (Şekil 2.45). Model, modelleme sonuçlarıyla deney sonuçları karşılaştırıldığında birbirine yakın sonuç vermiştir (Şekil 2.45).

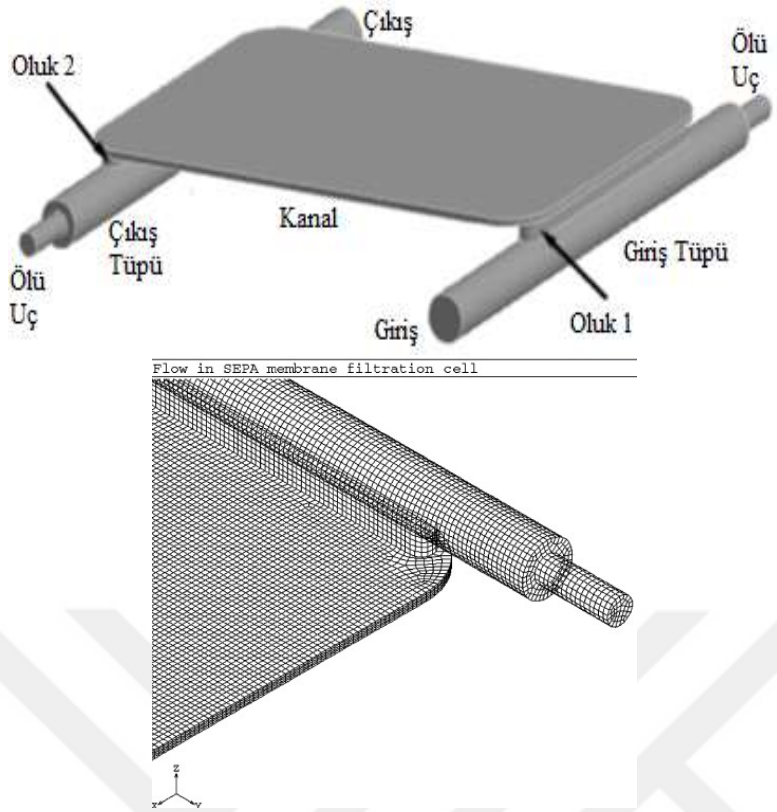


Şekil 2.45 : (sol üst)- farklı geçirgenlik değerleri için giriş basıncındaki değişikliklere bağlı basınç düşüşlerindeki değişimler (d = 1 mm, L = 1.2 m, v=1ms^{-1}), (sağ üst)- farklı geçirgenlik değerleri için membran uzunluğuna bağlı olarak membran boyunca meydana gelen basınç düşüşlerindeki değişimler (d = 1 mm, L = 1.2 m, v=1ms^{-1}), (sol alt)- farklı giriş basınçları için geçirgenliğe bağlı basınç düşüşlerindeki değişimler (d = 1 mm, L = 1.2 m, v=1ms^{-1}), (sağ alt)-tıkanan hollow fiber yüzdesine bağlı olarak uygulanması gereken pompa gücündeki değişimler (Lp =100Lh^{-1} m^{-2} bar^{-1}, v=1ms^{-1}, Pi = 150 kPa, d = 1 mm, L = 1.2 m, Qinlet = 200m^3 h−1, 35,000 hollow fibers), (Ghidossi ve diğ., 2006).



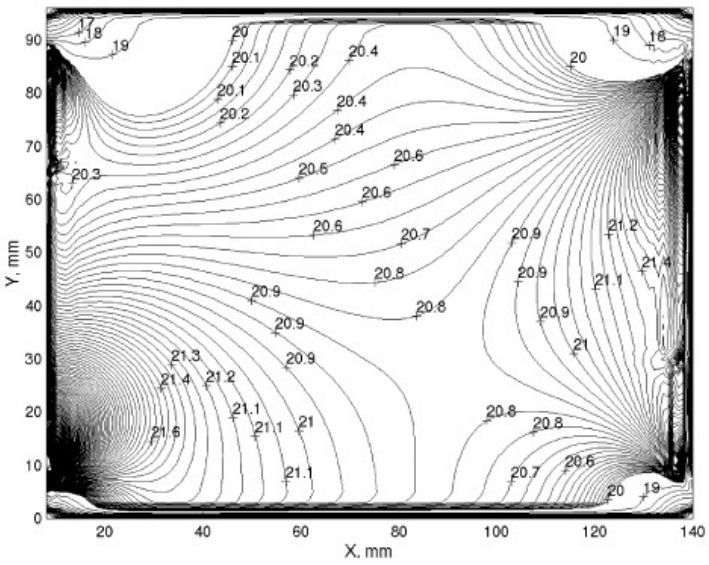
Şekil 2.46 : Nümerik çözümlerden ve deneyler sonucu farklı giriş basınçları için elde edilen basınç düşüşlerinin karşılaştırılması, (Ghidossi ve diğ. ,2006).

Tarabara ve Wiesner (2003), düşük geri kazanımlarda çalıştırılan SEPA CF düz plaka membranların akış modellemesini yapmak için CFD kullanmıştır. Çünkü laboratuvar çalışmalarında sıklıkla küçültülmüş ölçekli endüstriyel filtrasyon üniteleri kullanılır ve membran yüzeyindeki akışı ve kayma gerilimini bilmek bu tarz küçük ölçekli deneyler için hayati önem taşır. Çalışmada problem, sıkıştırılamaz newtonian akışkanı için sabit izotermal laminar akış olarak seçilmiştir. Basınç, hız, ve kayma gerilimi dağılımlarını 1mm çözünürlüklerde farklı giriş hızları için hesaplanmıştır. Model geometrisi Şekil 2.47'de verilmiştir.



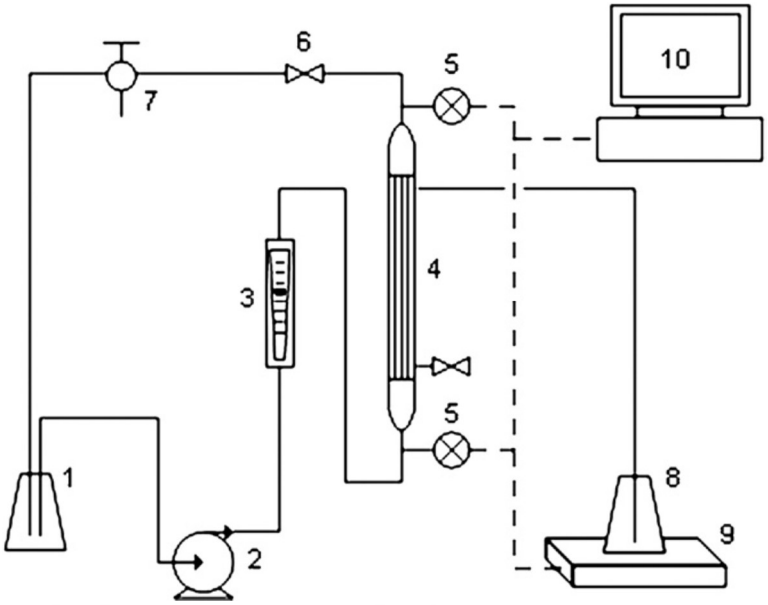
Şekil 2.47 : (Üst)- SEPA CF membran filtrasyon hücresinin şematik gösterimi, (Alt)- Mesh yapısı,(Tarabara ve Wiesner, 2003).

Modelin meshlenmesinde sweep, bazı yerlerde ise hekzahedral mesh atılmıştır, modelde kullanılan mesh sayısı 138336'dır. Kanalda türbülans oluşturu spacer olmadığı varsayılmıştır. Yaptıkları çalışma 24 iterasyon sonucunda yakınsama göstermiştir. Modele göre oluk girişlerinin arkasında, giriş ve çıkış borularında ölü noktalar saptanmıştır. Her iterasyondan sonra kayma gerilimi, kayma oranı ve bölgesel Reynolds sayıları hesaplanmıştır. Hız gradyanları membrandaki kek oluşumunu etkiler. Bu sebeple üç farklı giriş hızı ve reynolds sayısı kullanılarak modelleme yapılmıştır. $V_{giriş}$: 9:351 m/=s, Re = 8:11 × 10^0 iken kanalın alt duvarındaki düzlem için kayma oranlarının üç boyutlu dağılımı Şekil 2.48'de verilmiştir. Kayma geriliminin yüksek olduğu yerler olarak olukla kanal arasındaki geçiş bölgeleri bulunmuştur. Kayma geriliminin az olduğu giriş ve çıkış bölgelerinde kek tabakası oluşumunun daha fazla olduğu görülmüştür.



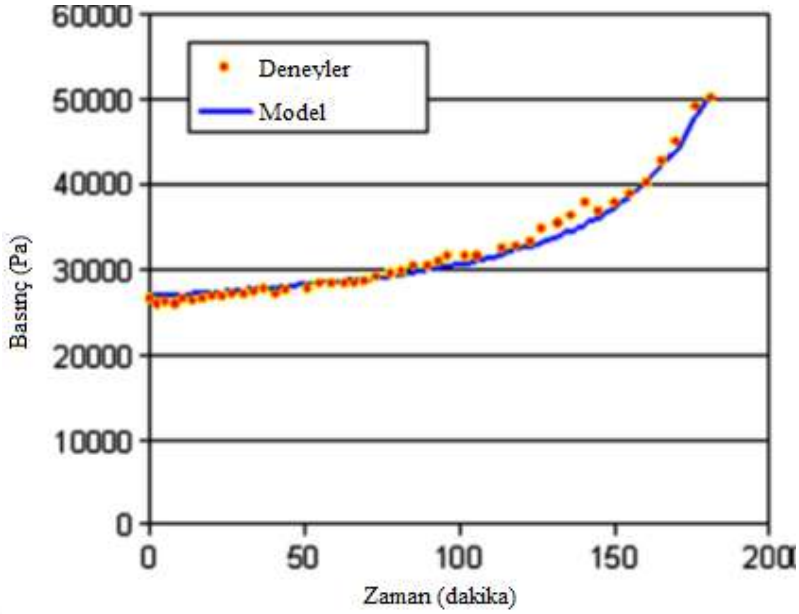
Şekil 2.48 : Kanalın alt duvarındaki düzlem için kayma oranlarının üç boyutlu dağılımı,(Tarabara ve Wiesner, 2003).

Marcos ve diğ. (2009), UF ünitesindeki akış ve konsantrasyon denklemlerini CFD de sonlu eleman yöntemi kullanılarak geçiş modeli oluşturup nümerik olarak çözdürmüştür. CFD modeli 2 boyutlu Navier Stokes denklemi ve geçiş durumları için kütle korunumu denklemleri kullanılarak geliştirilmiştir. Modellenecek sistem besleme tankı, besleme pompası ve hf modülünden oluşmaktadır (Şekil 2.49). 50 fiberlik kartuş sistemin esas kısmını oluşturmaktadır. Her fiber, birbirinden bağımsız olarak hareket eden gözenekli membranlardan oluşsan R çaplı ve L uzunluklu bir silindirdir. Çap (10^{-3}m) ve debi (Q_{feed}<5.8L/dk) küçüktür. Deneylerde ve simülasyonlarda kullanılan nominal debi Q=2L/dk, bir fiberin içindeki ortamala hız $V_{mean}=4Q/50\Pi D^2=1.02$m/s ve de maksimal Reynolds sayısı 1000'dir. Sonuç olarak akış laminar olarak varsayılmıştır. Polarizasyon katmanı ve kek tabakasının membranın dış tabakasının yarıçapını önemli olarak değiştirmediği ve bu yarıçapın filtrasyon boyunca sabit olduğu varsayılmıştır. Model tüm fiberlerin aynı özelliğe ve süzüntü akısına sahip olduğunu düşünmektedir. Bu sebeple de sadece bir fiber hesaplanmıştır.



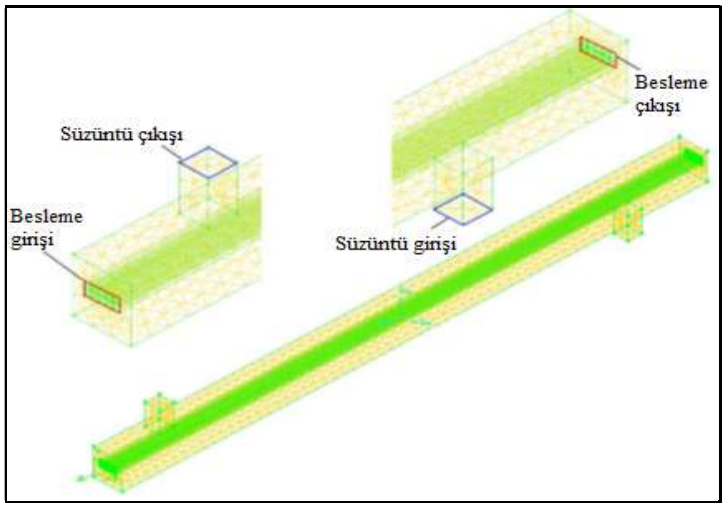
Şekil 2.49 : Deneysel düzenek 1)besleme tankı, 2)pompa, 3)akı ölçer, 4)membran, 5)basınç ölçer, 6)vana, 7)örnek alma vanası, 8)süzüntü kabı, 9)tartı, 10)PC/yazılım,(Marcos ve diğ., 2009).

Membran yüzeyinde kalan protein konsantrasyonu, besleme ve süzüntü suyu hızı ve basınçlarını birbirine bağlamak için direnç modeli kullanılmıştır. HF modülü içinde, değişken geçiş basıncı, değişen konsantre viskozitesi ve polarizasyon katmanı olduğu, zamanla membranda oluşan kek tabakasının arttığı varsaymışlardır. Çalışmada soya proteininin tamamen giderildiği bir HF modülündeki soya proteini konsantrasyonunun zamana göre nasıl değiştiğini gösteren deneysel sonuçlarla, modelin tahmin ettiği geçiş süzüntü akısı ve basınç profilleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmaya göre model, deney sonuçlarına uygun sonuç vermiştir ve viskozite akısının dirençteki ve konsantredeki değişimleri göz önüne almak gerektiğini göstermiştir. Modelle birlikte membran geçiş basıncının konsantrasyon polarizasyonu üzerinde etkisi olduğu gösterilmiştir ve de sabit bir membran geçiş basıncının konsantrasyon polarizasyonu hakkında yanlış sonuçlar vereceği bulunmuştur. Basınç profili incelendiğinde ise filtrasyon boyunca protein konsantrasyonu arttığı için konsantre viskozitesi de artar. Fiber giriş ve çıkışındaki basınç değişimleri bu viskozite artışına bağlı olduğu için filtrasyon zamanı ilerledikçe basınç artışı beklenir. Şekil 2.50'de görüleceği üzere hem deneysel hem modelden alınan sonuçlar bu savı destekler niteliktedir.



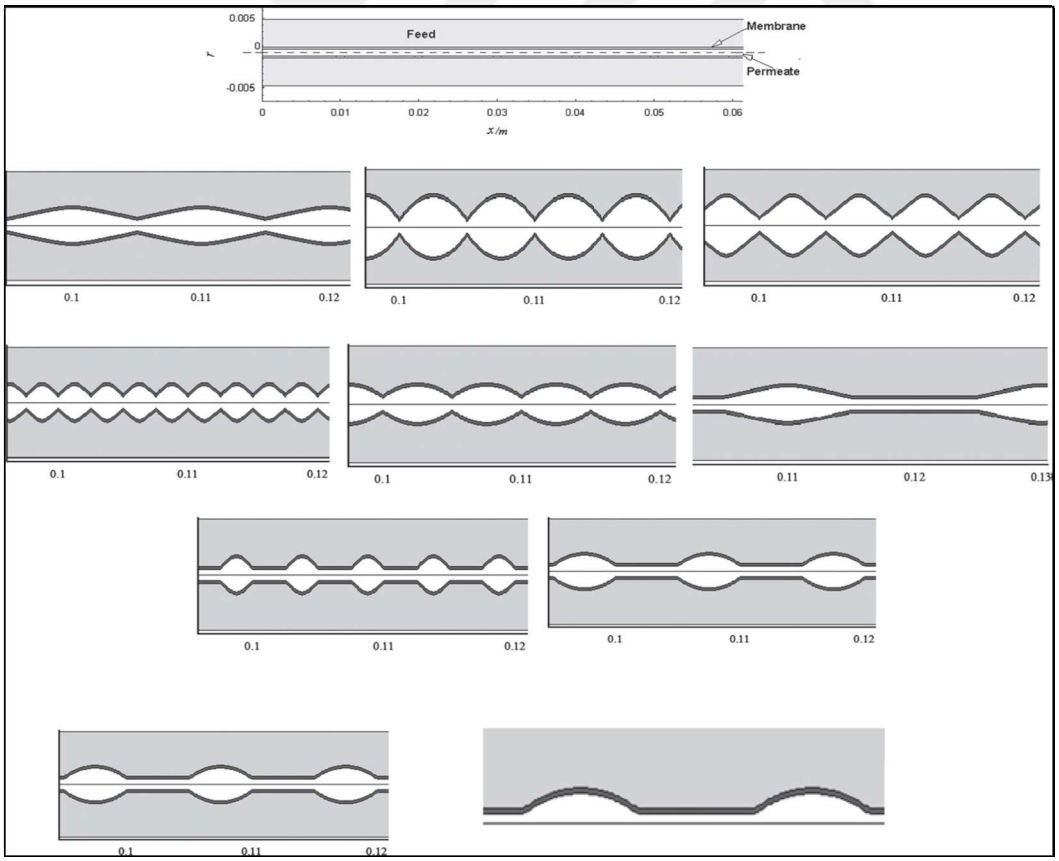
Şekil 2.50 : Membran geçiş basıncı 27580Pa'da iken protein ekstraksiyon konsantrasyonu için basıç değişimi (Marcos ve diğ., 2009).

Bir diğer çalışmada Chong ve diğ. (2012), hollow fiber membran modülü kullanarak direkt kontakt membran distilasyon (DKMD) modellemesi yapmıştır. Çeşitli CFD çoklu faz modelini membran içerisindeki ısı ve kütle davranışı açısından incelemişlerdir. DKMD'nin içindeki buhar basıncı göz önüne alınarak 3 farklı tür çoklu faz modellemesi yapılmıştır. Bunlar akışkan hacim modeli, karışım modeli ve Eulerian modellerdir. Akışkan hacim modeli iki veya daha fazla karişmayan sıvının arayüzeyini hesaplamak için kullanılan momentum denklemleridir. Bu model genel olarak katmanlı akış, serbest yüzey akışı ve de akışkan içindeki büyük kabarcıklar için kullanılır. Karışım modeli iki veya daha fazla fazın hız ve momentum denklemlerini çözerek karışımların modellenmesinde kullanılır. Eulerian model ise iki veya daha fazla faz için momentum ve devamlılık denklemlerini çözmek için kullanılır. Çalışmada farklı akışkanların farklı hızda karışımı söz konusu olduğundan karışım modeli kullanılıyor. Membran modülü iki giriş çıkışı olacak bir şekilde basitleştirilmiştir (Şekil 2.51). Besleme girişi ve süzüntü girişi "velocity inlet" olarak tanımlanmıştır. Besleme ve süzüntü çıkışları ise "pressure outlet" olarak tanımlanmıştır. Membran modülü yapısı itibariyle hidrofobik porlu membran olduğundan porous jump olarak, modül kasası ise duvar olarak tanımlanmıştır. Mesh işlemi quadrilateral mesh olarak seçilmiştir. Çalışmanın sonucu olarak CFD simulasyonunun DKMD sistemlerinde akışkan dinamiklerinin tahmin edilebileceği görülmüştür.



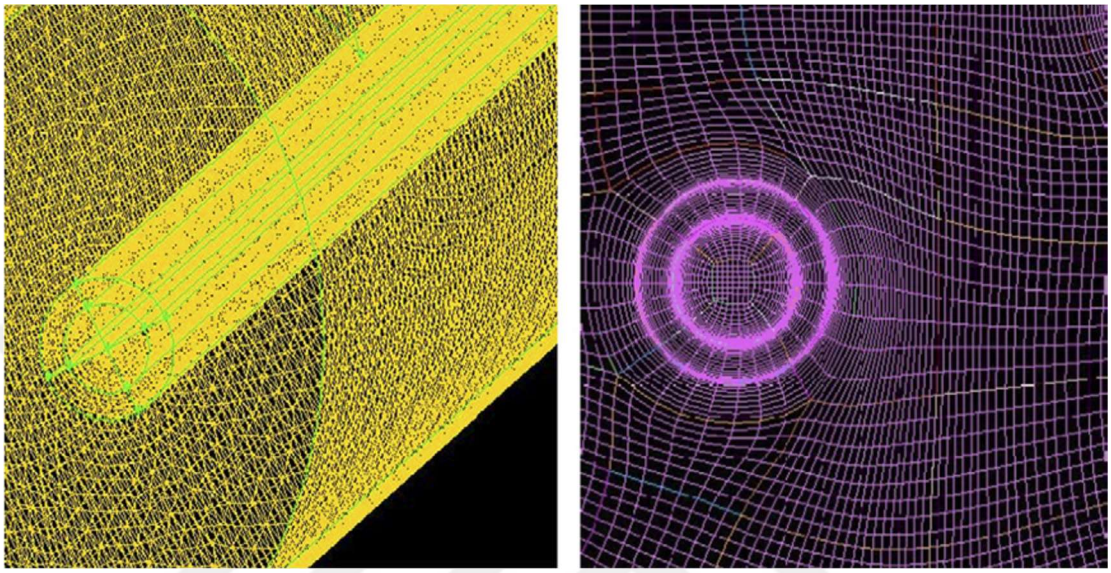
Şekil 2.51 : Çalışmada kullanılan mesh görüntüsü (Chong ve diğ., 2012).

Bir diğer membran distilasyonu çalışmasında (Yang ve diğ., 2012) ideal eksenli simetrik yapılı olduğu düşünülen 10 adet farklı geometriye sahip (Şekil 2.52) (dişli görünümden dalgalı görünüme kadar) hollow fiber modülü için direkt temaslı membrane distilasyon proses performans katkısını incelemiştir.



Şekil 2.52 : Çalışmada kullanılan modül geometrileri (Yang ve diğ.,2012).

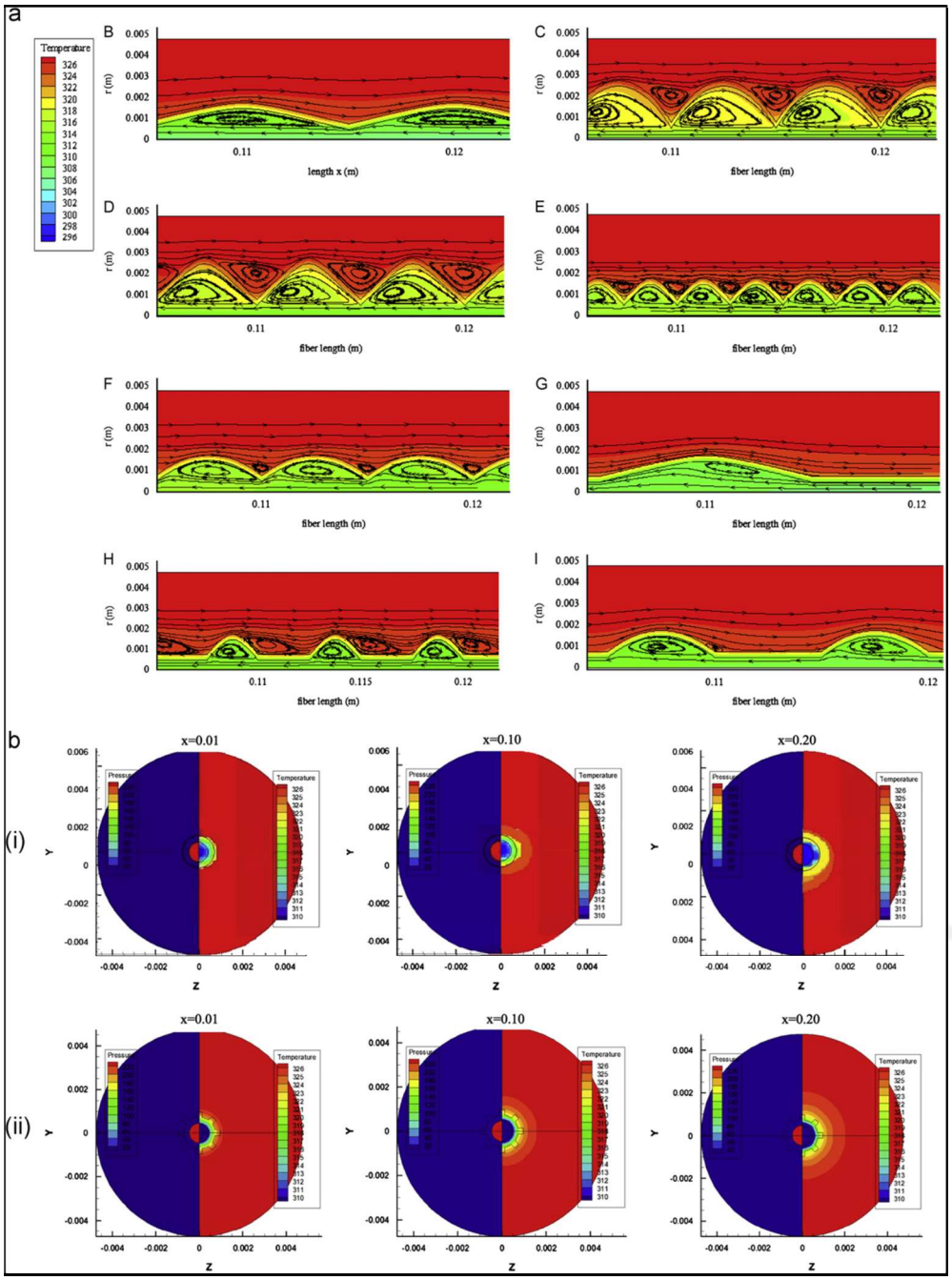
Her bir membran su üretkenliğini arttıracak şekilde sıvı sınır katmanları oluşturabilecek yeteneğe sahip karakterde seçilmiştir. Modelin simülasyonu laminar akış altındaki akış için laminar akış modelleri kullanılıp, türbülans akış içinse κ-ε modeli kullanılarak simüle edilmiştir. Meshleme için dörtyüzlü ve altıyüzlü bölümlendirme (grid) işlemi yapılmıştır (Şekil 2.53).



Şekil 2.53 : Mesh görüntüsü (Yang ve diğ., 2012).

Çalışmada farklı geometrik dizaynlara sahip olan modüllerde fiber uzunluğunun etkilerini incelemişlerdir. Şekil 2.54'de TPC eğrileri verilmiştir. Şekle göre konfigürasyonların TPC değerleri modül uzunluğunun artmasıyla düştüğü görülmüştür. Bütün göz önüne alındığında dişli şeklindekiler ve dalgalı şekildekiler yüksek TPC değerleri göstermiştir.

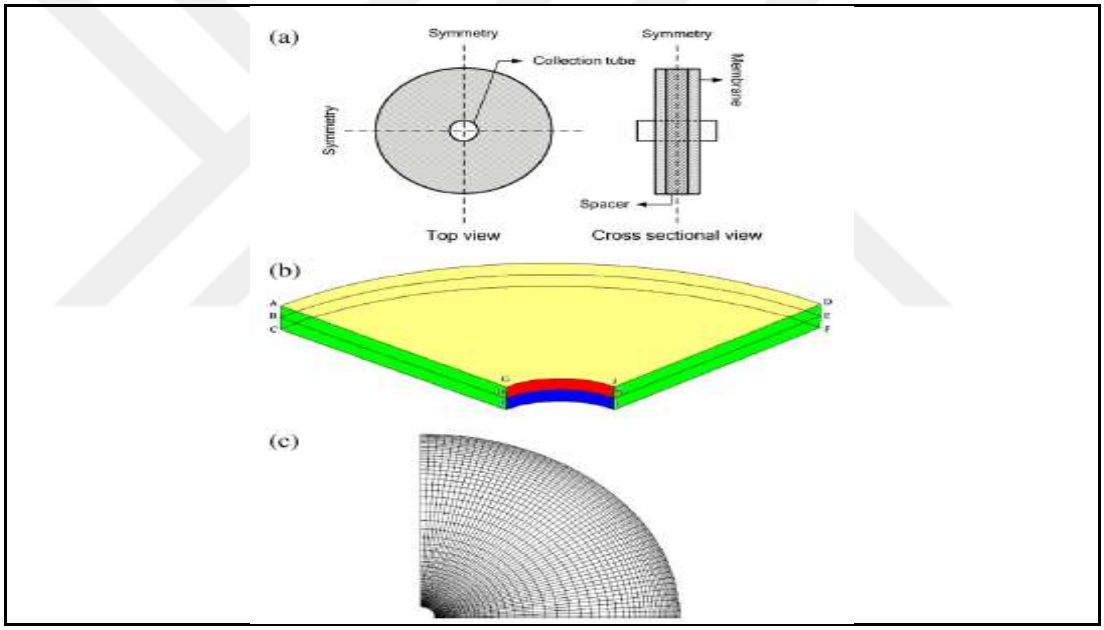
Çalışmanın sonuçlarına göre dişli şeklindeki fiber modülleri %57-65 civarında daha yüksek akı sağlamıştır. Düşük Reynolds sayılarında bu geometri için akış koşulları daha iyidir ve en yüksek su üretimi burada olmuştur. Ama hidrolik enerji tüketimi karşılaştırıldığında dişli şeklindeki modüllerde bu parameter en düşük olmuştur. Ayrıca dişli şeklindeki modüllerin besleme hızına karşı hassas olduğu bulunmuştur ve zorlu akış koşullarına dayanıklı hale gelebilmek için mikroyapılı dizaynların kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 2.54 : (a) dalgalı dizaynlar için bölgesel akış bölgeleri (b) Dalgalı 01, 5.0/1.0, b=0.8, (c) dalgalı 02, 2.5/2.0, b=0.5, (e) dalgalı 04, 1.25/1.0 , b=0.7, (f) dalgalı 05, 2.5/1.0, b=0.5, (g) dalgalı 06, alternatif 5.0/1.0, b=0.8, (h) dalgalı 07, alternatif, 1.25/1.0 , b=0.7, (i) dalgalı 08, alternatif 2.5/1.0, b=0.5 ve (b) tek fiberli modüllerin bölgesel basınç ve sıcaklık dağılımlarının karşılaştırılması (i)orjinal düz fiber; (ii)dişli fiber ($C=8.0x10^{-7}$ kg/m^{2}sPa ve Cn (dişli)$=6.4x10^{-7}$ kg/m^{2}sPa, L=0.25 m, T_{fi}=327.15 K, T_{pi}=293.85 K, u_{fi}=0.06 m/s, u_{pi}=0.417 m/s) (Yang ve diğ., 2012).

Li ve diğ. (2011) boşluklu disk tipi membran modüllerinin arasındaki sıvı akışını incelemiştir. Çalışmada membran modülünün geometrisinin, hacimsel debi, süzüntü akısı ve süzülme oranının bir boşluklu disk tip membran modülü içinde dağılımı üzerinde etkisine odaklanmıştır. SIMPLEC ve QUICK hız ve basınç bileşenlerini

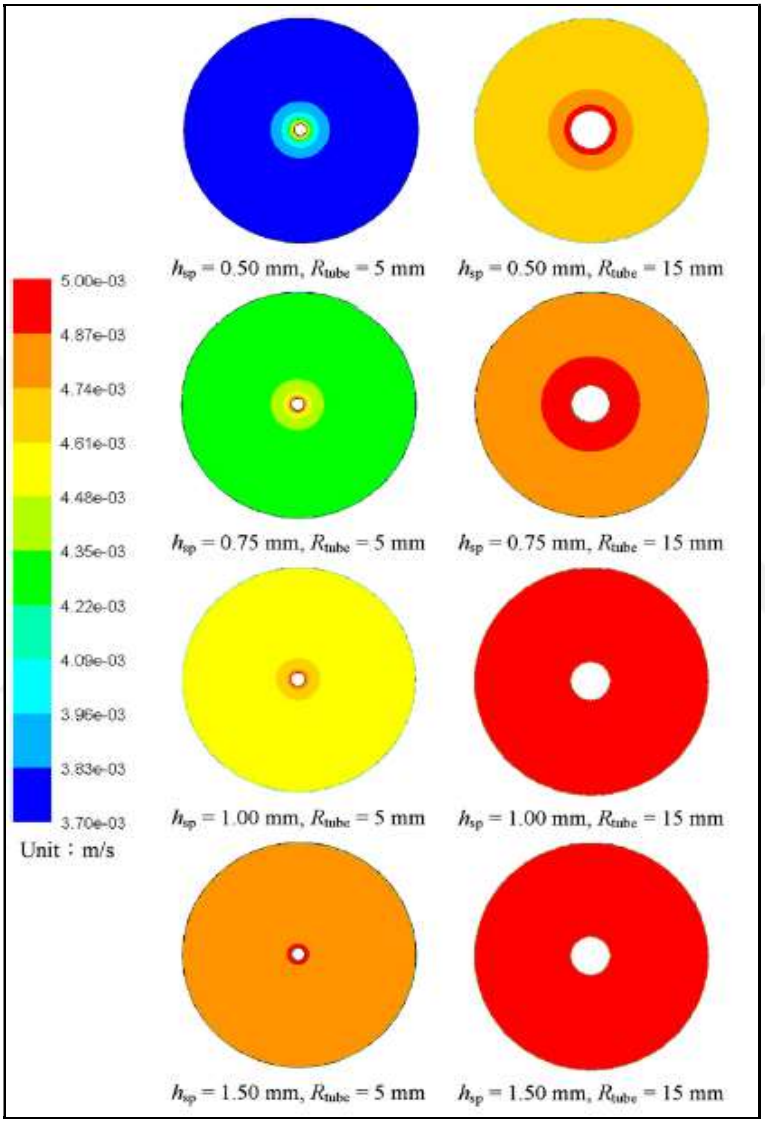
hesaplamak için kullanılmıştır. Şekil 2.55'te iki membran katman içeren (boşluk katmanı ve bir toplama tüpü) boşluklu disk tip membran modülü verilmiştir. Membran yapısı bir yüzey katmanı ve bir destek katmanından oluşmaktadır. Seçici yüzey katmanı PAN nano lif membran ile lamine edilmiştir. Destek katmanı non wowen PET ten yapılmıştır. Bu konfigürasyon geometrik olarak simetriktir (Şekil 2.55). GHKJ, ABED ve BCFE yüzeyleri duvarlar olarak kabul edilmektedir. ABHG, BCIH, JKED, KLFE ve CILF yüzeyleri simetrik planlar olarak ayarlanmıştır. ADJG ve HKLI sırasıyla basınç giriş ve çıkış sınırları olarak tanımlanmıştır. Buna ek olarak, AGJDEBHK ve BCIHKFE alanları sırasıyla membran tabakası ve destek tabakasıdır. Bu basitleştirilmiş sistem işlem süresini azaltmak için bu çalışmada bu haliyle kabul edilmiştir. Boşluklu disk tip membran modülünün geometrik parametreleri Şekil 2.55'de listelenmiştir.



Şekil 2.55 : (a)- Membran modülü şematik gösterimi, (b)- boşluklu disk tipi membran modüllerinin geometrik parametreleri, (c)- farklı TMP'lerde saf su akısı (Li ve diğ., 2011).

Çalışmada membran modülünün performansına modül toplama tüpünün, boşluk kalınlıklarının ve transmembran basıncının etkisi incelenmiştir. Bunlardan membran modülüne boşluk kalınlığının etkisi Şekil 2.56'de verilmiştir. Sonuçlara göre boşluk kalınlığı arttırıldığında süzüntü akısı da artmaktadır.. 1 bar TMP ve R_{tube} =5 ve 15 mm arasındayken boşluk kalınlığının membran üzerindeki geçirgenlik oranı dağılımına etkisi Şekil 2.56'da gösterilmiştir. En büyük geçirgenlik oranı aralığı ve en düşük geçirgenlik oranı değerleri, R_{tube}=5 mm ve h_{sp}=0,5 mm iken meydana gelmiştir. Boşluk

kalınlığı 1,5 mmye yükseldiğinde, geçirgenlik oranı aralığı 4,74x10^{-3} den 5x10^{-3}m/s ye daralmıştır. Boşluk kalınlığı 1 mm den büyük iken R_{tube} 15 mm de, geçirgenlik oranı aralığı en düşüktür. Çalışmanın sonucunda modül toplama tüpü boyutunun ve boşluk kalınlıklarının membran performansını iyileştirmede kullanılabilecek bir parametre olduğu görülmüştür.

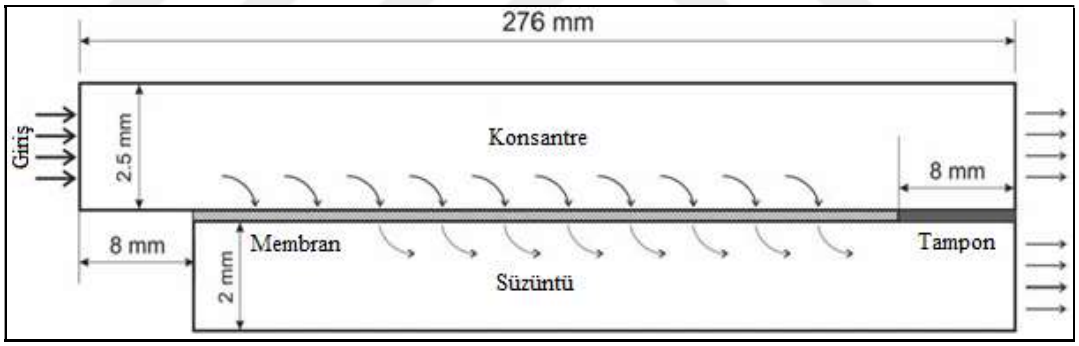


Şekil 2.56 : Boşluk kalınlığının R_{tube}=5mm ve 15mm iken ve TMP=1bar iken geçirgenlik değerlerine etkisi(Li ve diğ., 2011).

Pak ve diğ. (2008) laminar akım şartlarında nümerik yöntemler kullanarak geçirgen bir membran tüp üzerinde sonlu hacim yöntemiyle iki boyutlu akış alanı, partikül taşınım ve iletim denklemlerini hesaplamıştır. Navier-Stokes denklemleri kütle transfer denklemleriyle birlikte SIMPLE algoritması kullanılarak sonlu hacim metoduna göre çözdürülmüştür. Bu doğrultuda 70x200'lük kontrol hacimleri kullanılmıştır. Bu çalışmada farklı işletme koşullarının membran yüzeyindeki

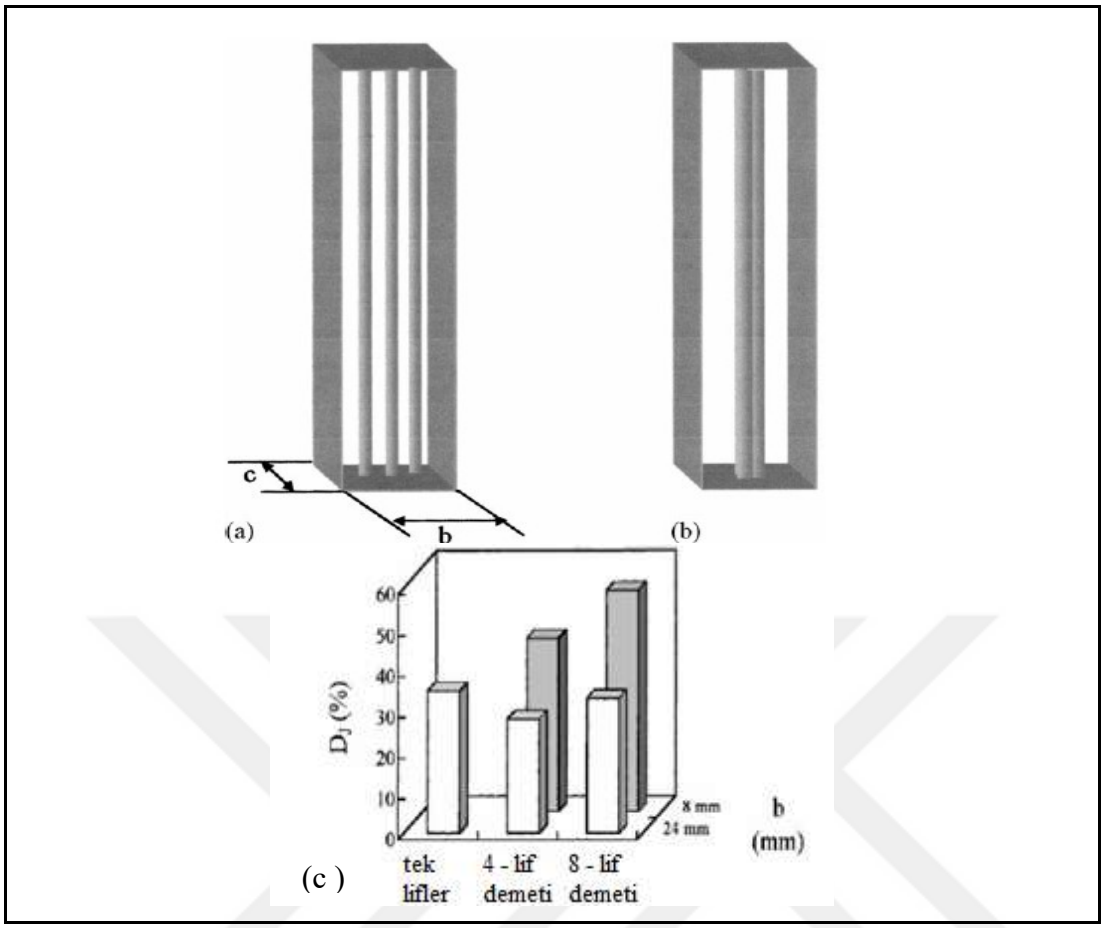
konsantrasyon polorizasyonu üzerindeki etkisi çalışılmıştır. Eksensel konsantrasyon profilleri membran uzunluğunun bir mikrofiltasyon çapraz akışlı membran tasarımı için önemli bir faktör olduğunu ortaya koymuştur. Nümerik sonuçlara göre yüksek eksenel Reynolds sayısı lokal konsantrasyon sınır tabakasının kalınlığının düşmesine yol açtığı, ayrıca yüksek Schmidt sayısının da aynı etkiye sebep olduğu görülmüştür. Genel olarak, türbülans koşulların membran performansını geliştirebileceği kabul edilmiştir.

Alexiadis ve diğ. (2007) laboratuvar ölçekli düz plaka ters ozmos membran modülünün CFD modellemesini yapmıştır. Deneysel ve nümerik çalışma sonuçları karşılaştırılmıştır. Deneysel modül, besleme ve süzüntü kanalları olmak üzere iki dikdörtgen kanaldan oluşmakta olup Şekil 2.57'da verilmiştir. Simülasyon olarak CFX4 kullanılmıştır. Membran kanalında 50 hücrelik, besleme kanalı boyunca ise 100 hücrelik meshlerin gride bağımsız sonuç verdiği bulunmuştur. CFD ile duvar konsantrasyonu ve yarı-empirik doğrulamalar karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre bu doğrulamalar en başta duvar konsantrasyonu hakkında düzgün bir sonuç verse de kanaldaki konsantrasyon profilini hesaplarken düzgün sonuç verememiştir.



Şekil 2.57 : Kanal geometrisi (Alexiadis ve diğ., 2007).

Chang ve Fane (2001) batık biyoreaktörlerde ara-lif iki fazlı debi ile filtrasyon ve akı dağılımı üzerinde lif çapının etkisini incelemiştir. Farklı çaplardaki düzenli boşluklu liflerin özel olarak tasarlanmış bir gövde içerisinde tutturularak batık ve batık olmayan membranlar için bir biyokütle modeli test edilmiştir. Bunun için altı farklı lif çapı denenmiştir ve ayrıca bir dikey batık model lif boyunca akı dağılımı teorik model içinde geliştirilmiştir. Modül performansı lif çapı değişikliklerine duyarlıdır. Lif çapı arttıkça akı düşmesi artar. Sonrasındaysa liflerin kanal içerisine yerleştirilmesinin etkileri incelenmiştir. Bunun için kurulan düzenek ve akı azalımı Şekil 2.58'de verilmiştir.

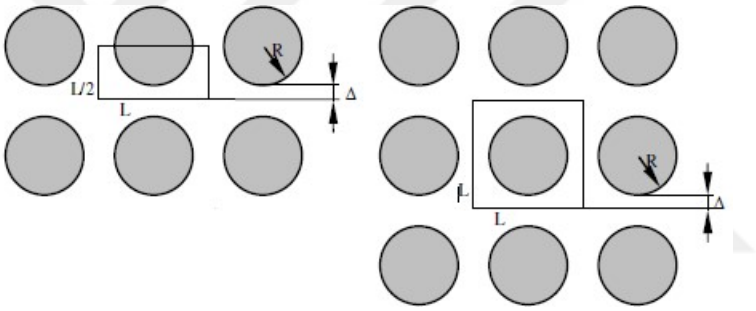


Şekil 2.58 : Çapraz akışlı hücre kanalı içinde liflerin düzenlenmesi. (a) şeklinde lifler kontollü aralıklarla kanala sabitlenmiştir. (b) şeklinde ise, lifler kanalın merkezinde sabitlenmiş ve her destede 4 ve 8 lif demetleri içermektedir. Kanal boyutu 4 mm kanalın genişliği 24 ve 8 mm olarak belirlenmiştir. c) 24 ve 8 mm lik kanallarda ki farklı çap düzenlemeleri ile 90 dakika filtrasyon için akı azalımı (Chang ve Fane, 2001).

Sonuçlara göre 8 mm lik kanal için 4 ve 8 lifli destelerde akı azalımı değişimi artmıştır. Batık sistemlerin performansının belirlenmesinde lif yoğunluğunun optimizasyonunun çok önemli olduğu sonucuna varılmıştır. Deneysel olarak lif çapının filtrasyon performansına etkisi ve batık boşluklu liflerin, lifler boyunca akı dağılımı teorik olarak keşfedilmiştir. Batık membran biyoreaktörün liflerinin optimizasyonu akının dengelenmesi ve orantısız akı dağılımını içermekte olup, her ikisinin de lif ebadı azaldıkça arttığı gözlemlenmiştir.

Hellström ve Lundström (2006) poroz bir ortamdaki akışın gerçek mekanizmasını ortaya çıkarmak için CFD yaklamışını kullanmıştır. Akışın gözenekli bir ortamda modellemesi yapılırken atalet kuvvetleri hesaba katılmalıdır. Bu genellikle empirik Ergun denklemi ile tanımlanarak yapılmakta, ancak akışın gerçek mekanizmasını ortaya çıkarmamaktadır. Bu tarz akışların daha iyi anlaşılabilmesi için Re akış üzerine

paralel silindirlerin arasındaki mikromekanik tabanlı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yaklaşımı kullanılmıştır. Simulasyon kaliteli ve güvenilir bir şekilde hücre oluşturma tekniği ile ve iterasyonların yeteri derecede küçük olmasıyla tamamlanmıştır. Simülasyondaki sınır koşulları konusunda gözenekli ortamdaki hücrelerin üst ve alt yüzeyleri simetrik yüzeyler olarak tanımlanmıştır. Simulasyonları kolaylaştırmak bakımından Şekil 2.59'da hücreler sabit ve değişken olarak tanımlanmıştır. Her iki hücre için, ayrıştırma için ANSYS ICEM CFD 10.0 Hexa kullanılmıştır, blok yapının olabildiğince başarılı bir geometride tanımlanması ve yansıtılması da yapılmıştır. Hücre oluşturma çalışmasında hücreler düz yönde, düğüm noktaları ise düz yönün dışarısında üniform olarak her iki durum içinde gerçekleştirilmiştir. Değişken simülasyonlar için geometri aynalanmış ve böylece tüm silindir bir hücre içerisine sığdırılmıştır. Ayrıca Reynolds sayısının 150'den küçük olduğu durumlar sabit akış olarak varsayılmıştır.

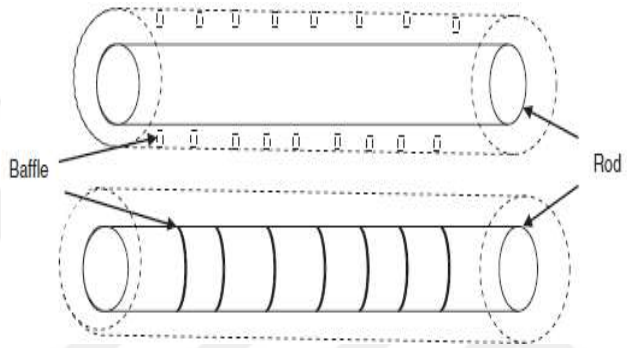


Şekil 2.59 : Simülasyonda kullanılan hücreler; (sol) sabit akışlı hesaplamar için, (sağ) değişken akışlı hesaplamalar için (Hellström ve Lundström, 2006).

Simülasyonlarda Reynolds sayıları 0.001 ile 1000 arasında değişmektedir. Simülasyon sonuçlarına göre Reynolds sayısı 10 civarındayken gözenekli ortamdaki akış için atalet etkilerinin hesaba katılması gerektiği, Reynolds sayısı 20'ye kadar olan değerlerde simülasyon sonuçları Ergun denklemiyle aynı sonuç vermektedir Reynolds sayısı 880'e kadar olan hesaplamalara kadar simülasyonun doğru sonuç verdiği görülmüştür. Daha yüksek değerler için formülün geliştirilmesi gerekmektedir.

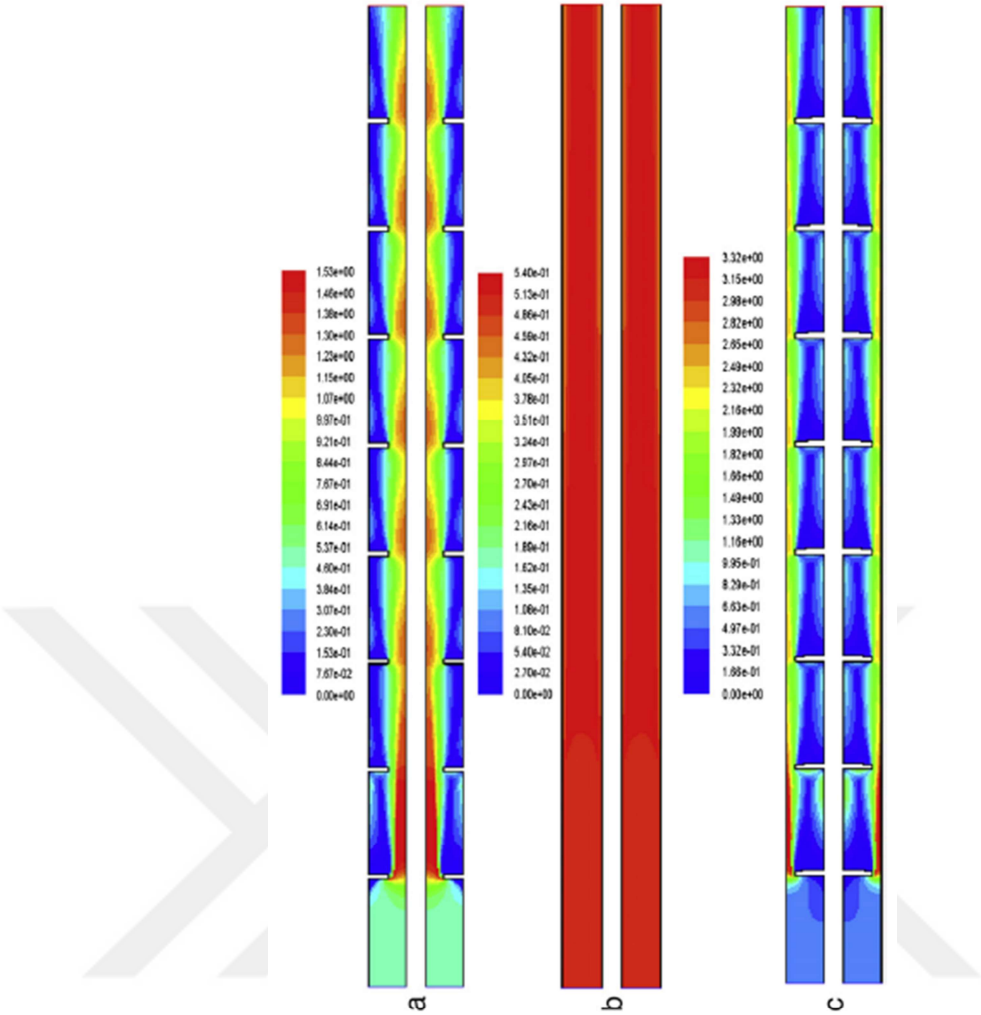
Ahmed ve diğ. (2011) çalışmasında eş merkezli çubuk etrafına yerleştirilmiş perdeli bir membran kanalındaki türbülans akışın simülasyonunu yapmıştır. Akışkanın dinamik özellikleri akış örüntüsünü, davranışını ve özelliklerini bulmak için incelemiştir. Ayrıca hız, statik basınç, duvar kayma gerilimi, türbülans kinetik enerjisi, türbülans dağılım enerjisi gibi bölgesel parametrelerin dağılımı da CFD kullanılarak elde edilmiştir. Akışkanın Newtonian, sıkıştırılamaz, izotermal ve sabit koşullarda

altında olduğu varsaymıştır. CFD modelinde süreklilik, Reynolds ortalamalı Navier-Stokes denklemleri kullanmıştır. Reynolds gerilimlerini türbülans viskozitesiyle ilişkilendirmek için, Boussinesque yaklaşımı kullanmıştır. CFD simülasyonları duvara yakın bölgelerde ince meshler atılarak RNG k-ε modeli kullanılarak yapmıştır. Model geometrisi Şekil 2.60'da görülebilir. CFD kodu olarak FLUENT kullanmış ve sonlu hacim yöntemiyle perde bulunan kanalın içindeki türbülans akış simüle etmiştir. İki boyutlu basınç bazlı ayrık çözücü ile birlikte modelin geometrisine bağlı olarak 1.derece diferansiyel denklem kullanmıştır. SIMPLE algoritmasıyla basınç-hız eşleşmesi çözümlenmiş, PRESTO ile basıncı ayrıklaştırmıştır.



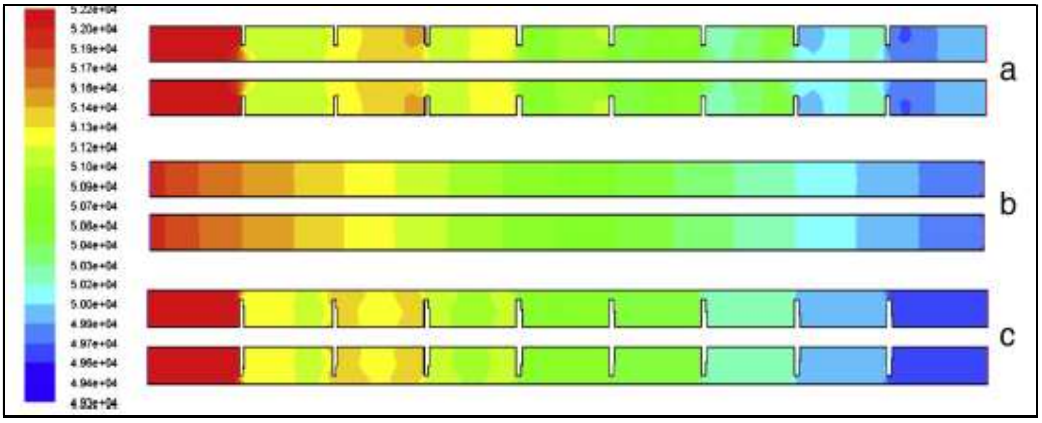
Şekil 2.60 : Modelin şematik gösterimi (Ahmed ve diğ., 2011).

Bütün simülasyonlarda giriş hızı 0.5m/s, çıkış basıncı da 50KPa seçilmiştir. Perdeli tübüler membran simülasyonu sadece bir çubuk içeren boş bir tüple karşılaştırılmıştır. Şekil 2.61'de perdeli duvar, boş tüp ve perde çubuklu tübüler kanalların besleme hızı 0.5 m/s ve Re=6000'e eşitkenki hız profilleri verilmiştir. Perdeli duvara sahip olan tübüler membran için akışın türbülanslı olduğu görülmektedir her ne kadar iç kısımlarda durağan bölgeler de olsa. Bu durumda, besleme suyu içerisindeki parçacıklar membran yüzeyinde birikmeye meyillidir, bu sebeple de membran akısı düşebilir. Ama çubuk üzerinde perde bulunduğunda sadece türbülans artmakla kalmamıştır, ayrıca membran yüzeyinde parçacık birikmesi de engellenmiştir. Bu etkilerin biraraya gelmesiyle membrandaki konsantrasyon polarizasyonu ve tıkanma azalmıştır bu da membran performansını arttırmıştır. Perde bulunmayan membranda ise ne güçlü bir akışın olduğu ne de durağan bir akışın olduğu bölge gözlemlenmişir. Üniform bir dağılım vardır bu da perdeli membranlarda neden daha yüksek akı elde edildiğini kısmen açıklayan bir sebep olarak bulunmuştur.



Şekil 2.61 : a)perdeleri duvarda olan, b)boş tüp, c)perdeleri çubukta olan membran kanalları boyunca hız büyüklükleri (m/s) (Ahmed ve diğ., 2011).

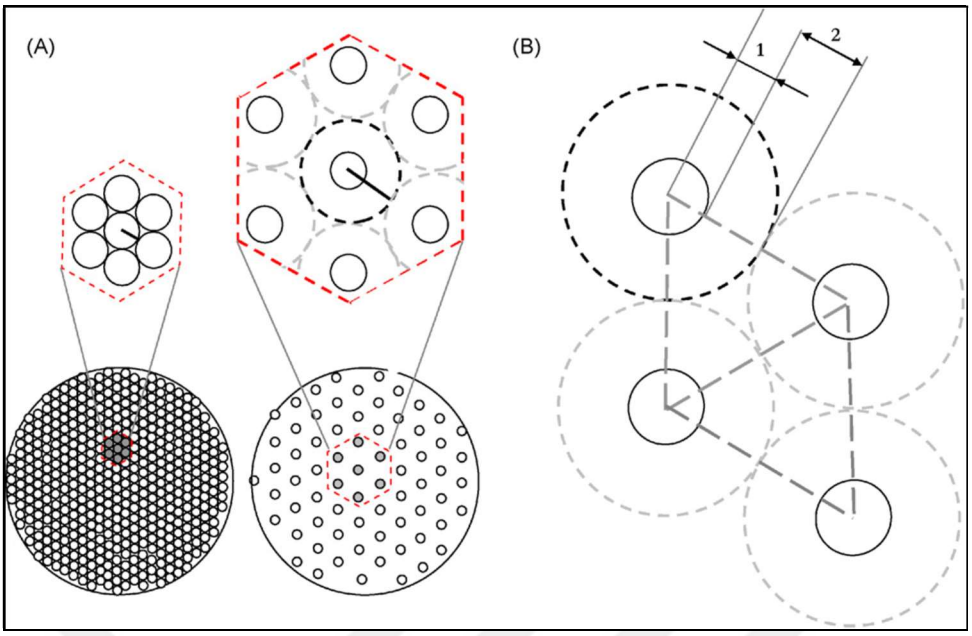
Şekil 2.62'de ise farklı tübülar membran konfigürasyonlarının statik basınç üzerine etkisi incelenmiştir. Buna göre basınç düşüşünün derecesinin geometrideki engellere ve Reynolds sayısına bağlı olduğu bulunmuştur.



Şekil 2.62 : a)perdeleri duvarda olan, b)boş tüp, c)perdeleri çubukta olan membran uzunlukları boyunca statik basınç dağılımı (Pa) (Ahmed ve diğ., 2011).

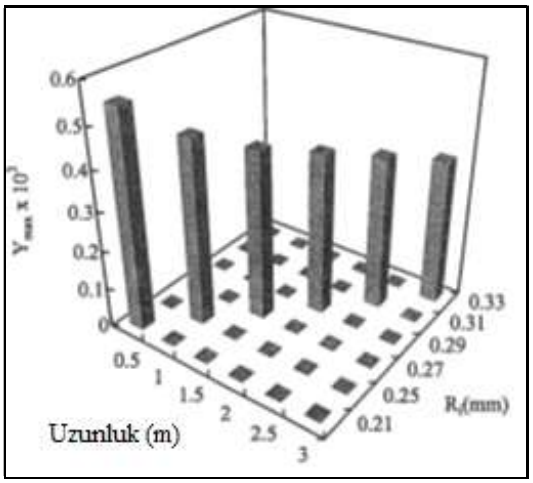
Sonuçlara göre çubuğun ve duvar perdelerinin oluşu hem bölgesel duvar hızında hem de duvar kayma geriliminde dalgalanmalara sebep olmuştur. Çubuklar üzerine sabitlenen perdeler duvar perdeleriyle karşılaştırıldığında daha fazla akı elde edilmesini sağlamıştır. Perdelerin varlığı akış yönünü ve girdap oluşumunu etkilemiştir ki bu da basınç kaybı ve enerji masrafı demektir. Bu sebeple perdelerin optimizasyonunun yapılması gerekmektedir. Bu optimizasyon perde çapını, ve aralarındaki boşlukları değiştirerek ya da giriş hızı, viskozitesi, ve kanal boyutlarıyla oynanılarak da yapılabilir olduğu sonucuna ulaşmıştırlar.

Günther ve diğ. (2010) HF modüllerindeki paketleme yoğunluğunun ve filtrasyon çalıştırma modunun filtrasyon performansı üzerine etkisini analiz etmiştir. Akış ve filtrasyon hızı simülasyonları için sonlu eleman yöntemi kullanmıştır. Filtrasyon performansına Happer'in serbest yüzey modeline göre her HF membranın yaptığı katkının eşit olduğu varsaymıştır. Kanaldaki akış Newtonian, laminar, sabit ve sıkıştırılamaz olarak seçmiştir. Ve modelin formüle edilebilmesi adına akışın tek fazlı ve de fiberlerin hareket edemez olduğunu varsaymıştır. Silindirik modüllerin içten dışa çalışma modundayken yatay kesit ana akışa normal, dıştan içe çalışırkense ana akışa dik olduğunu varsaymıştır. Hekzagonal istif düzeni yapılmış ve 4 komşu diski tepe noktası alan eşkenar dörtgen şeklinde meshler atılmıştır (Şekil 2.63). Fiber boyunca 100 hücreli mesh, iç kanal boyunca 20 hücreli mesh, gözenekli ortam boyunca 10 hücreli mesh ve dış kanal için de çapı D=25µm, 50µm and 100µm olan kanallara sırasıyla 5,10 ve 20 hücreli meshler atılmıştır. Giriş basıncı akışa dik olarak 0.8 bar seçilmiştir. Kanallar ve gözenekli duvardaki akışı çözmek için COMSOL kullanılmıştır. Modele göre içten dışa çalışma modundayken fiber boyunca basınç düşüşü artmalıdır. Dıştan içe mod çalıştığında ise yüksek paketleme yoğunluğuna sahip modüldeki basınç düşüşü düşük paketleme yoğunluğuna sahip modüldekinden daha fazladır. Paketleme yoğunluğuna bağlı olarak oluşan yer kısıtlamaları kanalın üstünde altında olduğundan daha fazla basınca sebep olur. Filtrasyon membranarası geçiş basıncının fazla olduğu bölgelerde gerçekleşir. Özetlemek gerekirse paketleme yoğunluğunu arttırmak fiber boyunca eşit olmayan bir geçirgenliğe sebep olur, ayrıca yüksek paketleme yoğunluklarında filtrasyon akışında çok büyük azalmalar meydana gelir. Filtrasyonun fiberin alt kısımlarında gerçekleştiği gözlemlenmiştir.



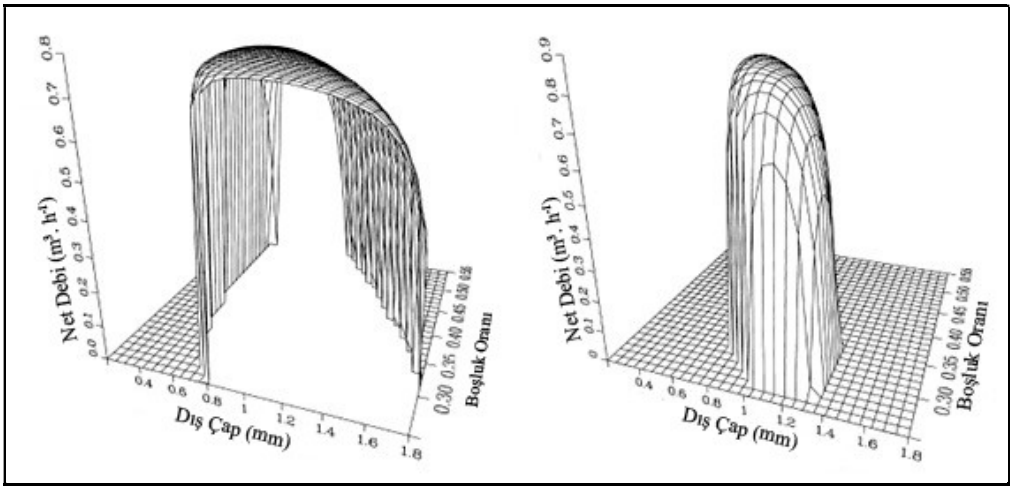
Şekil 2.63 : a)Yüksek ve düşük paketleme yoğunluğuna sahip hekzagonal ve b) 4 komşu kenarı birleştirerek elde edilen eşkenar dörtgen meshin şematik gösterimi (Günther ve diğ., 2010).

Chang ve diğ. (2002); yaptıkları çalışmada sabit süzüntü suyu çalışma modundaki batık hollow fiber modülü için iki farklı koşul altındaki filtrasyon davranışını incelemiştir. İlk incelenen durum fiber boyunca maksimum akının kritik akıdan düşük olmasıdır. Diğer durum ise maksimum akının kritik akıdan yüksek olup fiberin iç alanından elde edilen ortalama akının kritik akıdan küçük olduğu durumdur ($J_{imax}>J_{cr}$ fakat $J_{mi}<J_{cr}$). İlk durumda birikme yaşanmamıştır ve filtrasyon direnci filtrasyon boyunca sabit kalıp, fiber boyunca başlangıç akısını tahmin etmek için kullanmıştır. Öte yandan ikinci durumda bir birikme gerçekleştikten sonra filtrasyonun sabit duruma geçebilir olduğu görülmüş ve fiber çapı azalırsa filtrasyon direncinin arttığı gözlemlenlenmiştir. Başlangıçtaki bu birikme J_{mi}/J_{cr} oranından, fiber boyu, fiber iç çapı ve membran direnci gibi fiber karakteristiklerinden etkilenmiştir. Bu durumun özellikle dar ve uzun hollow fiberleri etkilemekte olduğu görülmüştür. Bu sebeple fiber boyu ve yarıçapınının optimizasyonu yapılmıştır. Şekil 2.64'de fiber yarıçapı ve uzunluğunun optimum değerleri verilmiştir. Optimum fiber yarıçapı fiber uzunluğuyla birlikte artmakta olduğu görülmüştür. Bunun sebebi olarak da paketleme yoğunluğu ve basınç düşüşlerinin üretkenliği düşürmesi gösterilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre optimum fiber boyu ve yarı çapı sırasıyla 0.5-3 m ile 0.2-0.35 mm olarak bulunmuştur.



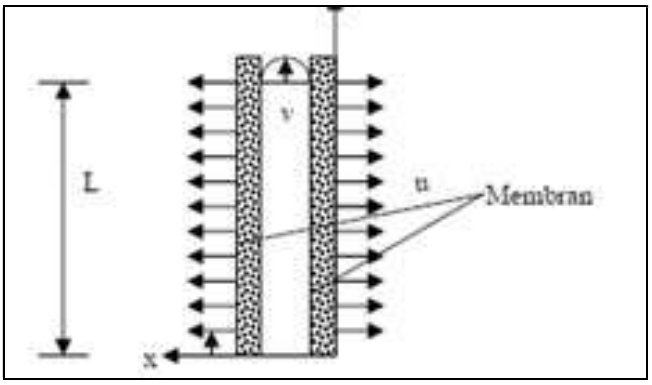
Şekil 2.64 : Fiber yarıçapı ve uzunluğunun optimum kombinasyonları. Simülasyon sırasında kullanılan koşullar : *Jmi/Jcr*= 0.85, *Jcr*= 5.56x10^-6 *m/s, Rm*=10^11 (l/m), *h*=0.5 m, δ= 0.00035 m, g=9.8 *m*/s^2, ρ=1,000 kg/m^3, μ=0.001 Ns/m^2 (Chang ve diğ., 2002).

Serra ve diğ. (1998) çalışmasında dıştan-içe, ölü-uç akışına sahip sabit akıda çalışan hollow fiber membran modüllerinde fiber içi ve fiber demetinin içindeki boyuna basınç düşüşlerinin etkisini araştırmıştır. Simüle edilen modelde kek tabakası oluştuğunda ve geri yıkama yapıldığındaki filtrasyon performansı da incelenmiştir. Bunlara bağlı olarak modelin net üretkenliği tahmin edilmiştir. Filtre alanı ve basınç düşüşlerinin artmasıyla birlikte optimum modül ve fiber boyutlarının da değiştiğini gözlemlenmiştir. Oluşturulan model deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Model, fiber çapı, boşluk fraksiyonu, hidrolik geçirgenlik katsayısı, fiber uzunluğu, dıştan içe çap oranı gibi parametreleri kullanarak modül geometrisini hesaplamak için kullanılabilir. Ya da bir modül için işletim parametrelerinin ve besleme suyu özelliklerinin membran performansını nasıl etkileyeceği de çalışılabilir. Modül dış fiber çapı, geçirgenlik, uzunluk vb. gibi parametreler sabit tutularak optimize edilmiştir. Şekil 2.65'de bu optimizasyon sonrası boşluk fraksiyonu ve dış çap için iki farklı besleme suyu hızındaki net akış oranları bulunmuştur. Her iki sonuçta da bir maksimum değere ulaşılmıştır. Bunun sebebinin boşluk oranı veya fiber çapı azaldığında filtrasyon oranının artmasından ve basınç düşüşünün daha fazla olmasından dolayı olduğunu düşünmüşlerdir. Daha yüksek üretkenlik verimi elde etmek için akış hızının optimuma yakın seçilmesi gerektiği yoksa keskin düşüşler olduğu bulunmuştur. Membranın hidrolik geçirgenlik katsayısı ve basıncın eşik değerinde bir artış gerçekleşirse de net üretkenliğin bundan etkilendiği görülmüştür. Ayrıca yüksek basınçlardaki geri yıkama net üretkenlik oranını arttırmıştır fakat sık geri yıkama yapılırsa bu oranın düştüğü de görülmüştür.



Şekil 2.65 : Boşluk fraksiyonu ve dış çap için iki farklı besleme suyu hızındaki net akış oranlarındaki değişimler. a) Q_{feed}=0.8m^3/h, b) Q_{feed}=0.95m^3/h (Serra ve diğ., 1998).

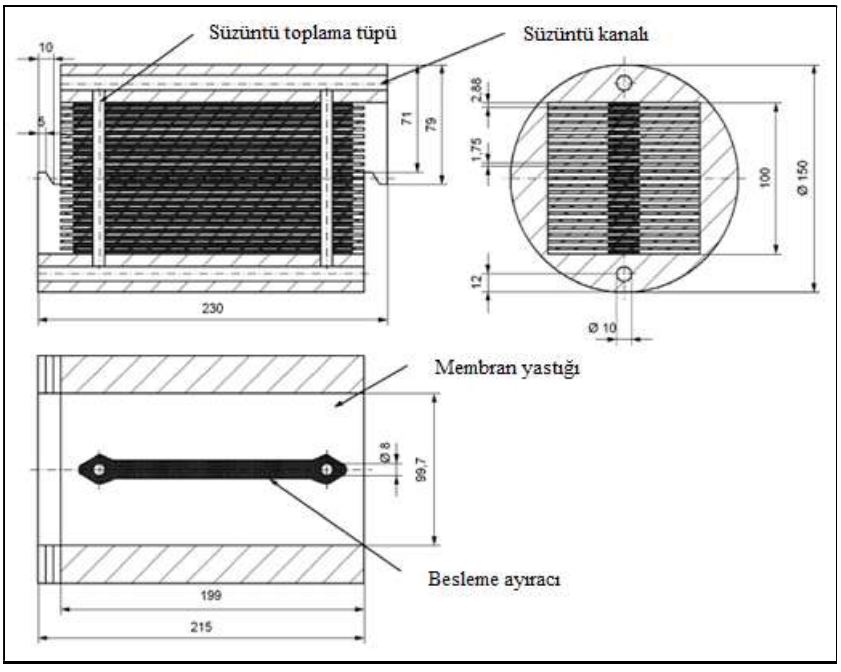
Khor ve diğ. (2009), filtrasyon, membrandan geçen akımın transferi ve çapraz akım hidrodinamiği arasındaki ilişki göz önünde bulundurularak modellenmiştir. İlk olarak membrana paralel akımın transferi için bir alt model tanımlamışlardır. İkinci olarak ise membrandan geçen sıvı filtrasyonu için model tanımlanmıştır. Membran üzerine biriken kirletici miktarını etkileyen hidrodinamik karakteristikler simüle edilmiştir. İlk model için membrandan geçen distile suyu simule etmek için modeller kullanmışlardır. Ardından deneysel çalışmalar ile sonuçlar kıyaslanmışlardır. İkinci bölüm olarak membran yüzeyinde gel tabakası oluşturan çözünmüş yağların birikimi film teorisi metodu ile modellenmiştir. Nümerik çözüm için membran geometrisi (Şekil 2.66) çok kompleks olmadığından ve akışta tam türbülanslı olduğundan ayrıca moleküler viskozite gözardı edilebilir olduğundan standard κ-ε modeli kullanılmıştır. Simüle eden modellerin çözümü için FLUENT kullanılmıştır.



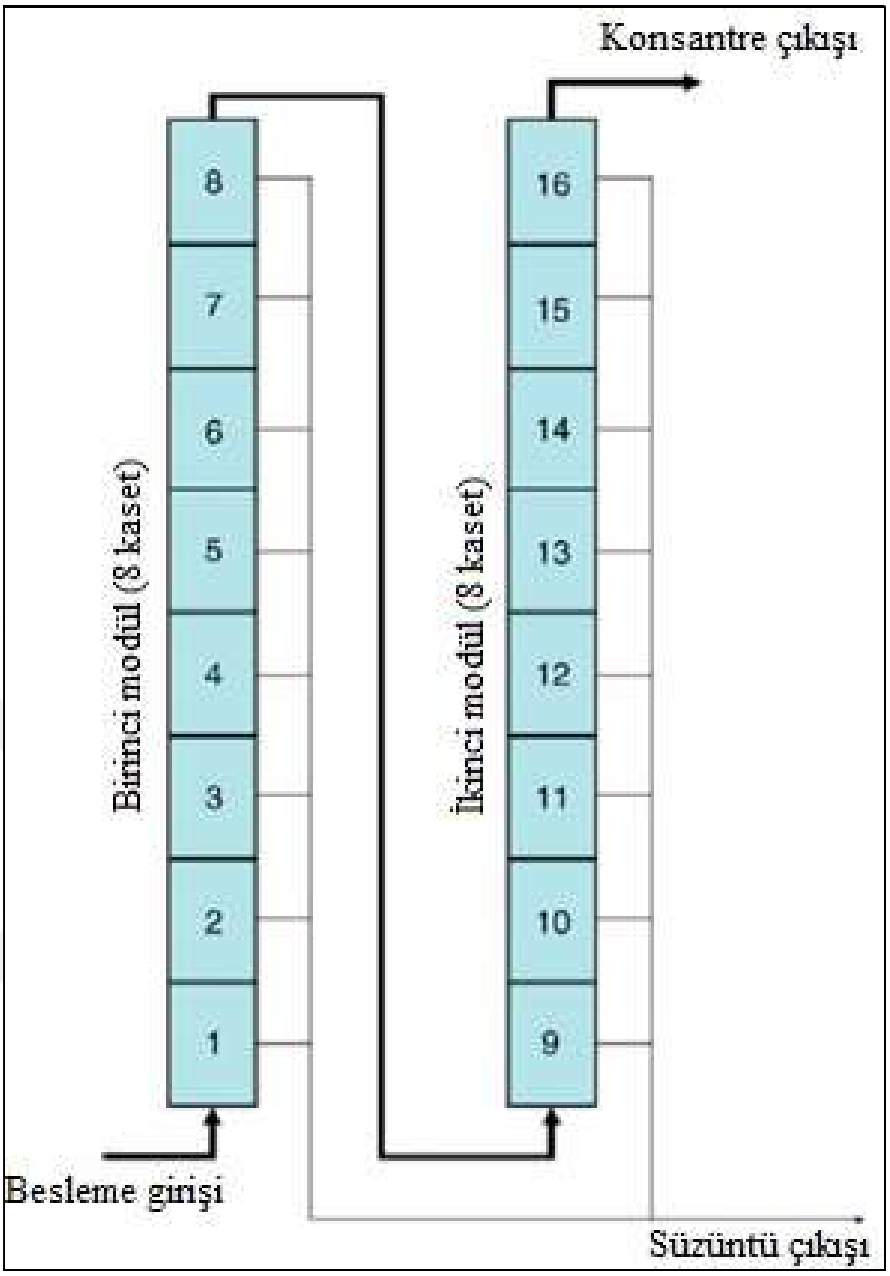
Şekil 2.66 : Modül geometrisi (Khor ve diğ., 2009).

Sonuç olarak CFD ile deiyonize su filtrasyonu için doğru bir şekilde süzüntü akısının tahmin edilebilineceği bulunmuştur. Simulasyona göre diferansiyel basınç ve hızın birbirleriyle bağlı olmadığı görülmüştür. Daha düşük diferansiyel basıncın daha yüksek türbülans yoğunluğuna katkıda bulunduğu görülmüştür. Bundan dolayı daha fazla süzüntü akıntısı elde etmek için daha düşük diferansiyel basınca ihtiyaç duyulduğu bulunmuştur.

Gehlert ve diğ. (2004) çalışmasında MBR da kullanılmak üzere bir açık kanal kaset modülünün matematiksel modellemesi için titiz bir yaklaşım bildirilmektedir. Bu fikir, ileri filtrasyon ve geri yıkama yaklaşımlarının direnci olarak uygulanmaktadır. Ek olarak modül geometrisi (Şekil 2.67; 2.68); modül uzunluğunun bir fonksiyonu olarak süzüntü akısı, kek kütlesi ve trans membran basıncı hakkında daha detaylı bilgi elde etmek için tek boyutlu bir yaklaşım kullanılarak modellenmiştir. Simülasyon geri yıkama basınç ve verimliliği yanı sıra modül uzunluğunun bir fonksiyonu olarak kek bilgisini tartışmak için kullanılmıştır. Modül uzunluğu farklı bölümler halinde bölünmüştür. Bütün değişkenler konumlarına bağlı olarak vektör şeklinde ifade edilmiştir. Bu modelleme yaklaşımı farklı çalışma noktaları için deneysel veriler ile iyi bir uyum içerisindedir. Modelin sağladığı veri, geri yıkama boyunca basınç düzenlemesi, kek arttırmak ve geri yıkama verimliliğini anlamak için kullanılmıştır.



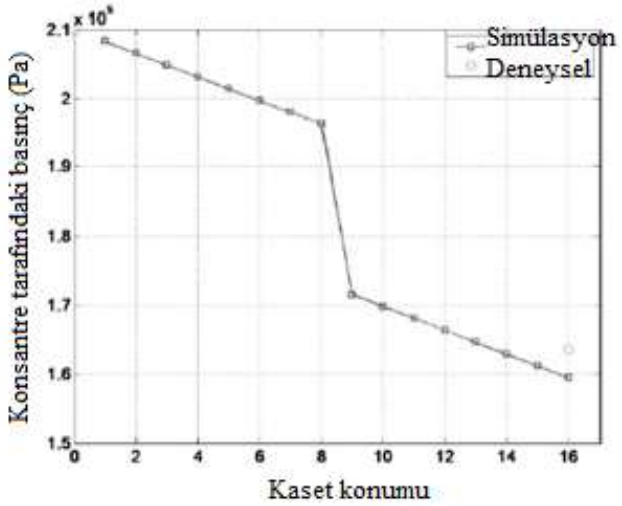
Şekil 2.67 : Kaset modül (Gehlert ve diğ., 2004).



Şekil 2.68 : UF modüllerin alt bölümleri (Gehlert ve diğ., 2004).

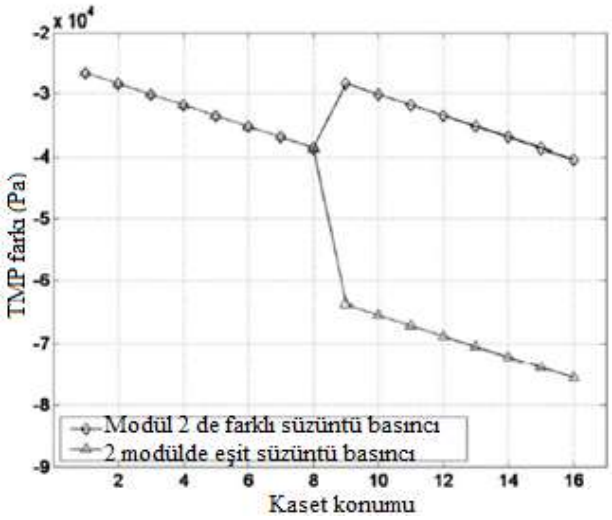
Modelin, süzüntü üretim oranının tahmini dışında prosesin davranışı hakkında ek bilgi sağlamakta olduğu görülmüştür. Bu bilgi pratikte meydana gelebilecek bazı problemlerin tartışılmasında kullanılır. Tartışma için referans şartlar TMP_{av}= 185 kPa, Re= 2700, TS= 9 g/l, t ≈ 1800 s dir.

Membranın besleme tarafındaki basınç kayıpları eksenel akış hızına bağlı olarak önemli olabileceği düşünülmüştür. Şekil 1.69'da, modül uzunluğu boyunca basınç profili çizilmiştir. Bunanla birlikte, iki modül boyunca deneysel olarak belirlenen toplam basınç kaybını da eklenmiştir.



Şekil 2.69 : Re= 2700, TMP_{av}= 185 kPa, TS= 9 g/l, t=1679 s için modül uzunluğu üzerinde ileri filtrasyon boyunca basınç profili (Gehlert ve diğ., 2004).

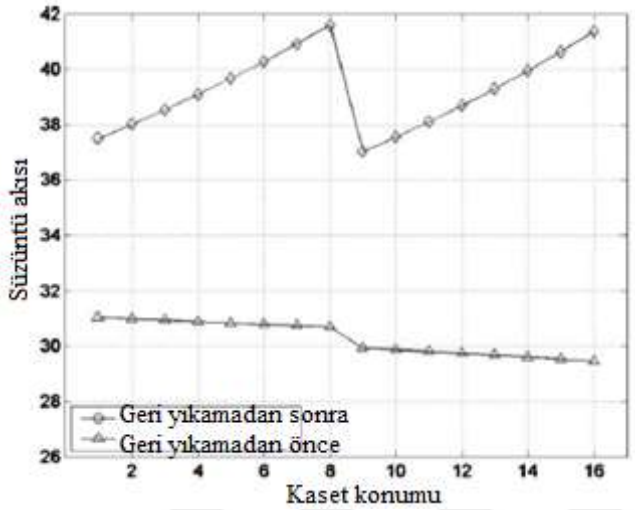
Şekil 2.70'de geri yıkamada sırasında TMP ye karşı, besleme giriş basıncından daha büyük olan 25 kPa lık bir süzüntü basıncı için modül uzunluğu çizilmiştir. Üçgenler, süzüntü tarafında üniform basınç için profil göstermektedir. Diğer profil, eğer kaset 9-16 arasındaki süzüntü basıncı, kaset 1-8 arasındaki süzüntü basıncının % 85' i ile sınırlı ise meydana geldiği bulunmuştur.



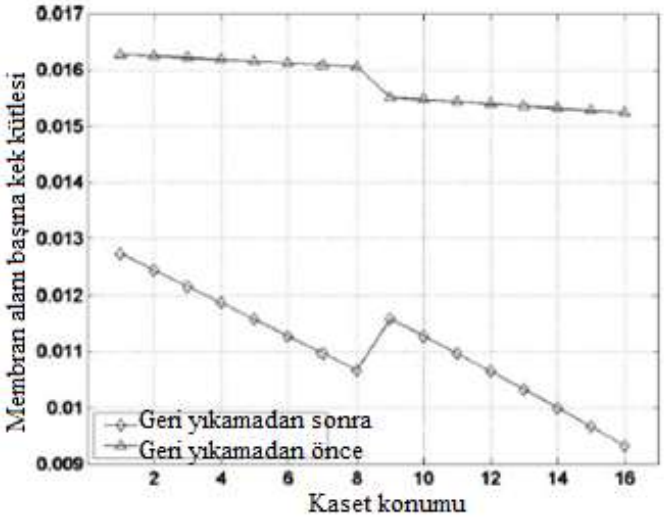
Şekil 2.70 : Re= 2700, TS= 9 g/l, t= 1799 s için basınç ayarlı ve ayarsız modül uzunluğu üzerinde geri yıkama boyunca basınç profili (Gehlert ve diğ., 2004).

Şekil 2.71'de geri yıkama öncesi ve sonrası süzüntü akıları modül uzunluğuna karşı çizilmiştir. Geri yıkama boyunca kaset 9-16 arasındaki süzüntü basıncı, kaset 1-8 arasındaki süzüntü basıncının %85' i olacak şekilde ayarlanmıştır. Süzüntü akısı geri yıkamadan önce modül uzunluğu boyunca çok az azalır. Geri yıkamadan sonra 1-8 ve 9-16 kasetleri arasında akı yükselmesi gözlenebilir. Şekil 2.72 bu etkinin özellikle geri

yıkamadan sonra modül uzunluğu boyunca azalan kek kütlesinden ortaya çıktığını göstermektedir.



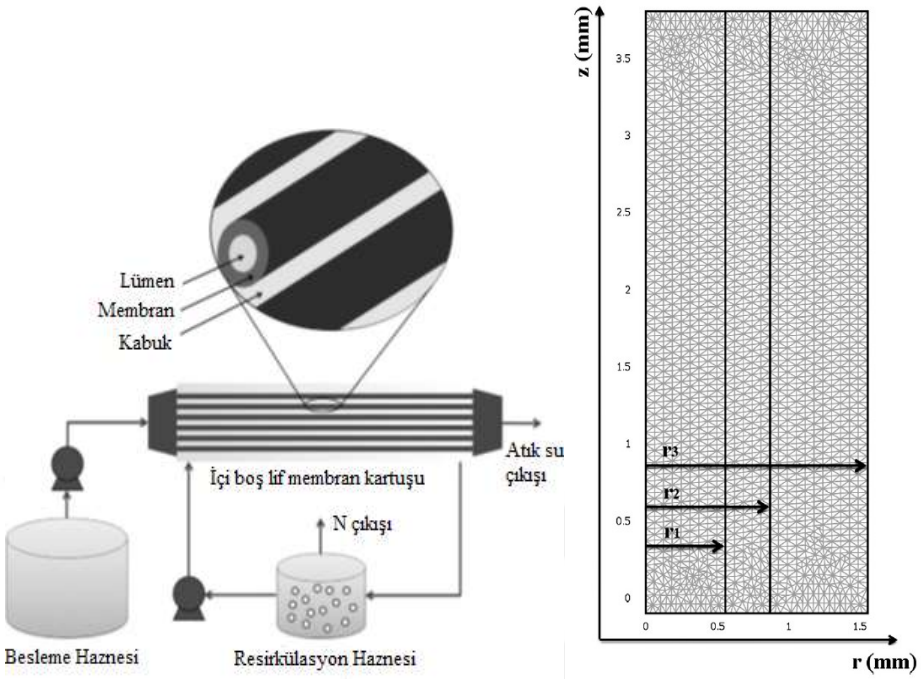
Şekil 2.71 : Re= 2700, TMP_{av}= 185 kPa, TS= 9 g/l, t=1679 s ve hemen geri yıkamadan hemen sonra t= 1801 s için modül uzunluğu üzerinde süzüntü akısı (Gehlert ve diğ., 2004).



Şekil 2.72 : Re= 2700, TMP_{av}= 185 kPa, TS= 9 g/l, t=1679 s s ve hemen geri yıkamadan hemen sonra t= 1801 s için modül uzunluğu üzerinde kek kütle profili (Gehlert ve diğ., 2004).

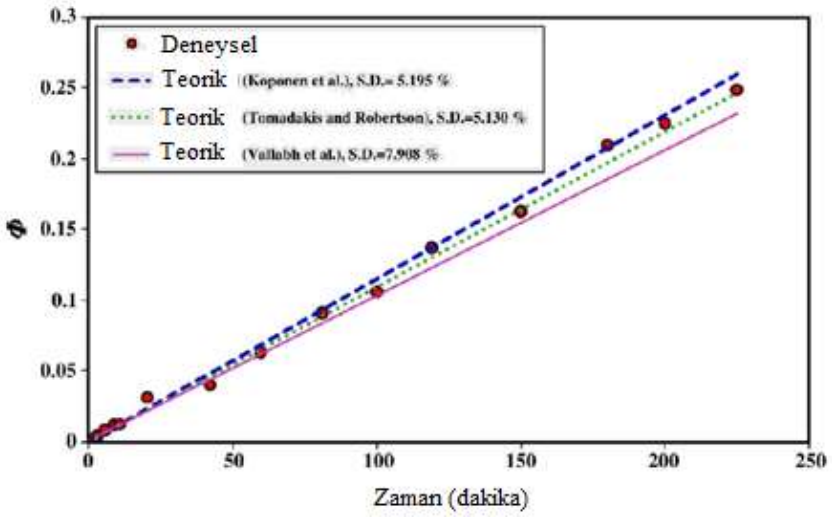
Sanaeepur ve diğ. (2012) çalışmalarında nitritin bir MBR sisteminde zamana bağlı matematiksel modelinin oluşturulmasını gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca momentum transfer denklemleri ile, ince boru ve kabuk üzerindeki hızlar, debiler, geri devir sistemi ve nitrat üzerindeki membranın yapısal parametreleri ve son olarak nitrat'ın denitrifikasyon verimi de çalışılmıştır. Modellemenin yapıldığı geometri ve bu geometride kullanılan mesh Şekil 2.73'de verilmiştir. Nümerik hesaplama COMSOL Multiphysics 3.5 tarafından yapılmıştır. Aynı zamanda UMFPACK' de kullanılmıştır.

Çözüm elemanları COMSOL tarafından oluşturulmuştur. Mesh 1500 adet eş yönsüz üçgensel eleman içermektedir.



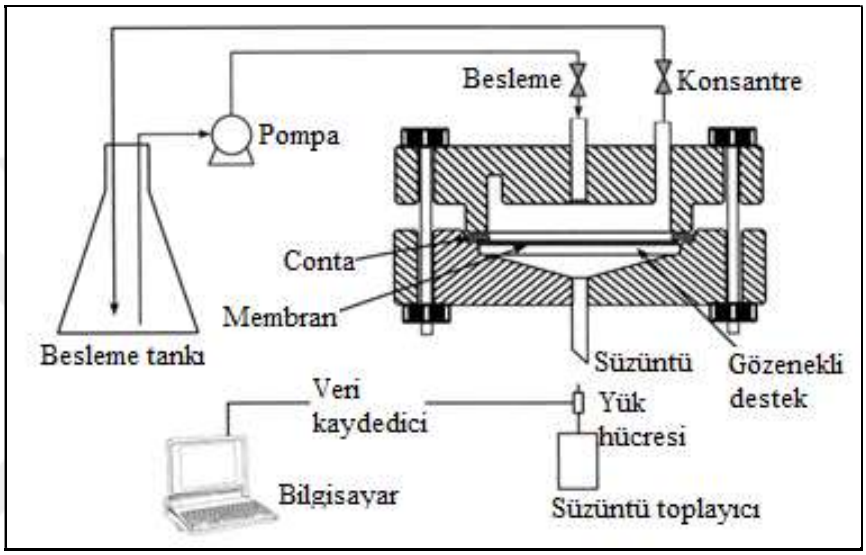
Şekil 2.73 : Modellemenin yapıldığı geometri ve geometride kullanılan mesh (Sanaeepur ve diğ., 2012).

Deneysel ve simülasyon sonuçları Şekil 2.74'de verilmiştir. Deneysel veri ile simülasyon verileri arasındaki hata oranı %8'den az çıkmıştır. Bu da modelin tahmin kabiliyetinin yüksek olduğunu gösterir. Modele göre fiber içerisindeki akım hızı arttıkça nitrat giderimi azalmaktadır.



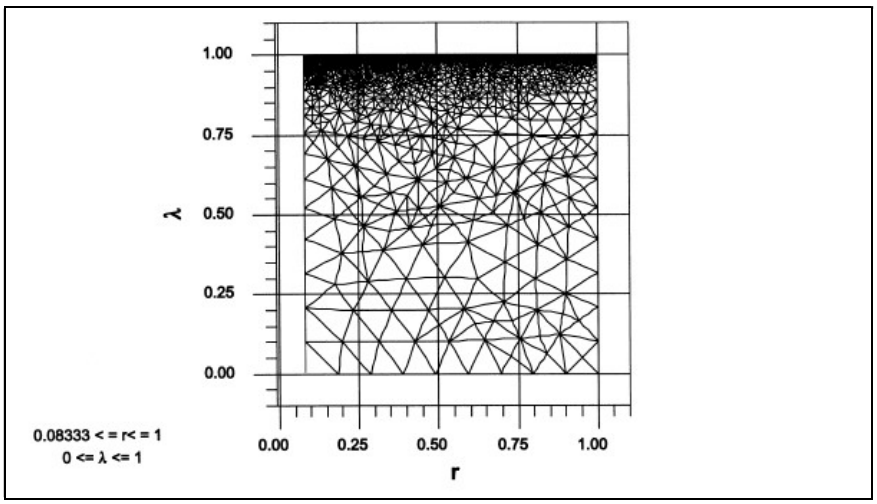
Şekil 2.74 : Deneysel ve model verilerinin karşılaştırılması (Sanaeepur ve diğ., 2012).

Huang ve Morrissey (1998) sonlu eleman analizi kullanılıp protein çözeltilerinin ultrafiltrasyonunda konsantrasyon polarizasyonunun simülasyonu yapılmıştır. Çalışmada ayrıca deney çalışması da yapılmıştır. Küçük ölçekli paslanmaz çelik membran ünitesi tasarlanmış ve imal edilmiştir. Bu deneyde kullanılan membran polisülfon ultrafiltrasyon membran diskleridir. (MWCO = 30000Da) Bu membran diskinin çapı 47 mm, efektif filtrasyon alanı 11.4 cm^2 olarak seçilmiştir. Giriş ve çıkış basınçları 2 basınç sensörü tarafından ölçülmüştür. Bu sistemin deney düzeneği Şekil 2.75'deki gibidir.



Şekil 2.75 : Sistemin deney düzeneği (Huang ve Morrissey, 1998).

Nümerik analizde ise konsantrasyon polorizasyonundan dolayı bir konsantasyon sınır tabakası oluşturulmuştur ve çok küçük elemanlara bölünmüştür. Bu yüzden daha fazla mesh (bölünmüş eleman) ihtiyaç vardır. Kullanılan mesh Şekil 2.76'da görülebilir.



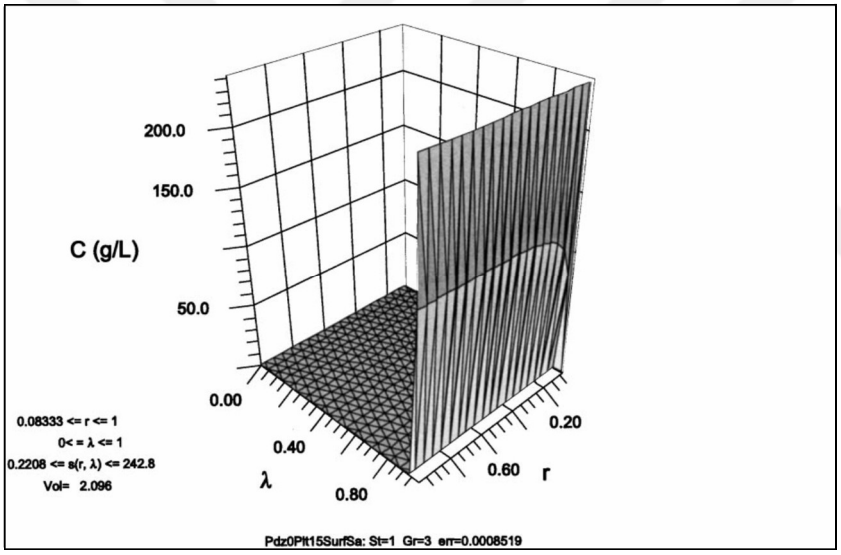
Şekil 2.76 : Modelde kullanılan mesh görüntüsü (Huang ve Morrissey, 1998).

Sonlu eleman analizinde model girdileri Çizelge 2.6'de verilmiştir.

Çizelge 2.6 : Model girdileri (Huang ve Morrissey, 1998).

Parametere	Değer
Kanal Yüksekliği(m)	4.76e-03
Efektif akış yarıçapı(m)	1.75e-02
Debi (m^3/s)	3.96e-07
TMP (Pa)	4.82e+04
Besleme Konsantrasyonu (g/l)	0.25
Ortalama Permeate Hızı (m/sn)	8.17e-06

Şekil 2.77' de akışın olduğu kanal içerisindeki konsantrasyon polarizasyonu hem dikey hem de yatay düzlem için verilmiştir. Besleme suyu akışkan kanalına girdiğinden çok kısa bir süre sonra konsantrasyon polarizasyonunun arttığı gözlemlenmiştir.

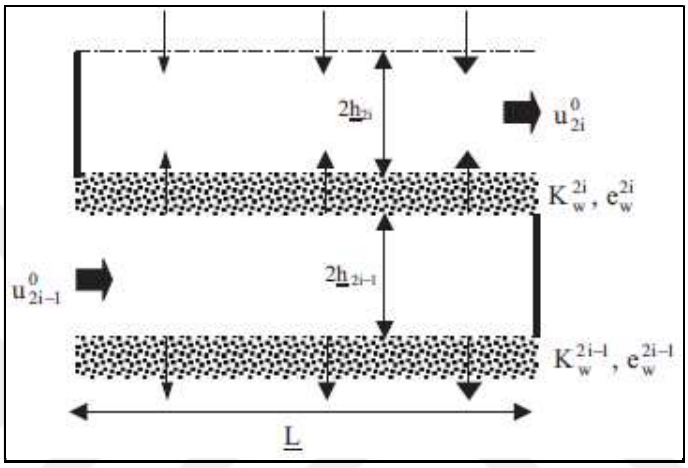


Şekil 2.77 : Hem dikey hem de yatay düzlemde kanal içerisindeki konsantrasyon polarizasyonu (Huang ve Morrissey, 1998).

Sonlu eleman analizi Pdease2D ile yapılmıştır. Bu çalışmada BSA çözeltisinin ultrafiltrasyonu esnasında konsantrasyon-polarizasyonu da dikkate alınarak model simülasyonu yapılmıştır. Sonlu eleman analizi kütle transferi katsayının belirlenmesinde kullanılırki bu RO/UF prosesinin tasarımı için önemli bir parametre olarak bulunmuştur.

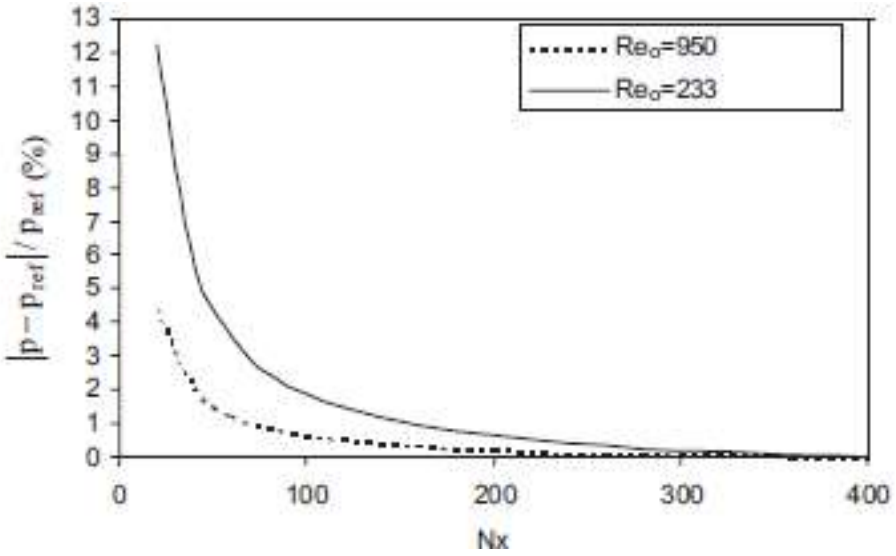
Oxarango ve diğ. (2003) emme kuvvetinin ve enjeksiyonlu bir gözenekli kanalda laminer akımın modellenmesini çalışmışlardır. Çslıştıkları model Navier-Stokes denklemlerinin integrasyonu baz alınarak ve analatik çözümlere dayanmaktadır. Oluşturulan bir boyutlu model tüm akış özelliklerini korumalıdır. Özellikle sınır

kouşlları duvar emme şartlarını ve duvardaki büyüyen partiküllü kek tabakasınının üç boyutlu dağılımını filtrasyon prosesinde etkiler. Bu sebeple çalışmada filtrasyon sırasında duvarlarda biriken kek tabakasının akışa etkisini ortaya koyan matematikseller model incelenmiştir. Yapılan modeller kirli filtrelerdeki akışın davranışını tahmin etmeyi öngörmektedir. Kurulan matematikel modeller CFD teknikleri ile birleştirilerek ve Navier – Stokes denklemlerinin Darcy kanunu ile birlikte çözülerek veri alınması sağlanmışır. Şekil 2.78'de kullanılan geometri verilmiştir.



Şekil 2.78 : Çalışmada kullanılan model geometrisi (Oxarango ve diğ., 2003).

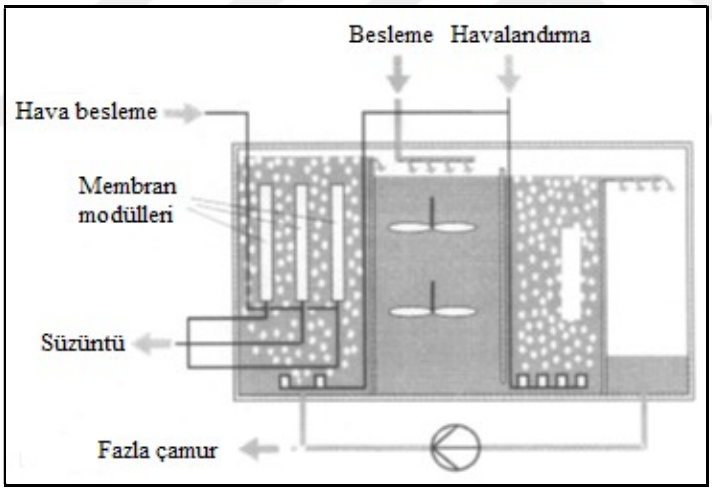
Şekil 2.79'de ise çözüm noktası sayısının basınç profilini göreceli olarak ne şekilde etkilediği gösterilmiştir.



Şekil 2.79 : Çözüm noktası sayısının basınç profili üzerine göreceli etkisi (Oxarango ve diğ., 2003).

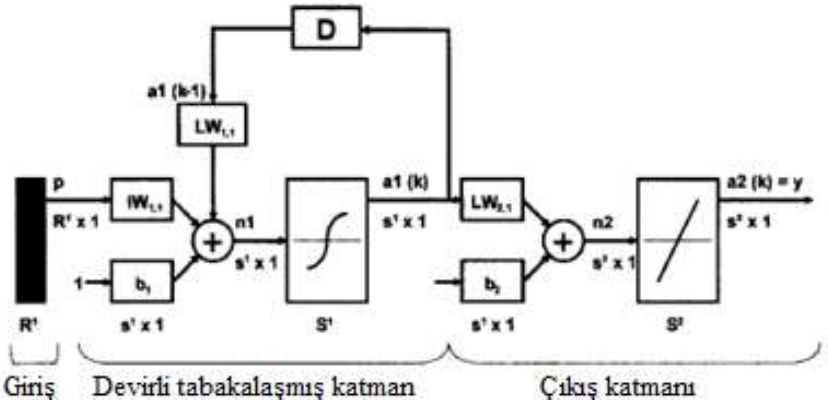
Sonuç olarak bu çalışmada çok kanallı filtrasyon sistemlerinin tasarlanmasında faydalı bir modelin nasıl geliştirildiği ve CFD uygulamalarının filtrasyon teknolojileri üzerinde ne kadar önemli olduğu ortaya konmuştur.

Geissler ve diğ. (2004) çalışmalarında membran biyoreaktörler için iki süzüntü akı modeli oluşturmayı amaçlamaıştır. İlk model olarak yarı empirik bir model filtrasyon direncini işletme parametrelerine ve membran yaşına göre tanımlanmışlardır. İkinci modelde ise yapay sinir ağları oluşturulmuştur. Pilot ölçekli membran biyoreaktör sisteminde kullanılan kapiler modüller PURON tarafından temin edilmiştir. Çalışmada kullanılan pilot tesis iki ayrık MBR ünitesinden oluşmuştur. Herbir ünitede 3 adet hollow fiber modül kullanılmıştır. Bir modül 2 m^2 membran alanına sahiptir. İlk sistemde üç hollow fiber modül aynı süzüntü toplama sistemine bağlanmıştır. İkinci ünitede ise üç modülün herbirinde kendi süzüntü toplama yapıları mevcuttur. Biyoreaktörler iki ünitenin herbirinde dört bölge içermektedir. Bunlar 1 anoksik bölge, 1 aerobik bölge, 1 seviye kontrol bölgesi ve 1 membran bölmesidir. Şekil 2.80'de deney düzeneği verilmiştir.



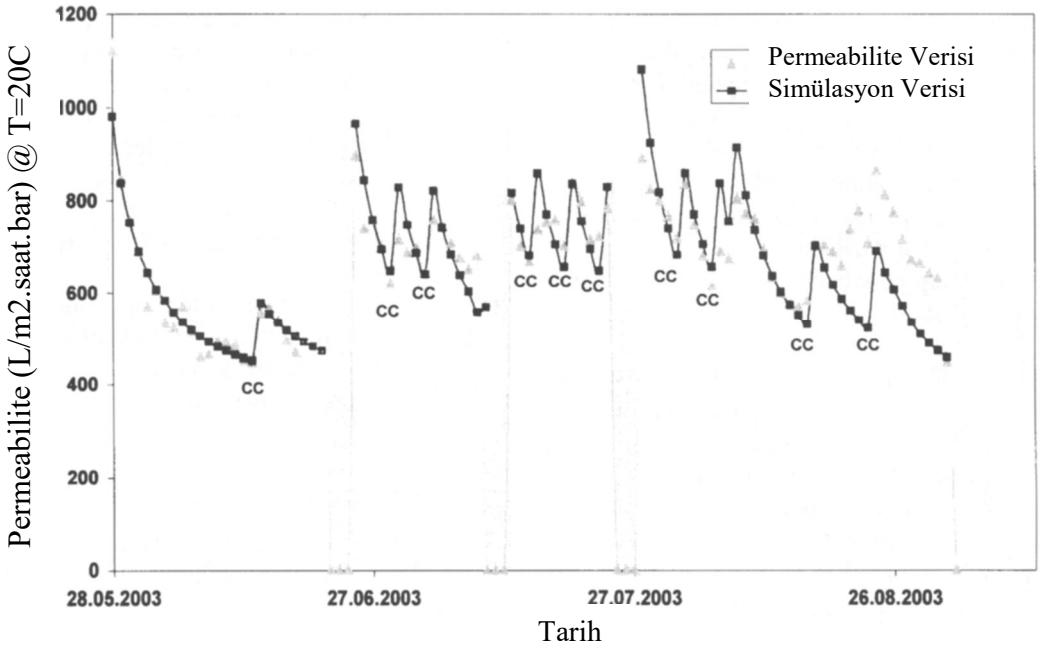
Şekil 2.80 : Çalışmada kullanılan deney düzeneği (Geissler ve diğ., 2004).

Diğer yandan ikinci model olan yapay sinir ağları için; transmembran basıncı (TMP), TMP değişiminin oranı, geri yıkama sırasındaki TMP, filtrasyon döngü uzunluğu, geri yıkama döngü uzunluğu, çamur yaşı, toplam askıda katı madde, sıcaklık, aerobik bölgede oksijen kullanım oranı gibi parametreler dikkate alınmıştır. Ve çalışmada kullanılan yapay sinir ağı Şekil 2.81'de verilmiştir.



Şekil 2.81 : İkinci Modelde kullanılan yapay sinir ağı (Geissler ve diğ., 2004).

Çalışmadan üç ana sonuç çıkarılmıştır. Bunlar; daha yüksek geri yıkama daha yüksek akı değerlerine neden olur, yükselen TMP ile oluşan akıdaki artış birkaç günde dengelenir, yüksek geri yıkama TMP ile TMP oranları eşitliği şartlarına ulaşılır. Tüm bunlara ek olarak bir model daha oluşturmuşlardır. Bu modelde geçirgenliğin geri yıkama sonrası ve işletme esnasındaki akıların yarı deneysel olarak modellenmesi amaçlanmıştır. Model çıktısından ve süzüntü verilerinden elde edilen çıktılardan oluşmuş Şekil 2.82'de verilmiştir. İlk zamanlar yakın olan değerlerde sonraki zamanlarda sapmalar gözlenmiştir.

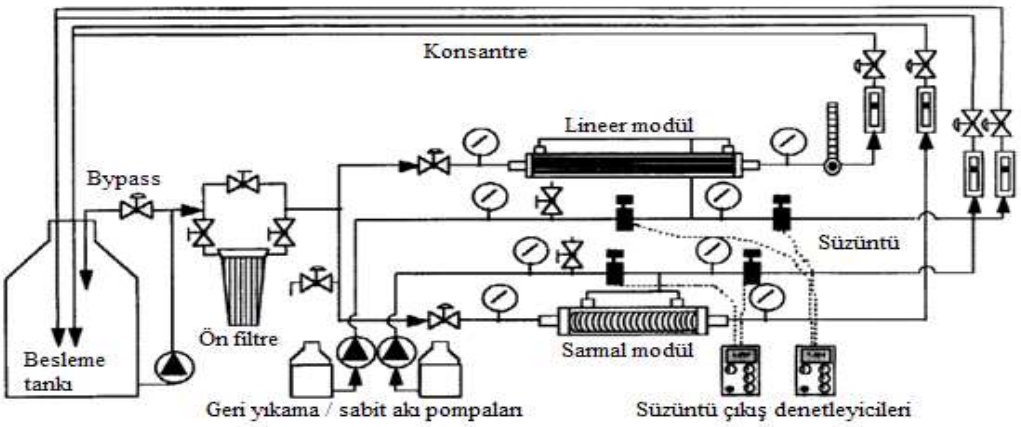


Şekil 2.82 : MBR pilot tesisindeki geçirgenlik değerlendirmesi (Geissler ve diğ., 2004).

Sonuç olarak bu çalışma membran biyoreaktör modellemesi konseptinin başarılı bir şekilde olacağını göstermiştir. Bu nedenle MBR performansını iyileştirilen işletmelerin belirlenmesinde modellemenin önemi büyüktür kimyasal temizleme

işlemlerinin etkisi bu modele dahil edilmediğinden performans değerlendirilmesi tam olarak yapılamamıştır.

Luque ve diğ. (1998) çaışmalarında sarmal sargılı hollow fiber mikrofiltrasyon memranı modül dizaynını düz hollow fiber içeren çapraz akışlı ticari membranla karşılaştırmıştır. Membran performansı değerlendirmesi için membran arası geçiş basıncı, parçacık süspansiyon konsantrasyonu, besleme suyu oranının etkilerine bakmışlardır. Şekil 2.83'de çalışmada kullanılan mikrofiltrasyon sistemleri verilmiştir. Mikrofiltrasyon deneylerinde maya kullanılmıştır. Farklı konsantrasyonların elde edilmesi için seyreltmeler saf su ile yapılmıştır. Çalışmada iki tip membran modülü kullanılmıştır. Her modulde 6 adet 0.1mm ortalama por çapına sahip PES hollow fiber membran bulunmaktadır. Modüllerden biri sarmal yapıya sahip olarak düzenlenmiş, merkezi bir desteğin etrafına Şekil 2.83'deki gibi sarılmıştır. Diğer modül düz bir şekilde tertiplenmiş hollow fiber membranlarından oluşturulmuştur. Modüller çapraz akış filtrasyon prensibine göre çalıştırılmıştır. İkili paralel modül mikrofiltrasyon sistemi , 10L besleme tankı, bir diyafram pompa ve iki membran modülünden oluşmuştur.



Şekil 2.83 : Çalışmada kullanılan sarmal ve düz hollow fiber membran modüllerini içeren mikrofiltrasyon deney düzeneği (Luque ve diğ., 1998).

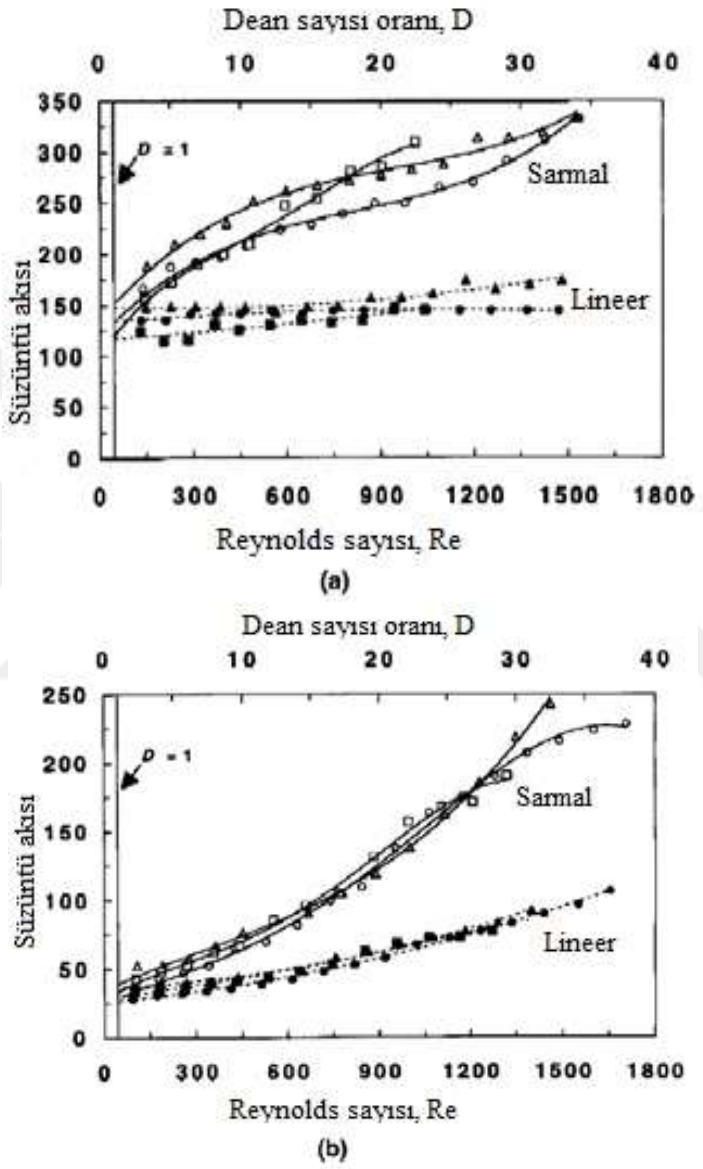
Farklı konsantrasyonlardaki maya süspansiyonları 303K de ölçeklerinde dinamik viskozite ve konsantrasyon arasında aşağıdaki bağıntı elde etmişlerdir.

$$\mu = 0.7826 \exp(0.077\ c)$$

$$R^2 = 0.98$$

Çalışmada sabit TMP deneylerinde iki modül içinde aynı debi ve aynı ortalama TMP değerleri kullanılmıştır. Sabit akı deneylerinde ise her deneyden önce su geçirgenlik

testleri yapılmıştır. Deneyler, iki modül içinde sabit giriş besleme suyu debisi ve çıkış akısı ile yürütmüşlerdir.Saf su geçirgenlikleri ölçüldüğünde, sarmal ve düz modülün geçirgenlikleri aynı çıkmış olup, 151 L/m^2.sa.kPa olarak bulunmuştur. Sonrasında farklı TMP değerlerinde artan debi oranına karşılık sözde kararlı durum akıları farklı maya süspansiyonları kullanılarak bulunmuştur (Şekil 2.84).

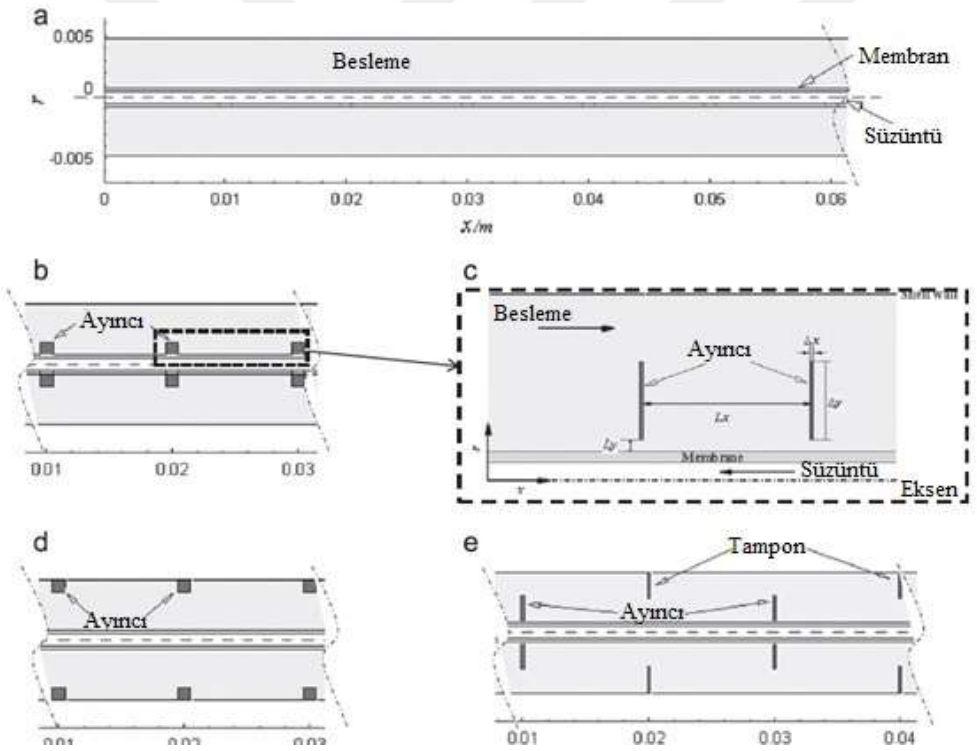


Şekil 2.84 : Artan giriş debisi ile farklı TMP nin süzüntü akısı üzerindeki etkisi. (a) 0.1 kuru wt% maya süspansiyonu. Düz modül için (●) 14 kPa, (■) 28kPa, ve (▲) 42 kPa. Açık semboller ise sarmal modül için. (b) 0.5 kuru wt% maya süspansiyonu. Düz modül için (●) 14 kPa, (■) 28kPa, ve (▲) 42 kPa. Açık semboller ise sarmal modül için (Luque ve diğ., 1998).

Luque ve diğ (1998) çalışma sonunda sarmal yapıdaki modulun sabit basınçta farklı akım hızlarında düz haldeki modülere göre akıyı gözle görülür biçimde arttırdığını bulmuştur. Transmembran basıncı, çalışılan basınç aralığında (14-42 kPa) akı artışında

çok fazla etkiye sahip olmamıştır. Çözelti konsantrasyonundaki artış sarmal modülde düz modüle göre önce akıda artışa hemen ardından düşüşe yol açmıştır. Sabit akı işletiminde (endüstriyel yaklaşım), sarmal yapıdaki modülün düz modüle oranla performansının çok daha iyi oldugu ve çözelti filtreleme hacminin düz modüle göre 4-5 kat daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Sabit akı seviyesinin seçimi, mevcut filtre edilecek su hacmi, giriş çözeltisinin konsantrasyonu ve giriş debisi, performansı etkileyen önemli faktörler olarak söylenmiştir.

Yang ve diğ. (2012) çalışmalarında 2 boyutlu ısı transferi modeli ile, 9 farklı türbülans oluşturucu tasarımı kullanılarak tek fiberli DCMD (Direct Contact Membrane Distillation) modülü ile çeşitli CFD simülasyonları yürütmüştür. Şekil 1.85'de kullanılan geotmeriler görülebilir. Simülasyonlar FLUENT yazılımı kullanılarak yapılmıştır.

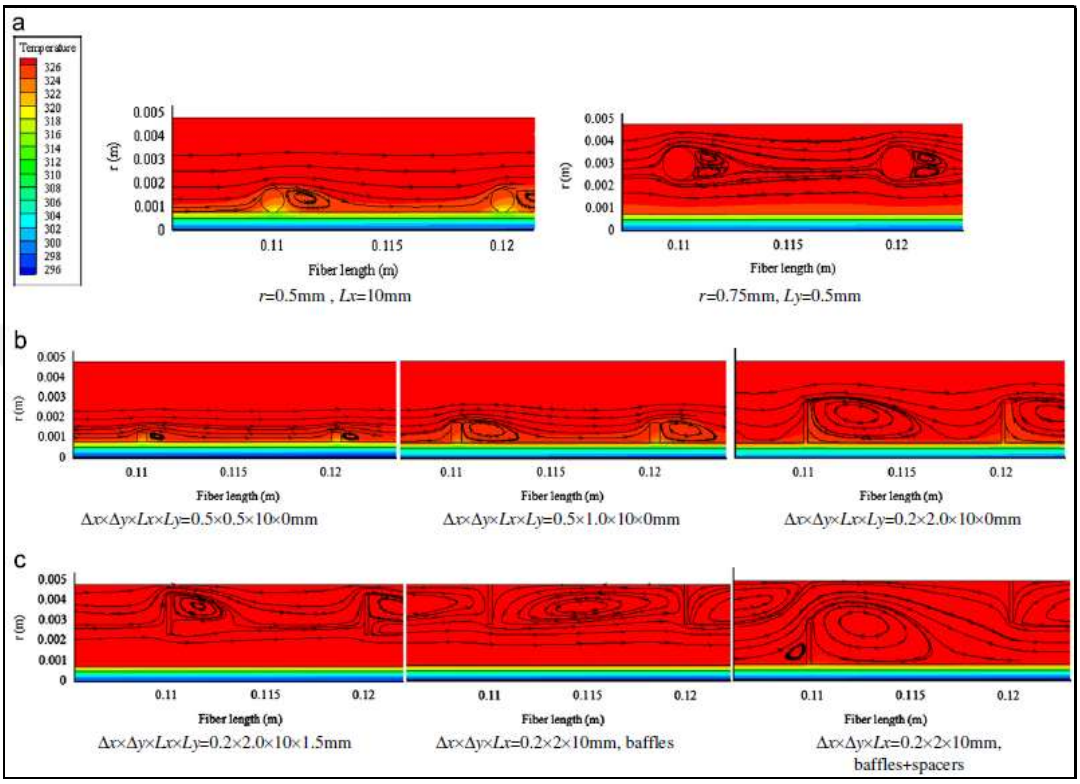


Şekil 2.85 : CFD simülasyonlarında kulanılan tek fiberli modüllerin örnek tasarımlar şemaları (Yang ve diğ., 2012).

Deneyleri 3 farklı senaryo ile gerçekleştirmişlerdir. Bu senaryolar; yüksek geçirgenlik katsayısı, yüksek çalışma sıcaklığı ve değişken akışkan hızıdır.

Oluşturulan türbülans tasarımları ierisinden halka tampon ile yüzen daireler şeklindeki türbülans oluşturucuların ısı transfer katsayısını 6 kat arttırdığını bulmuşlardır. Bu türbülans oluşturucular tutarlı ısı transfer katsayısına bağlı olarak, TPC (temperature

polarization coefficient) ve kütle akısı yükselen bir trend yakalamış ve diğerlerine göre %57 ve %74 oranında artış sağlamıştır. Performans artışları, modül içerisindeki akış kanalında ikincil akışlar ve farklı sıvı yoğunluklarının dairesel karışımına bağlanmıştır ve bu iyileştirmeler yerel akım alanlarının ve sıcaklık dağılım profilinin CFD simülasyonu olarak görselleştirilmesiyle anlaşılmıştır (Şekil 2.86).

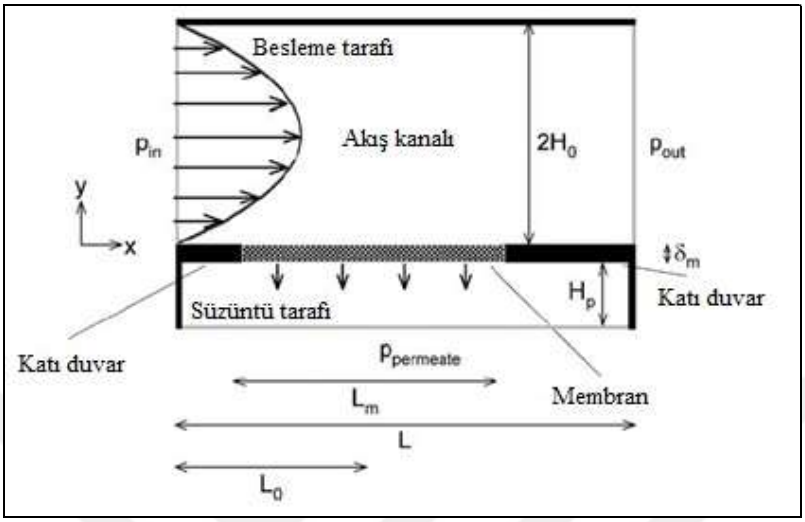


Şekil 2.86 : Değişik türbülans oluşturucuların bulunduğu modüllerdeki yerel akım çizgilerinin görselleştirilmesi. ($C=8.0x10^{-7}$ kg/m^{2}sPa, L=0.25 m, ufi=0.06 m/s, upi=0.417 m/s, Tfi=327.15 K, Tpi=293.85 K) (Yang ve diğ., 2012).

Ayrıca çalışmada, akış hızının artırılması hidrodinamik yapının etkinliğinin karşılaştırılması amacıyla kullanılmıştır. Bu sonuçlara göre iyi dizayn edilmiş türbülans oluşturucuların kullanılması, fark edilebilir biçimde sıvı akışkan tabakanın daha baskın olduğu daha iyi ısı transfer sistemlerinin tasarımına olanak sağlayabilir olduğu bulunmuştur.

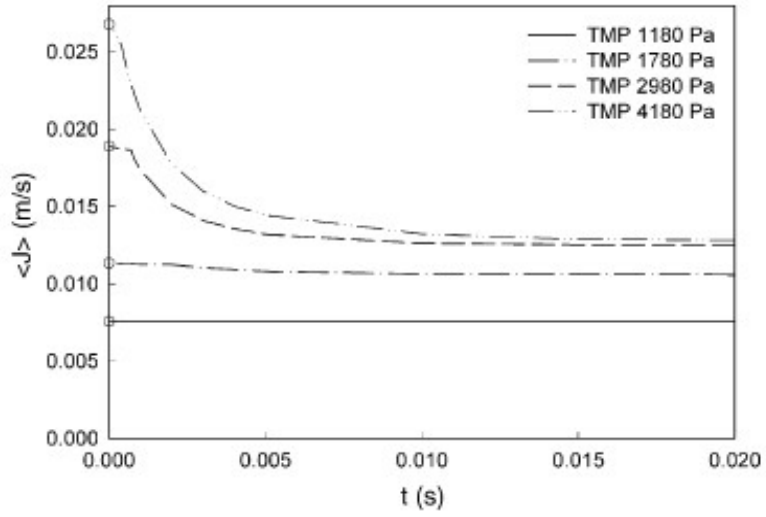
Kromkamp ve diğ. (2005) yaptıkları çalışmada mikrofiltrasyon sistemlerinde akı ve konsantrasyon polarizasyonu kendiliğinden oluşan geri-taşınım mekanizması ile CFD model kullanarak önermede bulunmuştur. Büyük sistemlerdeki partiküllerin fiziksel teorilerinin açıklanması amacıyla lattice Boltzman (LB) metodu uygulanmıştır. İki metotta laminer ve türbülanslı akışlara uygulanabilmektedir. LB metodu kompleks geometrilerin modellenmesinde çabuk ve kolay çözümler sunmaktadır. LB metodu

ayrıca hareketli sınırlar ve çoklu fazlı sistemlerdeki askıda partiküllerin modellenmesinde oldukça etkilidir. LB simülasyonları üç boyutlu olarak kolayca modellenebilmesinde rağmen bu çalışmada iki-boyutlu (2B) olarak modelleme yapılmıştır. Şekil 2.87'da mikrofiltrasyon sisteminin geometrisi tarif edilmiştir.



Şekil 2.87 : 2B'lu mikrofiltrasyon sisteminin planı, Siyah çizgiler katı duvarları, gri çizgiler ise basınç sınırlarını göstermektedir (Kromkamp ve diğ., 2005).

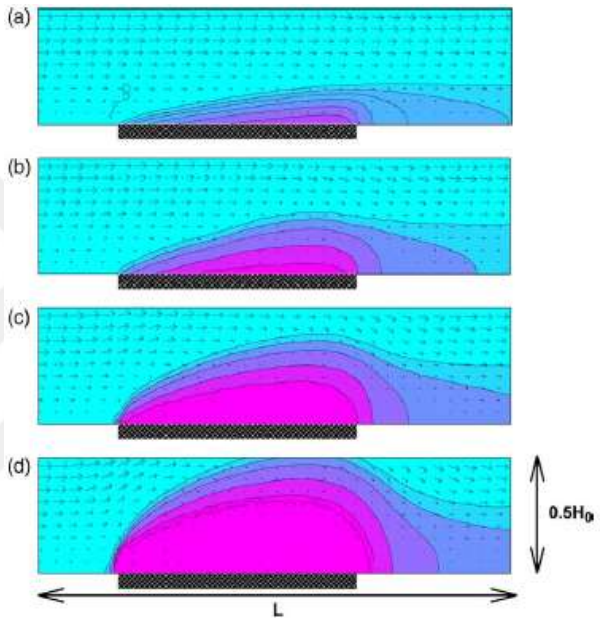
Geometrisi ve boyutları mikro-mühendislik membranları sınıfına giren mikroeleklerden esinlenilmiştir. Değişik Transmembran basıncında (TMP) uzunluk ortalamalı akının dağılımı Şekil 2.88'da görülmektedir.



Şekil 2.88 : Zamana bağlı fonksiyon olarak uzunluk ortalamalı trans membran basıncının değişimi (Kromkamp ve diğ., 2005).

Kromkamp ve diğ. (2005) buldukları sonuçlara göre başlangıçta akı TMP ile orantılı olarak artmaktadır. 1180 Pa TMP değerinde akı anlık olarak sabit kalmaktadır. Burada askıda katıların 1180 Pa basınçta olması kek tabaka oluşturması çok az olmaktadır.

Ancak, 1780 Pa basınçta kek tabakası oluşumu daha fazla olmaktadır. Şekil.'den de görüldüğü üzere kek tabakası oluşumu hemen gözlenmemektedir. Bunun için konsantrasyon polarizasyonu oluşana kadar yeterli süre geçmesi gerekmektedir. Şekil 2.89'de membran üzerindeki konsantrasyon dağılımı gösterilmektedir. Mikrofiltrasyon sistemlerinde kullanıma imkan veren bu yeni model de konsantrasyon polarizasyonu ve kek tabakası oluşumu sonuçları başarı ile gerçekleştirilmiştir. Bu yeni model süspanse akıştaki Navier-Stokes (NS) denklemleri ile konveksiyon-difüzyon denklemlerindeki askıda katı ve lattice Boltzman metodunun birleşiminden oluşmaktadır.



Şekil 2.89 : (a)1180 Pa, (b) 1780 Pa, (c) 2980 Pa ve (d) 4180 Pa transmembran basıncında membran üzerindeki akış ve konsantrasyon dağılımı (Kromkamp ve diğ., 2005).

Yu ve diğ. (2011) yaptıkları çalışmada tekli hollow-fiber modülünün silindirik olduğunu kabul edip, 2B'li eksensel simetrik tekli fiber verileri oluşturmuşlardır. Grid konfigürasyonlarını optimize etmek için kütle akısı $5x10^{-6}$ m seçilmiştir. Bu değer sırasıyla membrandan membran dış yüzeyine doğru grid boyutlarının $5x10^{-6}$ m mertebesinden $2x10^{-4}$ m olarak seçilmiştir. X yönünde grid boyutu evrensel olarak $1x10^{-4}$ m olarak kullanılmıştır.

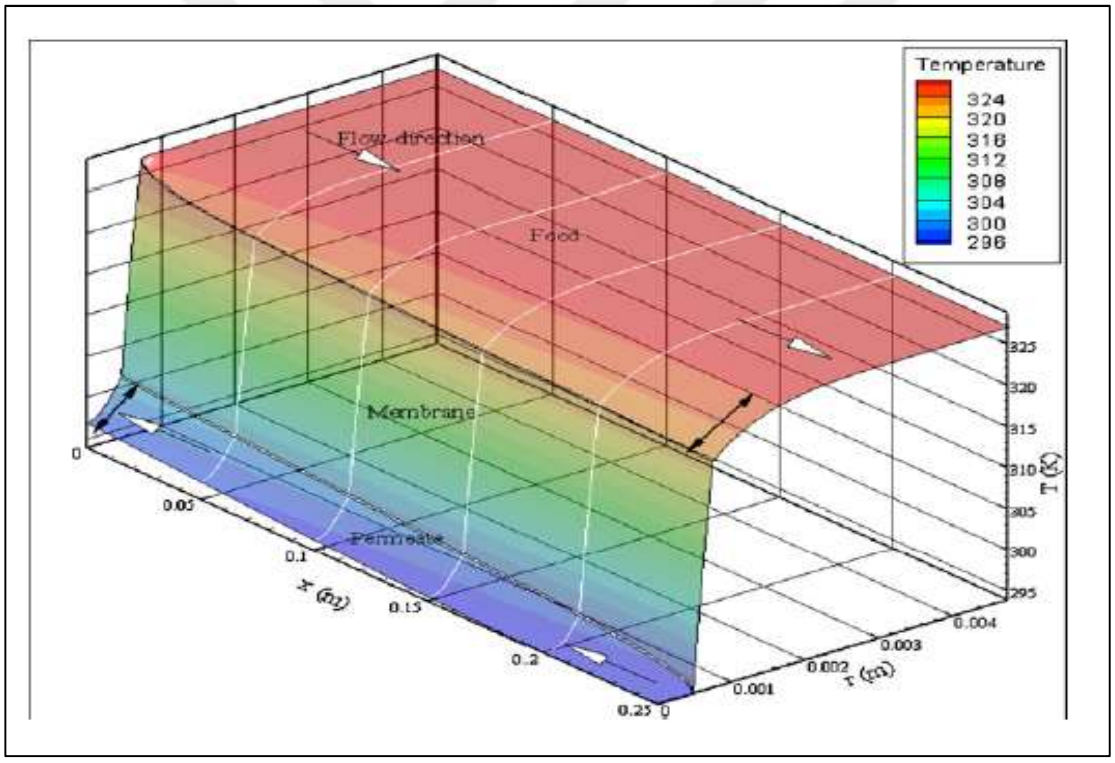
Simülasyon çalışmaları Fluent 6.3 programı SIMPLE(Basınç bağlantılı denklemler için yarı kapalı yöntem) algoritmaları kullanılmıştır.

Direkt temaslı membran distilasyonu deney düzeneğinde önceki çalışmalarında kullanılan sistemler kullanılmıştır. Besleme ve çıkış çözeltileri hollow fiber modülü

içerisinde karşı akımlı mod kullanılarak yapılmıştır. Membranın dış kısmında besleme çözeltisi (iletkenliği 60 mS/cm % 3.5 Sodyum Klorür (NaCI) çözeltisi 327.2 ^{0}K sıcaklığında peristaltik pompa ile sirküle edilmektedir. 0.25 m ile 1.02 m uzunluğu arasında tekli fiber modülü fiber uzunluğunun etkisini araştırmak amacıyla yapılmıştır. Bu lab-ölçekli Membrdan distilasyon (MD) modülleri PVDF hollow fiber membranlardan yapılmış ve teflon ile muhafazası sağlanmıştır.

Deney verilerinin modelleme verileri ile karşılaştırılması sırasında öncelikle simule edilen deneysel veriler yeni oluşturulan ısı transfer modeli ile karşılaştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre yeni geliştirilen nümerik metoda göre deneyler ile simülasyon arasındaki rölatif hatalar %1 seviyesinden daha az olmaktadır.

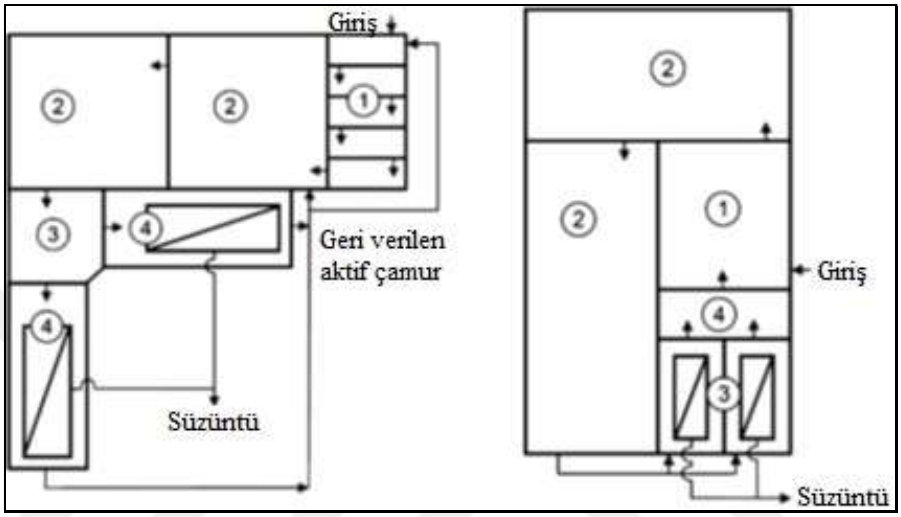
Modül içerisindeki sıcaklık profili için 0.25 m uzunluğundaki modül kullanılmıştır. Şekil 1.91'de sıcaklığın x ve r yönündeki dağılımı görülmektedir.



Şekil 2.90 : Membran modülü içerisindeki sıcaklık dağılımı (Yu ve diğ., 2011).

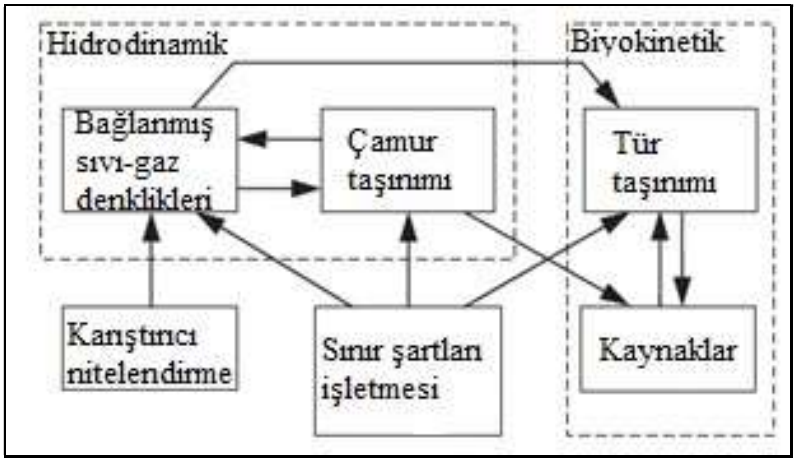
Membranın dış kısmına doğru kalınlık sınır tabakası çıkıştaki besleme akı kanalının 1/3'i oranına ulaşmakta ve süzüntü çıkış kanalına doğru sınır tabakasını doldurmaktadır. Sıcaklık profili membranın besleme kısmından süzüntü kısmına kadar belirgin bir düşüş yaşamaktadır. Bu da membranın ısı transfer prosesine karşı direncinde önemli bir rol oynamaktadır sonuçları elde edilmiştir.

Brannock ve diğ. (2010) MBR'ın optimizasyonu için membran tıkanması ve karıştırmanın önemli olduğundan ve literatürde az çalışma bulunmasından yola çıkıp CFD kullanarak MBR tank dizaynı ve çamur reolojisi hakkında tahminlerde bulunmaya çalışmıştır. Deneysel çalışmada tam ölçekli hollow fiber ve düz plaka membran konfigürasyonlarına sahip MBR reaktörler kullanılmıştır. Tesis 2 prosesi paralel işletmekle beraber kuru hava debisi 3.4 ml/gün olacak şekilde boyutlandırılmıştır. Tesislerin şematik resmi Şekil 2.91'de verilmiştir.



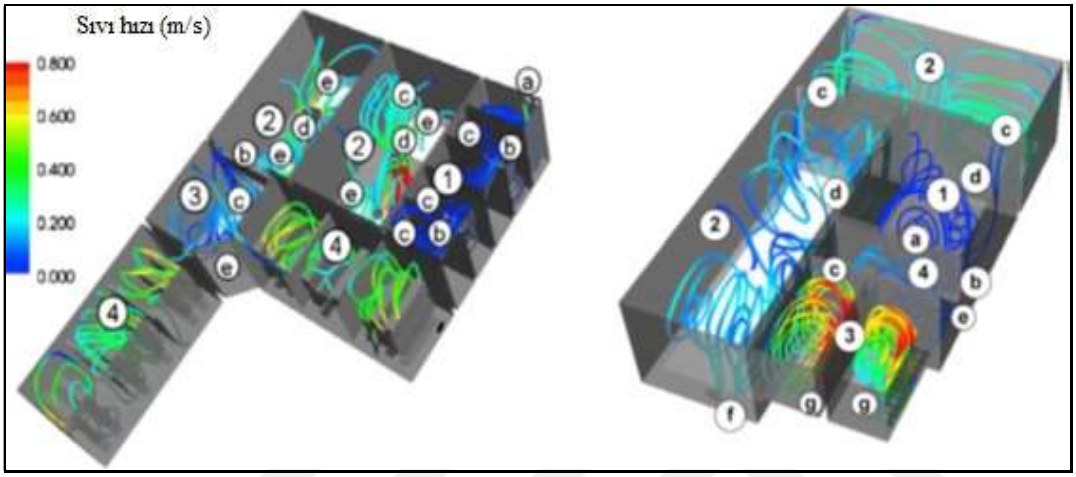
Şekil 2.91 : Proses düzeneğinin taslak görüntüsü (Brannock ve diğ., 2010).

Her MBR tesisinde iz çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışma lityum klorit kullanılarak yapılmıştır. İz maddesi ICP-AES kullanılarak ölçülmüştür. CFD modeli kurulmadan önce ise bir konsept model kurulmuştur. Konsept model Brannock (2003) tarafından yapılan önceki modelden uyumlaştırılmıştır. Amaçlanan CFD modelinin bileşenleri Şekil 2.92'de gösterilmiştir.



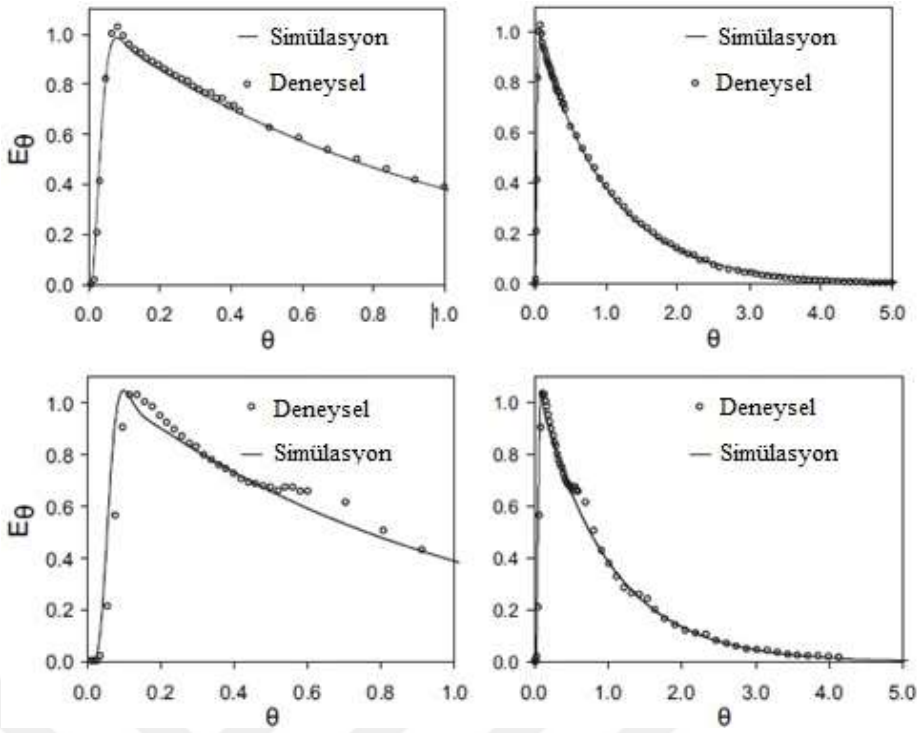
Şekil 2.92 : Önerilen CFD modelinin bileşenlerinin şematik gösterimi (Brannock ve diğ., 2010).

CFD modellemesi ticari kod olan FLUENT kullanılarak yapılmıştır. Sıvı ve gaz fazların tanımı için multifaz özelliği kullanılmış ve Euler modeli seçilmiştir. Devamlı faz su/çamur olmakla beraber dağınık faz hava olarak belirlenmiştir. Dağınık faz olan hava için bazı varsayımlar yapılmıştır. Bunlar; hava kabarcıkları küreseldir, hava kabarcıkları sabit çapa sahiptir, kabarcıklarda çökme veya patlama yoktur. Türbülans modeli olarak standart k-e türbülans modeli kullanılmıştır. Modelleme sonucu olarak ortaya çıkan hız profilleri Şekil 2.93'da verilmiştir.



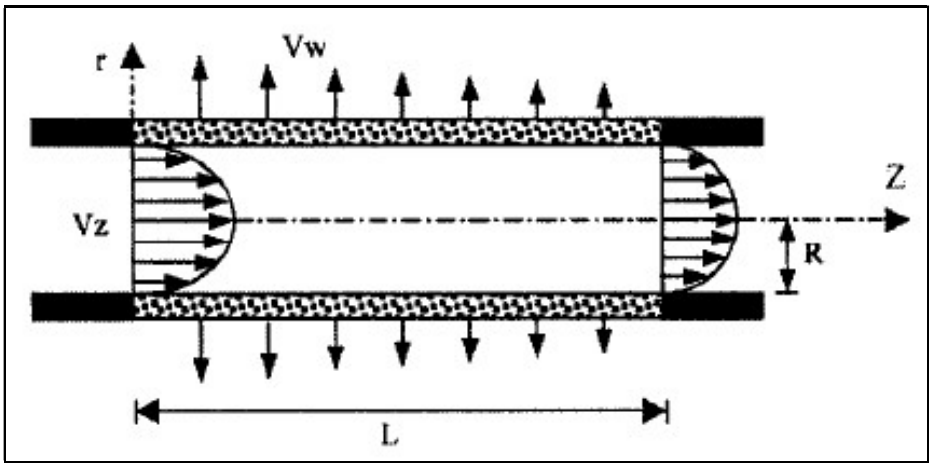
Şekil 2.93 : Hıza bağlı oluşturulmuş akış çizgileri. (sol) bölmeler sırası ile düz plaka mbr dizayn görünümü; 1. Anaeobik bölge, 2. Salınan havalandırma bölgeleri 3. Havalandırma bölgesi, 4. Membran filtrasyon tankı, a) Ana giriş , b) Taşma savağı, c) Dip savağı, d) Karıştırıcı, e) Havalandırıcı, (sağ)- bölmeler sırası ile hollow fiber MBR dizayn görünümü; 1) Anoksik bölge, 2) Havalandırma bölgesi, 3) Membran filtrasyon tankı, 4) Tekrar Havalandırma bölgesi, a) Ana giriş, b) Karıştırıcı, c) Taşma savağı, d) Havalandırıcı, e) Dip savağı (Brannock ve diğ., 2010).

Simülasyon ve deney sonuçlarının olduğu grafikler Şekil 2.94'de verilmiştir. Grafiklere bakıldığında deney ve simülasyon sonuçlarının doğruluğunu göstermektedir. Bu makalenin sonucunda en önemli çıktılardan birisi membran biyoreaktör sistemlerinde CFD uygulamarı MBR'ların dizayn ve optimizasyonunda büyük bir öneme sahiptir.



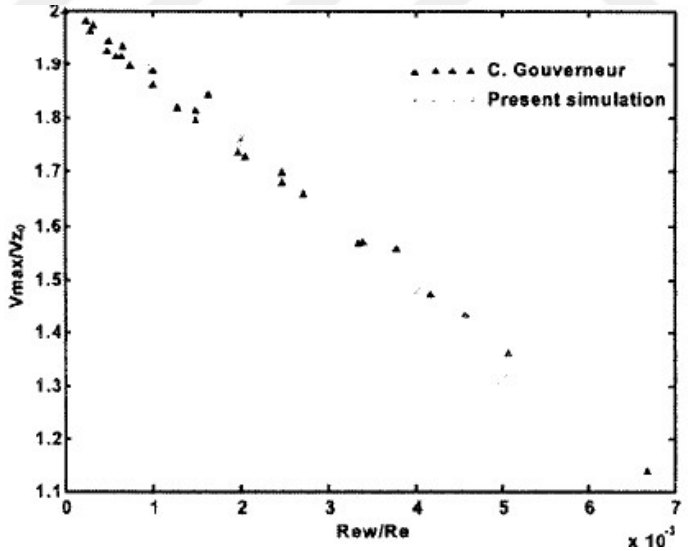
Şekil 2.94 : Simüle edilen ve deneysel olarak ölçülen boyutsuz bekleme süresi dağılımları. Üst taraftaki grafikler düz plaka MBR modüllerine, alt taraftaki grafikler ise hollow fiber MBR modülüne aittir (Brannock ve diğ., 2010).

Damak ve diğ. (2003), çapraz akışlı tübular membran modülünde değişken duvar vakumu ile poroz bir tüpte laminer akışkan akışı için nümerik simülasyonlar gerçekleştirmiştir. Değişken duvar vakumu, geçirgen duvar boyunca akış hızı olan bir akım akışı bünyesindeki basınç değişimi ile ilgili Darcy kanunu tarafından tanımlanmıştır. Esas olarak poroz duvara akışı teğetsel olan tüpteki besleme akımı Navier-Stokes denklemleri ile modellenmiştir. Bir dinamik çapraz akışlı filtrasyon modeli geliştirilmesi için çözüm şemasında Navier-Stokes ve Darcy denklemlerinin bir birleştirme metodu dikkate alınmıştır. Korunum denklemleri nümerik olarak sonlu farklar şeması kullanılarak çözülmüştür. Çözüm eksensel Reynolds ve filtrasyon sayısına bağlıdır. Basitleştirilmiş modelde kabul edilen bazı varsayımlar tartışılmıştır. Bu sistemde akışın doğru modellemesi polarizasyon konsantrasyonu ve sonrasında tıkanma dikkate katılarak güvenilir bir tahmini filtrasyon modeli geliştirilmesinde temel gereksinimdir. Fiziksel modelin şematik bir gösterimi ve koordinat sistem Şekil 2.95'de verilmiştir. Poroz kısmın uzunluğu L ve tüpün iç yarı çapı R'dir.



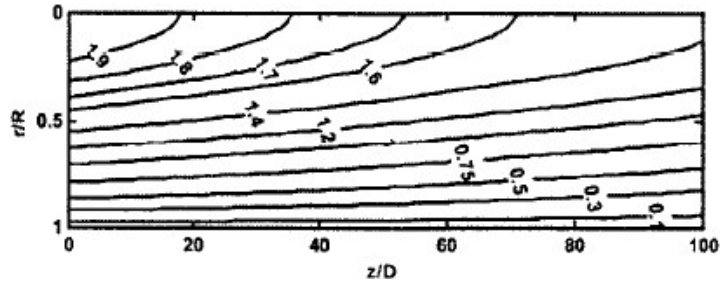
Şekil 2.95 : Silindirik bir koordinat sistem ile bir tübular membranda laminer akışın gösterimi (Damak ve diğ., 2003).

Modeli doğrulamak amacıyla, nümerik sonuçlar Gouverneur tarafından bulunan V_{max} / Vz_0 a karşı Re_w / Re oranlarının hesaplanmasıyla ilgili bazı deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır (Şekil 2.96). Bu çalışmalarda, lazer anemometresi ölçümleri çeşitli Reynolds laminer eksenel ve filtrasyon numaraları altında sinterlenmiş poroz tüp çıkışında eksenel hız profilini belirlemek için yapılmıştır. Nümerik sonuçlar deneysel ölçümler ile iyi bir uyum içerisindedir.

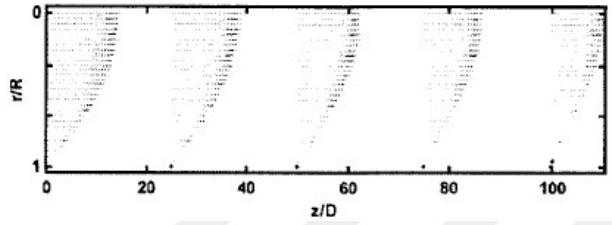


Şekil 2.96 : V_{max} / Vz_0 oranının deneysel ve teorik değerleri(Damak ve diğ., 2003).

Eksenel hız kontur grafiği Şekil 1.98'de verilmiştir, boyutsuz bir geçirgenlik (10^{-8}), Reynolds eksenel sayısı (300) ve Reynols filtrasyon sayısı (0,3) ile akış alanına (Şekil 2.97) karşılık gelir. Bu şekil, eşit uzaklıkta paralel konturler tarafından karakterize edilmiş duvar emme olmadan basit boru akışları için tipik bir eksenel hız alanından bir miktar sapmayı gösterir.

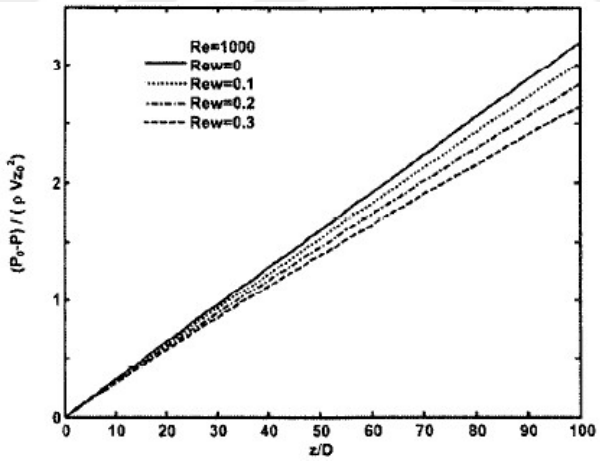


Şekil 2.97 : Şekil 1.96'da gösterilen hız alanına karşılık gelen hız konturleri (Damak ve diğ., 2003).



Şekil 2.98 : 10^{-8} poroz duvar geçirgenliği, Re=300 ve Re_w= 0,3 ile tüpteki akış alanları (Damak ve diğ., 2003).

Nümerik simülasyonların sonuçları, Re_w'in çeşitli değerleri için z-ekseni boyunca boyutsuz basınç veya başka bir deyişle basınç düşüşü artışlarını göstermektedir (Şekil 2.99).

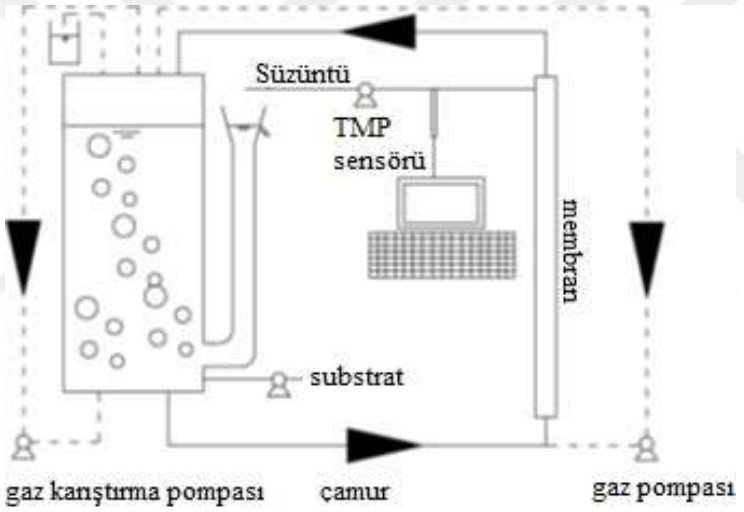


Şekil 2.99 : z-ekseni boyunca boyutsuz gradyan basıncın çizimi (Damak ve diğ., 2003).

Yang ve diğ. (2012) çalışmalarında, gaz havalandırmalı iki fazlı akış uygulanan anaerobik membran biyoreaktörün (AnMBR) cidar akımının tübular membranında kütle transfer karakteristiklerini analiz etmek için akışkan dinamik modellemesini kullanmıştır. 2 boyutlu bilgisayarlı hesaplama alanı CFD model için oluşturulmuştur ve bu alan ticari olarak ulaşılabilen FLUENT yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Modelleme, membran yüzeyinde gaz kabarcıklarının burunun da ki kütle transfer

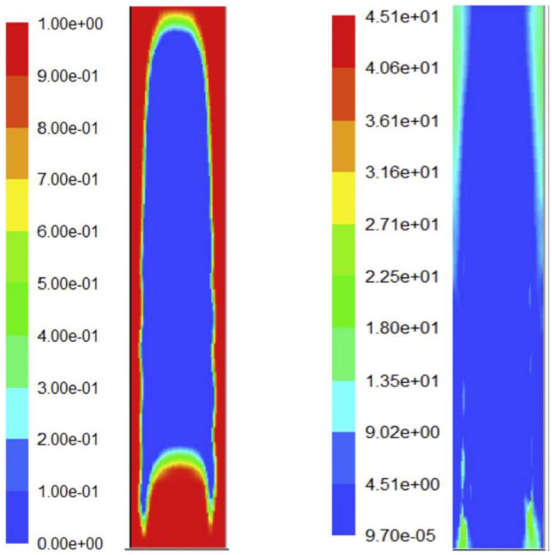
kapasitesinin kabarcıkların ucundaki kütle transfer kapasitesine göre daha fazla olduğunu göstermiştir. Çamur yerine su kullanıldığında ise sonuçların tam tersi olduğu görülmüştür. Söz konusu kütle transfer oranında, çamurun filtre edilebilirliğinin sabit bir akışta trans membran basıncı üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Buna ek olarak, bu model ayrıca göstermiştir ki tübular membranın iç kısmında kayma gerilmesi genel olarak 20 Pa civarındadır. Fakat gaz kabarcıklarının hareketlerine göre 40 Pa a kadar yükselebilmektedir. Bununla beraber, bu kayma gerilmelerinde çamur parçacıkları için dengeli bir parçacık boyutu dağılımı bulunmuştur.

Deneysel düzen Şekil 2.100'de gösterilmiştir. MBR gaz havalandırmalı biçimde çalıştırılmıştır. Bioreaktörde üretilen biogaz tübular 5,2 mm lik çap ve 1 m lik bir akış kanalı uzulunğu ile bir membran (PVDF, NORIT gözenek boyutu 30 mm) içine pompalanmıştır.



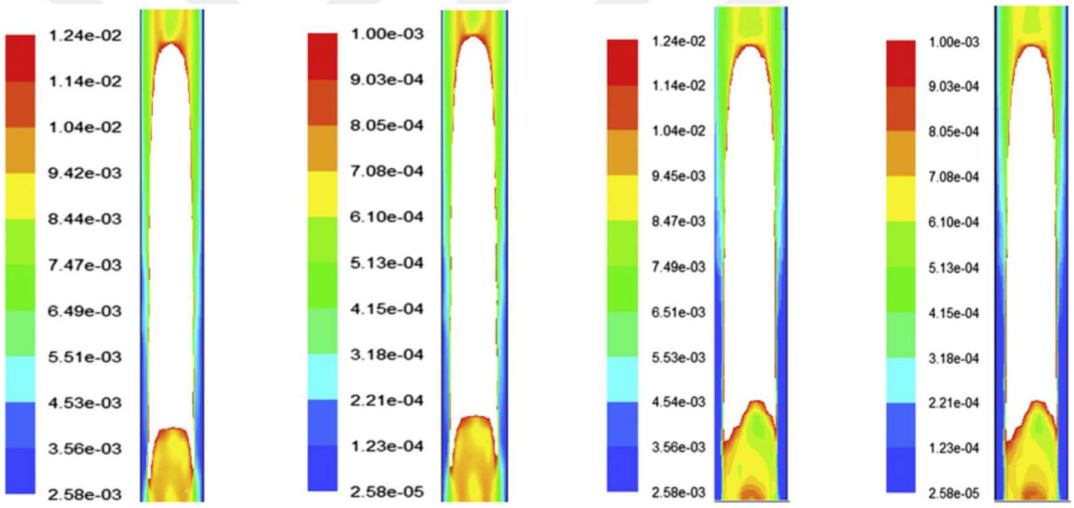
Şekil 2.100 : Deneysel düzeneğin şematik gösterimi (Yang ve diğ., 2012).

Hidrodinamik durum ve çamurun partikül büyüklüğü arasında bir ilişki elde etmek amacıyla, kayma gerilmesi şartları için partikül büyüklüğü çeşitliliği ölçüldü ve CFD modelden kayma gerilmesi dağılımı elde edildi. Tek bir gaz yumruğu etrafında kayma gerilmesi dağılımı Şekil 2.102'de gösterilmiştir. Yüksek kayma gerilmesi ağırlıklı olarak kabarcığın burun ve kuyruk kısmında ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte, Şekil 2.101'de de gösterildiği gibi kabarcık sonrası toplu çözümün kayma gerilmesi, kabarcığın burnuna kuvvetli bir şekilde etki ettiği kadar membran yüzeyine etki edememiştir. Bu, kabarcığın kuyruğunun etrafındaki membran yüzeyinde düşük kayma gerilmesini ve kabarcığın burnunun etrafındaki membran yüzeyinde yüksek kayma gerilmesini açıklar.



Şekil 2.101 : Bir gaz yumruğu etrafındaki kayma gerilmesi (Yang ve diğ., 2012).

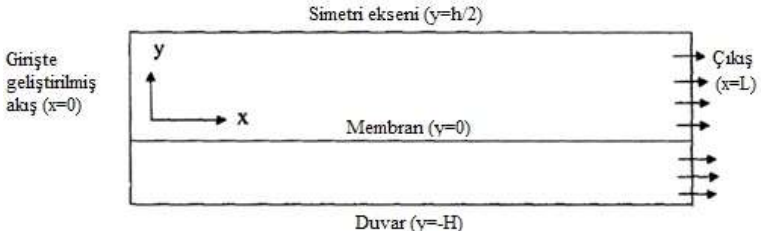
Kütle transfer katsayısı dağılımları ise Şekil 2.102'de verilmiştir.



Şekil 2.102 : Farklı faz hızları ve partikül boyutları((kırmızı: yüksek K_l, mavi: düşük K_l). Soldan sağa doğru: V_{gaz}= 0,74 m/s(birinci: d_p= 1µm; ikinci: d_p= 100µm) ve V_{gaz}= 0,5 m/s (üçüncü: d_p= 1µm; dördüncü: d_p= 100µm)). için bir gaz yumruğu etrafındaki kütle transfer katsayısı (K_l) (Yang ve diğ., 2012).

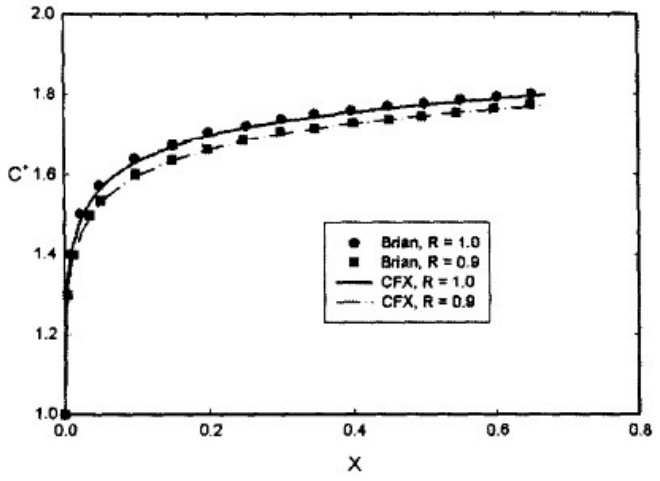
Wiley ve Fletcher (2002), yaptıkları çalışmada, besleme kanalındaki bileşiklerin seçici uzaklaştırılması ve bunların süzüntü kanalına transferini içeren basınç sürücülü membran proseslerin, CFD modelinin uygulamasını ve doğrulamasını tanımlamaktadır. Boş kanallar ve türbülans yükselticileriyle kanallar için, tutulma mekanizmasındaki değişikliklerin etkisi, hız üzerindeki duvar süzülme oranları ve çözelti özellikleri ve konsantrasyon profilleri ortaya konulmuştur. Akış olgusunun ve polarizasyonun doğru ve güvenilir tahminlerini elde etmek amacıyla fiziksel özellik değişimleri ve tutulma mekanizmasının doğru modellemesi ve yüksek mertebeden

nümerik şemalar ile birlikte, klasik ultra filtrasyonda genellikle karşılaşılan yüksek polarizasyon uygulamaları için sonuçlar, membran duvarı yakınında çok iyi meshler gerektiğini göstermektedir. Çalışmada kullanılan geometri Şekil 2.103'de verilmiştir.

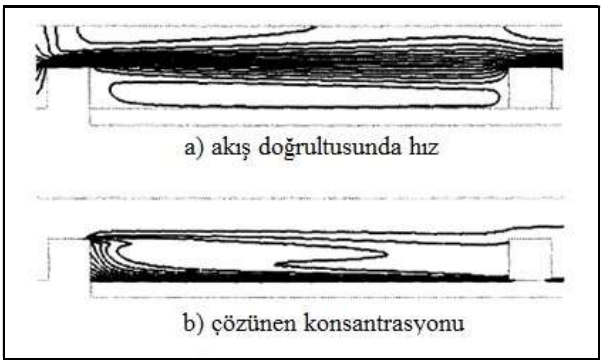


Şekil 2.103 : Simülasyonlar için kullanılan akış kanalının geometrik modeli (Wiley ve Fletcher, 2002).

SIMPLEC algoritmasıyla sonlu hacim kodu CFX4 korunum denklemlerinin çözümü için kullanılmıştır. Akışın kararlı, sıkıştırılamaz ve laminer olduğu varsayılmıştır. Model yarı analitik çözümlerin bir tipine karşı doğrulanmıştır. Şekil 2.104 ve Şekil 2.105'de modelden elde edilen sonuçlar ile Brain tarafından yayınlanan veriler arasında mükemmel uyumu göstermektedir. Sonuçlar arasında oluşan küçük farkın sebebi; CFX dikkatli bir şekilde bütün Navier-Stokes ve konsantrasyon denklemlerini çözerken, Brain ın eksik bir hız dağılımı kullanması ve akım yönünde olan çözünen difüzyonu yok saymasından kaynaklanmaktadır.



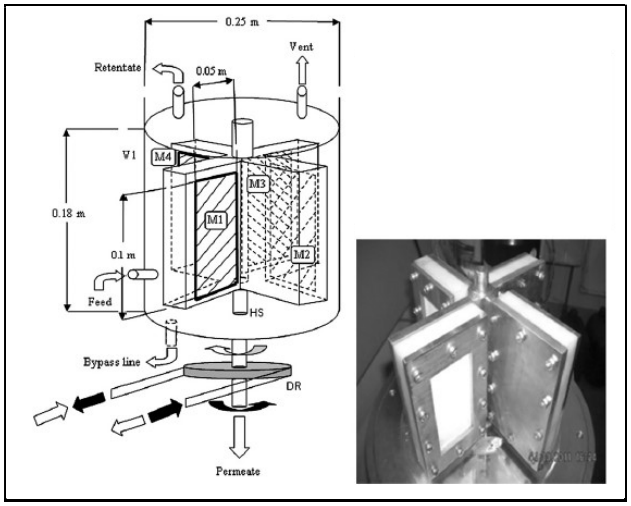
Şekil 2.104 : Değişken süzülme oranı için (α_0=0,27, β=1) CFX ve Brain verilerinin karşılaştırılması (Wiley ve Fletcher, 2002).



Şekil 2.105 : Şekil EK-1.107'de gösterilen şartlar için ayırıcıların konsantrasyon polarizasyonuna etkileri (Wiley ve Fletcher, 2002).

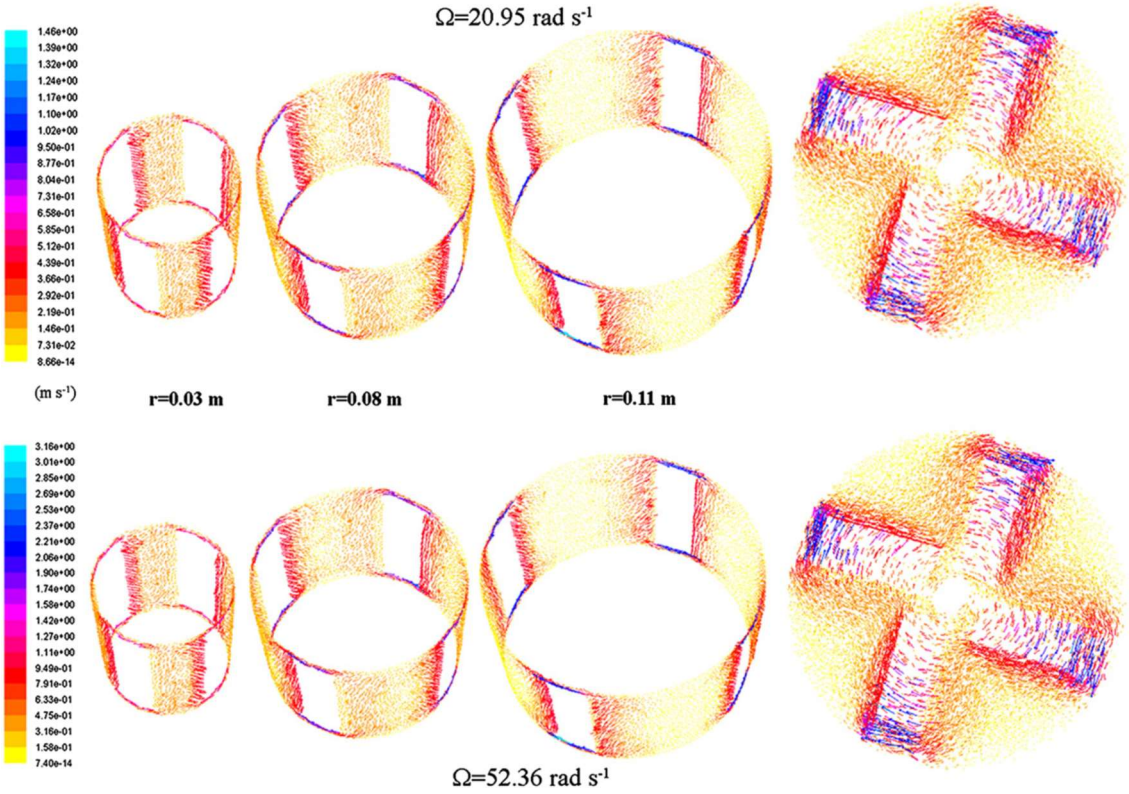
3 boyutlu membran modüllerinde akış ve konsantrasyon olaylarını tamamen modelleme becerisi hala mümkün değildir. Modern CFD paketleri karmaşık geometrilerin oluşumunu basitleştirmiştir. Bu makale, besleme ve süzüntü akımları arasında bileşenlerin dönüşümü ve seçici giderimi için bir model kapsayan membran sistemlerinin modellenmesi için mevcut CFD paketi CFX i geliştirmeyi tanımlamıştır. Bu CFD modelin bilinen yarı analitik çözümlere karşı geçerliliği kabul edilmiştir. Bu onaylanmış CFD modelinin modüler yapısı, membran sistemlerinin tasarımı ve optimizasyonunda son derece etkili bir araç olmasını sağlamaktadır.

Sarkar ve diğ.(2012) GAMBIT ve FLUENT'in ticari paketlerini kullanarak Döner Sepet Membranı (DSM) modülünün hidrodinamik performansını ve iyileştirilmiş sıyırma performansını simule ederek incelemiştir. Deneylerinde Bovine Serum Albumin (BSA) içeren sulu çözelti ile 50000 moleküler ağırlık kesme kapasitesine sahip PVDF membran kullanmışlar. Kullandıkları deney sisteminin şematik diyagramı Şekil 2.106'da verilmiştir.



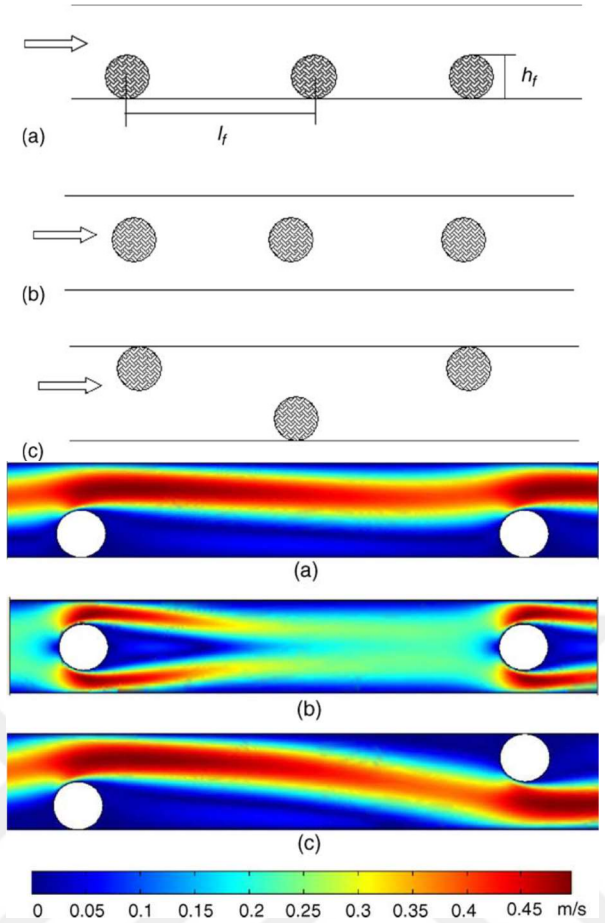
Şekil 2.106 : Döner Sepet Modülü'nün şematik diyagramı (Sarkar ve diğ., 2012).

Yaptıkları çalışmada membran yüzeyindeki suyun yarattığı sıyırma kuvvetini arttırdıkları sonucuna varmışlar. Bu sıyırıcı kuvvet ise konsantrasyon polarizasyonu sonucu oluşan bariyer tabakayı engellemiş ve daha yüksek akı almalarına yardımcı olmuş. Yaptıkları simülasyonun hız alanları Şekil 22.107'de verilmiştir. Bu şekilden görüleceği üzere modül çapı arttıkça uç kanatlara doğru olan hızda artmıştır. Dönüş ekseninden uzaklaşıldıkça hızında artmakta olduğu görülmüştür.



Şekil 2.107 : Farklı çaplarda ve farklı dönüş hızlarındaki modüllerde (r=0,03 m, 0,08 m, 0,11m) hız alanları (Sarkar ve diğ., 2012).

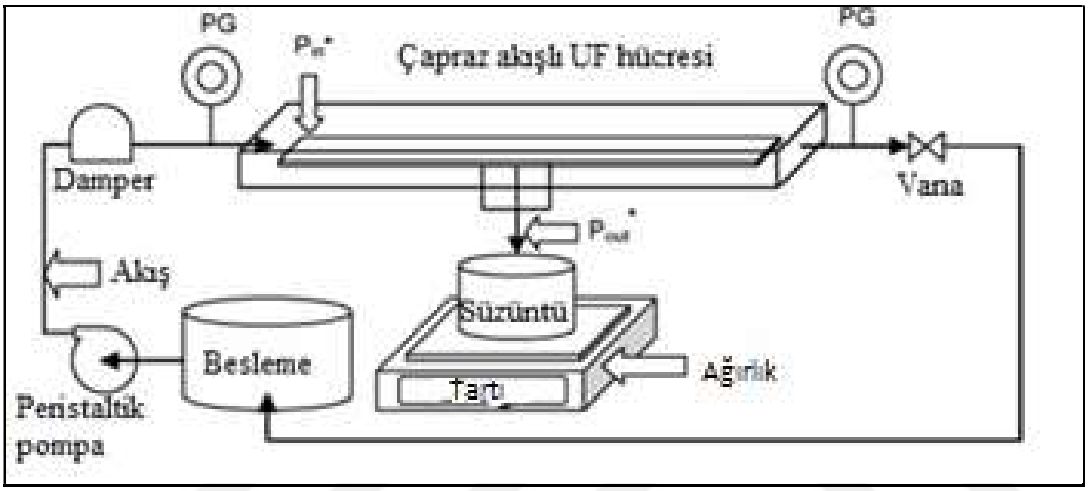
Subramani ve diğ. (2006) hem açık kanallı hem de çapraz akışlı membran filtrasyonu sistemlerinde momentum ve kütle aktarımını incelemek üzere bir sonlu elemanlar modeli geliştirmiş. Bu modeli Comsol firmasının FEMLAB 3.0 sonlu elemanlar çözücüsünde çözmüşler. Boşluk oluşturucu filamentleri membranlar arasına kenarda, ortalanmış ve zig zag olacak şekilde 3 farklı biçimde yerleştirmişler (Şekil 2.108).



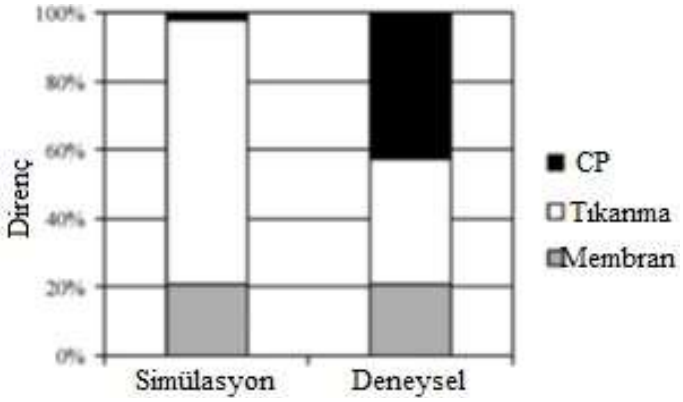
Şekil 2.108 : Boşluk oluşturucu filamentlerin membranlar içerisine yerleştirilme stilleri (a:kenarda, b:ortalanmış, c:zigzag) ve bu filamentler arasından akışlar.(akım yönü soldan sağa olup, ölçü barı 0-0,5 ms^{-1}'dir) (Subramani ve diğ., 2006).

Şekil 2.108'de ayrıca bu kanallarda su akımının simülasyonu da verilmiştir. Suyun giriş hızının 0,2 ms^{-1} olduğu sistemde, filamentlerin kenarda olduğu tip modelde su hızı 0,5 ms^{-1} mertebelerine çıkmaktadır. Üst taraftai membran boyunca hızı neredyse sabit kalan bu sistemde konsantrasyon polarizasyonu etkin bir şekilde azaltılabilecektir. Filamentlerin ortalandığı tip modelde ise her iki duvarda yüksek hızlar üretilmektedir. Ancak su hızı belirli bir süre sonra yavaşlamaktadır. Zig zag tipi filamentte ise filamentlerin temas noktalarında hız sıfıra yakınken suyun geçtiği açıklıklar arasında yüksek hız oluşmaktadır. sonuç olarak zig zag ve kenarda olan filamentli sistemlerde filamentlerin temas ettiği membranlarda konsantrasyon polarizasyonu artıp tıkanma oranı daha yüksek olurken, filamentlerin temas etmediği membranlarda konsantrasyon polarizasyonu daha düşük olup tıkanma oranı daha düşük olmaktadır.

Schausberger ve diğ. (2009) Bovine Serume Albumin (BSA) çözeltisini hem deneysel hem de hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonları olarak çalışmışlar. Deneysel sistem olarak Şekil 2.109'deki gibi bir sistem kullanmışlar. Bu deneysel sistemde zamana bağlı toplam akı, besleme miktarına bağlı membran yüzeyinde nihai protein birikimi, pH ve protein konsantrasyonunu ölçmüşler. Bu dataları, değişen fiziki şartları ve yüzeydeki protein absorblamasınıda hesaba katan bir şekilde çözecek bir CFD çözücü geliştirmiş. Şekil 2.110'de ise 1 saat boyunca standart koşullarda membran akısına uygulanan resistanslar verilmiştir.



Şekil 2.109 : Deney düzeneğinin şematik görünümü. Oklar ölçüm noktalarını göstermektedir. Bütün ölçüm noktaları data toplayıcı bir bilgisayara bağlıdır (Schausberger ve diğ., 2009).



Şekil 2.110 : 1 saat boyunca standart koşullarda membran akısına uygulanan resistanslar (Schausberger ve diğ., 2009).

Şekil 2.110'da görülmektedir ki, simülasyonda konsantrasyon polarizasyon etkisi göz ardı edilmiştir ve tıkanmanın resistansı daha yüksek çıkmıştır. Deneysel sistemde konsantrasyon polarizasyonunun etkisi simülasyona göre oldukça yüksek çıkmıştır. Bu bulguardan sonuç olarak konsantrasyon polarizasyonunun çok düşük

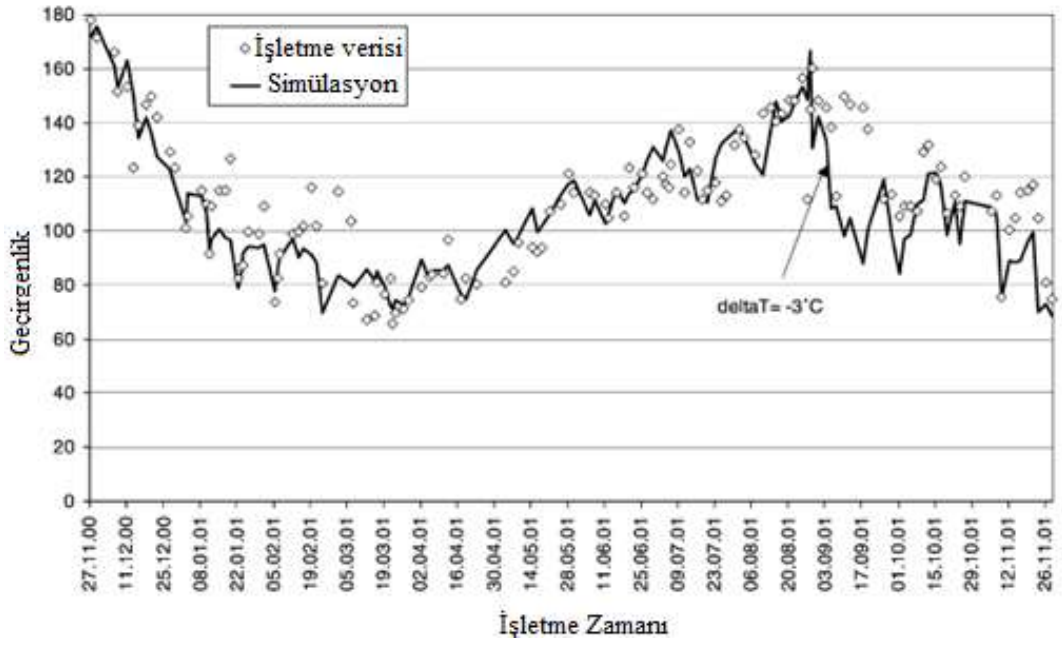
transmembran akılarında bile hesap edilmesi gerektiği sonucu çıkmıştır ve daha iyi tahminler alabilmek için; BSA için konveksiyon-difüzyon denklemini daha uygun çoklu faz taşınım denklemleri ile değiştirmek, membranın bu taşınım ile alakalı uzaysal çözümünün değiştirilmesi gerektiği bulunmuştur.

Wintgens ve diğ. (2003) yaptıkları çalışmada membran biyoreaktörü içerisine daldırılmış bir kapiler hollow fiber membran modülü için filtrasyon performansı modeli geliştirmişlerdir. Model gerçek ölçekli bir MBR tesisi verileri ile kalibre edilmiştir.

Simulasyon ile ölçümlerin karşılaştırılmaları biyolojik parametreler için Çizelge 2.7'da verilirken permabiliteler için ise Şekil 2.111'de grafik olarak verilmiştir. Sonuçlardan görüleceği üzere varsayılan model tam ölçekli bir membran biyoreaktördeki davranışları anlamak üzere kullanılabilir.

Çizelge 2.7 : Biyolojik parametrelerin ölçüm ve simülasyon karşılaştırılmaları, (Wintgens ve diğ., 2003)).

Parametre	Ölçüm (ortalama)	Simülasyon (karalı hal)
COD (mg/l)	23.0	23.4
NH_4-N (mg/l)	0.173	0.2
NO_x-N (mg/l)	6.2	6.6



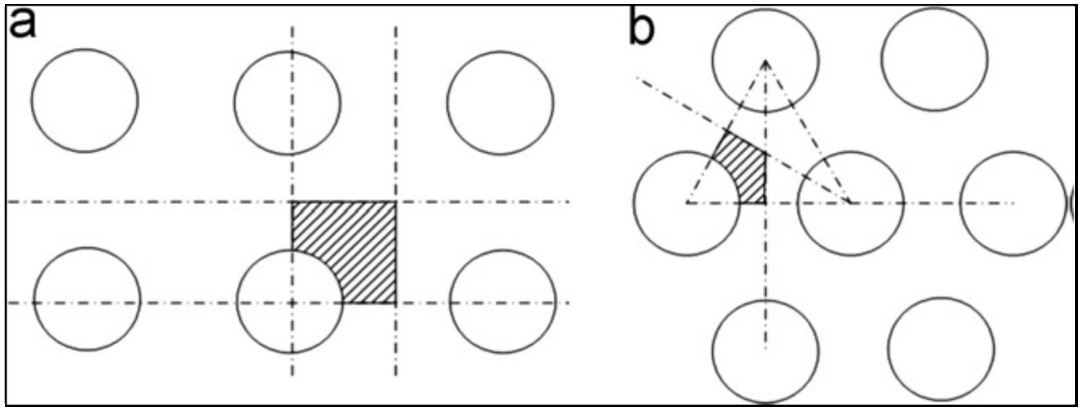
Şekil 2.111 : Permabilite değerlerinin ölçüm ve simülasyon olarak karşılaştırılması (Wintgens ve diğ., 2003).

Bir diğer çalışmada Zamani ve diğ. (2013), dinamik kayma gerilmesi vibrasyon aracılığı ile konsantrasyon polarizasyonunu düşüren ve yüksek katı madde miktarı yüksek membran uygulamalarında membran tıkanmasını azaltan bir parametre olmasından yola çıkarak hem numerik hemde analitik olarak membran yüzeyinde ki duvar gerilmesi vibrasyonlu membran sistemlerinde tıkanma performansını çalışmıştır. Literatürde vibrasyonlu sistemlerin filtrayon akısı üzerine yüzey kayma gerilmesinin etkisinin incelendiği birkaç çalışma yayınlanmıştır. Ancak vibrasyonlu sistemlerin simülasyonu bu çalışmalar arasında yoktur. Vibrasyonlu sistemlerin modellenmesi ve simülasyonu konusunda iki büyük problem bulunmaktadır. Bu problemler;

- Membran yüzeyi üzerinde kayma gerilmesini tahmin etmek için sistemin hidrodinamik ve akımın modellenmesi ve membran yakınlarındaki akış karakterizasyonu
- Partiküllerin ters taşınım mekanizmasının modellenmesi

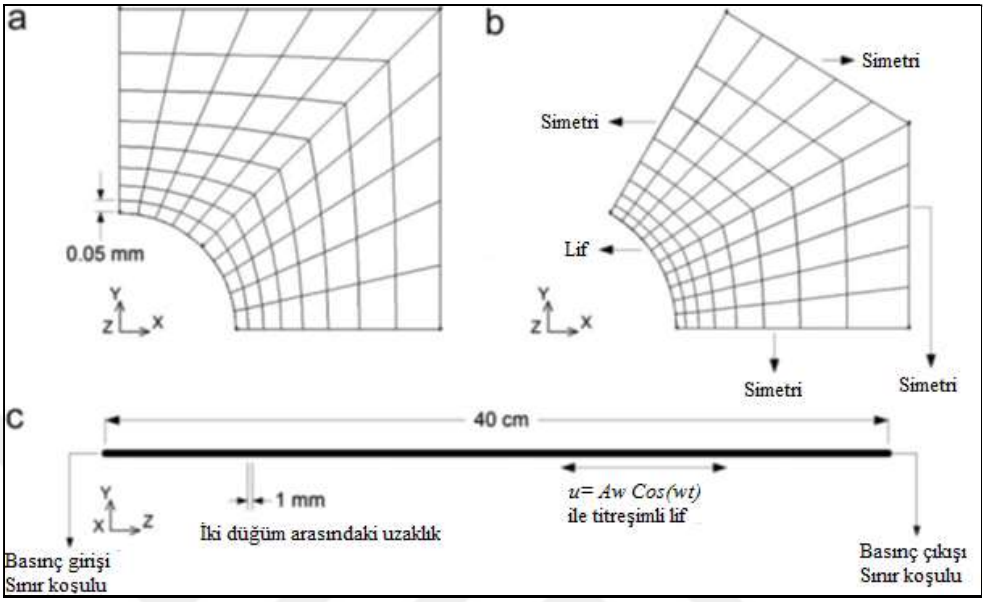
Bu çalışma uzunlamasına titreyen hollow fiber membran sistemlerin CFD ve analitik modellenmesi üzerinde yoğunlaşmıştır. Daha önce ki çalışmalarda tek fiberin veya birbirine ile arasındaki mesafesi ayarlanmış düz plaka membranların modellenmesi yapılmıştır. Ancak bu çalışmada rastgele hollow fiber membran bağının vibrasyonlu sistemde ki davranışı modellenmiştir.

Çalışmada 3 boyutlu CFD simülasyonu için FLUENT programı kullanılmıştır. 2 farklı konfigürasyon da simülasyon yapılmıştır. Düz ve çapraz eksenli olarak fiberler yerleştirilerek analiz yapılmıştır. Bahsedilen iki konfigürasyon için Şekil 2.112'de kesit görüntüleri verilmiştir.



Şekil 2.112 : a. Aynı eksenli fiber yerleşimi, b. Çapraz eksenli fiber yerleşimi (Zamani ve diğ., 2013).

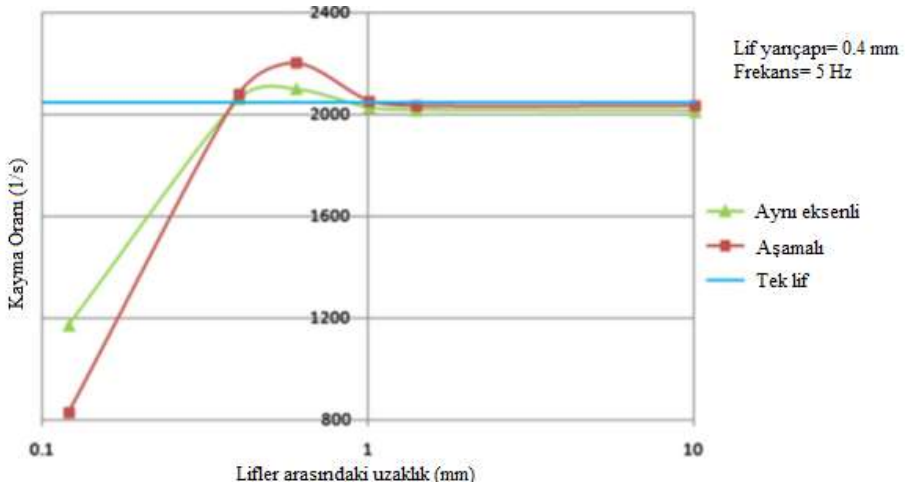
1 mm çaplı fiberler birbirlerinden en az 0,05 mm olacak şekilde yerleştirildiği varsayımı yapılmıştır. Bu durum ve sınır şartlar modelde kullanıldığı gibi Şekil 2.113'de gösterilmiştir. Debi laminer olduğu kabul edilmiştir. Basınç ve hızı eşleştirebilmek için PISO algoritması kullanılmıştır.



Şekil 2.113 : 2 komşu fiber arasında ki mesafenin 1,4 mm olduğu düz ve çapraz eksenli konfigürasyonlar için mesh ve sınır şartlar (Zamani ve diğ., 2013).

Şekil 2.113'de görüldüğü gibi hollow fiberin yüzeyi 5 Hz frekansında ve 1 cm genişlik ile vibrasyon şartları göz önünde bulundurulmuştur.

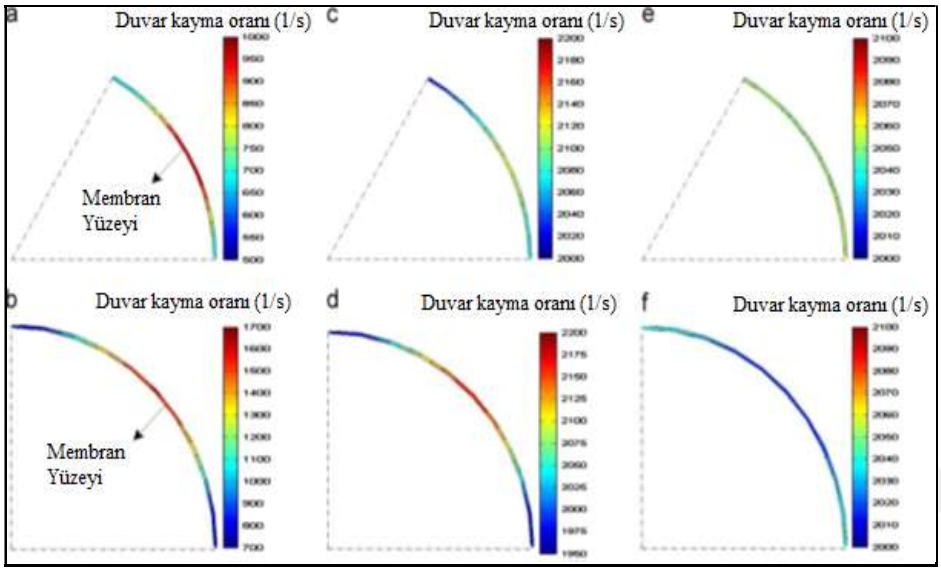
Hesaplanan alanda titreyen yüzey üzerinde ortalama duvar kayma gerilmesi CFD simülasyonda elde edilmiştir. Simülasyonlar hem düz eksenli hemde çapraz eksenli düzen için fiberler arasında ki farklı mesafeler kullanılarak hesaplanmıştır. Sonuçlar Şekil 1.114'de verilmiştir.



Şekil 2.114 : Fiber desteleri için duvar kayma gerilmesi(Zamani ve diğ., 2013).

Grafikte ki sonuçlara göre (Şekil 2.114) fiberler arasındaki mesafe azaldıkça kayma gerilmesinde önemli ölçüde düşüş gözlemlenmiştir. Aynı zamanda fiberler birbirlerinden uzaklaştığında CFD sonuçları analitik sonuçlar ile birbirine yakınlık göstermektedir. Bu yüzden CFD sonuçları analitik çözümler tarafından kontrol edilmiştir. Bir diğer önemli nokta ise fiberler birbirlerine çok yakın olduğunda yüzeyde ki kayma gerilmesi önemli ölçüde düşüş göstermektedir.

Şekil 2.115'de fiberler arasındaki farklı mesafeler için titreyen fiberlerin yüzeyi üzerinde kayma gerilmesi dağılımı göstermektedir.



Şekil 2.115 : Fiberler arasındaki farklı mesafeler için titreyen fiberlerin yüzeyi üzerinde kayma gerilmesi dağılımı; fiberler arasındaki mesafeler; a) çapraz 0.12mm, b) aynı eksenli-0.12mm, c) çapraz-0.4mm, d) aynı eksenli-0.4mm, e) çapraz-1mm, f) aynı eksenli-1mm (Zamani ve diğ., 2013).

3. TİTREŞİMLİ BATIK MBR MODÜLLERİNİN TASARLANMASI, MODELLENMESİ VE BU MODÜLLERİN ÜRETİLMESİ

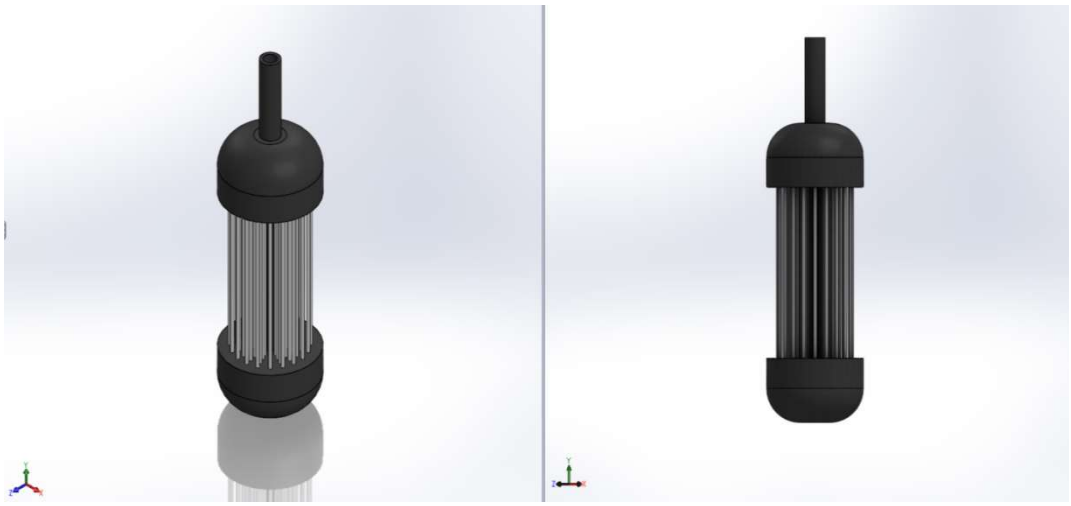
3.1 Titreşimli Batık Lab-ölçek MBR Modülün 3 Boyutlu Tasarımı

Titreşimli membran modüllerinin Solidworks Profesyonel 2013x64 sürümü ile 3 boyutlu (3B) tasarımları yapılmıştır. Modüllere ait özellikler Çizelge 3.1 :'de verilmektedir.

Çizelge 3.1 : Modül özellikleri.

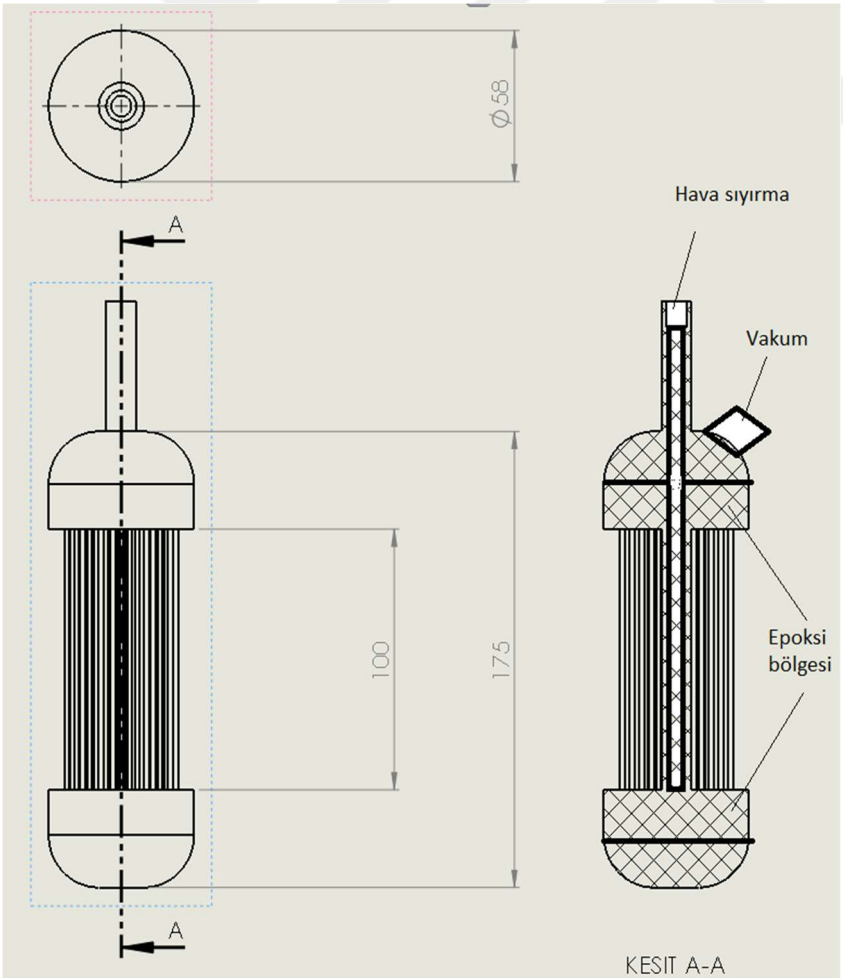
Parametre	Özellikler
İnce boşluklu bir membranın çapı (mm)	2
İnce boşluklu bir membranın yüzey alanı (m^2)	0,0006
Toplam ince boşluklu membran sayısı	80
Toplam membran alanı (m^2)	0,048
Modül uzunluğu (cm)	17,5
Modül çapı (cm)	5,8
Geri yıkama durumu	var
İçeriden hava sıyırma durumu	var
Maksimum vakum basıncı (bar)	0,8

Modüllerin üst tarafından içeriye doğru havalandırma borusu bulunmakta olup, fiberlerin merkezine hava sıyırma amaçlı olarak yerleştirilmiştir. Vakumla süzüntü toplanması ile igili bağlantı, modülün üst tarafından yapılmıştır. Modülün üç boyutlu olarak farklı açılardan görünümü Şekil 3.1 :'de verilmektedir.



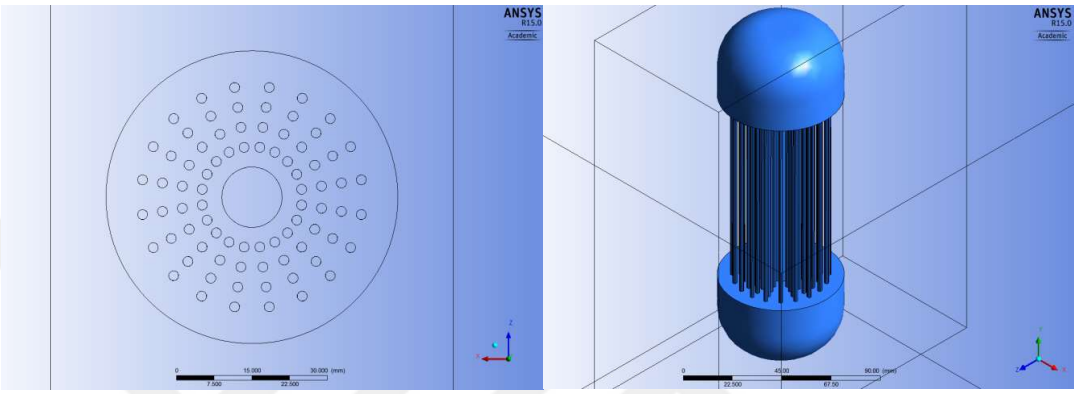
Şekil 3.1 : Modülün üç boyutlu görünümleri.

İnce boşluklu membranlar iki baştan plastik parçalara epoksi yapıştırıcı ile dikilmiş olup, alt taraf tamamen kapatılmış, üst taraf ise süzüntü alınacağından dolayı açık bırakılmıştır. Modüldeki aktif membran yüzey uzunluğu, modül çapı ve kesit görünümünü içeren teknik detaylar Şekil 3.2 :'de gösterilmektedir.



Şekil 3.2 : Membran modüllerin teknik detayı.

Modelleme için yapılan tasarımda ise, çizilen modül geometrisi içerisinde, 58 mm çaplı bölge ince boşluklu membranların bulunduğu alan olarak belirlenmiştir. Toplamda 80 adet fiberin bulunduğu bölge, gerçekte üretilen modüller ile aynı dizilime sahip olup, geometri gerçek modülün yapısını bire bir oranda yansıtmaktadır. Analiz geometrisi Şekil 3.3 :' de görülmektedir. Membran uzunluğu 100 mm ve toplam boy 175 mm'dir. Membran fiberlerinin dış çapı ise 2 mm'dir. Merkezde havalandırma borusu bulunmakta olup, çapı 12 mm, uzunluğu ise 100 mm'dir.



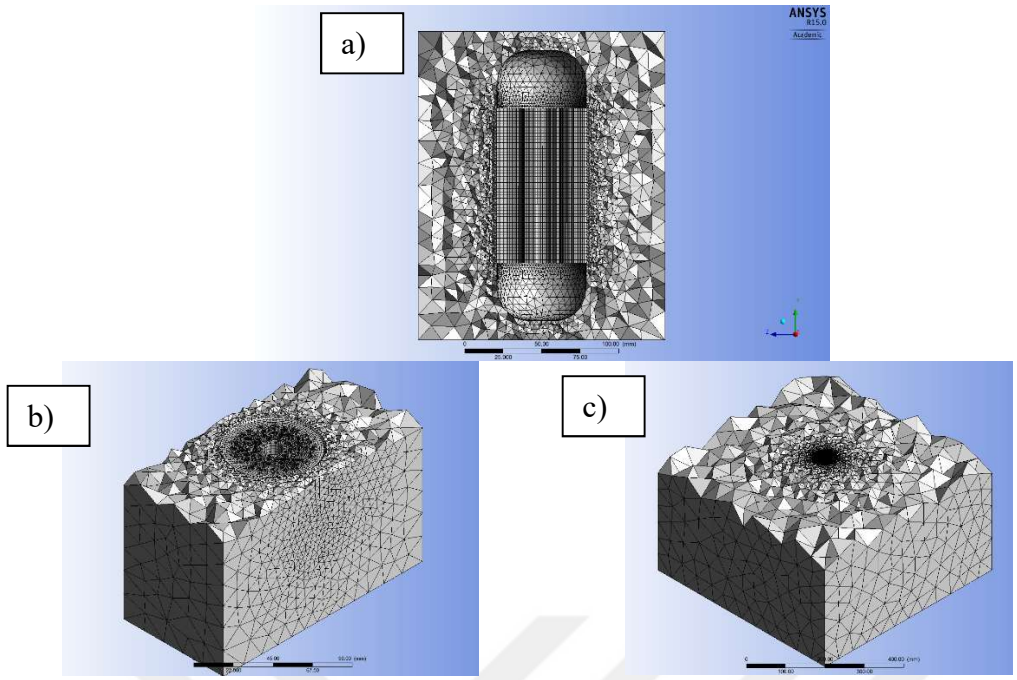
Şekil 3.3 : Modül geometrisi.

3.2 Titreşimli batık lab-ölçek MBR modülün CFD yöntemi ile Modellenmesi

Bu bölümde, ince boşluklu MBR modülünün üç boyutlu CFD modellemesi çalışmalarına yer verilmiştir. Bu kapsamda kullanılması planlanan ince boşluklu membran modülünün basitleştirilmiş bir geometri ile sayısal analizi ve modül geometrisi boyunca fiberler yüzeyinde oluşan kayma gerilimi (shear stress) değişimleri sunulmuştur.

3.2.1 Çözüm noktası (Mesh) oluşturma

Modelin çözüm noktası dağılımı ANSYS Meshing programında bulunan Automatic Meshing algoritması ile oluşturulmuştur. Mesh ağındaki elementler tetrahedral, hekzahedral ve piramit geometrilerden oluşmaktadır. Elementlerin dağılımı, membranların bulunduğu bölge gibi küçük boyutlu geometrilerin bulunduğu bölgede yoğun olarak sağlanmıştır. Alt ve üst kapaklar ile merkezdeki havalandırma borusu gibi büyük geometriden oluşan yeterli hacimdeki elementler ile mesh ağı oluşturulmuştur. Mesh ağı element dağılımının genel ve kesit olarak görünümü Şekil 3.4 :'de verilmiştir. Oluşturulan element sayısı 541.385, çözüm noktası sayısı ise 289.290 olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.4 : a) Modül ve etrafındaki sıvı kütlesinin genel olarak element dağılımı, b) ZX eksenindeki kesit görünümü, c) ZX ekseninde sıvı kütlesiyle beraber modül kesit görünümü.

3.2.2 Model kurulumu ve sınır koşulların belirlenmesi

Model geometrisi içerisindeki akışın modellenmesi, standard k-ε türbülans modeli seçilerek çözdürülmüştür. Modül 0.20 m^3 su dolu bir küp içerisine yerleştirilmiştir. Çeşitli frekans ve genliklerde modül geometrisi bu su kütlesi içerisinde titreştirilmiş ve fiber yüzeyi olarak tanımlanmış bölgelerde oluşan kayma gerilimi verileri toplam, ortalama, maximum ve minimum değerler olarak elde edilmiştir. Modelde kullanılan sınır koşulları Çizelge 3.2 :'de verilmiştir.

Çizelge 3.2 : Modelde kullanılan sınır koşulları.

Parametre	**Değer**
Dış Çap (r)	2 mm
Uzunluk (L)	100 mm
Türbülans Modeli	Standard k-ε
Frekanslar (Hz)	5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60
Genlikler (Amp) (mm)	1, 5, 10

Modüldeki titreşimler, modele dışarıdan kullanıcı tanımlı fonksiyon olarak Denklem 3.1'de verilen denklem kodu kullanılarak tanımlanmıştır.

```
#include "udf.h"
DEFINE_CG_MOTION(piston,dt,vel,omega,time,dtime)
{vel[2] = 0.01*sin(60*2*M_PI*CURRENT_TIME);}
```
(3.1)

Kod'da koyu ve italik olarak verilmiş "***0.01***" değeri metre cinsinden genliği, "***60***" ise Hz cinsinden frekansı ifade etmektedir. Modelleme çalışmaları, Çizelge 3.3 :'de verilen 8 farklı frekans (5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 ve 60 Hz) ve bunların her biri için 3 farklı genlik (1, 5 ve 10 mm) için gerçekleştirilmiştir. Süre olarak 1 sn seçilmiştir. Ancak, kayma geriliminin pik noktalarının daha net görülebilmesi için ve aynı zamanda oluşan pik noktaları süre ile değişmediğinden sadece 0,1 saniyelik kısım grafik olarak gösterilmiştir.

Çizelge 3.3 : CFD modelleme çalışmalarında kullanılan frekans ve genlikler.

CFD Model No	Frekans (Hz)	Genlik (mm)
1	60	1
2	60	5
3	60	10
4	50	1
5	50	5
6	50	10
7	40	1
8	40	5
9	40	10
10	30	1
11	30	5
12	30	10
13	20	1
14	20	5
15	20	10
16	15	1
17	15	5
18	15	10
19	10	1
20	10	5
21	10	10
22	5	1
23	5	5
24	5	10

3.2.3 Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) analiz sonuçları

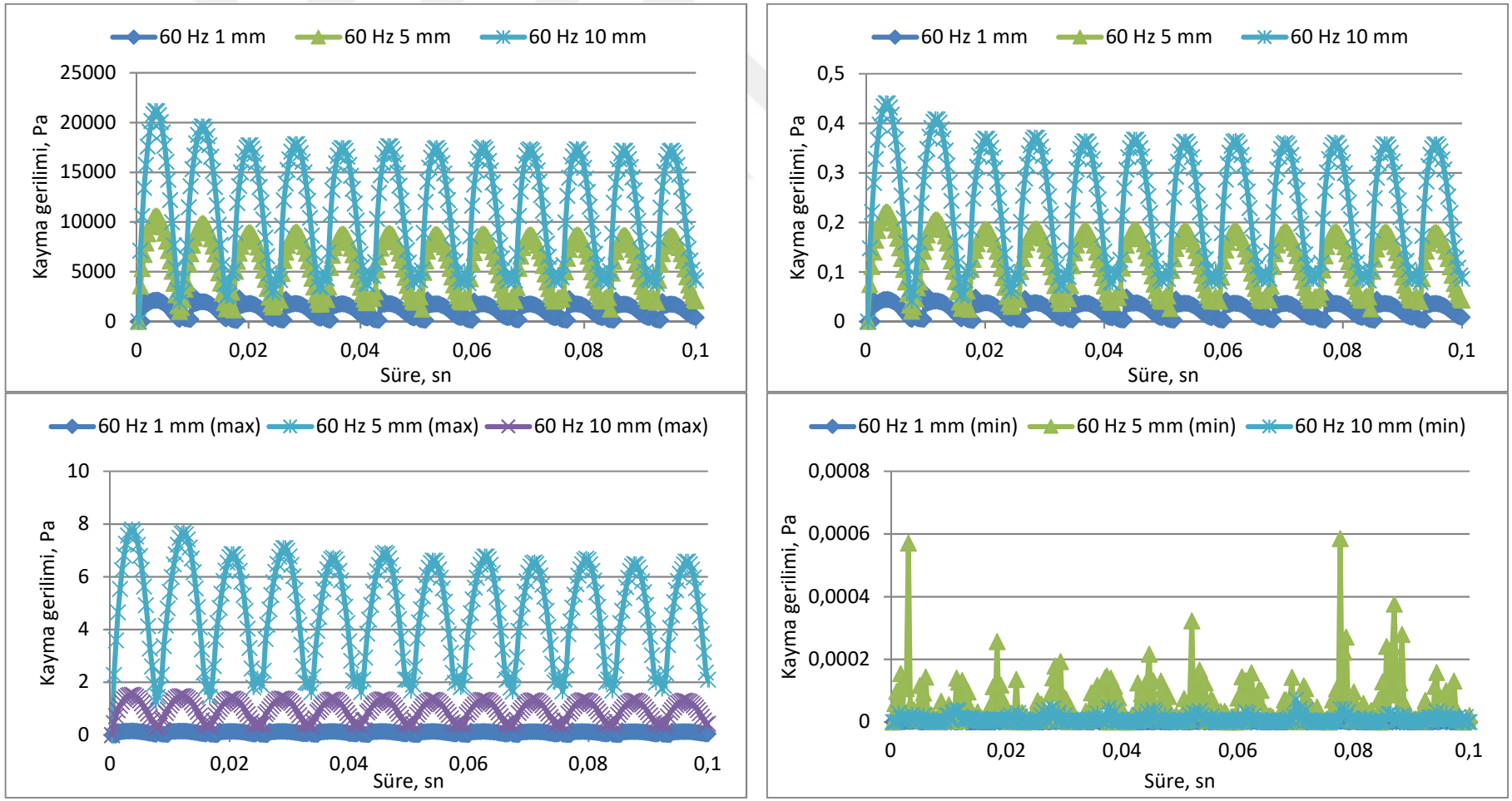
Çeşitli frekanslarda ve genliklerde membran modülü geometrisi üzerinde hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) analizleri gerçekleştirilmiş, elde edilen sonuçlar grafik olarak verilmiştir. Daha sonra fiber yüzeylerinde kayma geriliminin pik yaptığı herhangi bir nokta seçilerek ekran görüntüsü alınmış ve kayma gerilimi dağılımı görsel olarak incelenmiştir.

3.2.3.1 Farklı titreşim genlikleri için elde edilen kayma gerilim değerleri

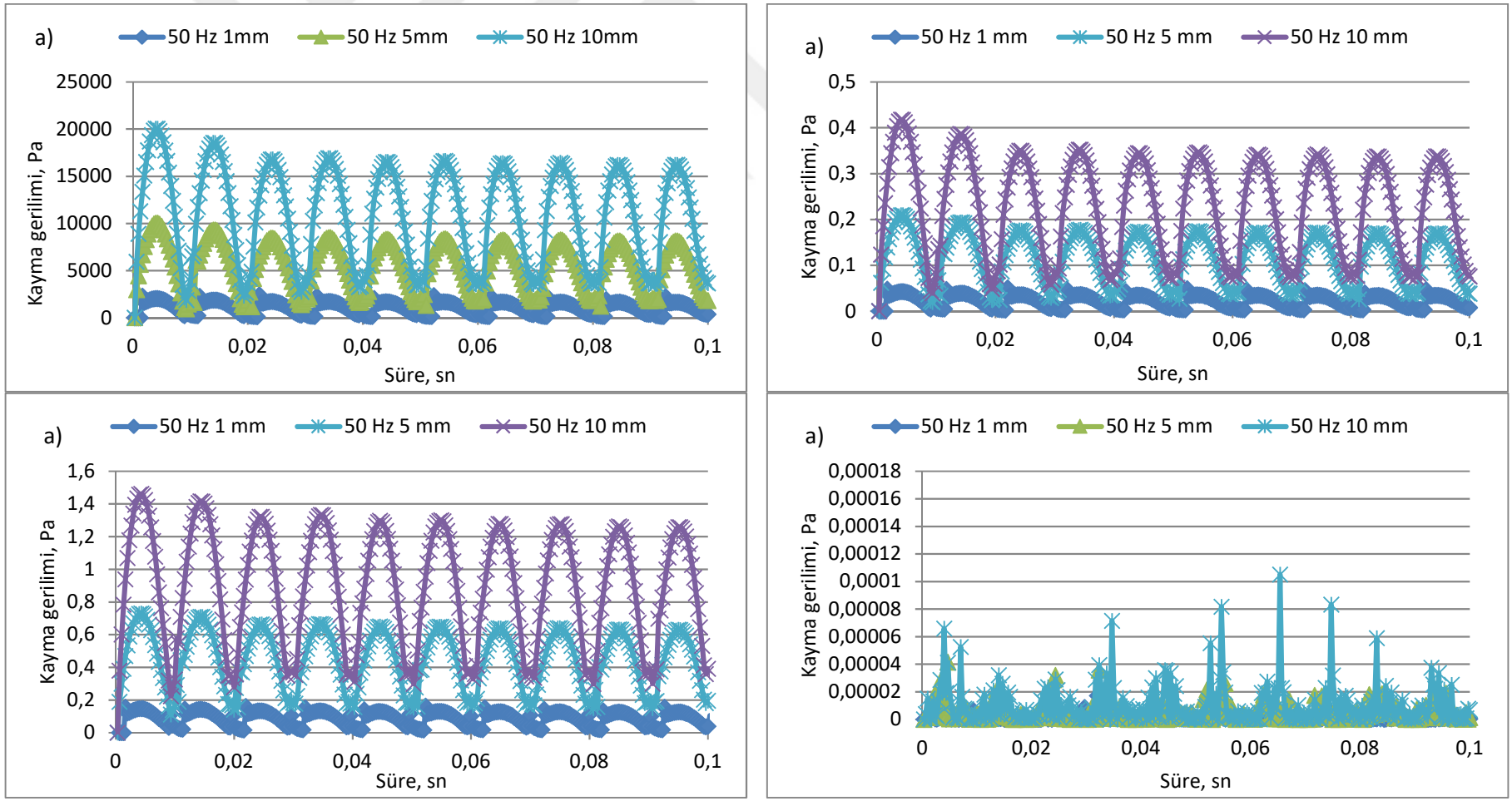
60 Hz frekansta, 1, 5 ve 10 mm genlikte gerçekleştirilmiş analizlerden elde edilen toplam, ortalama, maksimum ve minimum kayma gerilimi sonuçları Şekil 3.5'de verilmiştir. Buna göre toplam kayma gerilimi 1, 5 ve 10 mm genlik için sırasıyla 2000, 9000 ve 17500 Pa olarak elde edilmiştir. Ortalama kayma gerilimi 1, 5 ve 10 mm genlik için sırasıyla 0,05, 0,175 ve 0,375 Pa olmuştur. Maksimum kayma gerilimi ise 1, 5 ve 10 mm genlikler için sırasıyla 0.12, 1,3 ve 6,8 Pa olarak bulunmuş olup, minimum kayma gerilim değerlerinde önemli bir fark elde edilmemiştir.

50 Hz frekansta, 1, 5 ve 10 mm genlikte gerçekleştirilmiş analizlerden elde edilen toplam, ortalama, maksimum ve minimum kayma gerilimi sonuçları Şekil 3.6'da verilmiştir. Buna göre toplam kayma gerilimi 1, 5 ve 10 mm genlik için sırasıyla 1800, 8000 ve 16000 Pa olarak elde edilmiştir. Ortalama kayma gerilimi 1, 5 ve 10 mm genlik için sırasıyla 0,03, 0,17 ve 0,34 Pa olmuştur. Maksimum kayma gerilimi ise 1, 5 ve 10 mm genlikler için sırasıyla 0,12, 0,64 ve 1,28 Pa olarak bulunmuş olup, minimum kayma gerilim değerlerinde önemli bir fark elde edilmemiştir.

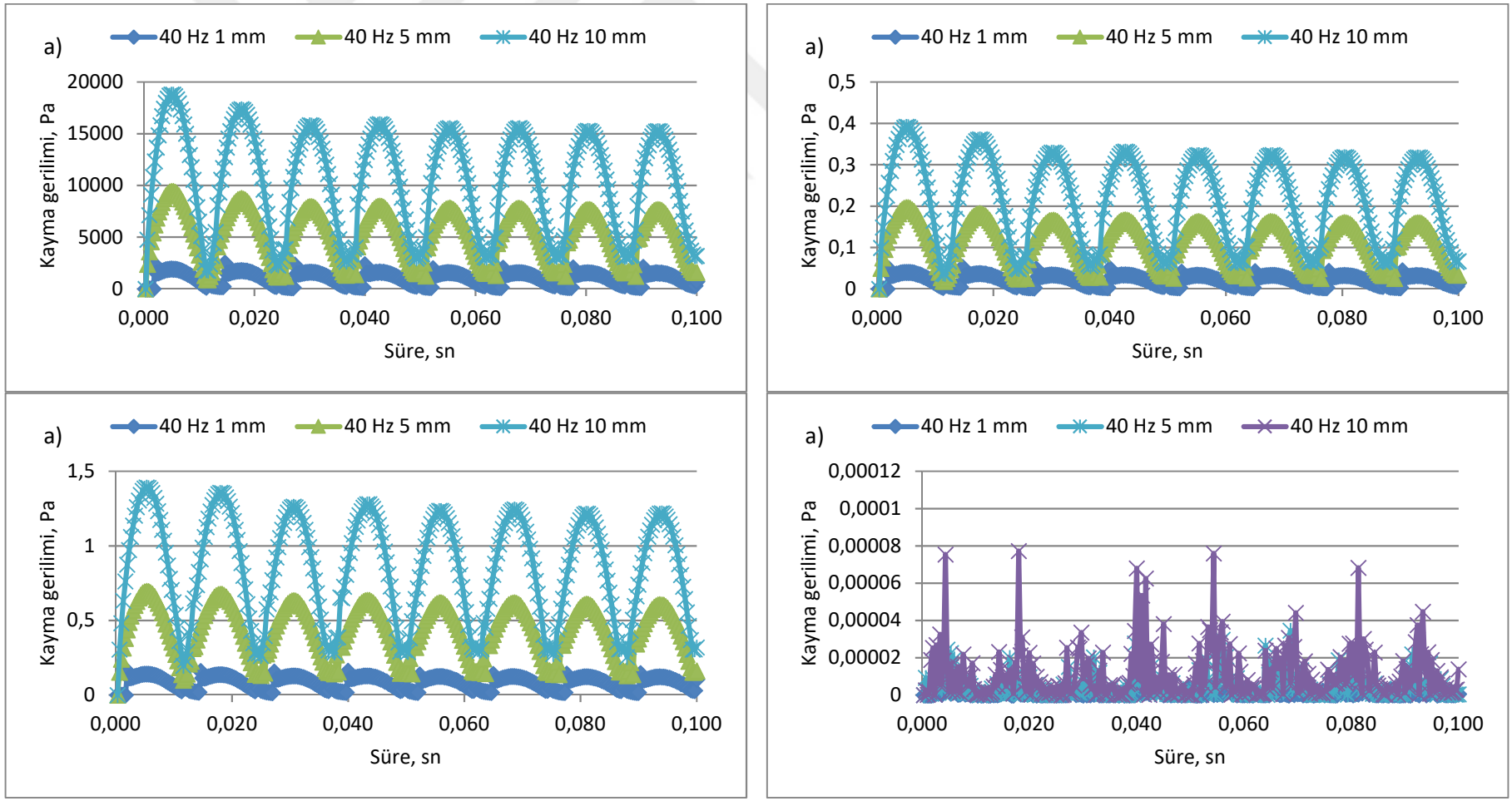
40 Hz frekansta, 1, 5 ve 10 mm genlikte gerçekleştirilmiş analizlerden elde edilen toplam, ortalama, maksimum ve minimum kayma gerilimi sonuçları Şekil 3.7'de verilmiştir. Buna göre toplam kayma gerilimi 1, 5 ve 10 mm genlik için sırasıyla 1500, 7400 ve 15000 Pa olarak elde edilmiştir. Ortalama kayma gerilimi 1, 5 ve 10 mm genlik için sırasıyla 0,03, 0,17 ve 0,34 Pa olmuştur. Maksimum kayma gerilimi ise 1, 5 ve 10 mm genlikler için sırasıyla 0,12, 0,60 ve 1,21 Pa olarak bulunmuş olup, minimum kayma gerilim değerlerinde önemli bir fark elde edilmemiştir.



Şekil 3.5 : 60 Hz frekansta fiberler üzerinde oluşan toplam (a), ortalama (b), maksimum (c), minimum (d) kayma geriliminin değişimi.



Şekil 3.6 : 50 Hz frekansta fiberler üzerinde oluşan toplam (a), ortalama (b), maksimum (c), minimum (d) kayma geriliminin değişimi.



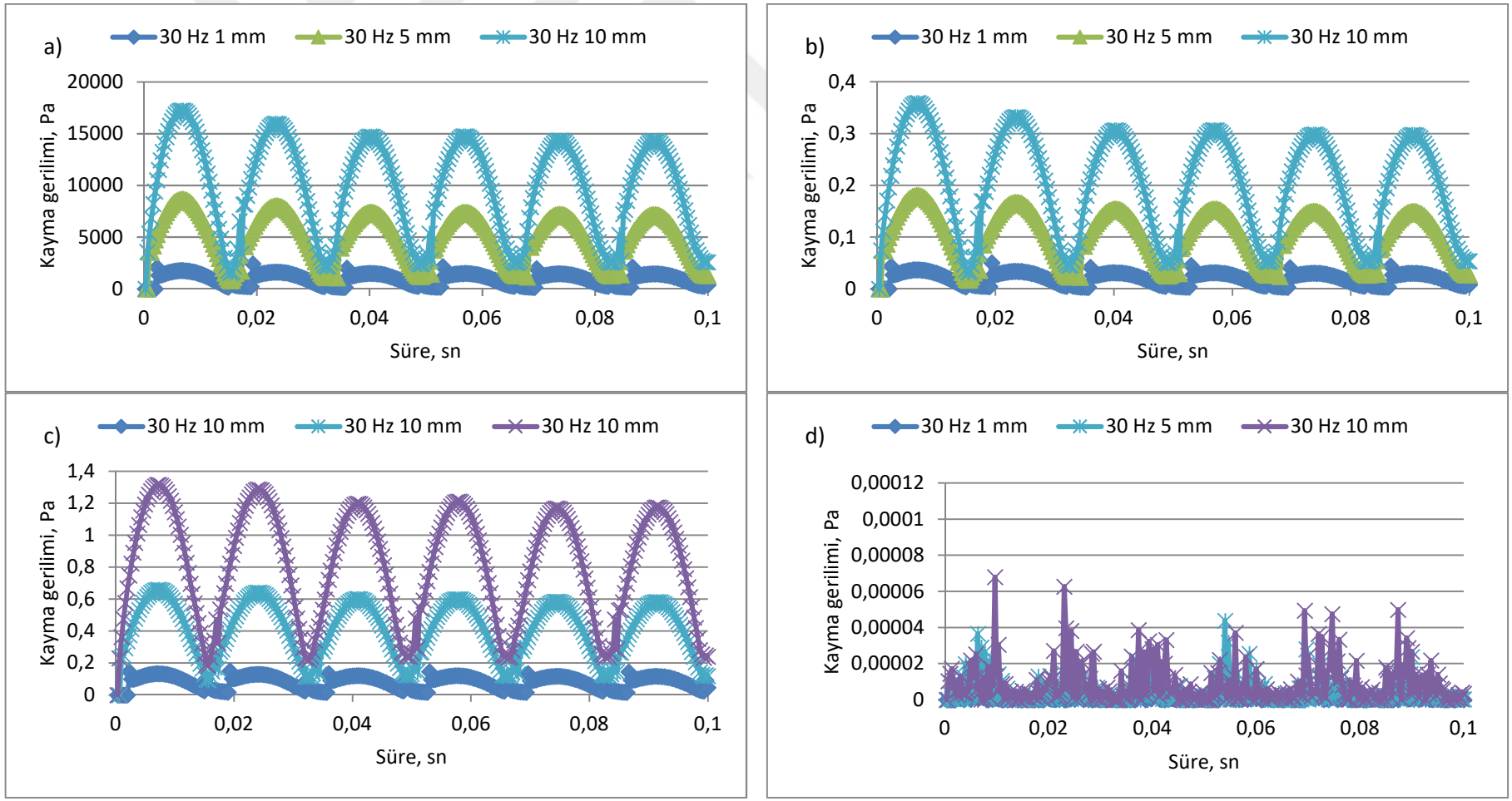
Şekil 3.7 : 40 Hz frekansta fiberler üzerinde oluşan toplam (a), ortalama (b), maksimum (c), minimum (d) kayma geriliminin değişimi.

30 Hz frekansta, 1, 5 ve 10 mm genlikte gerçekleştirilmiş analizlerden elde edilen toplam, ortalama, maksimum ve minimum kayma gerilimi sonuçları Şekil 3.8'de verilmiştir. Buna göre toplam kayma gerilimi 1, 5 ve 10 mm genlik için sırasıyla 1420, 7100 ve 14300 Pa olarak elde edilmiştir. Ortalama kayma gerilimi 1, 5 ve 10 mm genlik için sırasıyla 0,03, 0,14 ve 0,30 Pa olmuştur. Maksimum kayma gerilimi ise 1, 5 ve 10 mm genlikler için sırasıyla 0,11, 0,58 ve 1,17 Pa olarak bulunmuş olup, minimum kayma gerilim değerlerinde önemli bir fark elde edilmemiştir.

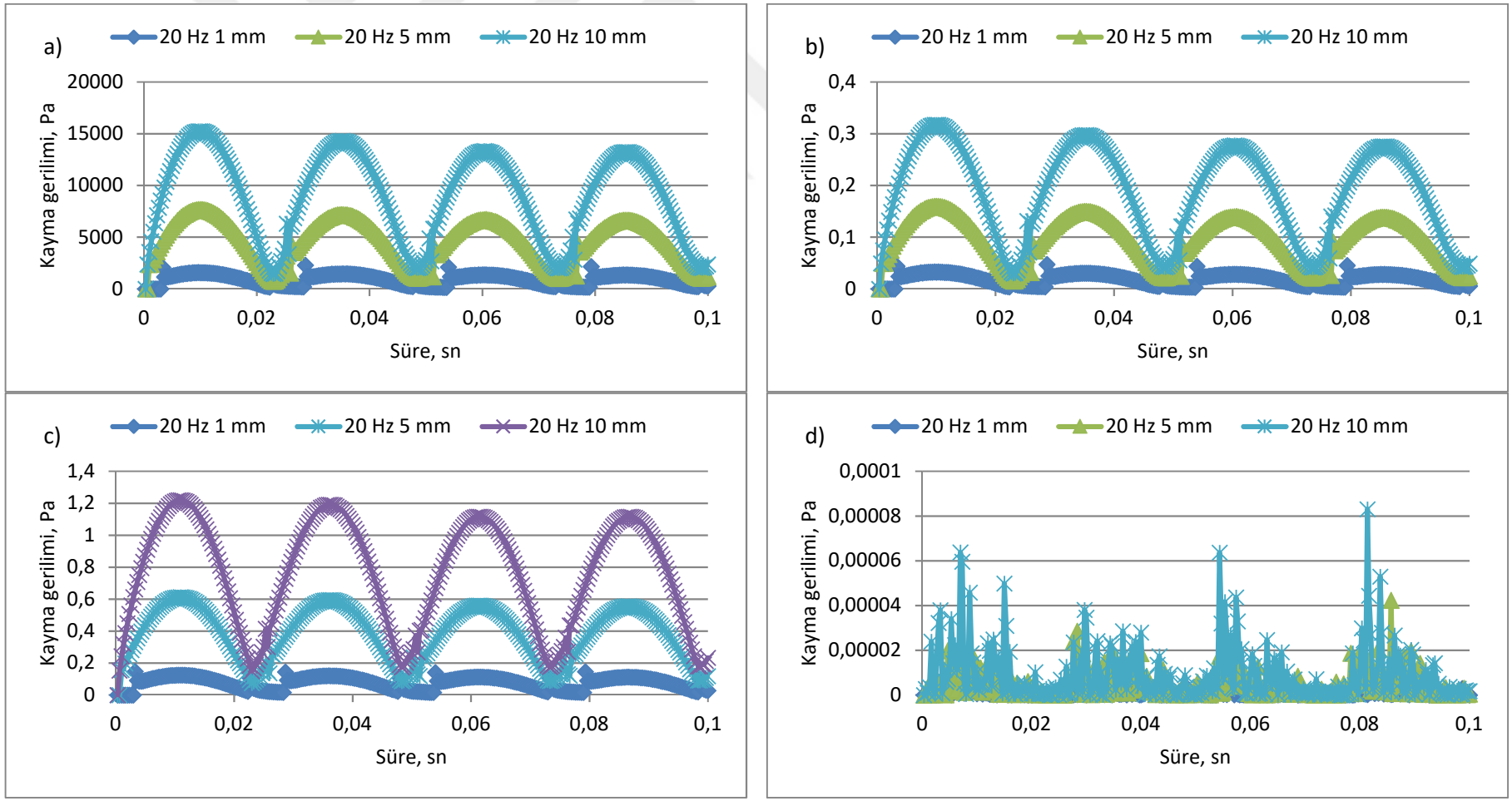
20 Hz frekansta, 1, 5 ve 10 mm genlikte gerçekleştirilmiş analizlerden elde edilen toplam, ortalama, maksimum ve minimum kayma gerilimi sonuçları Şekil 3.9'da verilmiştir. Buna göre toplam kayma gerilimi 1, 5 ve 10 mm genlik için sırasıyla 1320, 6580 ve 13200 Pa olarak elde edilmiştir. Ortalama kayma gerilimi 1, 5 ve 10 mm genlik için sırasıyla 0,03, 0,13 ve 0,27 Pa olmuştur. Maksimum kayma gerilimi ise 1, 5 ve 10 mm genlikler için sırasıyla 0,11, 0,55 ve 1,17 Pa olarak bulunmuş olup, minimum kayma gerilim değerlerinde önemli bir fark elde edilmemiştir.

15 Hz frekansta, 1, 5 ve 10 mm genlikte gerçekleştirilmiş analizlerden elde edilen toplam, ortalama, maksimum ve minimum kayma gerilimi sonuçları Şekil 3.10'da verilmiştir. Buna göre toplam kayma gerilimi 1, 5 ve 10 mm genlik için sırasıyla 1250, 6150 ve 12300 Pa olarak elde edilmiştir. Ortalama kayma gerilimi 1, 5 ve 10 mm genlik için sırasıyla 0,03, 0,13 ve 0,26 Pa olmuştur. Maksimum kayma gerilimi ise 1, 5 ve 10 mm genlikler için sırasıyla 0,10, 0,53 ve 1,05 Pa olarak bulunmuş olup, minimum kayma gerilim değerlerinde önemli bir fark elde edilmemiştir.

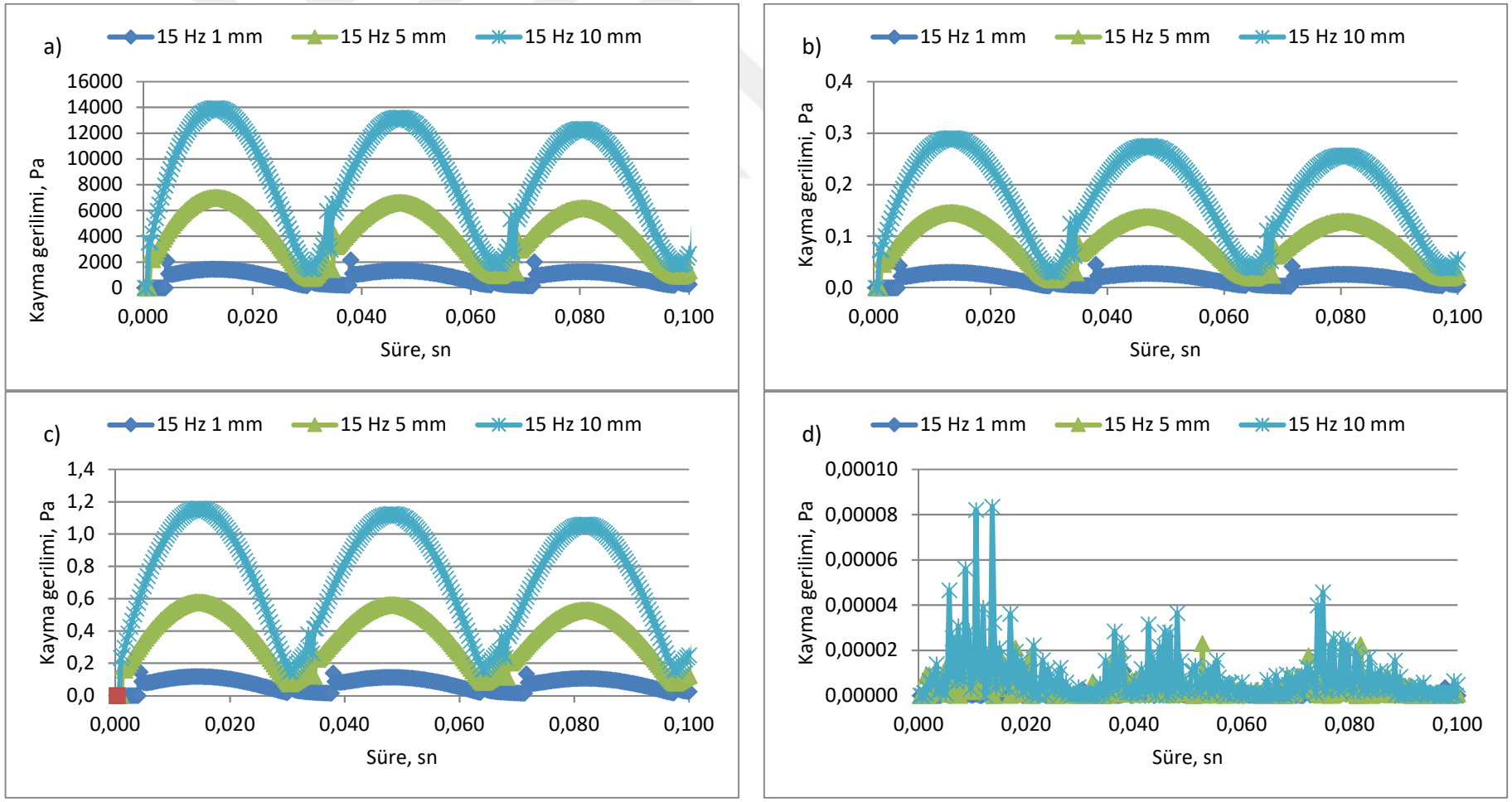
10 Hz frekansta, 1, 5 ve 10 mm genlikte gerçekleştirilmiş analizlerden elde edilen toplam, ortalama, maksimum ve minimum kayma gerilimi sonuçları Şekil 3.11'de verilmiştir. Buna göre toplam kayma gerilimi 1, 5 ve 10 mm genlik için sırasıyla 1200, 5900 ve 11750 Pa olarak elde edilmiştir. Ortalama kayma gerilimi 1, 5 ve 10 mm genlik için sırasıyla 0,03, 0,12 ve 0,24 Pa olmuştur. Maksimum kayma gerilimi ise 1, 5 ve 10 mm genlikler için sırasıyla 0,10, 0,52 ve 1,03 Pa olarak bulunmuş olup, minimum kayma gerilim değerlerinde önemli bir fark elde edilmemiştir.



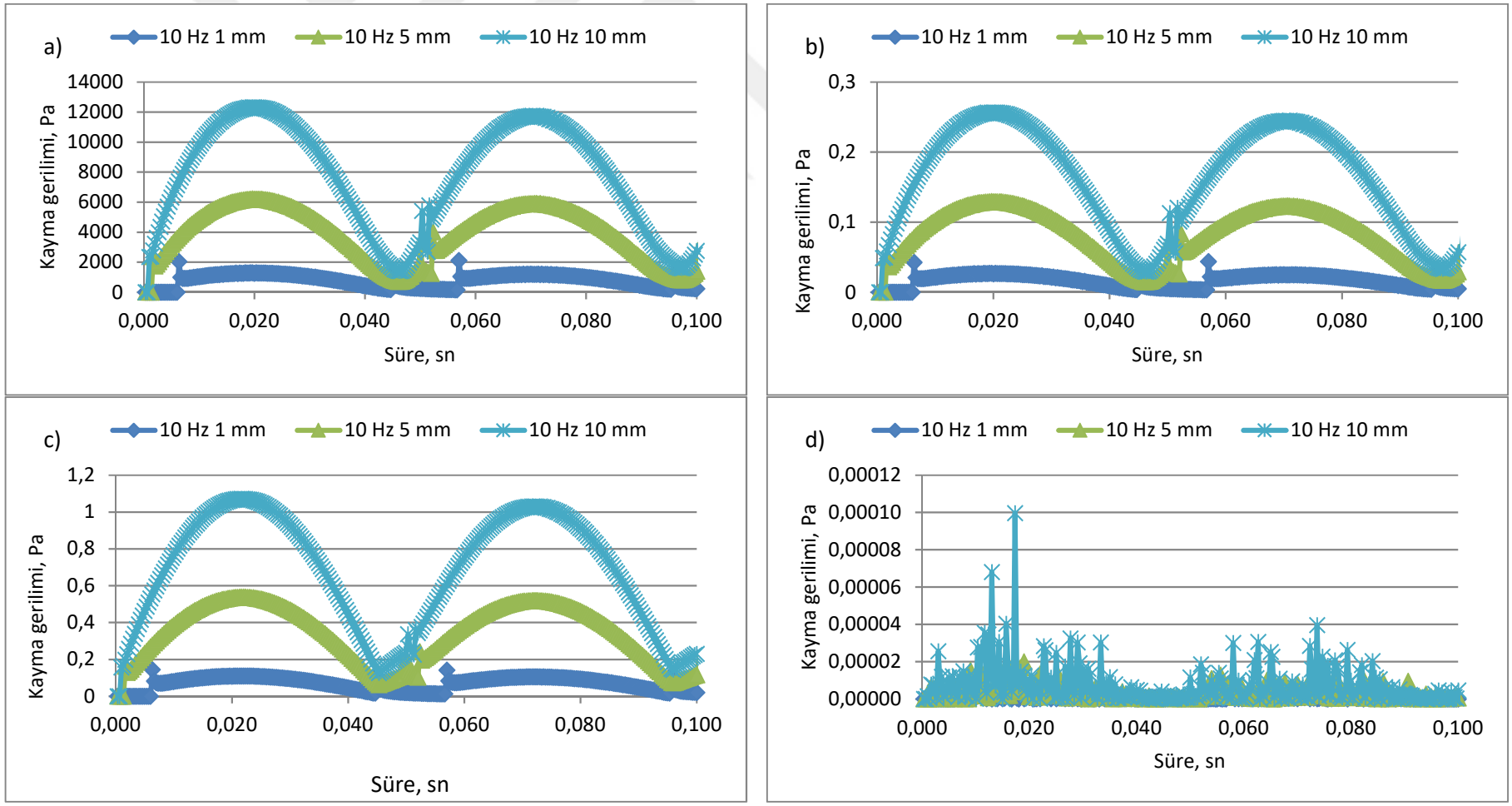
Şekil 3.8 : 30 Hz frekansta fiberler üzerinde oluşan toplam (a), ortalama (b), maksimum (c), minimum (d) kayma geriliminin değişimi.



Şekil 3.9 : 20 Hz frekansta fiberler üzerinde oluşan toplam (a), ortalama (b), maksimum (c), minimum (d) kayma geriliminin değişimi.

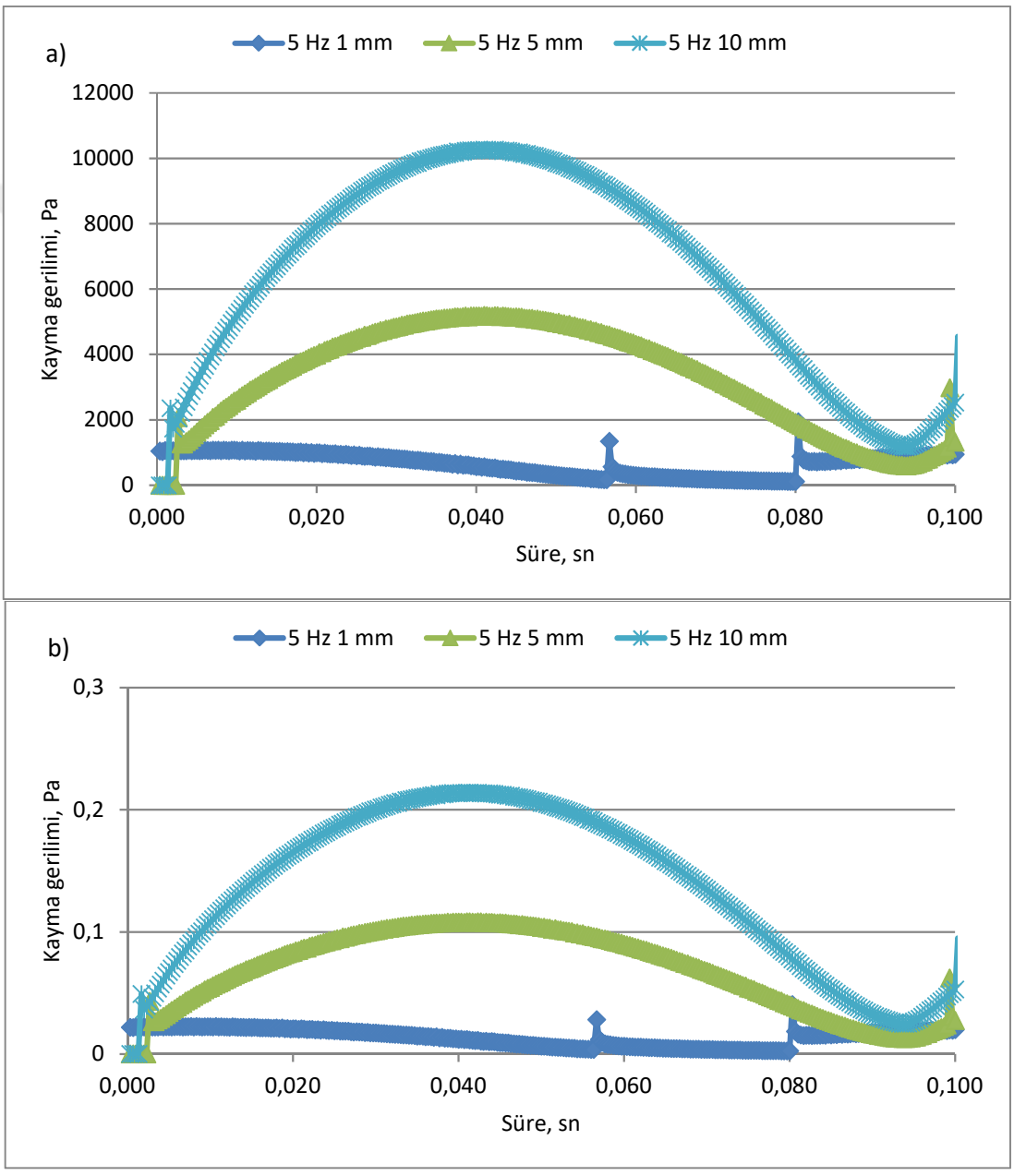


Şekil 3.10 : 15 Hz frekansta fiberler üzerinde oluşan toplam (a), ortalama (b), maksimum (c), minimum (d) kayma geriliminin değişimi.

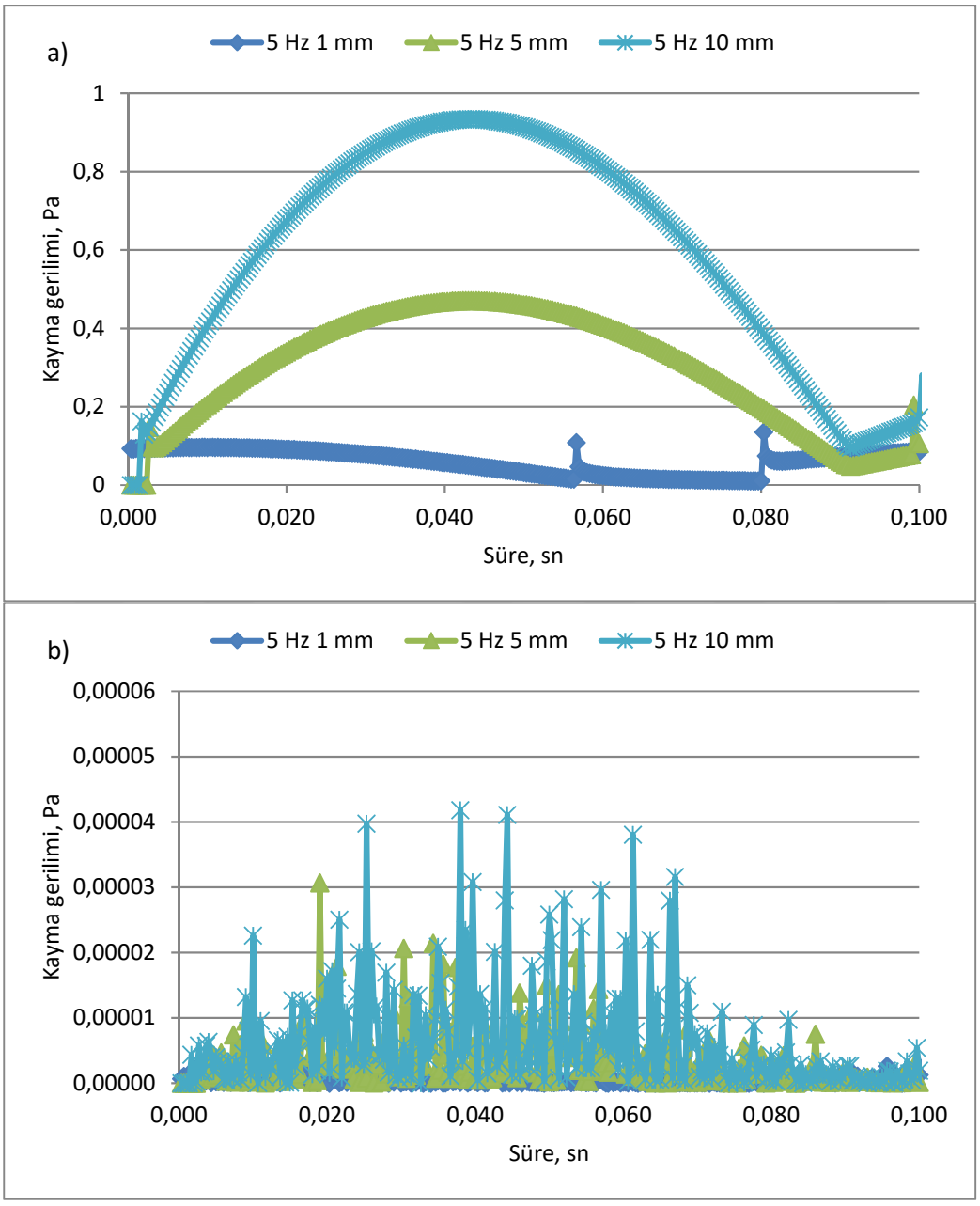


Şekil 3.11 : 15 Hz frekansta fiberler üzerinde oluşan toplam (a), ortalama (b), maksimum (c), minimum (d) kayma geriliminin değişimi.

5 Hz frekansta, 1, 5 ve 10 mm genlikte gerçekleştirilmiş analizlerden elde edilen toplam, ortalama, maksimum ve minimum kayma gerilimi sonuçları 3.12-3.13'te verilmiştir. Buna göre toplam kayma gerilimi 1, 5 ve 10 mm genlik için sırasıyla 860, 4350 ve 8700 Pa olarak elde edilmiştir. Ortalama kayma gerilimi 1, 5 ve 10 mm genlik için sırasıyla 0,02, 0,11 ve 0,21 Pa olmuştur. Maksimum kayma gerilimi ise 1, 5 ve 10 mm genlikler için sırasıyla 0,09, 0,47 ve 0,93 Pa olarak bulunmuş olup, minimum kayma gerilim değerlerinde önemli bir fark elde edilmemiştir.

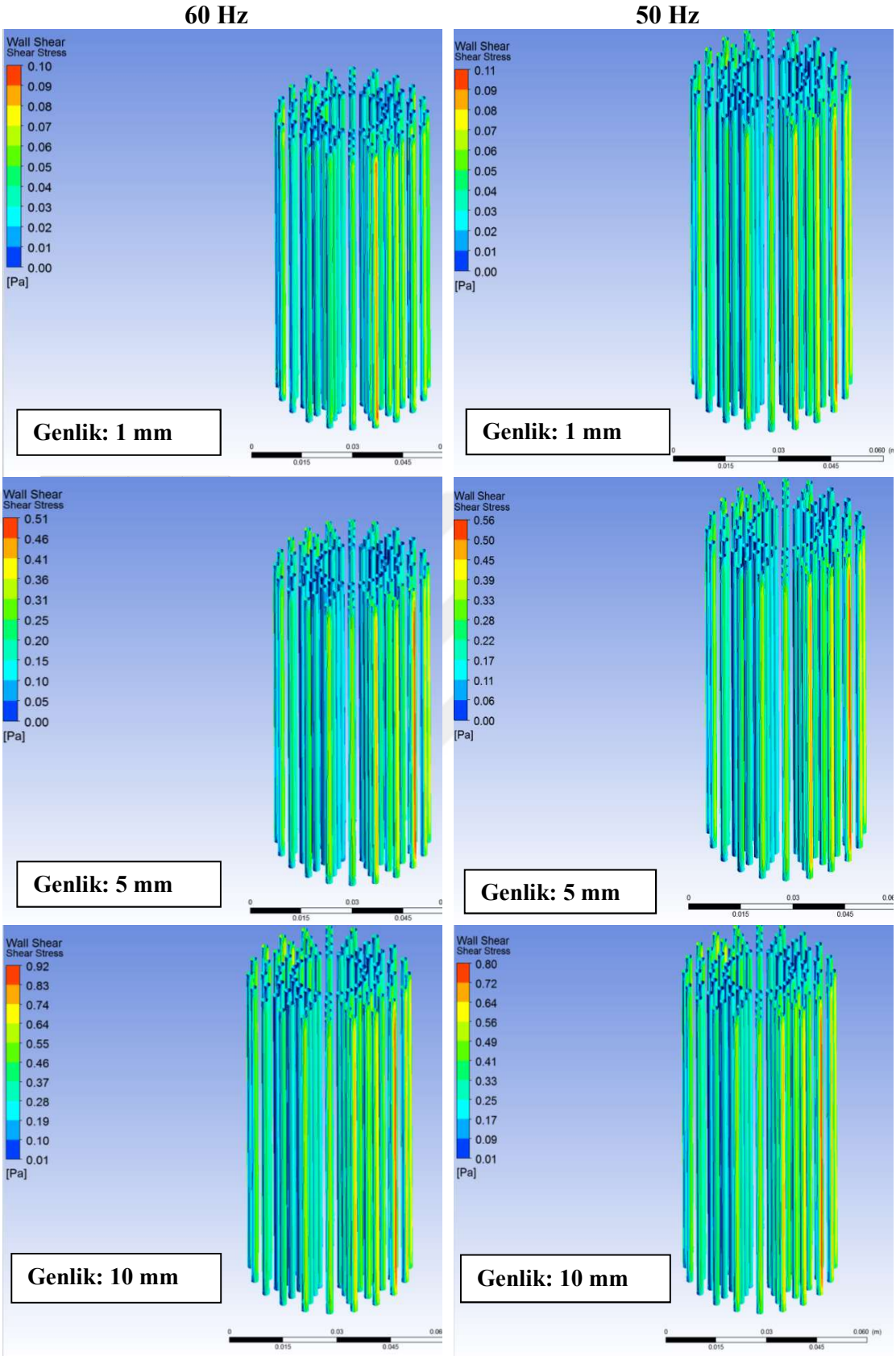


Şekil 3.12 : 5 Hz frekansta fiberler üzerinde oluşan toplam(a) ve ortalama (b) kayma geriliminin değişimi.

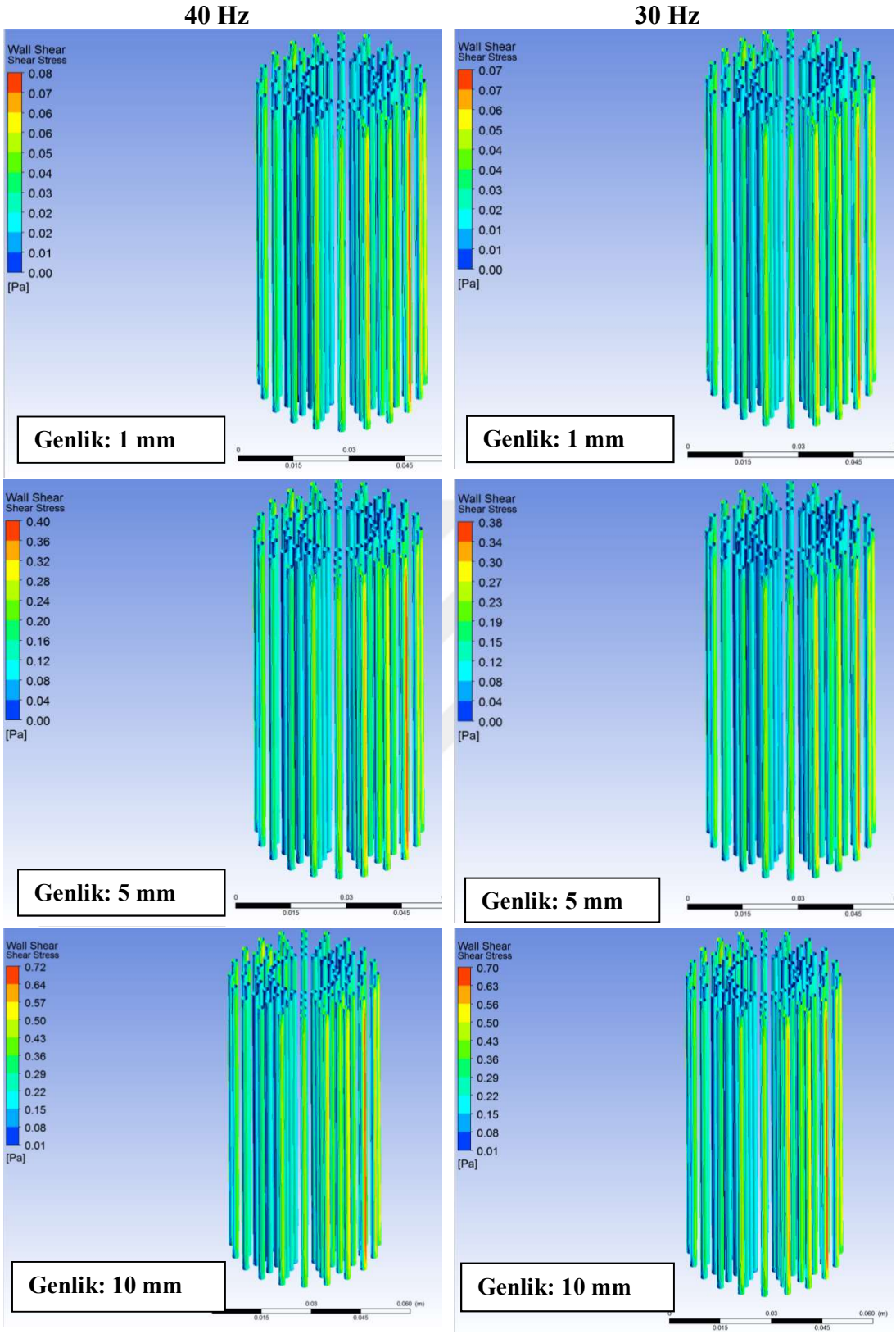


Şekil 3.13 : 5 Hz frekansta fiberler üzerinde oluşan maksimum(a) ve minimum(b) kayma geriliminin değişimi.

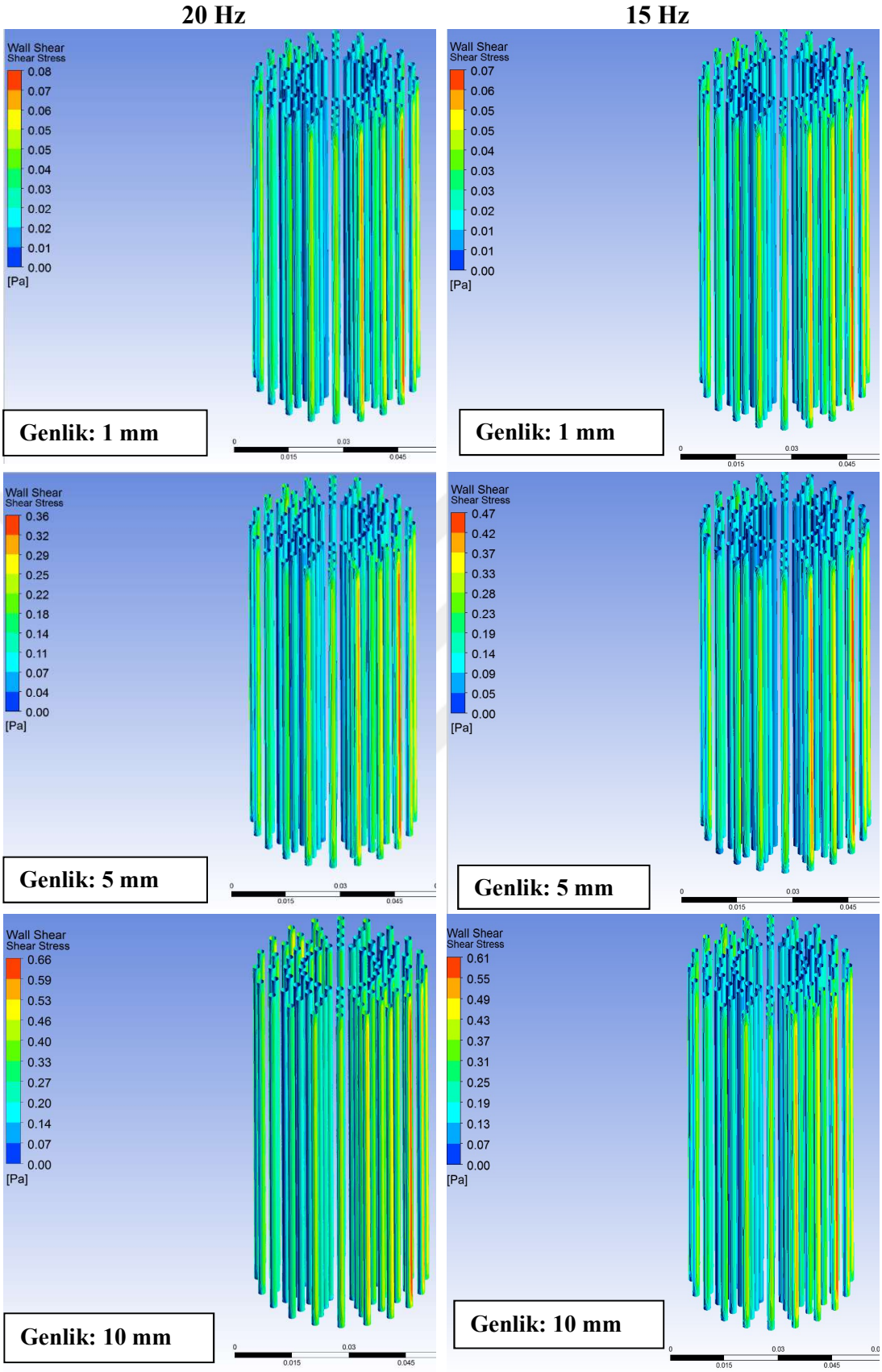
Farklı frekanslar için kayma gerilimi dağılımının görsel hali incelendiğinde, maksimum kayma gerilimlerinin membran fiberlerinin orta noktalarında minimum kayma gerilimlerinin ise membranların uç noktalarında gerçekleştiği anlaşılmaktadır (Şekil 3.14-3.17). CFD analizinden alınan ekran görüntüleri incelendiğinde dağılım olarak kayma gerilimlerinin pek değişmediği fakat genlik arttıkça daha yüksek değerlerde tüm fiber yüzeylerinde kayma gerilimi oluştuğu görülmektedir.



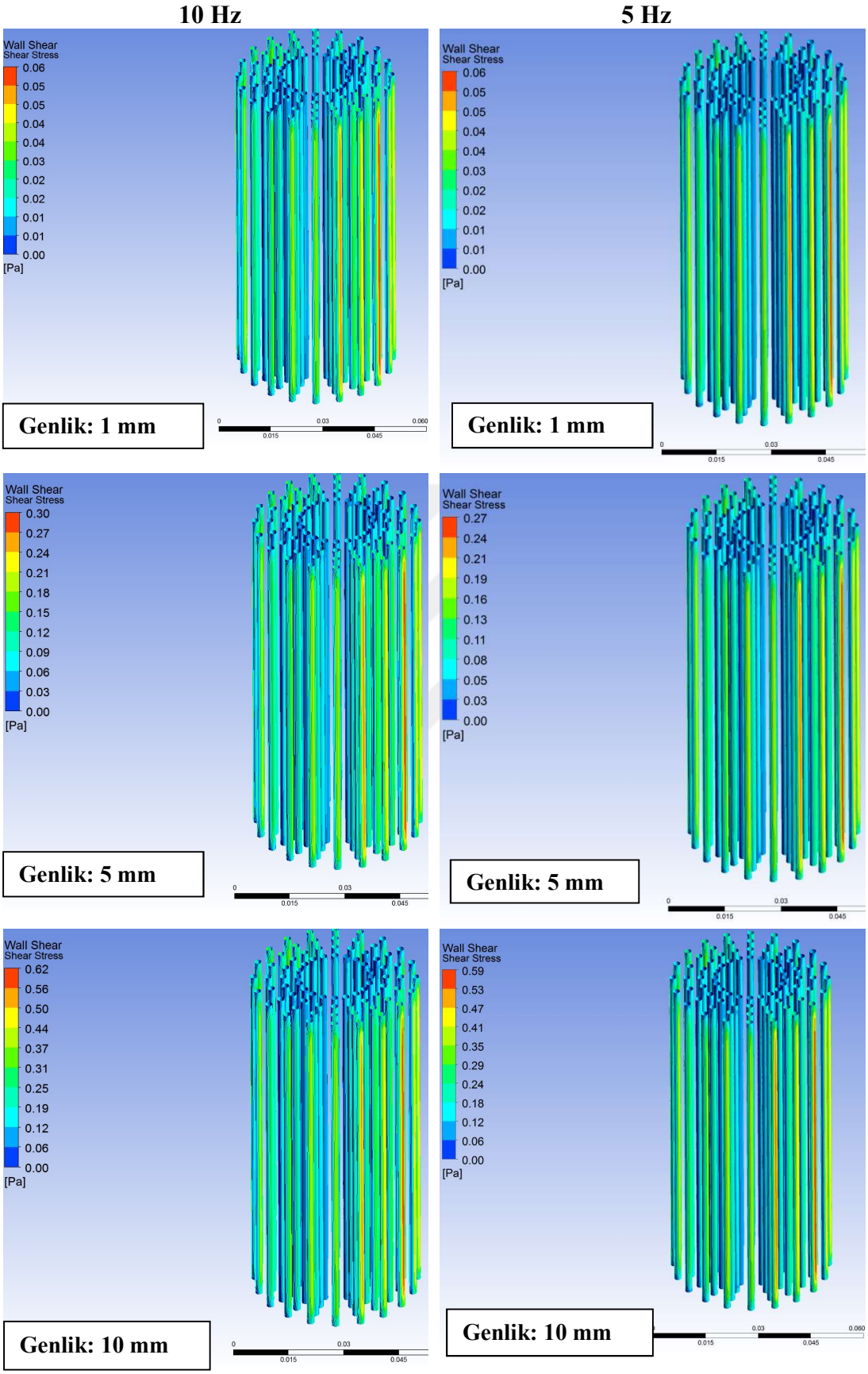
Şekil 3.14 : 60 ve 50 Hz frekansta fiberler üzerindeki kayma gerilimi dağılımının görselleştirilmiş hali.



Şekil 3.15 : 60 ve 50 Hz frekansta fiberler üzerindeki kayma gerilimi dağılımının görselleştirilmiş hali.



Şekil 3.16 : 20 ve 15 Hz frekansta fiberler üzerindeki kayma gerilimi dağılımının görselleştirilmiş hali.



Şekil 3.17 : 10 ve 5 Hz frekansta fiberler üzerindeki kayma gerilimi dağılımının görselleştirilmiş hali.

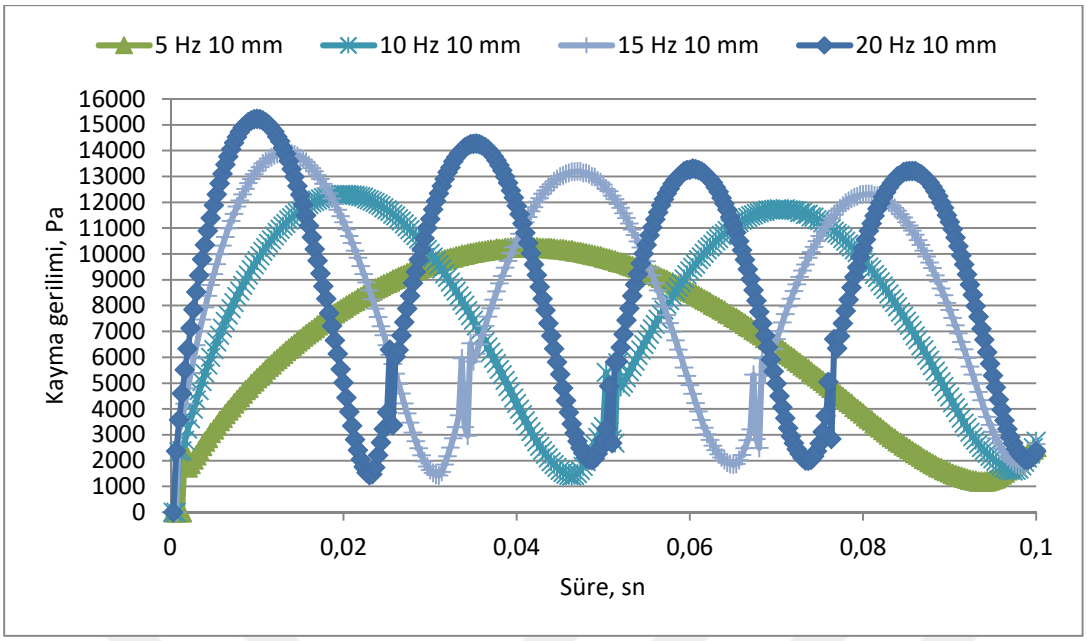
3.2.4 Farklı titreşim frekansları için elde edilen kayma gerilim değerleri

Titreşim frekansındaki değişimin ince boşluklu membran yüzeylerinde oluşturduğu kayma gerilimlerine etkisini ortaya koymak için genlik 10 mm'de sabit tutulmuş ve 5-60 Hz arasında değişen frekanslar için CFD analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerden elde edilen sonuçların daha rahat görülebilmesi amacıyla grafik 0,05 saniye ile 0,075 saniye arasında kısıtlanmıştır. 5 - 20 Hz frekansları için fiberler üzerinde oluşan toplam kayma gerilimleri Şekil 3.18 :'te, 20 - 60 Hz frekansları için elde edilen sonuçlar ise Şekil 3.19 :'te verilmiştir. Analizlerdeki pik noktalarda oluşan kayma gerilimi değerleri ise Çizelge 3.4 :'te sunulmuştur.

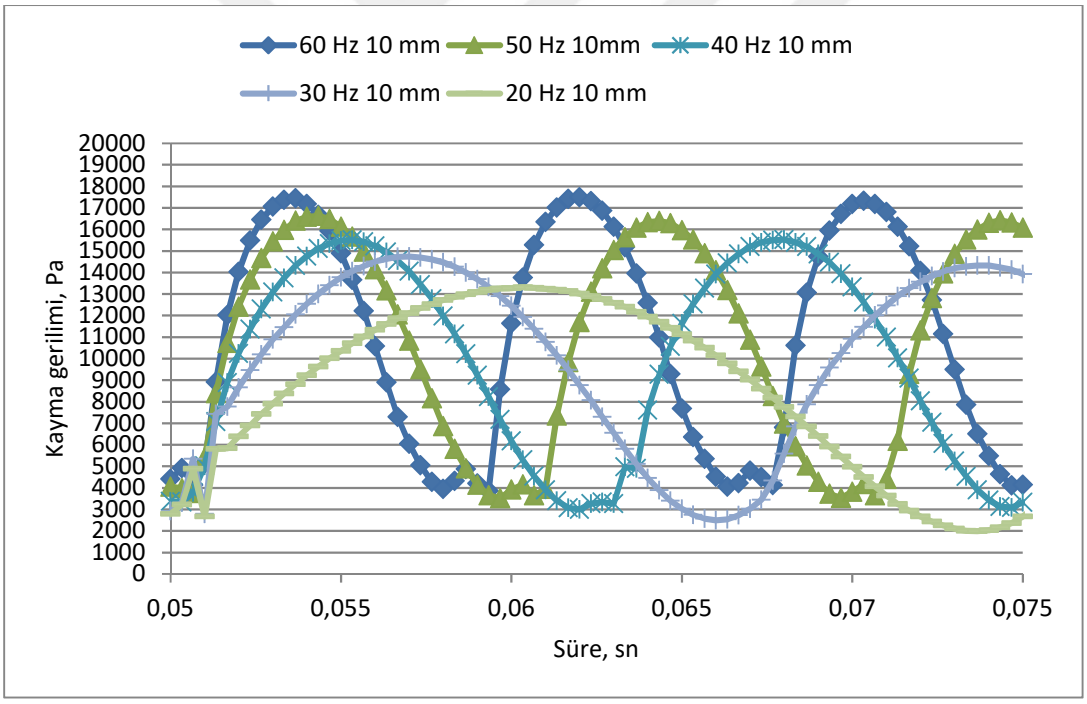
Sonuçlara bakıldığında örneğin membran yüzeyindeki kayma gerilimi sabit 10 mm genlikte; 60 Hz frekansının bir sinüs dalgası için 17320 Pa, 30 Hz frekansının bir sinüs dalgası için ise 13290 Pa olmaktadır(Şekil 3.19). 30 Hz frekansının bir sinüs dalgası için genliği 5 mm'den 10 mm'ye arttırıldığında kayma gerilimi 7350 Pa'dan 13290 Pa'a yükselmektedir. Frekans parametresi zamana bağlı bir değişken olduğundan birim zamanda membran yüzeyinde tekrarlanan kayma gerilimleri frekansa değerine bağlı olarak artmaktadır.

Titreşim sistemlerinde frekans ve genlik, filtrasyon performansı üzerinde ayrı etkilere sahiptir. Örneğin; Beier ve diğ. (2006), frekanstaki 6 katlık artışın (5'den 30 Hz'e), kritik akıyı, genlikteki 6 katlık (0,2'den 1,175'e) artışa göre daha fazla arttırdığını bulmuşlardır.

Frekansın ve genliğin membran yüzeyindeki tıkanma ve tıkanmaya sebep olan partiküllerin yüzeyden uzaklaştırılmasında farklı etkileri olmaktadır. Literatür araştırması ve gerçek zamanlı çözdürülmüş CFD sonuçları, sadece kayma geriliminin en yüksek seviyeye çıkarılmasının performansın maksimum olmasını sağlamadığını göstermektedir. Dolayısıyla frekans ve genliğin membran yüzeyindeki akı ve tıkanma performansına olan etkisinin ortaya konması için laboratuvar ve pilot ölçekli çalışmaların yapılması gerekmektedir.



Şekil 3.18 : Sabit 10 mm genlikteki ve farklı frekans (5 – 20 Hz) değerlerindeki titreşimlerin oluşturduğu toplam kayma gerilimleri.



Şekil 3.19 : Sabit 10 mm genlikteki ve farklı frekans (20 – 60 Hz) değerlerindeki titreşimlerin oluşturduğu toplam kayma gerilimleri.

Çizelge 3.4 : Farklı frekanslarda pik noktalardaki toplam kayma gerilimleri.

Frekans (Hz)	Genlik (mm)	Kayma Gerilimi (Pa)
5	10	10025
10	10	11700
15	10	12310
20	10	13195
30	10	13290
40	10	14280
50	10	15520
60	10	17320

3.3 Laboratuvar ve Pilot Öçekli Titreşimli Modül Sistemlerinin Üretimi

Bu bölümde tez çalışmasında kullanılan laboratuvar ve pilot ölçekli titreşimli modüllerin nasıl yapıldığı açıklanacaktır.

3.3.1 Membran üretimi ve uygun membran çeşidinin seçimi

Deneylerde kullanılmak üzere laboratuvarda üretilmiş PES (polyetersülfon), PAN (poliakrilonitril) membranları ile ticari olarak bulunabilir hazır satın alınan güçlendirilmiş PVDF (polivinilfloriden) bazlı ince boşluklu fiber membranlar ile üretilmiş modüller yapılmış ve uygun membran materyalinin seçimi yapılmıştır. PES ve PAN bazlı membranlar laboratuvar ölçekli üretilmiş olduğu için çeşitli karaterizasyon ve dayanım testlerinden geçirilmiştir. Güçlendirilmiş PVDF bazlı membranlar ise standart özelliklere sahip olarak satın alınmış olduğu için herhangi bir karakterzasyon testine sokulmamıştır.

3.3.1.1 Membranların üretimi ve karakterizasyonu

Modüllerin üretimi için PES, PAN ve güçlendirilmiş (ticari) membranlar kullanılmıştır. Kullanılan membranlar; ince boşluklu fiber ultrafiltrasyon (UF) membranlardır.

Membran çözeltisi hazırlama prosedürü

Uygun membran çözeltisi seçilmeden önce optimizasyon çalışması yapılmıştır. PES ve PAN polimerlerinin herbiri için farklı membran çözeltisi kullanılmıştır.

Polimer (PES veya PAN) kullanılmadan önce 75 °C'de 2 saat boyunca kurutulmuştur. Çözeltiyi hazırlamak için solvent olarak dimetilformamid (NMP) kullanılmıştır. Membran çözeltisinin hazırlanmasında ilk olarak belirli miktarda polimer solventin içerisine eklenmiş ve oda sıcaklığında 200 rpm'de karıştırılmıştır. Solvent içerisine atılan polimer çözündükçe ve konsantrasyon arttıkça karıştırma hızı kademeli olarak arttırılmıştır. Ardından PVP K90 çözeltiye yavaş yavaş eklenmiştir. Hazırlanan çözelti 12 saat boyunca 75 °C sıcaklıkta karıştırılmıştır. Çözelti kullanılmadan önce içerisindeki hava kabarcıklarının uzaklaştırılması için 30 dk boyunca vakum altında bırakılmıştır. Şekil 3.20 :'de çözelti hazırlamak için kullanılan düzenek gösterilmiştir.

Şekil 3.20 : Çözelti hazırlama düzeneği.

İnce boşluklu membranların üretimi

Bu çalışmada ince boşluklu membranlar faz değişimi metodu ile üretilmiştir. Fiberlerin üretilmesi için membran üretim cihazı (Philos, Güney Kore) kullanılmıştır. Bu cihaz sırası ile basınç kaynağı, çözelti tankları, pompalar, nozul ve koagülasyon banyoları gibi ünitelerden oluşmaktadır. Üretimde 3 gözlü (triple) nozul kullanılmıştır. Fiber çekme oranı, dahili koagülant ve dış koagülant hızları pompalar yardımı ile kontrol edilmektedir. Polimer çözeltisi ile dahili koagülant aynı anda nozula doğru pompalanmaktadır. Koagülasyon havuzu haricindeki bir dış koagülant fiber nozuldan çıkmaya başladığı anda nozulun 3. kanalından pompalanmaya başlanmaktadır. Hava boşluğundan geçtiği sırada dış kogülanttan dolayı fiber dış yüzeyinde membran

oluşma mekanizması başlatılmıştır. Dış koagülanttaki solvent konsantrasyonu arttırılarak membran dış yüzeyinin gözenek çapı kontrol edilebilmektedir. Koagülasyon banyosundan sonra fiberler ikinci bir havuza alınır. Burada fiber içerisinde tutulmuş olan solventin yıkanması amaçlanmaktadır. Ayrıca ikinci koagülasyon banyosunda bulunan silindirlerle de fiberler sarılmaktadır. Son sarım (take-up) ile ikinci banyodaki silindirler arasındaki hızın kontrolüyle fiberler gerdirilip daha küçük gözenekli ve daha küçük çaplı fiberler üretmek mümkün olmaktadır.

Üretim sonrası işlemler

Üretilen membranlar son sarım silindirinde sınıflandırılıp membran yıkama sistemi içerisine alınır. İçerisine su doldurulan bu sistemde havalandırma difüzörleri yardımı ile membranların havalandırılıp membran yapısı içerisindeki solventin tamamının uzaklaştırılması hedeflenmektedir. Ayrıca su 50 °C'de tutularak solventin difüzyonunun hızlandırılması amaçlanmaktadır. Bu işlemde, membranlar 12 saat boyunca 50 °C'de cihaz içerisinde havalandırılmıştır.

Yıkama işlemi tamamlandıktan sonra membran yapısında mevcut olan PVP'nin uzaklaştırılması gerekmektedir. Bu sebeple üretilen membranlar filtrasyon sırasında şişerek gözeneklerden su geçmesini engelleyen gözenek oluşturucu PVP'nin parçalanması için 4000 ppm sodyumhipoklorit (NaOCl) içerisinde 2 gün boyunca bekletilmiştir.

Son olarak üretilen bütün membranlar gözenek yapılarının zarar görmemesi için hacimce %10 gliserol - %90 su çözeltisi içerisinde 12 saat boyunca bekletilmiştir. Bu adımdan sonra membranlar oda sıcaklığında kurutularak modül yapımı için hazır hale getirilmiştir.

Membran karakterizasyonu

Üretilen PES ve PAN membranların karekterizasyonları yapılmıştır. Membranların karakterizasyonu aşamasında yapılan işlemler aşağıda sıralanmaktadır:

- Membranlardan laboratuvar ölçekli ince boşluklu membran modülleri üretilip, permeabilite testine tabii tutulmuştur.
- Membranların giderme verimlerini belirlemek için Polietilen glikolün (PEG) 4400, 10000, 35000 ve 100000 Da molekül ağırlıklarında çözeltileri süzülmüştür. Membranlardan alınan süzüntü numuneleri GPC-HPLC cihazı yardımıyla okunmuştur. Bu analizin yapılması sırasında Sterlitech HP4750

marka manyetik karıştırmalı filtrasyon hücresi kullanılmıştır. Bu kısımda molekül ağırlığı GPC-HPLC (Prominence LC-20A Modular HPLC System) cihazının ölçüm aralığına uygun konsantrasyonda stok kimyasallar kullanılarak hazırlanmıştır.

- Üretimi gerçekleştirilen membranların yüzey yükleri belirlenmiştir. Bu amaçla Elektrokinetik Analizör (Anton PAAR SurPASS) sistemi ile (pH 3 ile 8 aralığında) okumalar yapılmıştır.
- Membranlardaki diğer bir önemli husus yüzey hidrofilikliğidir. Bu parametrenin ölçümü için temas açısı ölçüm cihazı (Attension by KSV instruments, T200) kullanılmıştır. Cihazın diğer bir eklentisi olan kamerasıyla yüzey üzerinde en az 10 farklı görüntü alınmıştır. Bu görüntülerde yüzeydeki damlacığın yüzey tarafından emilimi veya reddi incelenmiştir.
- Membranlardaki mekanik dayanımın incelenmesi açısından Dinamik Mekanik Analiz (SII Nanotechnology Inc. DMS6100) cihazı kullanılmıştır. Bu cihazın ölçüm prensibine göre 20 mm uzunluğundaki ince boşluklu membran cihazın kuvvet uygulanan aktif bölümüne yerleştirilmek suretiyle esnetilerek kopma noktası kuvveti, uzama yüzdesi ve Young's Modulü değeri elde edilmiştir.
- Membranlardaki gözenek çapını belirlemek için Porometre cihazı (Quantachrome 3G Porometer) kullanılmıştır. Porometre cihazı sıvı yer değiştirmesi prensipine göre çalışmaktadır. Ölçüm sonucunda gözenek çapı ve gözeneklerin dağılım sonuçları elde edilmiştir.
- Üretimi yapılan membranların yüzey ve ara kesit morfolojilerinin belirlenmesi amacıyla öncelikle stereo mikroskop (Leica) incelmesi sonrasında Taramalı Elektron Mikroskop (SEM FEI, Quanta Feg 250) kullanılmıştır. SEM görüntüleri Au-Pd kaplama cihazında yüzey kaplaması yapıldıktan sonra alınmıştır. Kaplama daha kaliteli görüntü alınması için yapılmıştır.
- Üretilen membranların geçirgenlik (permeabilite) ölçümleri yapılmıştır. Membranların geçirgenlik değeri (R), birim zamanda ve birim basınç altında birim membran alanından geçen su miktarı olarak tanımlanmaktadır.

Membran karakterizasyon sonuçları

Üretilen PES ve PAN membranların karşılaştırılması için karakterizasyon çalışmaları yapılmış ve sonuçları aşağıda verilmiştir. PES bazlı membranlar iki farklı üretim parametresi ile üretilmiştir. Biri 0 cm hava boşluğu bırakılarak diğeri ise 2.5 cm hava boşluğu bırakılarak üretilmiştir. Bu membranlar hava boşluğu "0" ve hava boşluğu "2,5" olmak üzere adlandırılmıştır.

Geçirgenlik deneyi sonuçları

Üretilen membranların geçirgenlik testleri saf su ile yapılmıştır. Deneyde kullanılan membranların özellikleri Çizelge 3.5'de verilmektedir.

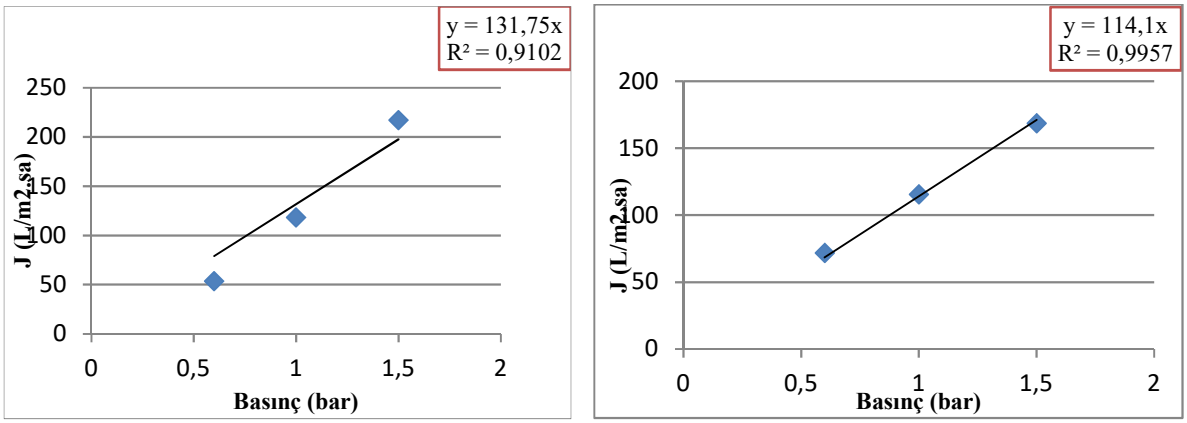
Çizelge 3.5 : Geçirgenlik deneyinde kullanılan membranların özellikleri.

Parametre	**PES (hava boşluğu= 0)**	**PES (hava boşluğu= 2,5)**	**PAN (hava boşluğu= 0)**
Fiber Dış Çapı (mm)	1,36	1,45	1,19
Fiber Uzunluğu (mm)	106	102	100
Fiber Sayısı (adet)	4	4	4
1 Fiber Alanı (mm^2)	453,6	465,3	373,9
Toplam Membran Alanı (cm^2)	18,14	18,61	14,95

Her membran için oda sıcaklığında saf su ile 3 farklı basınç altında akılar hesaplanmıştır Üretilen PES membranının (hava boşluğu = 0 ve 2,5) geçirgenlik deneyinin 0,6, 1 ve 1,5 bar basınç altında hesaplanan akı değerleri Çizelge 3.6'de verilmiş, basınca göre akı değişimi Şekil 3.21'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.6 : PES membranın (hava boşluğu = 0) akı ve permeabilite değerleri.

Üretilen Membran	**P (bar)**	**Akı (J_{ort}, $L/m^2.sa$)**	**Permeabilite ($L/m^2.sa.bar$)**
PES (hava boşluğu = 0)	0,6	59,46	99,09
	1	131,18	131,18
	1,5	241,24	141,91
PES (hava boşluğu = 2,5)	0,6	63,07	105,12
	1	101,37	101,37
	1,5	147,97	98,65

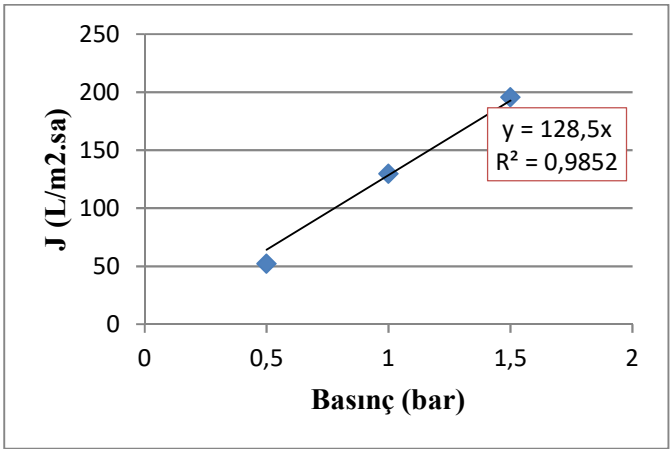


Şekil 3.21 : (a) PES (hava boşluğu=0), (b) PES (hava boşluğu=2,5) membranların basınç-akı grafikleri.

Üretilen PAN membranının (hava boşluğu = 0) geçirgenlik deneyinin 0,5, 1 ve 1,5 bar basınç altında hesaplanan akı değerleri Çizelge 3.7'da sunulmuş, basınç-akı grafiği Şekil 3.22'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.7 : PAN membranın (hava boşluğu = 0) geçirgenlik değerleri.

P (bar)	Akı (J_{ort}, L/m².sa)	Permeabilite (L/m².sa.bar)
0,5	52,34	104,68
1	129,87	129,87
1,5	195,81	130,54



Şekil 3.22 : PAN membranının basınç-akı grafiği.

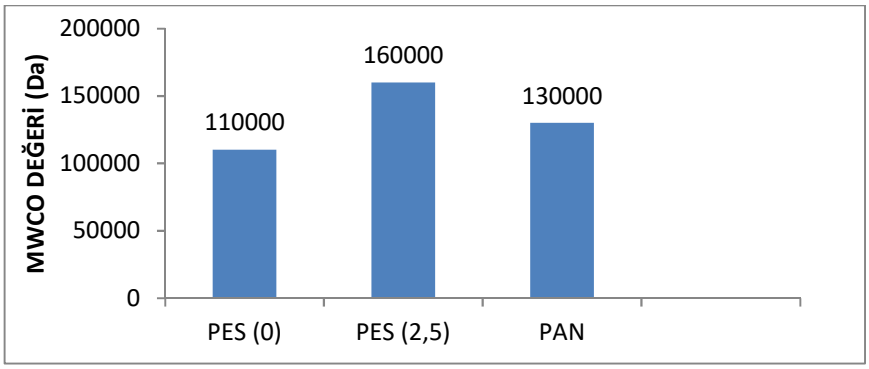
3.3.2 MWCO analizleri sonuçları

Üretilen membranlarla yapılan MWCO analizi sonuçları Çizelge 3.8'de, hesaplanan MWCO değerleri ise Şekil 3.23'de verilmektedir.

Çizelge 3.8 : Üretilen PES ve PAN membranların MWCO analiz sonuçları tablosu.

	PES (0)		
	Giriş	Çıkış	Solüt Ayrımı (%)
PEG-4400	230332	210816	8,47
PEG-10000	242677	217900	10,21
PEG-35000	226667	213092	5,99
PEG-100000	537812	14331	97,34
	PES (2,5)		
	Giriş	Çıkış	Solüt Ayrımı (%)
PEG-4400	199179	59766	69,99
PEG-10000	223455	168251	24,70
PEG-35000	204630	195916	4,26
PEG-100000	655228	6698	98,98
	PAN		
	Giriş	Çıkış	Solüt Ayrımı (%)
PEG-4400	200741	76646	61,82
PEG-10000	87108	56741	34,86
PEG-35000	65960	48624	26,28
PEG-100000	575142	11052	98,08

PES (0), PES(2.5) ve PAN membranları için MWCO değerleri sonuçları incelendiğinde sırasıyla 110 kDa, 160 kDa ve 130 kDa olarak belirlenmiştir. En yüksek giderim verimine sahip membran Şekil 2.20'de görüldüğü gibi PES (0) membranıdır.



Şekil 3.23 : PES ve PAN membranların MWCO değerleri.

3.3.3 Temas açısı ölçüm sonuçları

Temas açısı değeri yükseldikçe membranlar hidrofobik özelliğe, azaldıkça hidrofilik özelliğe sahip olur. Temas açısı değerleri PES membranları için Çizelge 3.9 ve Çizelge 3.10'da, PAN membranı için ise Çizelge 3.11'da verilmiştir.

Çizelge 3.9 : Üretilen PES (hava boşluğu=0) membranın temas açısı sonuçları.

	1.Numune		2.Numune		3.Numune	
	Temas Açısı	**Standart Sapma**	**Temas Açısı**	**Standart Sapma**	**Temas Açısı**	**Standart Sapma**
1	95,07	1,52	79,28	1,38	79,36	2,18
2	95,83	1,06	80,86	0,63	73,6	2
3	89,72	1,86	82,16	1,01	75,16	1,61
4	93,33	1,32	83,65	0,9	75,06	1,49
5	94,3	1,14	91,22	1,61	76,99	1,51
Ortalama	**93,65**		**83,43**		**76,03**	

Çizelge 3.10 : Üretilen PES (hava boşluğu=2,5) membranın temas açısı sonuçları.

	1.Numune		2.Numune		3.Numune	
	Temas Açısı	**Standart Sapma**	**Temas Açısı**	**Standart Sapma**	**Temas Açısı**	**Standart Sapma**
1	73,39	0,87	90,84	2,97	86,17	1,43
2	80,06	1,07	89,33	1,48	79,22	2,61
3	72,66	0,8	88,95	3,12	78,77	2,37
4	73,09	1,32	86,53	3,22	77,51	2,41
5	71,81	1,87			81,81	2,03
Ortalama	**74,20**		**88,91**		**80,69**	

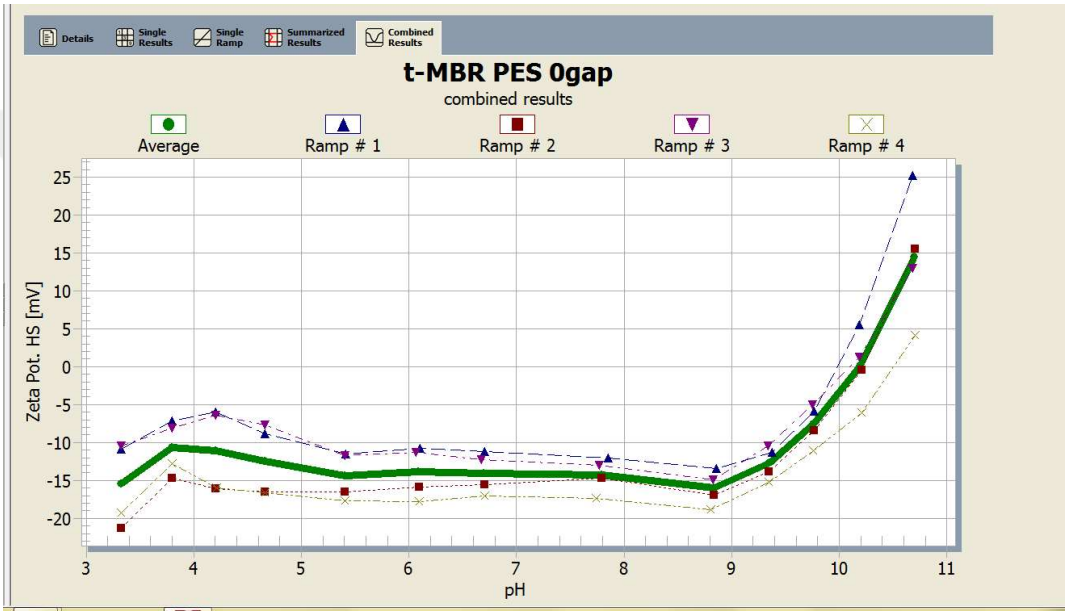
Çizelge 3.11 : Üretilen PAN membranın temas açısı sonuçları.

	1.Numune	
	Temas Açısı	**Standart Sapma**
1	52,34	0,42
2	54,41	0,73
3	53,86	0,31
4	51,87	0,51
5	49,09	2,48
6	53,97	1,81
7	58,08	1,8
Ortalama	**53,37**	

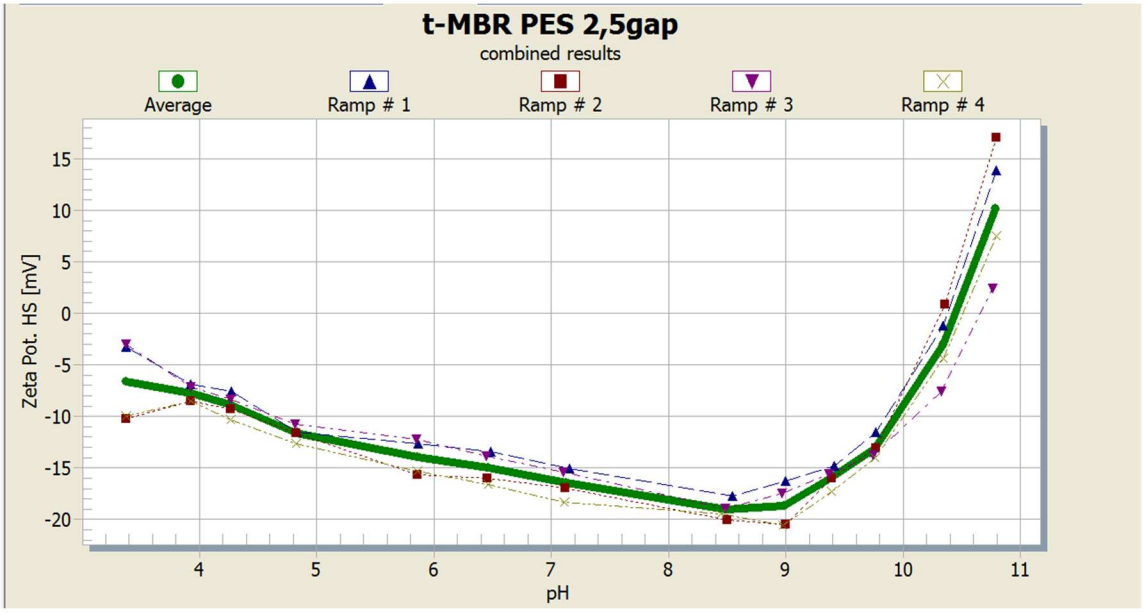
Ortalama temas açısı sonuçları; PES (0), PES (2.5) ve PAN membranları için sırasıyla 84,4, 81,3 ve 53,4 olarak elde edilmiştir. En düşük temas açısı PAN membranı için ölçülmüş olup, diğer membranlara göre hidrofilik yapıya sahip olduğu belirlenmiştir.

3.3.4 Yüzey yükü (zeta potansiyeli) ölçüm sonuçları

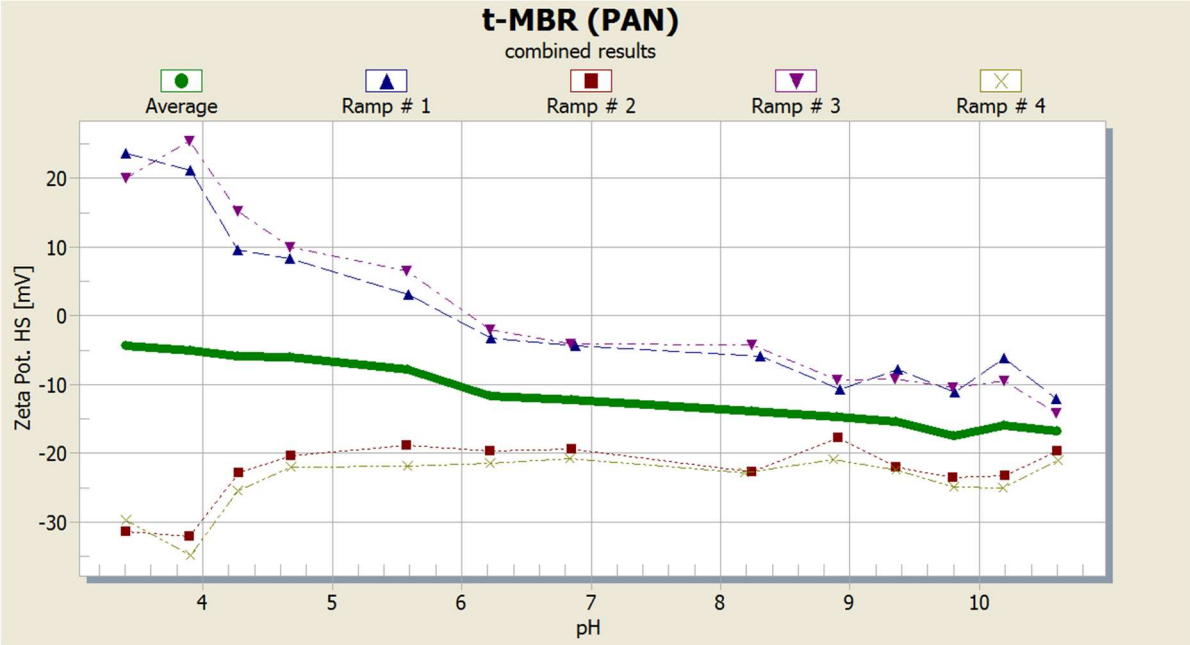
Yüzey yükü ölçümleri, farklı membran numuneleri alınarak birer örnek üzerinde yapılmıştır. PES membranlarının yüzey yükü analizlerine ait grafikler Şekil 3.24 ve Şekil 3.25'de, PAN membranlar için yapılan yüzey yükü analizlerine grafiği ise Şekil 3.26'da verilmektedir.



Şekil 3.24 : PES (hava boşluğu=0) membranının yüzey yükü analizi sonuç grafiği.



Şekil 3.25 : PES (hava boşluğu=2,5) membranının yüzey yükü analizi sonuç grafiği.



Şekil 3.26 : PAN membranının yüzey yükü analizi sonuç grafiği.

PES (0) ve PES (2.5) membranları için zeta potansiyeli, pH artışına bağlı olarak yüzeylerinde oluşan negatif değerlerden pozitif değerlere doğru artış gösterirken, PAN membranı için önemli bir değişiklik olmamıştır (Şekil 3.24-3.26).

3.3.5 Porometre deneyi sonuçları

Membranların geçirgenlik ve mekanik özellikleri ile doğrudan alakalı olduğu için membranların por çapları belirlenmiştir. Üretilen membranların porometre deneyi sonuçları Çizelge 3.12'de verilmektedir. Ortalama değerler incelendiğinde en düşük por çapına sahip membran PES(0) membranı olarak belirlenmiştir. Bu sonuç MWCO analizi sonuçlarını desteklemektedir.

Çizelge 3.12 : Porometre deneyi sonuç tablosu.

Parametre	PES (hava boşluğu=0)	PES (hava boşluğu=2,5)	PAN (hava boşluğu=0)
Maksimum por çapı (µm)	0,084	0,105	0,503
Ortalama debide por çapı (µm)	0,080	0,082	0,404
Minimum por çapı (µm)	0,070	0,067	0,077

3.3.6 DMA (Dinamik Mekanik Analiz) analiz sonuçları

Mekanik dayanım testleri membranların sertlik mertebesini değerlendirebilmek amacı ile yapılmıştır. Her bir membran için Young Modülü değeri bulunmuş ve grafikler üzerinde değerlendirilmiştir.

Üretilen PES ve PAN membranlarının her birinden 3 tane numune alınmak üzere mekanik dayanım deneyleri yapılmıştır. Mekanik dayanım deneyi sonuçları PES membranları için Çizelge 3.13 ve Çizelge 3.14'da, PES membranları için ise Çizelge 3.15'de verilmektedir.

Çizelge 3.13 : PES (hava boşluğu=0) membranın mekanik dayanım testi sonuçları.

	Uzama katsayısı	**Kopma gerilmesi**	**Young Modülü**
	%	mN/mm^2	Pa
1	0,185	11593	31908270
2	0,221	10781	27037053
3	0,163	11690	50202210

Çizelge 3.14 : PES (hava boşluğu=2,5) membranın mekanik dayanım testi sonuçları.

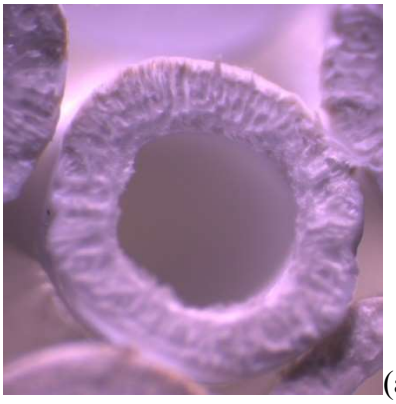
	Uzama katsayısı	**Kopma gerilmesi**	**Young Modülü**
	%	mN/mm^2	Pa
1	0,112	9412	59824616
2	0,243	7507	13006459
3	0,174	7203	30808105

Çizelge 3.15 : PAN membranın mekanik dayanım testi sonuçları.

	Uzama katsayısı	**Kopma gerilmesi**	**Young Modülü**
	%	mN/mm^2	Pa
1	0,5099	37,97	2199822
2	0,7020	37,90	1206676
3	0,3914	56,99	924969

Stereo mikroskobu ve SEM (Taramalı Elektron Mikroskop) analizi sonuçları

Stereo mikroskobu üretilen membranların morfolojik yapısının gözlemlenmesi ve DMA analizi için gerekli olan membran iç boşluksuz alanının hesaplanması için kullanılmıştır. Stereo mikroskobu görüntüleri PES membranı için Şekil 3.27'de, PAN membranı için Şekil 3.28'de gösterilmektedir.

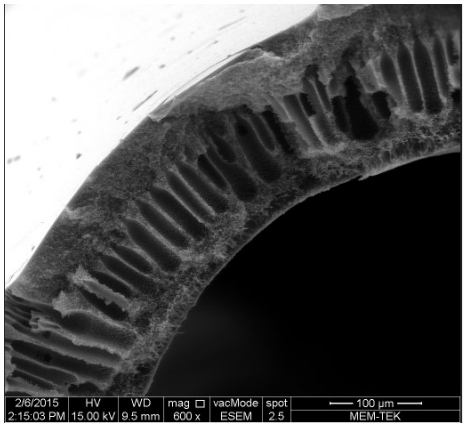

(a)

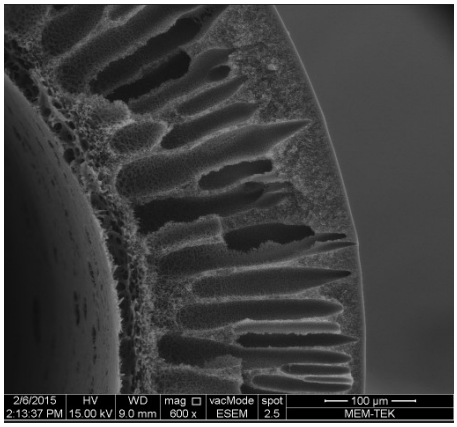
(b)

Şekil 3.27 : PES (hava boşluğu=0)(a), PES (hava boşluğu=2,5) (b) membranların stereo mikroskobu görüntüleri.

Şekil 3.28 : PAN membranının stereo mikroskobu görüntüleri.

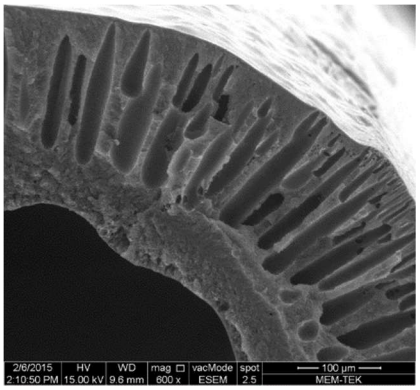
Membran morfolojisini daha iyi gözlemleyebilmek ve membran yapısı hakkında daha fazla bilgi sahibi olabilmek için SEM görüntüleri kullanılmıştır. Üretilen PES membranlara ait SEM görüntüleri Şekil 3.29'da, PAN membranına ait SEM görüntüleri ise Şekil 3.30'de gösterilmektedir.



(a)


(b)

Şekil 3.29 : 2 Tip PES membranına (h.b.=0) (a), (h.b.=2,5) (b) ait SEM görüntüleri.



Şekil 3.30 : PAN membranına ait SEM görüntüleri.

Membranlardan alınan SEM ve stereo mikroskop görüntüleri incelendiğinde, üretilen tüm membranların parmaksı (finger-like) yapıda oldukları belirlenmiştir.

Farklı membran alternatiflerinin değerlendirilmesi

Bu bölümde PES, PAN ve güçlendirilmiş ince boşluklu UF membranların performans değerlendirmesi sunulmuştur.

PES içi boşluklu membranların performansı

PES membran içeren modüllerin üretiminde vakumun uygulandığı üst kısımda poliüretan yapıştırıcının enjeksiyonu yöntemi kullanılmıştır. Böylece membran süzüntü uçları poliüretan yapıştırıcı ile dış ortamdan ayrılmıştır. Alt kapak ise tamamen epoksi ile doldurulup kapatılmıştır.

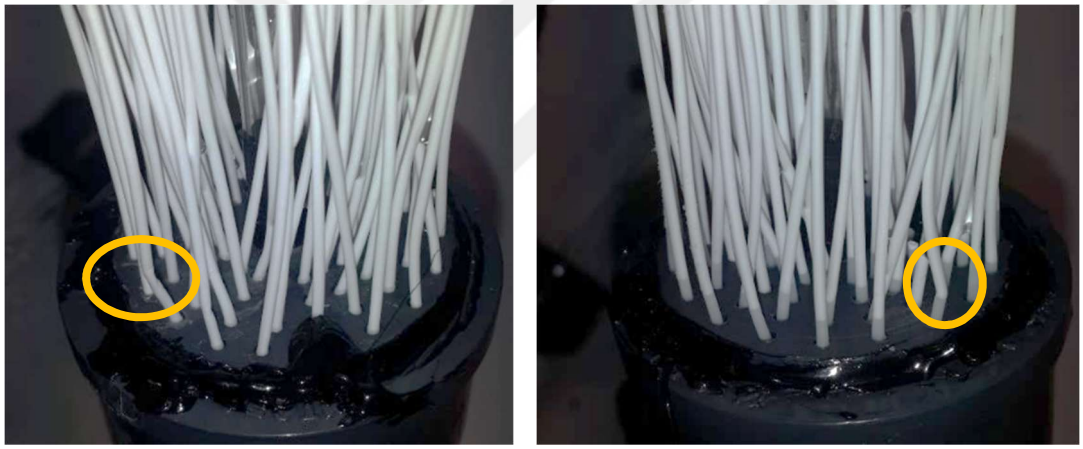
PES membranları kullanılarak üretilen modüllerde çeşitli sorunlar ile karşılaşılmıştır. Bu sorunlardan en önemli olanı membranların dayanıksız yapısından dolayı, kolayca kırılmalarıdır. Diğer bir önemli sorun ise poliüretan yapıştırıcının kürleşmesi esnasında şişerek büyümesinden dolayı membranları sıkıştırıp iç boşluğunu daraltması veya tamamen kapatmasıdır. Bu nedenle süzüntünün alınması için kritik olan modülün üst kapak kısmı tıkanmakta ve kullanılamaz hale gelmektedir.

Modüllerin alt kısımlarında ise süzüntü toplanması söz konusu olmadığından bu taraf, epoksi yapıştırıcı ile sızdırmaz bir şekilde körlenmiştir. Yapıştırıcının alt kısma döküldükten sonra bir gün süreyle kuruması beklenmiştir.

Yapıştırma işlemlerinden sonra vakum hattı ve havalandırma hattının bağlantıları yapıldıktan sonra tamamlanmış modüllerin görünümü Şekil 3.31'de verilmektedir.

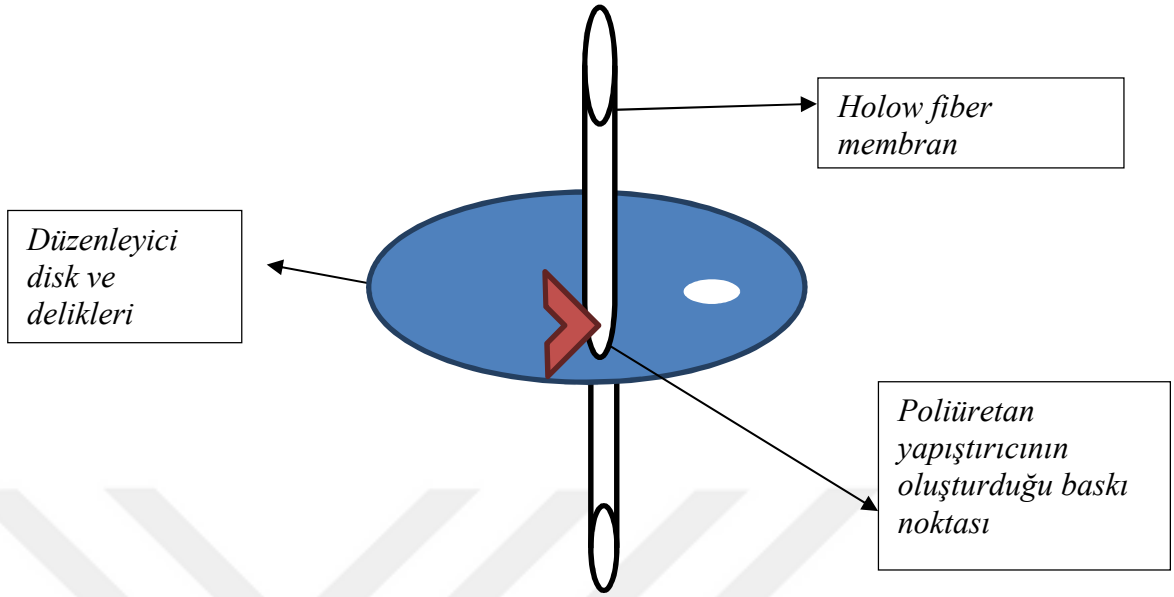
Şekil 3.31 : PES membranlardan üretilmiş MBR modülleri.

PES membranların bazılarında bükülme ve kırılmalar meydana gelmiştir, bu durum modüllerin permeabilitelerinde farklılıklar oluşturmuştur. Kırılma ve bükülmeler ile ilgili görünümler Şekil 3.32'da verilmiştir.



Şekil 3.32 : PES modüllerde gerçekleşen kırılma ve bükülmeler.

Bükülme ve kırılmalar modüllerin permeabilitelerini etkilemiş ve birbirinden çok farklı permeabilite ve membran dirençlerine sahip modüllerin elde edilmesine sebep olmuştur. Bu nedenle permeabilite değerleri membran kırılmaları sebebiyle çok yüksek veya bükülmeler nedeniyle çok düşük çıkmıştır. Bu durum, membran modüllerinin permeabilite açısından sağlıklı şekilde karşılaştırılamamasına sebep olmuştur. Bir diğer performans sorunu ise, poliüretan yapıştırıcının kürleşmesi esnasında şişip büyümesi ve membranları disklerde bulunun deliklerin içinde sıkıştırıp bazı fiberlerin iç boşluğunun kaybolmasına neden olmasıdır. Bu durumun şekilsel olarak gösterimi Şekil 3.33'da verilmektedir.



Şekil 3.33 : Poliüretan yapıştırıcının membranı disk deliklerinde sıkıştırması.

Yapıştırıcının kürleştikten sonraki görünümü ise Şekil 3.34'de verilmiş olup, membranların sıkışmış olduğu görülmektedir.

Şekil 3.34 : Poliüretan yapıştırıcının modül üzerinde görünümü.

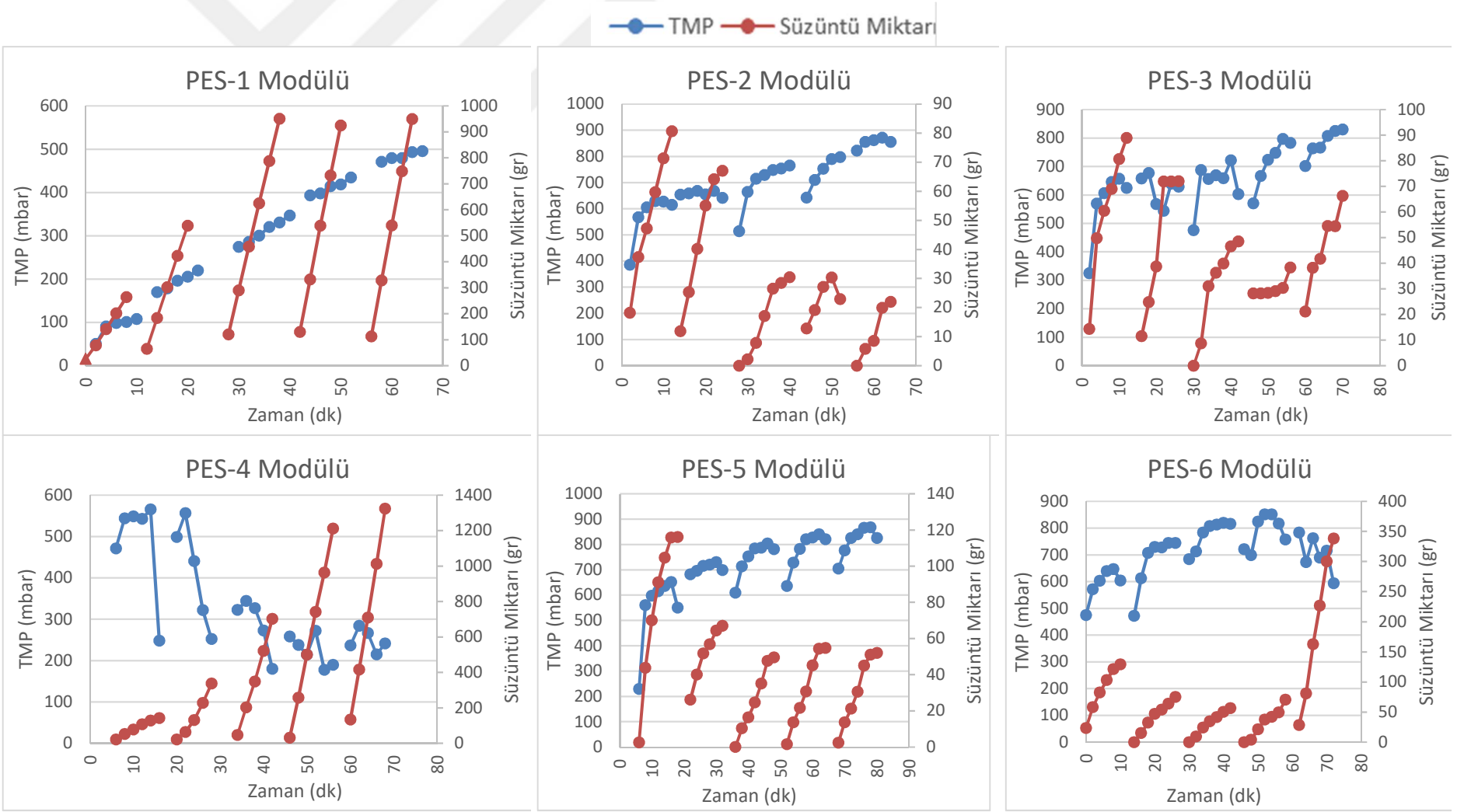
Aynı PES membranlarından aynı yöntem ile üretilmiş altı adet membran modülü laboratuvar ölçekli MBR sistemine bağlanıp saf su ile permeabilite ve membran dirençleri hesaplanmıştır. Elde edilen permeabilite, dirençler ve değerlendirmeleri

Çizelge 3.16'da verilmektedir. Altı PES membran 1-6 şeklinde 1'den 6'ya kadar kodlanmıştır.

Çizelge 3.16 : PES modülleri permeabilite ve membran direnci değerleri.

	Permeabilite ($L/m^2.sa.bar$)	**Direnç** (1/m)	**Değerlendirme**
PES-1	367	$1,03x10^{12}$	Diğer modüllere göre permeabilite çok yüksek ve direnç düşük elde edilmiştir. Membranların bir veya birkaçında kopmalar olmuştur. Modül kullanılamaz hale gelmiştir.
PES-2	-	-	TMP artmış, fakat süzüntü miktarı düşmüştür. Dolayısıyla direnç negatif hesaplanmıştır. Anlamlı olmayan direnç değerleri elde edilmiştir .
PES-3	13	$2,87x10^{13}$	Permeabilite değeri oldukça düşüktür. Negatif direnç değerleri hesaplanmıştır.
PES-4	-	-	Pompa devri arttırıldığında membran hasar görmüştür. Bu nedenle pompa gücü arttırıldıkça, basınç düşmüştür. Membranda yırtılma, bükülme, kırılma vb. olma ihtimali yüksektir.
PES-5	25	$1,43x10^{13}$	Değerler 60-80 rpm (devir/dakika) dataları kullanılarak hesaplanmıştır. Diğerleri dikkate alındığında negatif direnç hesaplanmıştır.
PES-6	-	-	Direnç negatif hesaplanmıştır. Modül kullanılamaz hale gelmiştir.

Üretilen altı adet (PES 1-6) modülde elde edilmiş TMP ve süzüntü miktarı değişimi Şekil 3.35'de verilmektedir.



Şekil 3.35 : PES modüllerine ait TMP ve süzüntü miktarı değişimi.

Şekil 3.35'de verilen grafikler incelendiğinde, her bir modülde farklı süzüntü miktarları elde edildiği, özellikle PES-4 ve PES-6 modüllerinde zamanla pompa gücü arttırılmış olmasına rağmen TMP'nin düştüğü ve aynı zamanda süzüntü miktarının arttığı görülmektedir. Bunun sebebi membranların poliüretan ile yapıştırılması esnasında membranların açık olan uçlarının ezilip sıkışması ve bu nedenle artan pompa devriyle beraber TMP artışına dayanamayıp su kaçırmaya başlamasıdır. Sonuçlar değerlendirildiğinde, birbirine yakın sonuç alınabilecek hiçbir modül üretilemediği, dolayısıyla bu PES membranlarından elde edilen modüllerde tekrar edilebilirlik konusunda problemler yaşandığı anlaşılmaktadır.

PAN İnce boşluklu membranların performansı

PAN membran içeren modüllerin üretiminde vakumun uygulandığı üst kısımda poliüretan yapıştırıcının enjeksiyonu yöntemi kullanılmıştır. Bu sayede membranın açık olan uçları poliüretan yapıştırıcı ile dış ortamdan ayrılmıştır. Alt kapak ise epoksi ile doldurulup kapatılmıştır. Yapıştırma işlemlerinden sonra vakum hattı ve havalandırma hattının bağlantıları yapıldıktan sonra tamamlanmış modüllerin görünümü Şekil 3.36'te verilmektedir.

PAN membranları kulanılarak üretilen modüllerde de PES membranlarına benzer sorunlar (membranların dayanıksız yapısından dolayı kolayca kırılmaları, poliüretan yapıştırıcının kürleşmesi esnasında şişerek büyümesinden dolayı membranları sıkıştırıp iç boşluğunu daraltması) ile karşılaşılmıştır.

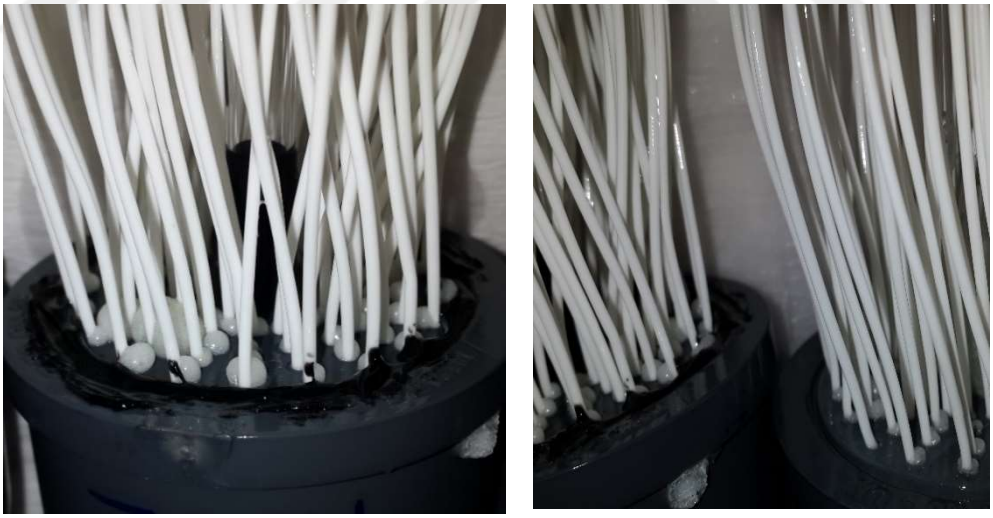
Şekil 3.36 : PAN membranlarından üretilmiş MBR modülleri.

PAN membranların bazılarında bükülme ve kırılmalar meydana gelmiş olup, bunlara ait görünümler Şekil 3.37'de verilmiştir.

Şekil 3.37 : PAN modüllerde gerçekleşen kırılma ve bükülmeler.

PAN membranlarında görülen bükülme ve kırılmalar modüllerin permeabilitelerini etkilemekte ve birbirinden çok farklı permeabilite ve membran dirençlerine sahip modüllerin elde edilmesine sebep olmaktadır.

PAN membranlarında tespit edilen membran sıkışması ile ilgili görünümler Şekil 3.38'de verilmektedir.



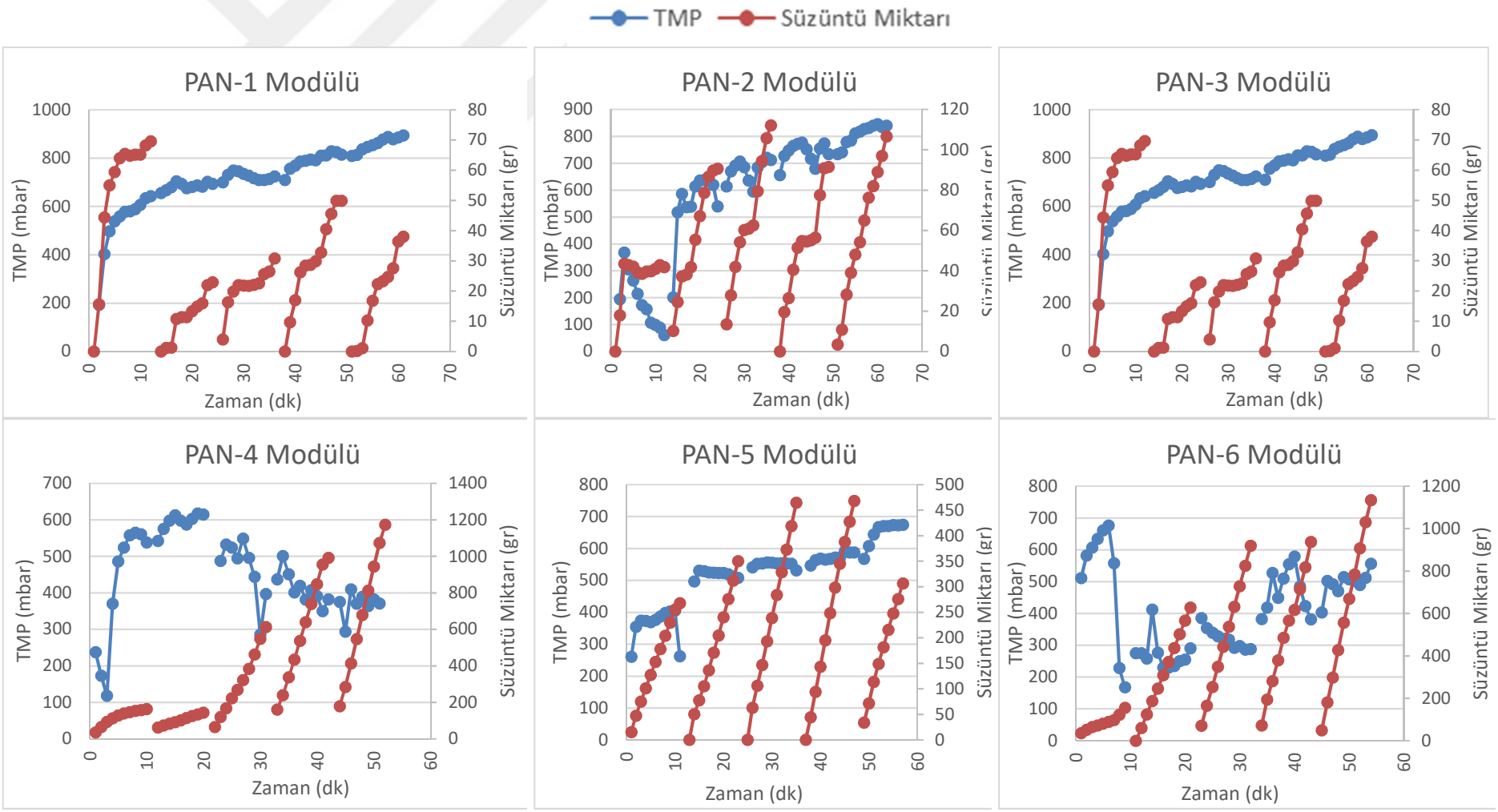
Şekil 3.38 : Poliüretan yapıştırıcının modül üzerinde görünümü.

Aynı PAN membranlarından üretilmiş altı adet membran modülü laboratuvar ölçekli MBR sistemine bağlanıp saf su içerisinde permeabilite ve membran dirençleri hesaplanmıştır. Elde edilen permeabilite, dirençler ve değerlendirmeleri Çizelge 3.17'de verilmektedir. Altı modül PAN-1, PAN-2, PAN-3, PAN-4, PAN-5, PAN-6 şeklinde 1'den 6'ya kadar kodlanmıştır.

Çizelge 3.17 : PAN modülleri permeabilite ve membran direnci değerleri.

	Permeabilite (L/m^2-sa.bar)	**Direnç** (1/m)	**Değerlendirme**
PAN-1	-	-	TMP artmış, fakat süzüntü miktarı düşmüştür. Dolayısıyla direnç negatif hesaplanmıştır. Anlamlı olmayan direnç değerleri elde edilmiştir.
PAN-2	12	$3{,}03*10^{13}$	Çok yüksek filtrasyon direnç değerleri ve çok düşük permeabilite değerleri elde edilmiştir.
PAN-3	29	$1{,}27*10^{13}$	40-60-80 rpm dataları kullanılarak hesaplanmıştır. Diğerleri dikkate alındığında negatif direnç hesaplanmıştır.
PAN-4	-	-	Pompa devri arttırıldığında membran hasar görmüştür. Bu nedenle pompa gücü arttırıldıkça, basınç düşmüştür. Membranda yırtılma, bükülme, kırılma vb. olma ihtimali yüksektir.
PAN-5	122	$3{,}02*10^{12}$	Değerler 20-40-60-80 rpm dataları kullanılarak hesaplanmıştır. Diğerleri dikkate alındığında negatif direnç hesaplanmıştır. 100 rpm değerinde elde edilen süzüntü milktarı artması gerekirken azalmıştır. Vakum sebebiyle membranlarda büzüşme gerçekleşmiş olabilir.
PAN-6	-	-	Pompa devri arttırıldığında membran hasar görmüştür. Bu nedenle basınçta azalma meydana gelmiştir. Membranda yırtılma olma ihtimali yüksektir. Direnç negatif hesaplanmıştır. Modül kullanılamaz hale gelmiştir.

PAN 1-6 modüllerinde elde edilmiş TMP değişimi ve süzüntü miktarları Şekil 3.39'da sırasıyla verilmektedir.



Şekil 3.39 : PAN 1-6 modüllerine ait TMP ve süzüntü miktarı değişimi.

Şekil 3.39'da verilen grafikler incelendiğinde, her bir modülde farklı süzüntü miktarları elde edildiği, PAN 4 modülünde zamanla pompa gücü arttırılmış olmasına rağmen TMP'nin düştüğü ve aynı zamanda süzüntü miktarının arttığı görülmektedir. Bunun yanı sıra tüm modüllerde başlangıç TMP değerleri 450-500 mbar mertebelerinde olup, elde edilen süzüntü miktarlarında 10 kata kadar farklar bulunmaktadır. Sonuçlar değerlendirildiğinde, birbirine yakın sonuç alınabilecek hiçbir modül üretilemediği anlaşılmaktadır.

Sonuç olarak PES ve PAN membranları kırılganlıkları ve tutarsızlıkları sebebiyle uzun dönemli laboratuvar ve pilot ölçekli deneyler için ugun olmadığı anlaşılmıtşır. Bu sebeble ticari olarak satın alınabilen güçlendirilmiş ince boşluklu PVDF membranların kulanımına karar verilmiştir.

3.3.7 Laboratuvar ölçekli titreşimli modül sisteminin üretimi

3.3.7.1 Modüllerin üretimi

İnce boşluklu membranların modül kabına yapıştırılması için iki farklı yapıştırma yöntemi bulunmaktadır. Bunlardan biri dipping, diğeri ise potting yöntemleridir. Her iki yöntemde de özel yapıştırıcılar kullanılmaktadır. Dipping yöntemi, hazırlanan epoksi yapıştırıcının şırınga ile modüle beslenip, yer çekimi etkisiyle modül ucunda birikip kuruması şeklinde yapılmaktadır. Potting yönteminde ise, hazırlanan yapıştırıcı ve modül, bu iş için özel olarak üretilmiş santrifüj cihazına yerleştirilerek, yapıştırıcının modül uçlarından merkezkaç kuvvetiyle ittirilmesi ve membranların modül içerisine "dikilmesi" tekniği uygulanmaktadır. Deneylerde kullanılan modüller dipping yöntemiyle üretilmiş olup, poliüretan ve epoksi yapıştırıcılar birlikte kullanılmıştır.

Epoksi ve poliüretan yapıştırıcıların hazırlanması

Epoksi ve poliüretan yapıştırıcıların her biri çift bileşenli yapıştırıcılar olup, bu bileşenlerin belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilmektedir. A ve B komponentleri olarak adlandırılan bu bileşenler kullanılan yapıştırıcının teknik özelliklerine göre karıştırılarak reaksiyona girip sertleşmektedirler. Bu olaya kürleşme denilmektedir. Kürleşme zamanı, kullanılan bileşenlerin ekzotermik özelliğine göre ve ortam sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Yapıştırıcılar 2:1 (A:B) oranında karıştırılarak uygun form elde edilebilmektedir. Deneysel çalışmalarda kullanılan yapıştırıcılar Şekil 3.40 :'da verilmektedir.

Modül yapımı çalışmalarında yapıştırıcının kürleşme zamanı ve uygun viskoziteye sahip olması gibi farklı parametreler optimize edilmiştir. Epoksi komponentleri karıştırıldıktan sonra 15-30 dk arasında vakumlu etüvde 60 °C'de bekletilmiştir. Bu durum kürleşmeden sonra hava kabarcıklarının yaratacağı boşlukların engellenmesi açısından önemli bir adımdır. Etüvdeki bekleme süresi ve sıcaklık, kürleşme zamanını etkilemektedir. Yüksek sıcaklıkta uzun süre bekletilen yapıştırıcılar kürleşmesini etüv içerisinde tamamlayıp katılaşarak kullanılması imkansız hale gelebilmektedir.

Uygun süre ve sıcaklıkta vakumlu etüv içerisinde hava kabarcıkları giderilen karışım kullanılmaya hazır haldedir. Genellikle yapıştırma işlemi sonrasında 3-5 saat (ortam sıcaklığına bağlı olarak) içerisinde kürleşerek katılaşma olmaktadır. Takip eden 24 saat içerisinde ise reaksiyon devam ederek kürleşme işlemi tamamlanmaktadır.

Şekil 3.40 : Epoksi (önde) ve poliüretan (arkada) yapıştırıcıların A, B bileşenleri.

Membranların dizilimi ve dikimi

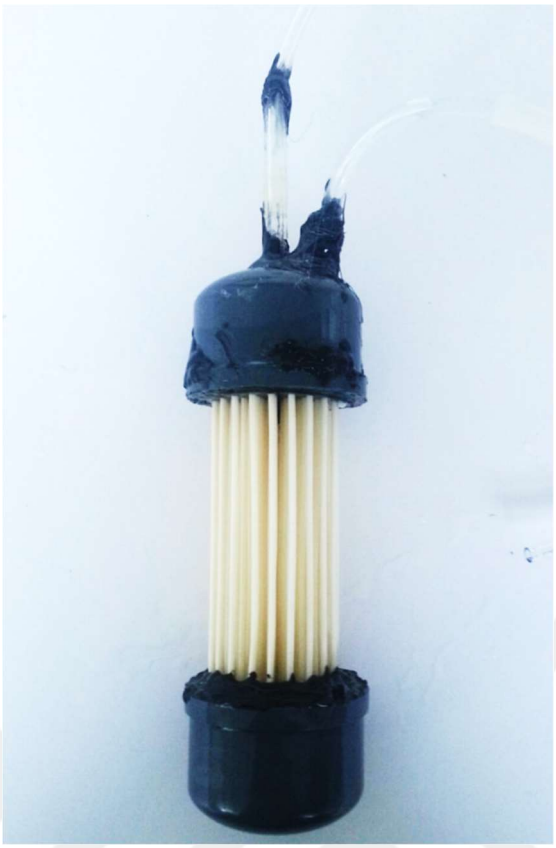
Membranlar modül içerisine yerleştirilmeden önce ön hazırlık aşaması yapılmaktadır. Bu aşamada membranlar dizilerek düzgün bir yuvarlak şekil elde edilmesi amaçlanmaktadır. Membran dizilimi sonrası membranların genel görünümü Şekil 3.41 :'de verilmektedir.

Şekil 3.41 : İçi boşluklu fiber membranların dizilimleri.

Membranlar uç noktalarından bir destek parçası (delikli disk) üzerine teker teker dizilmiştir. Bu işlem tamamlandıktan sonra iki disk arasında 10 cm kalacak şekilde ayarlama yapılmıştır. Membranlar uçlarından çekilerek gerdirilmiş ve modül üst ve alt parçalarına yerleştirilmek üzere fazlalıklar kırpılmıştır. Uç noktaları bantlanarak modül gövdesi içerisine membranlar yerleştirilmiştir. Yapıştırma işlemi esnasında karşılaşılan en büyük problem; yapıştırıcının membran içerisine girmesi ve iç boşluğu doldurmasıdır. Bu durumun önüne geçilmesi için bu modüllerin üretiminde farklı bir teknik ile vakumun uygulanacağı üst kısımda poliüretan yapıştırıcı ile iki disk arasına yapılan enjeksiyon yöntemi kullanılmıştır. Böylece membran süzüntü uçları poliüretan yapıştırıcı ile dış ortamdan ayrılmıştır.

Modüllerin alt kısımlarında ise süzüntü toplanması söz konusu olmadığından, bu taraf epoksi yapıştırıcı ile sızdırmaz bir şekilde körlenmiştir. Yapıştırıcı alt kısma döküldükten sonra 1 gün süreyle kuruması beklenmiştir.

Yapıştırma işlemleri tamamlanmış, vakum hattı ve havalandırma hattının bağlantıları yapılmış bir modülün görünümü Şekil 3.42 :'da verilmektedir.



Şekil 3.42 : Bağlantıları yapılmış kullanıma hazır laboratuvar ölçekli MBR modülü.

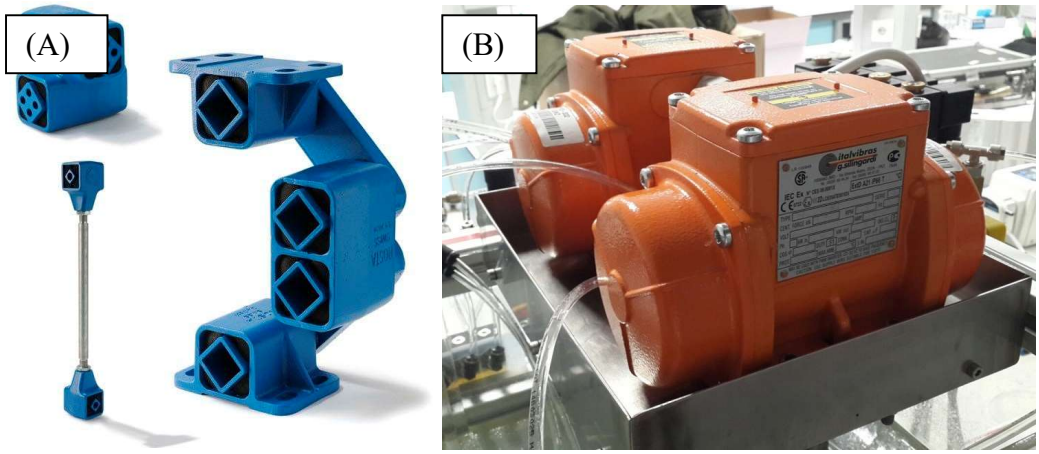
Modül üretiminin, bilgisayarda yapılan tasarım ile birebir uyumlu olmasına özen gösterilmiştir. Buna rağmen, gerçekte üretilmiş modüller ile bilgisayar tasarımı arasında %1-2 civarında bir farklılık gözlenmiş olup, bu farklılık kabul edilebilir bir seviyede kalmıştır.

3.3.7.2 Titreşim sistemleri

Reaktör içerisindeki modüllere titreşim uygulanması amacıyla iki farklı sistem tasarlanmış ve üretilmiştir. Bunlar; mekanik motorlu ve manyetik sürücülü sistemlerdir.

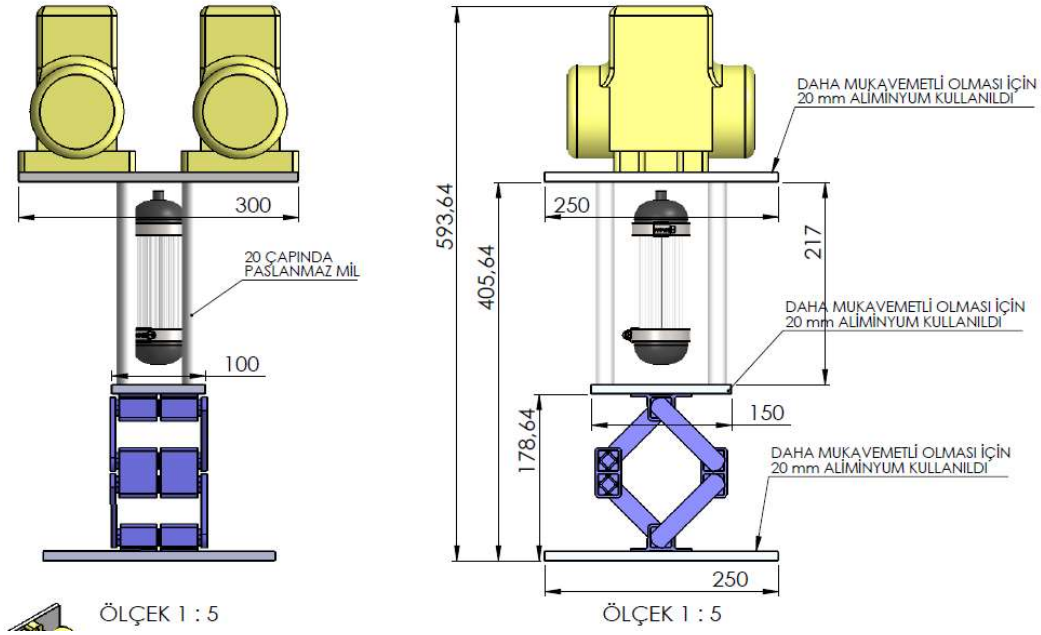
Mekanik motorlu sistem

Tasarlanıp üretilen mekanik titreşim sistemi, endüstriyel kullanıma uygun salınım yayları üzerine oturtulmuştur. Mekanik titreşim oluşturan motor olarak endüstrilerde kullanılan vibrasyon motoru seçilmiştir. Sistemde iki adet vibrasyon motoru (Italvibras MVSI 3/100-S02) ve 4 adet osilasyon yayı (Rosta AB15 marka) kullanılmıştır. Sistemde aşağı-yukarı yönde titreşim hareketinin sağlanabilmesi amacıyla iki adet motordan biri ters yönde çalışacak şekilde ayarlanmıştır. Şekil 3.43 :'de sistemde kullanılan yay ve motorun görünümleri verilmektedir.



Şekil 3.43 : Osilasyon yayı (A) ve iki kutuplu titreşim motoru (B).

Mekanik titreşim sistemi alüminyum ve çelik parçalar birlikte kullanılarak oluşturulmuştur. Dört adet mil arasına üç boyutlu tasarım yardımıyla modül yerleştirilmiş, modül üst ve alt tarafına alüminyum tablalar koyulmuştur. Üst tabla motorlar için, alt tabla ise osilasyon yayları için kullanılmıştır. Üç boyutlu tasarımda iki adet osilasyon yayı yeterli görülmüş, fakat denge sorunu nedeniyle gerçek sistem yapımı esnasında yay sayısı dörde çıkarılmıştır. Sistemin teknik detayları Şekil 3.44 :'de gösterilmektedir.



Şekil 3.44 : Mekanik titreşim sisteminin teknik detayları.

Mekanik titreşim sisteminde kullanılan yay ve vibrasyon motorunun teknik özellikleri sırasıyla Çizelge 3.18 : ve Çizelge 3.19 :'de verilmektedir.

Çizelge 3.18 : Mekanik titreşim sisteminde kullanılan yayın (Rosta AB15) özellikleri.

Parametre	Değer
G (yük kapasitesi) (N)	50 - 160
Ağırlık (kg)	0,51
Malzeme	Hafif alaşım - çelik kaynak

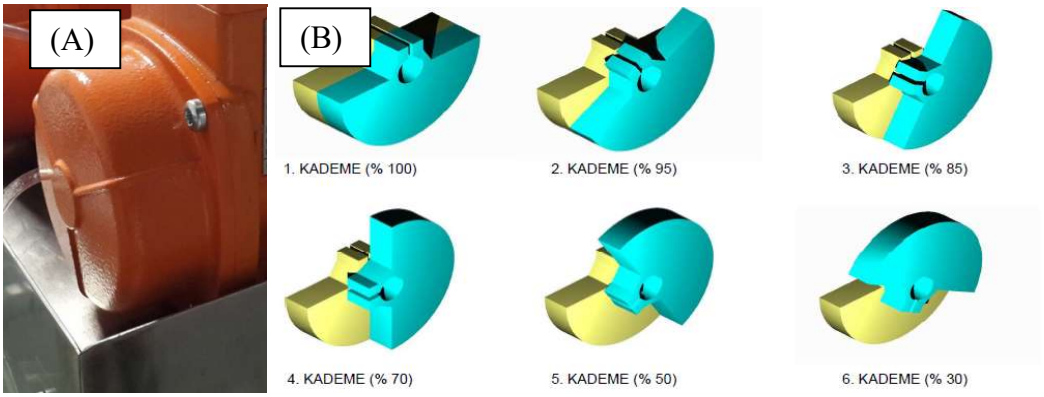
Çizelge 3.19 : Mekanik titreşim sisteminde kullanılan titreşim motorunun teknik özellikleri.

Parametre	Değer
Kutup sayısı	2
Mekanik koruma standardı	IP66
Ağırlık (kg)	5,60
Sıcaklık dayanım sınıfı (°C)	120
Maksimum güç (W)	180
Santrifüj kuvveti (kg)	121
Faz sayısı	3

Mekanik titreşim sisteminde farklı frekans ve genlik değerleri uygulanabilmektedir. Frekans değerleri 5-50 Hz, genlik ise 0,1-8 mm aralığında değiştirilebilmektedir. Motorlar zaman rölesine bağlı olup istenilen zaman programında çalıştırılabilmektedir. Vibrasyon motorlarının sürülmesi ve kontrolünü sağlayan panoya ait görüntü Şekil 3.45 :'de verilmektedir.

Şekil 3.45 : Mekanik titreşim sisteminin kontrol panosu.

Sistemde genlik ayarı motorlarda bulunan kutuplar sayesinde yapılabilmektedir. Bunun için motorların kutuplarında bulunan ağırlıkların birbirlerine göre olan konumları manuel olarak değiştirilebilmektedir. Şekil 3.46 :'te motor kutbu ve genlik ayarı için gerekli şematik bilgi verilmektedir.



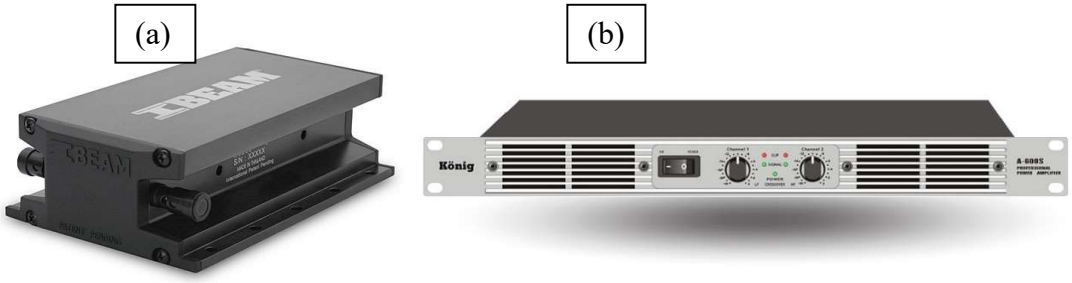
Şekil 3.46 : Motor kutbu (A) ve kutup içerisindeki ağırlıkların birbirlerine göre farklı konumları (B).

Manyetik sürücülü sistem

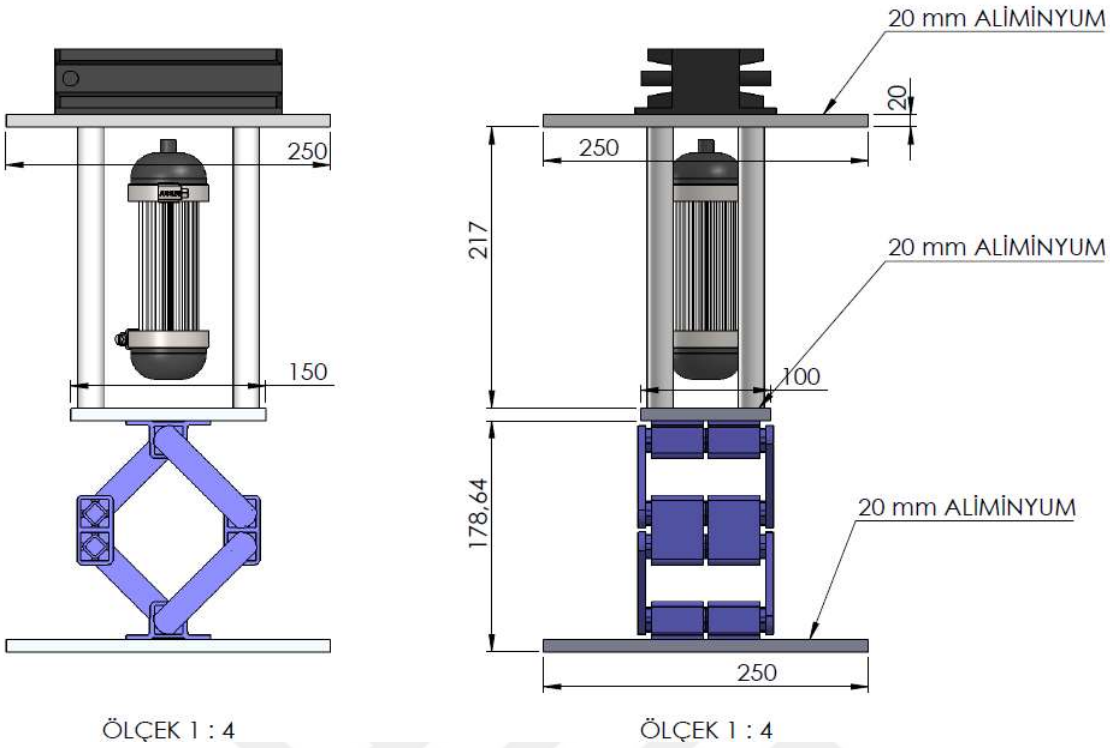
Kullanılan manyetik titreşim sistemi, Bilad ve diğ. (2012) tarafından kullanılan sistemin benzeridir. Frekans aralığı mekanik motorlu sisteme göre daha fazla olup, 20–150 Hz arasında değiştirilebilmektedir. Genlik ise, sistemde kullanılan titreştirici manyetik motorun teknik yapısından dolayı ayarlanamamakta ve frekans değişimine göre genlikte ufak farklılıklar oluşmaktadır.

Manyetik sürücü olarak sistemde I-BEAM VT200 kullanılmış olup, bu manyetik titreştirici sürücü 100 Watt gücünde bir amplifikatör ile sürülmüştür. Oluşturulmak istenen frekans ise NCH Tone Generator isimli bilgisayar yazılımı tarafından üretilen sinüs dalgası ile oluşturulmaktadır.

Sistemde 2 adet manyetik sürücü kullanılmış olup, tek bir amfi devresi ile sürülmektedir. Manyetik sürücü ve sürücüyü çalıştıran amfi devresinin görünümleri Şekil 3.47 :'de verilmiştir. Manyetik titreşim sistemi, alüminyum tablalar ve çelik destekler ile oluşturulmuş iskelet ile düzenlenmiştir. Tasarım aşamasında öncelikle 3B olarak bilgisayar ortamında boyutlandırma yapılmıştır. Titreşimlerin tanka ulaşmasını engellemek ve modülerin sabitlenmesi amacıyla alt alüminyum tablaya vidalanmış 4 adet Rosta AB15 yayları kullanılmıştır. Sistemin 3B tasarım görünümü Şekil 3.48 :'te verilmiştir. 3B tasarımda 2 adet osilasyon yayı yerleştirilmiş olup, yapım esnasında denge problemi yaşanması sebebiyle yay sayısı 4'e çıkarılmıştır. Yine 3B tasarımda 1 adet olarak düşünülmüş manyetik sürücü uygulamada ikiye çıkarılmıştır.



Şekil 3.47 : Manyetik sürücü (a) ve sürücü devresi (b).



Şekil 3.48 : Manyetik titreşim sisteminin teknik detayları.

Sistemde kullanılan manyetik sürücünün teknik özellikleri Çizelge 3.20 :'da verilmektedir.

Çizelge 3.20 : Manyetik sürücü teknik özellikleri.

Parametre	Değer
Elektriksel güç aralığı (W)	100 - 250
Frekans aralığı (Hz)	30-150
Empedans - Direnç (Ohm)	4

3.3.8 Pilot ölçekli titreşimli modül sisteminin üretimi

3.3.8.1 Modülün üretimi

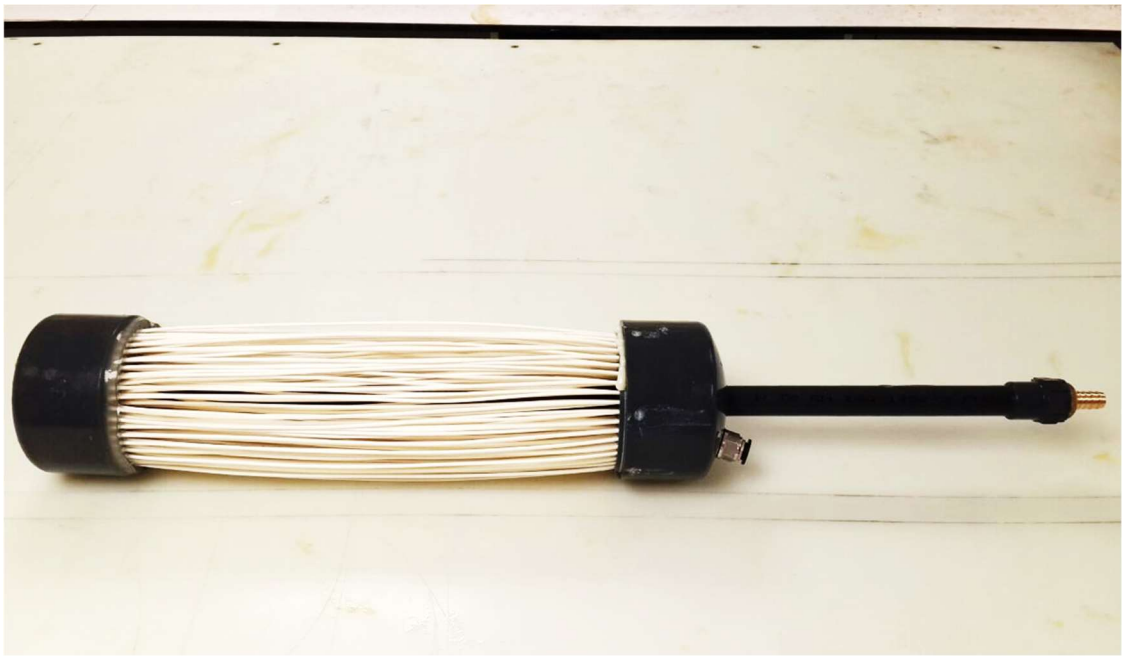
Pilot ölçekli MBR sisteminde kullanılan modüller laboratuvar ölçekli çalışmalarda kullanılan modüller ile aynı üretim metpdu kullanılarak üretilmiştir. Pilot ölçekli MBR sisteminde Philos marka güçlendiirilmiş ince boşluklu PVDF membranlar kullanılmıştır. Pilot ölçekli çalışmalarda kullanılan modülün özellikleri Çizelge 3.21 :'de verilmiştir.

Çizelge 3.21 : Modül Özellikleri.

Parametre	Özellikler
İçi boşluklu bir membranın çapı (mm)	2
İçi boşluklu bir membranın yüzey alanı (m^2)	0,002
Toplam içi boşluklu membran sayısı	200
Toplam membran alanı (m^2)	0,40
Modül uzunluğu (cm)	32
Modül çapı (cm)	9
Geri yıkama durumu	var
İçeriden hava sıyırma durumu	var
Maksimum vakum basıncı (bar)	0,8

Modüllerin hazırlanması ve üretiminde laboratuvar ölçekli çalışmalarda kullanılan yöntemler kullanılmıştır.

Pilot ölçekli çalışmalar için hazırlanan modüller Şekil 3.49 : ve Şekil 3.50 :'de verilmiştir.



Şekil 3.49 : Bağlantıları yapılmış kullanıma hazır pilot ölçekli MBR modülü.

Şekil 3.50 : Bağlantıları yapılmış kullanıma hazır pilot ölçekli MBR modülünün farklı açıdan görüntüsü.

3.3.8.2 Titreşim sistemi

Pilot ölçekli çalışmalarda kullanılan manyetik titreşim sistemi laboratuvar ölçekli çalışmalarda kullanılan sistemin aynısıdır.

Manyetik titreşim sisteminin frekans aralığı 20–150 Hz arasında değişmektedir. Manyetik sürücü olarak sistemde I-BEAM VT200 kullanılmıştır. Manyetik titreştirici sürücü 100 Watt gücünde bir amplifikatör ile sürülmüştür. NCH Tone Generator isimli bilgisayar yazılımı ile oluşturulmak istenen frekanslar bu programdan üretilen sinüs dalgaları ile oluşturulmaktadır. Sistemde 2 adet manyetik sürücü kullanılmış olup, tek bir amplifikatör devresi (Behringer Europower 2000) ile sürülmüştür (Şekil 3.51).

Şekil 3.51 : Pilot ölçekli modül için kullnılan amplifikatör devresi (a) ve manyetik sürücü (b).

4. LABORATUVAR ÖLÇEKLİ UZUN SÜRELİ DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Laboratuvar ölçeğinde üretilen membran modüllerinin uzun dönemli olarak laboratuvar ölçeğinde testinin gerçekleştirilmesi ile ilgili yapılan deneyler bu bölümde anlatılmştır. Deneylerde kullanılan analiz yöntemleri ve test metodolojisi açıklanmış, filtrasyon performansı değerlendirmesi ve arıtma performansı değerlendirmesi yapılmıştır.

Laboratuvar ölçekli çalışmalarda üç adet güçlendirilmiş membran modülü aynı işletme koşulları altında işletilmiş olup, titreşim kaynağındaki değişimin filtrasyon ve biyolojik giderme performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. 1. aşamada manyetik ve mekanik sistemlerin frekans değerleri sırasıyla 30 ve 5 Hz'dir. 2. ve 3. aşamalarda manyetik sistemin frekans değeri sabit tutularak, elde edilen sonuçlara bağlı olarak mekanik sistemin frekans değeri (30 ve 20 Hz) değiştirilmiştir. Bölüm 3.1.4'te belirtildiği üzere mekanik sistemin 3. aşamada yüksek frekans değeri denenmesinden dolayı hasar görmesi sebebiyle, 3. aşama çalışmaları tekrar başlatılmış ve mekanik sistemde titreşim frekansı 20 Hz olarak ayarlanmıştır.

4.1 Analiz Yöntemleri ve Test Metodolojisi

4.1.1 Atıksu kaynağı ve karakterizasyonu

Laboratuvar ölçekli MBR çalışmalarında; titreşim sistemlerinin etkisinin ham evsel atıksu kaynağındaki değişimlerden bağımsız olarak değerlendirilebilmesi için besleme çözeltisi olarak sentetik evsel atıksu kullanılmıştır. Sentetik evsel atıksu kompozisyonu Agtas ve diğ. (2016)'nin çalışmasından yararlanılarak belirlenmiştir. Besleme çözeltisi konsantre olarak hazırlanmış ve musluk suyu ile seyreltilerek sisteme sürekli olarak beslenmiştir. Kullanılan sentetik atıksu kompozisyonu Çizelge 4.1 :'de verilmektedir.

Çizelge 4.1 : Sentetik evsel atıksu kompozisyonu (Agtas ve diğ., 2016).

Kimyasallar	Konsantrasyon (mg/L)
Glikoz	715
Üre	85
KH_2PO_4	70
$(NH_4)_2SO_4$	70
$MgSO_4.7H_2O$	70
Na_2CO_3	145
NaCl	70
$CaCl_2.2H_2O$	15

Çizelge 4.1 :'e göre hazırlanan sentetik evsel atıksuyun karakterizasyonu Çizelge 4.2 :'de verilmektedir.

Çizelge 4.2 : Sentetik atıksu karakterizasyonu.

Parametre	Birim	Değer (Ortalama ± Std.Sapma)
Toplam KOİ	mg/L	540±44
Çözünmüş KOİ	mg/L	450±45
Toplam Katı Madde (TKM)	mg/L	959±160
Askıda Katı Madde (AKM)	mg/L	250±35
Toplam Azot (TN)	mg/L	56±5
Toplam Kjeldahl Azotu (TKN)	mg/L	55±6
NH_4	mg/L	36±8
NO_2	mg/L	0,06±0,03
NO_3	mg/L	0,16±0,1
Toplam Fosfor (TP)	mg/L	11,9±0,8
pH	-	7,5±0,1
Bulanıklık	NTU	115±10

4.1.2 Çamur karakterizasyonu

Laboratuvar ölçekli MBR sisteminde kullanılan aşı çamuru İSKİ Paşaköy Biyolojik Arıtma Tesisi aktif çamur ünitesinin geri devir hattından alınmıştır. Aşı çamurunun karakterizasyonu Çizelge 4.3 :'te verilmektedir.

Çizelge 4.3 : Aşı çamuru karakterizasyonu.

Parametre	Birim	Değer (Ortalama ± Std.Sapma)
Toplam KOİ	mg/L	11490 ± 64
TKM	mg/L	27000 ± 1585
Toplam Uçucu Katı Madde (TUKM)	mg/L	15920 ± 839
TUKM/TKM	-	0,59 ± 0,1
AKM	mg/L	13585 ± 378
Uçucu Askıda Katı Madde (UAKM)	mg/L	8490 ± 311
UAKM/AKM	-	0,62 ± 0,1
pH	-	6,5 ± 0,7

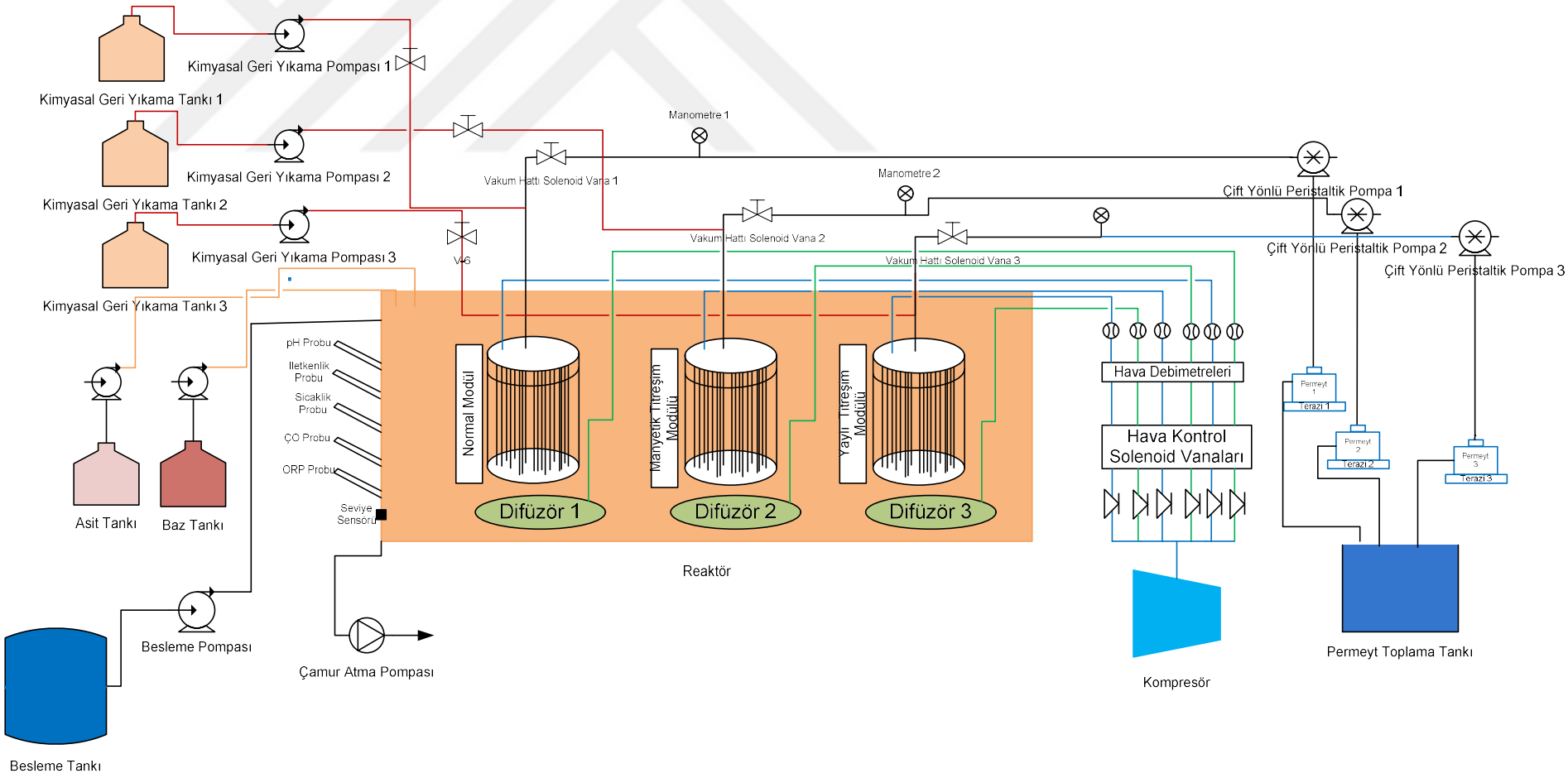
4.1.3 Laboratuvar ölçekli MBR sistemi

Laboratuvar ölçekli arıtılabilirlik çalışmaları kapsamında, verilen akım şemasına (Şekil 4.1 :) uygun olarak MBR sistemi kurulmuş ve bu sistemde deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Söz konusu sisteme, özel olarak tasarlanan ve üretilen membran modülleri yerleştirilmiş ve her bir membran modülünün arıtma performansı belirlenmiştir.

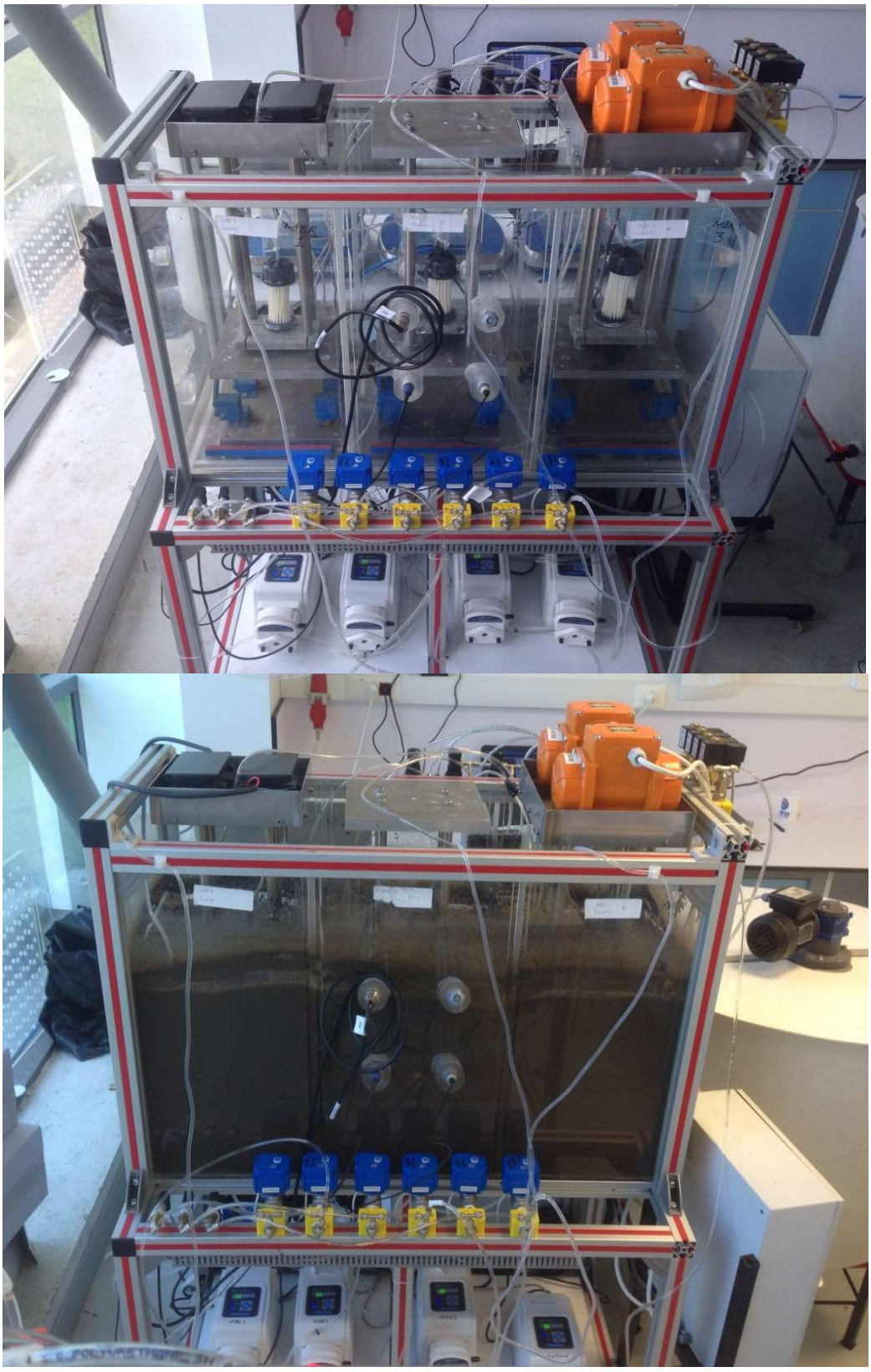
Laboratuvar ölçekli çalışmalarda kullanılan MBR prosesi tam otomasyon SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) sistemi ile kontrol edilmiştir. MBR sistemi, aynı anda üç farklı modül tipini test etmeye imkan verecek şekilde tasarlanmıştır. Kullanılan titreşim sistemleri aşağıda sıralanmıştır:

- Titreşim uygulanmayan ince boşluklu (hollow fiber) membran modülü (kontrol amaçlı)
- Manyetik alan kullanılarak titreşim uygulanan ince boşluklu membran modülü
- Mekanik titreşim uygulanan ince boşluklu membran modülü

Bu modüllerde polietersülfon (PES), poliakrilonitril (PAN) ve güçlendirilmiş (ticari) membranlar kullanılmıştır. Üç modül aynı reaktör içerisine yerleştirilmiştir. MBR sisteminin görünümü Şekil 4.2 :-Şekil 4.3 :'da verilmektedir. MBR sisteminin teknik özellikleri ise Çizelge 4.4 :'te özetlenmektedir.



Şekil 4.1 : Laboratuvar ölçekli MBR sisteminin akım şeması.



Şekil 4.2 : Laboratuvar ölçekli MBR sisteminin boş (üstte) ve aşı çamuru doldurulduktan sonraki genel görünümü (altta).

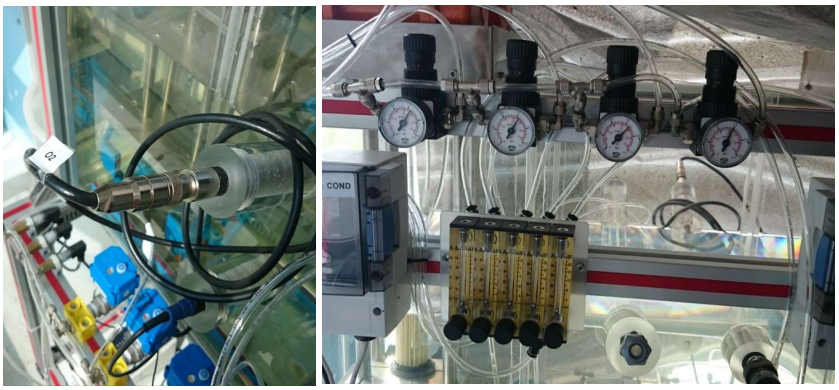
Şekil 4.3 : Laboratuvar ölçekli MBR sisteminin genel görünümü.

Çizelge 4.4 : MBR sisteminin teknik özellikleri.

Birim	Değer
Besleme tankı kapasitesi	300 L
Peristaltik pompa debisi	1-250 mL/dk
Reaktör boyutları	Genişlik: 30 cm, Uzunluk: 90 cm, Derinlik: 60 cm

Reaktör içerisinde pH, ORP (Oksidasyon Redüksiyon Potansiyeli), sıcaklık ve çözünmüş oksijen değerlerinin ölçülebilmesi için dört adet prob bulunmaktadır. Ölçülen değerler, reaktörün bağlı olduğu SCADA sisteminde eş zamanlı olarak kaydedilmiştir.

Çözünmüş oksijen probunun (Hamilton ARC, P/N 355219/1514) görünümü Şekil 4.4 :'te verilmiştir. Çözünmüş oksijen probu, reaktör içerisindeki oksijen seviyesini anlık olarak ölçebilmektedir. MBR içerisinde istenen oksijen konsantrasyonu SCADA sistemine girilmektedir. Oksijen konsantrasyonu istenen değerin altına düştüğünde, reaktör içerisinde bulunan difüzörler devreye girerek reaktörü havalandırmakta ve oksijen istenilen konsantrasyona geldiğinde havalandırıcılar otomatik olarak durmaktadır.



Şekil 4.4 : Çözünmüş oksijen probunun ve havalandırma vanalarının görünümü.

MBR'nin altını tamamen kaplayan difüzörlere verilen hava debisi, hava hattına bağlı olan vanalarla ayarlanmaktadır. Havalandırma vanalarının görünümü Şekil 4.4'de verilmektedir. pH probu (Olean PH5500), MBR içerisindeki anlık pH değerlerini ölçmektedir (Şekil 4.5 :). Reaktör içerisinde olması istenen pH aralığı, probun bağlı olduğu SCADA sistemi vasıtasıyla ayarlanabilmektedir.

Şekil 4.5 : pH probunun görünümü.

Sistemde bir adet asit ve baz pompası bulunmaktadır. Asit ve baz pompaları, asit ve baz besleme tankına bağlıdır. Bu pompalar kullanılarak, reaktör içerisindeki pH değeri istenilen değerin üzerine çıkarsa asit, altına inerse baz pompaları devreye girerek sisteme asit veya baz dozlaması yapmak suretiyle pH istenilen seviyelerde tutulmuştur. MBR sisteminde pH seviyesinin 6,5-7,5 arasında kalması istenmektedir. Asit beslemesi için 0,1 N HCl, baz beslemesi için ise 0,1 N NaOH çözeltisi kullanılmıştır. Asit ve baz pompalarının görünümü Şekil 4.6 :'de verilmektedir.

Şekil 4.6 : Asit ve baz pompalarının görünümü.

MBR sistemindeki ORP probunun (OLEAN ORP5500) görünümü Şekil 4.7'da verilmektedir. ORP probu ile sistemdeki oksidasyon ve redüksiyon gücünün ölçüsü olan ORP online olarak izlenebilmektedir. MBR sisteminde bulunan sıcaklık probu (1XPT1000, P/N120T158-033) ile reaktör içerisindeki sıcaklık değeri ölçülebilmektedir. Sıcaklık probunun görünümü Şekil 4.7 :'da verilmektedir.

Şekil 4.7 : Sıcaklık (solda) ve ORP (sağda) probunun görünümü.

MBR'de basıncın ölçülerek istenilen değerde sabitlenmesini sağlamak amacıyla Keller marka (23E model) dıştan diyaframlı basınç ölçer kullanılmıştır. Basınç transmitteri 0-10 bar aralığındaki basınca dayanıklı olup, 0-4 bar aralığında ölçüm yapabilmektedir. Ölçülen veriler, 4-20 mA aralığında online olarak SCADA yazılımına aktarılabilmektedir. Basınç ölçerin görünümü Şekil 4.8 :'de verilmektedir.

Şekil 4.8 : Basınç ölçerlerin (solda) ve iletkenlik probunun (sağda) görünümü.

MBR sisteminde iletkenlik değerinin online ölçümünün yapılabilmesi için bir adet iletkenlik probu (OLEAN CON5500) bulunmaktadır. İletkenlik probunun görünümü Şekil 4.8'de verilmektedir. MBR sisteminde elde edilen süzüntü hassas terazi üzerinde bulunan kaplarda toplanmaktadır. Bu terazi yardımı ile süzüntü miktarı kayıt altında tutulmuştur. Toplanan süzüntü miktarı, birim zaman ve birim membran alanı ile orantılanarak akı değeri elde edilmiştir.

Membrandan çekilen süzüntü miktarları vakum pompaları (Longer Pump BT 100, Çin) ile ayarlanabilmektedir. Bu yöntemde, SCADA sisteminde vakum pompasının istenilen kapasitede çalışması sağlanarak akı kontrol edilmektedir. MBR sisteminde, her membran modülü için bir adet olmak üzere toplamda üç adet vakum pompası bulunmaktadır. Süzüntülerin toplandığı teraziler ve vakum pompalarının görünümü sırasıyla Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'te verilmektedir.

Şekil 4.9 : Terazilerin görünümü.

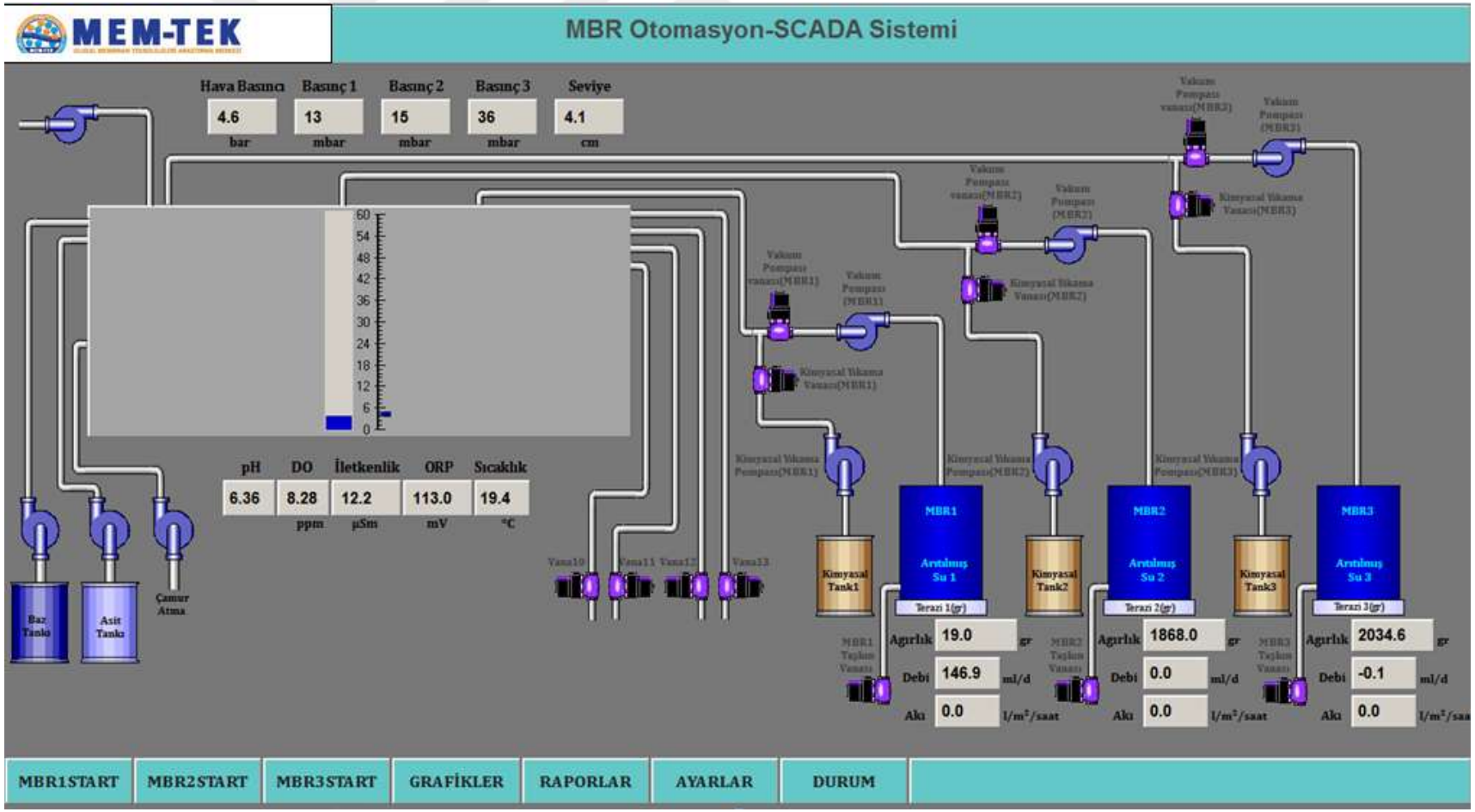
Vakum pompaları membrandan süzüntüyü çekmenin yanı sıra, belirli aralıklarla (10 dakikada 1 sefer: 9,5 dk süzme, 0,5 dk geri yıkama) süzüntü suyunu kullanarak membranlarda geri yıkamanın yapılmasında da kullanılmaktadır. SCADA sistemine girilen belirli sürede, vakum pompası normal çalışma yönününün tersine çalışarak vakum yerine yıkama işlemini gerçekleştirmektedir. Böylece tıkanmaların bir kısmı önlenmekte ve membranın süzme verimi istenilen seviyelerde kalmaktadır. Besleme ve vakum pompaları peristaltik olup, 1-250 mL/dk debi aralığında çalışmaktadır (Şekil 4.10 :).

Şekil 4.10 : Vakum pompalarının görünümü.

Laboratuvar ölçekli sistemde, vakum pompalarıyla aynı özellikte olan bir adet besleme pompası (Longer Pump BT 100, Çin) bulunmaktadır. Şekil 4.11 :'te besleme pompası görülmektedir. Sistemdeki çamur yüksekliği, seviye sensörü (İfm, PL2658) aracılığıyla kontrol edilmektedir. Bu sensörler yardımı ile reaktördeki seviye anlık olarak ölçülebilmektedir. Çamur seviyesi istenilen değeri geçtiğinde, seviye sensörü otomatik olarak bu durumu algılayarak taşma sinyalini devreye sokmakta ve sisteme besleme yapılmasını durdurmaktadır. Seviye sensörünün görünümü Şekil 4.11'de verilmektedir.

Şekil 4.11 : Besleme pompasının ve seviye sensörünün görünümü.

MBR'de istenilen çamur yüksekliği seviyesi SCADA sistemine girilerek reaktörde seviye kontrolü yapılabilmektedir. Reaktörden süzüntü suyu çekildikçe, seviye girilen değerin altına düşmekte ve sistem otomatik olarak besleme pompalarını çalıştırmaktadır. Besleme pompaları, seviye tekrar istenen değere gelene kadar çalışmasını sürdürmekte ve istenen yükseklik sağlandığında besleme pompaları otomatik olarak durmaktadır. Laboratuvar ölçekli MBR sisteminin SCADA ana ekranı Şekil 4.12'de görülmektedir. SCADA ekranında tüm sistemin akım şeması görülebilmekte ve üniteler ile ilgili işletme parametreleri gerektiğinde bu ekrandan değiştirilebilmektedir. Geri yıkama, kimyasal dozlama, vanaların açılıp kapanması ve basıncın ayarlanması gibi bütün işlemler SCADA kontrol sistemi vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir.



Şekil 4.12 : MBR Sistemi SCADA ana ekran görünümü.

4.1.4 Deneysel plan

Güçlendirilmiş ince boşluklu fiber membranlar kullanılarak hazırlanan modüllerde mekanik ve manyetik titreşim uygulanan sistemlerle, titreşimsiz sistem (kontrol) birlikte çalıştırılmıştır. Laboratuvar ölçekli çalışmalarda titreşimli membran modülleri Çizelge 4.5 :'de verilen 3 farklı koşulda, daha sonrasında da titreşim sistemlerinin maksimum frekansında test edilmiştir. Ayrıca 3 aşama deneyi tamamlandıktan sonra membranlar kritik akılarının üzerinde çalıştırılarak test edilmiş ve TMP değişimi 20 gün boyunca izlenmiştir. Öncelikle manyetik titreşim sistemi 30 Hz, mekanik titreşim sistemi 5 Hz olacak şekilde MBR sistemi işletilmiştir (1. aşama). Bu aşamada manyetik sistemde başarılı sonuçlar elde edildiğinden, 2. ve 3. aşamada manyetik titreşim sistemi 30 Hz'de sabit tutulmuştur. Mekanik titreşim sisteminin frekansı 2. aşamada 30 Hz'e çıkarılmıştır. 3. aşamada mekanik titreşim sisteminin frekansı öncelikle 50 Hz'e yükseltilmiştir. Ancak bu frekansta yüksek şiddetteki titreşimler sebebiyle motorların vidaları gevşemiş ve motorları taşıyan direklerden 2'si yerinden çıkarak reaktör içerisine düşmüştür. Motorlar eksik 2 direk sebebiyle reaktör içerisine doğru eğilmiş ve çalışmaz duruma gelmiştir. Bununla birlikte mekanik sistem hasar görmüştür. Sistemin hasar gördükten sonraki görüntüleri Şekil 4.13 :'da verilmiştir.

Şekil 4.13 : Hasar görmüş mekanik titreşim sistemine ait görünümler.

Mekanik sistem hasar gördükten sonra, reaktör içinden çıkarılarak tamir ettirilmiştir. Daha sonra mekanik titreşimli sistemin frekansı 20 Hz'e düşürülmek suretiyle 3. aşama çalışmaları tekrar başlatılmıştır. 3 aşamalı deney sona erdikten sonra 20 gün boyunca ek deney olarak, titreşim sistemlerinin maksimum çalışabildiği frekanslar ile,

manyetik titreşimli sistem 150 Hz ile mekanik titreşimli sistem ise 30 Hz ile çalıştırılmıştır.

Çizelge 4.5 : Farklı aşamalarda manyetik ve mekanik titreşim sistemlerinde test edilen frekans değerleri.

	Manyetik Titreşim Sistemi	**Mekanik Titreşim Sistem**
1. Aşama (Frekans)	30 Hz	5 Hz
2. Aşama (Frekans)	30 Hz	30 Hz
3. Aşama (Frekans)	30 Hz	20 Hz
4. Ek Deneyler (Frekans)	150 Hz	30 Hz

Her bir aşama başlangıcından önce kullanılacak olan membran modülleri saf su ile permeabilite testine tabi tutulmuş ve membran dirençleri belirlenmiştir. Membran performansları birbirine en yakın çıkan üç adet membran modülü MBR içine yerleştirilerek her bir modül için kritik akı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sistem, kritik akı deney sonuçlarına göre seçilen akıda işletilmiştir.

Uzun dönem laboratuvar ölçekli çalışmaları sonrasında, sistemde farklı frekans değerlerinin kritik akı üzerindeki etkisini gözlemleyebilmek amacıyla kritik akı çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Dört farklı deney seti olarak gerçekleştirilen kritik akı deneyleri için seçilmiş olan frekans değerleri Çizelge 4.6 :'da verilmektedir.

Çizelge 4.6 : Kritik akı deneylerinde uygulanan frekanslar.

Deney Seti	**Sistem**	**Frekans Değerleri (Hz)**
1	Titreşimsiz	-
	Manyetik	0
	Mekanik	0
2	Titreşimsiz	-
	Manyetik	30
	Mekanik	5
3	Titreşimsiz	-
	Manyetik	75
	Mekanik	20
4	Titreşimsiz	-
	Manyetik	150
	Mekanik	30

4.1.5 İşletme koşulları

Laboratuvar ölçekli MBR ünitesi aerobik şartlarda sürekli olarak işletilmiştir. MBR sistemi sentetik evsel atıksu ile beslenmiştir. Sistemin işletilmesinde kullanılan işletme parametrelerinin değerleri Çizelge 4.7 ’de verilmiştir.

Çizelge 4.7 : MBR sisteminin işletme parametreleri.

İşletme parametreleri	**1. Aşama**	**2. Aşama**	**3. Aşama**
Manyetik Sistem Titreşim Frekansı (Hz)	30	30	30
Mekanik Sistem Titreşim Frekansı (Hz)	5	30	20
Akı (L/m^2-sa)	25	25	25
Hidrolik bekleme süresi (HRT) (sa)	12	12	12
Çamur Yaşı (SRT) (gün)	∞	∞	∞
Çözünmüş oksijen (ÇO) (mg/L)	4,9±0,5	6,7±0,8	7,8±0,7
İletkenlik (µS/cm)	403±23	502±27	624±71
Sıcaklık (°C)	22±2	21±1	20±1
ORP (mV)	220±13	235±19	201±15
pH	6,5±0,3	7,2±0,2	7±0,3
Süzüntü üretim süresi (s)	570 (her 10 dakikada 9,5 dakika süzüntü üretimi)	570 (her 10 dakikada 9,5 dakika süzüntü üretimi)	570 (her 10 dakikada 9,5 dakika süzüntü üretimi)
Rutin geri yıkama süresi (s)	30 (9,5 dakikalık süzüntü üretimi sonrasında 0,5 dakika rutin geri yıkama)	30 (9,5 dakikalık süzüntü üretimi sonrasında 0,5 dakika rutin geri yıkama)	30 (9,5 dakikalık süzüntü üretimi sonrasında 0,5 dakika rutin geri yıkama)

4.1.6 Analiz metotları

Çalışma süresince laboratuvar ve pilot ölçekli sistemlerde arıtma ve filtrasyon performanslarının izlenmesi için Çizelge 4.8 :’de belirtilen analizler yapılmıştır. MBR

sistemlerinin işletimi sırasında; giriş atıksuyunda, reaktör içerisinde ve reaktörün süzüntü akımında çeşitli analizler belirli sıklıklarla gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.8 : Laboratuvar ve pilot ölçekli MBR sistemlerinin işletiminde ölçülen parametreler, ölçüm noktaları ve ölçüm sıklıkları.

Parametre	**MBR giriş akımı**	**MBR süzüntü akımı**	**MBR**
Sıcaklık			Online olarak sürekli
pH	7 gün/hafta	7 gün/hafta	Online olarak sürekli
Çözünmüş oksijen			Online olarak sürekli
İletkenlik*	7 gün/hafta	7 gün/hafta	Online olarak sürekli
Giriş debisi (Q_g)	7 gün/hafta	-	-
Süzüntü debisi (Q_p)	-	Online olarak sürekli	-
Havalandırma debisi (Q_h)	-	-	Online olarak sürekli
TMP	-	Online olarak sürekli	-
Akı	-	Online olarak sürekli	-
Çamur hacim indeksi (SVI)	-	-	1 gün/hafta
KOİ	3 gün/hafta	3 gün/hafta	-
Çözünmüş KOİ	3 gün/hafta	3 gün/hafta	-
AKM	3 gün/hafta	3 gün/hafta	-
TKM	3 gün/hafta	3 gün/hafta	-
NO_3-N	Belirli aralıklarla	Belirli aralıklarla	-
NO_2-N	Belirli aralıklarla	Belirli aralıklarla	-
NH_4-N	Belirli aralıklarla	Belirli aralıklarla	-
TKN*	Belirli aralıklarla	Belirli aralıklarla	-
TN	Belirli aralıklarla	Belirli aralıklarla	-
TP	Belirli aralıklarla	Belirli aralıklarla	-
Bulanıklık	1 gün/hafta	1 gün/hafta	1 gün/hafta
PSD	1 gün/hafta	1 gün/hafta	1 gün/hafta
ORP			Online olarak sürekli

*:Bu parametreler sadece laboratuvar ölçekli sistemde ölçülmüştür.

4.1.6.1 Toplam ve çözünmüş KOİ

KOİ parametresi Standart Metot (APHA, 2005)'a göre ölçülmüştür. Çözünmüş KOİ ölçümü yapılacak olan numuneler 0,45 µm'lik şırınga filtrelerden geçirilmiştir. KOİ analizinde ısıtma amacıyla termoreaktör (Hach Lange DRB2000) kullanılmıştır. KOİ konsantrasyonu spektrofotometre (HACH DR5000) ile belirlenmiştir.

4.1.6.2 Amonyum azotu (NH_4–N)

Amonyum azotu ölçümü Standart Metot (APHA, 2005)'a göre belirlenmiştir. Amonyum azotu konsantrasyonu HACH DR 5000 cihazında 694 nm dalga boyunda ölçülmüştür.

4.1.6.3 Nitrat azotu (NO_3-N)

Nitrat azotu ölçümü, kadmiyum indirgenme metoduna (APHA, 2005) göre, DR 5000 Hach Spektrofotometrede, 500 nm dalga boyunda gerçekleştirilmiştir.

4.1.6.4 Nitrit azotu (NO_2-N)

Nitrit azotu, diazotizasyon metoduna (APHA, 2005) göre, DR 5000 Hach Spektrofotometrede, 530 nm dalga boyunda ölçülmüştür.

4.1.6.5 Toplam kjeldahl azotu (TKN)

TKN konsantrasyonu titrimetrik yöntemle NH_3-N cinsinden belirlenmiştir (APHA, 2005).

4.1.6.6 Toplam azot (TN) analizi

Toplam azot, ayrı ölçümler ile tayin edilen toplam Kjeldahl azotu (NH_3-N olarak), NO_2-N ve NO_3-N'in toplam miktarı olarak belirlenmiştir.

4.1.6.7 Toplam fosfor (TP)

Toplam fosfor analizi Standart Metot (APHA, 2005)'a göre, DR 5000 Hach Spektrofotometrede, 507 nm dalga boyunda ölçülmüştür.

4.1.6.8 Bulanıklık

Bulanıklık parametresi bulanıklık ölçer (WTW marka Turb 550 model) kullanılarak NTU biriminde ölçülmüştür.

4.1.6.9 Askıda katı madde (AKM)

AKM analizi, Standart Metot (APHA, 2005)'a göre tayin edilmiştir.

4.1.6.10 Uçucu askıda katı madde (UAKM)

UAKM parametresi gravimetrik olarak belirlenmiştir (APHA, 2005).

4.1.6.11 Toplam çözünmüş katı madde (TÇK)

TÇK parametresi Standart Metot'a göre tayin edilmiştir (APHA, 2005).

4.1.6.12 Çamur hacim indeksi (SVI)

SVI ölçümü, çamur numunesi içerisindeki çökebilir katı maddelerin miktarının/oranının gravimetrik veya hacimsel yöntemlerle tespit edilmesine dayanmaktadır. SVI ölçümü hacimsel yöntem ile yapılmıştır (APHA, 2005).

4.1.6.13 SEM-EDS analizi

Kullanılmış membranların morfolojik özelliklerindeki değişimin belirlenmesi amacıyla Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağılımlı X-Işını Spektrofotometrisi (EDS) analizleri yapılmıştır. Ölçümler FEI Quanta FEG 200 marka elektron mikroskobu ve EDAX METEK marka EDS cihazı ile yapılmıştır. Elektron mikroskobu ile numune görüntülerine bakılmadan önce, numuneler altın-palladyum ile 3-4 nm kalınlıkta kaplanmıştır. Kaplama işlemi Quorum SC7620 marka cihaz ile gerçekleştirilmiştir.

4.1.6.14 PSD analizi

Partikül boyutu dağılımı (PSD) analizleri, mikron boyutunda partiküllere sahip çamur numuneleri için Malvern MasterSizer 2000 cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Süzüntü numunelerinde ise bu ölçümler Malvern NanoSizer S90 cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Ölçüm aralığı MasterSizer cihazı için 0,1-10000 µm, NanoSizer cihazı için 0,1-10000 nm'dir.

4.1.6.15 Akı

Akı, birim zamanda membranın birim alanından geçen akım miktarı olarak tarif edilir. Akı m^3/m^2.sn veya L/m^2.sa gibi birimlerle ifade edilmektedir.

$$J = \frac{Q_{süzüntü}}{A_{membran}} \quad (4.1)$$

Burada;

- J: Su akısı (L/m^2-sa)
- $Q_{süzüntü}$: Süzüntü debisi (L/sa)
- $A_{membran}$: Membran yüzey alanı (m^2).

4.1.6.16 Permeabilite deneyi

Filtrasyon başlangıcında temiz su akısı Darcy kanununa göre aşağıdaki ilişki ile ifade edilmektedir (Eren, 2006) (4.2).

$$J = \frac{\Delta P}{\mu . R_m} \quad (4.2)$$

Burada,

J : Akı,

ΔP : Membrandaki basınç farkı,

μ : Akışkanın vizkositesi,

R_m : Membran direnci

dir. Denklemden de anlaşılacağı üzere filtrasyonda, membrandan geçen süzüntü akımı, membrana uygulanan basınç (ΔP) ile doğru orantılıdır.

4.1.6.17 Kritik akının belirlenmesi

Kritik akının belirlenmesinde literatürde kullanılan en yaygın yöntem kademeli akı metodudur (Field ve diğ., 1995; Le-Clech ve diğ., 2003a,b; Yiğit, 2007). Bu nedenle, kritik akı ölçümünde kademeli akı metodu kullanılmıştır. Bu metotta, 15'er dakikalık her kademe işletiminde, 5 L/m^2-saat süzüntü suyu akısından başlayarak kademeli olarak 5'er L/m^2-sa akı arttırımıyla filtrasyon yapılmaktadır. Her akı kademesi sonunda, geri dönüşümlü tıkanmanın müteakip kademeye yansımaması için 60 sn süreyle geri yıkama uygulanır. Her kademe için akı arttırımı süzüntü suyu vakum pompasının motor devri arttırılarak sağlanmaktadır. Her kademenin başında ve

sonunda tıkanma göstergesi olan TMP ölçülmekte ve kaydedilmektedir. Her kademede sağlanması gereken akı için gerekli pompa motor devri deney öncesi yapılan testlerde tayin edilir ve gerekli kalibrasyon yapılır. Her akı kademesinde başlangıç TMP artışı, TMP artış hızı (veya tıkanma hızı, 0-15 dakika arası), ortalama TMP, permeabilite ve toplam direnç (R_t) (seri direnç modeli kullanılarak) ölçülür ve/veya hesaplanır (Denklem 4.3-4.6). Kritik akı hesaplamasında kullanılan bağıntılar aşağıda gösterilmiştir.

Başlangıç TMP artışı: $$\Delta Po = TMP_i^n - TMP_f^{n-1} \quad (4.3)$$

TMP artış hızı: $$\frac{dP}{dt} = \frac{TMP_f^n - TMP_i^n}{t_f^n - t_i^n} \quad (4.4)$$

Ortalama TMP: $$P_{ave} = \frac{TMP_f^n + TMP_i^n}{2} \quad (4.5)$$

Kademe akısı: $$J = \frac{Q_{süzüntü}}{A_{membran}} \quad (4.6)$$

Burada:

- n: kademe numarası
- TMP_i^n: n. kademe t=0 TMP değeri (mbar)
- TMP_f^{n-1}: (n-1). kademe t=15 dk TMP değeri (mbar)
- t: zaman (dk)
- J: kademe akısı (L/m^2-sa)
- $Q_{süzüntü}$: süzüntü suyu debisi (L/sa)
- $A_{membran}$: kullanılan modülün nominal membran yüzey alanı (m^2).

4.1.6.18 Membran dirençlerinin belirlenmesi

Membran direnci, membran materyalinin kendisinden, por çapı yüzey porozitesinden ve membran kalınlığından kaynaklanmaktadır (Judd, 2006). Membran direnci permeabilite deneyinde kullanılan denklemde (4.2) R_m değeri çekilerek hesaplanmıştır.

4.1.6.19 Membran modüllerine uygulanan temizlik prosedürü

Çalışmada kullanılan membran modüllerine her aşama sonrasında fiziksel ve kimyasal temizlik işlemleri uygulanmıştır. Her bir yıkama aşaması sonunda permeabilite deneyleri yapılarak tıkanmaya sebep olan kek direnci ve por tıkanmasına ait yüzde miktarları belirlenmiştir. Yıkama işlemi üç ayrı basamaktan oluşmaktadır:

1. Basamak: Kek direncinin belirlenmesi:

Yıkamanın ilk aşamasında membran yüzeyinde biriken kek tabakasının giderilmesi amacıyla membran yüzeyi musluk suyu ile yıkanmıştır. Sonrasında ise membranların permeabilitesi ve direnci belirlenmiştir.

2. Basamak: NaOCl ile giderilebilen direncin belirlenmesi:

Bu basamakta modüller %2 NaOCl çözeltisi içerisinde 30 dakika bekletilmiş ve sonrasında membranların permeabilitesi ve direnci belirlenmiştir.

3. Basamak: Sitrik Asit ile giderilebilen direncin belirlenmesi:

Bu basamakta modüller %8 sitrik asit çözeltisi içerisinde 60 dakika bekletilmiş ve sonrasında membranların permeabilitesi ve direnci belirlenmiştir.

Tüm bu işlemler sonucunda elde edilen direnç ile temiz membran direnci arasındaki fark da geri kazanılamayan direnç olarak tanımlanmıştır.

4.2 Filtrasyon Performansı Değerlendirmesi

4.2.1 Güçlendirilmiş içi boşluklu fiber membran modüllerinin performansı

PES ve PAN polimerlerden üretilen membranların modül haline getirilmesi sırasında ve sonrasında problemler ile karşılaşılmıştır. Bundan dolayı, modüllerin titreşimli sistemlerde kullanımı mümkün olmamıştır. Bu nedenle, laboratuvar ölçekli MBR denemelerinde güçlendirilmiş membranlar kullanılmış olup, bu membranlar ile üretilmiş modüllerden elde edilen permeabilite ve saf su membran direnç değerleri Çizelge 4.9'da belirtilmiştir. Çalışmanın 1. aşamasında yeni membranlar kullanılmış, 1. aşama işletme periyodu sonunda membranlarda gerçekleştirilen temizleme aşamalarından sonra geri kazanılamayan direnç gözlenmesi sonucu bu membranlar 2. aşamada tekrar kullanılmamıştır. Bu nedenle 2. ve 3. aşamalarda yeni membranlar kullanılmıştır. Çizelge 4.9'da görüldüğü üzere permeabilite değerleri 1. aşamada 1104-1324 L/m^2.sa.bar, 2. aşamada 904-1105 L/m^2.sa.bar, 3. aşamada 510-587

L/m^2.sa.bar aralığında; direnç değerleri ise 1. aşamada 2,99-3,59*10^{11} m^{-1}, 2. aşamada 3,75-4,58*10^{11} m^{-1}, 3. Aşamada 5,67-6,36*10^{11} m^{-1} aralığında değişmiştir.

Çizelge 4.9 : 1., 2. ve 3. aşama deneylerinde kullanılan güçlendirilmiş membran modüllerine ait permeabilite ve direnç sonuçları.

1. Aşamada Kullanılan Modüller	**Ortalama Permeabilite Değerleri (L/m^2.sa.bar)**	**Ortalama Direnç Değerleri (m^{-1})**
Modül-1	1104 ± 95	3,59 ± 0,31*10^{11}
Modül-2	1242 ± 9	3,11 ± 0,03*10^{11}
Modül-3	1324 ± 90	2,99 ± 0,20*10^{11}
2. Aşamada Kullanılan Modüller		
Modül-4	1014 ± 17	4,08 ± 0,07*10^{11}
Modül-5	1105 ± 33	3,75 ± 0,11*10^{11}
Modül-6	904 ± 28	4,58 ± 0,15*10^{11}
3. Aşamada Kullanılan Modüller		
Modül-7	532 ± 7	6,18 ± 0,01*10^{11}
Modül-8	587 ± 86	5,67 ± 0,97*10^{11}
Modül-9	510 ± 14	6,36 ± 0,01*10^{11}

4.2.2 Kritik akının belirlenmesi

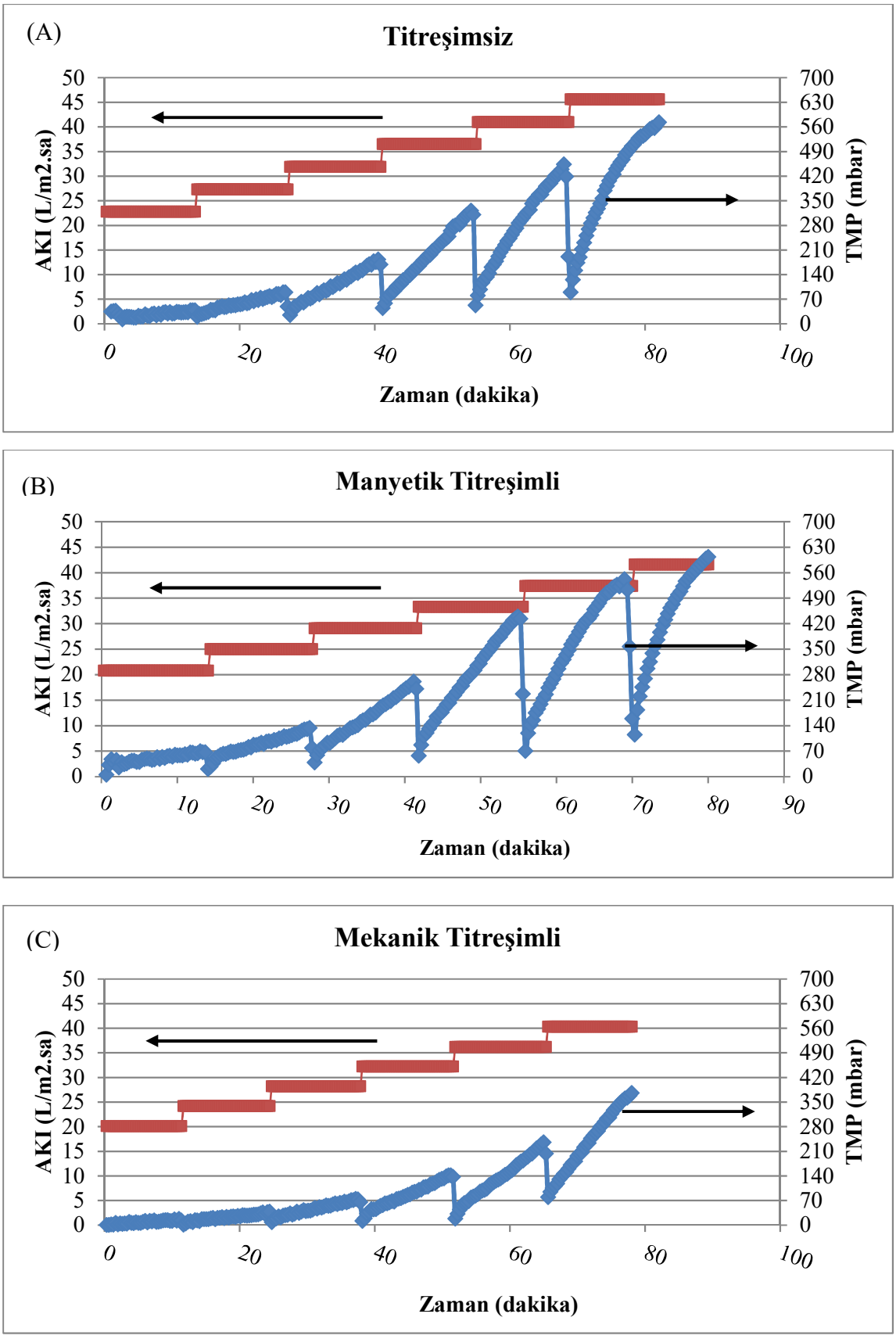
İşletme akısı, reaktör içerisinde aktif çamur içine yerleştirilen modüllerde gerçekleştirlen kritik akı deney sonuçlarına göre belirlenmiştir. Titreşim sistemleri kapalıyken, titreşimsiz, manyetik ve mekanik titreşim uygulanacak membran modüllerinde kritik akı deneyleri yapılmış ve elde edilen veriler grafik olarak sırasıyla Şekil 4.14'de verilmektedir.

Kritik akı değerleri Çizelge 4.10'de her üç modül için verilmiştir. Değerler incelendiğinde 31,9-36,5 L/m^2.sa aralığında olduğu görülmektedir. Bu değerler göz önüne alındığında tüm modüller için uzun dönemli işletme akısı, kritik akının altında kalacak şekilde 25 L/m^2.sa olarak seçilmiştir.

Çizelge 4.10 : Modüllerin laboratuvar ölçekli çalışma öncesi kritik akı deney sonuçları.

Modül	**Kritik akı, L/m^2.sa**
Titreşimsiz Modül	31,9
Manyetik Titreşimli Modül *	35,5
Mekanik Titreşimli Modül *	36,2

* *: Kritik akı deneyleri bu modüller titreşimsiz haldeyken gerçekleştirilmiştir.*



Şekil 4.14 : (A) Titreşimsiz modül, (B) Manyetik titreşimli modül ve (C) Mekanik titreşimli modülün titreşimler kapalı iken krtik akı grafikleri.

4.2.3 Uzun dönemli deneylerde TMP değişimi

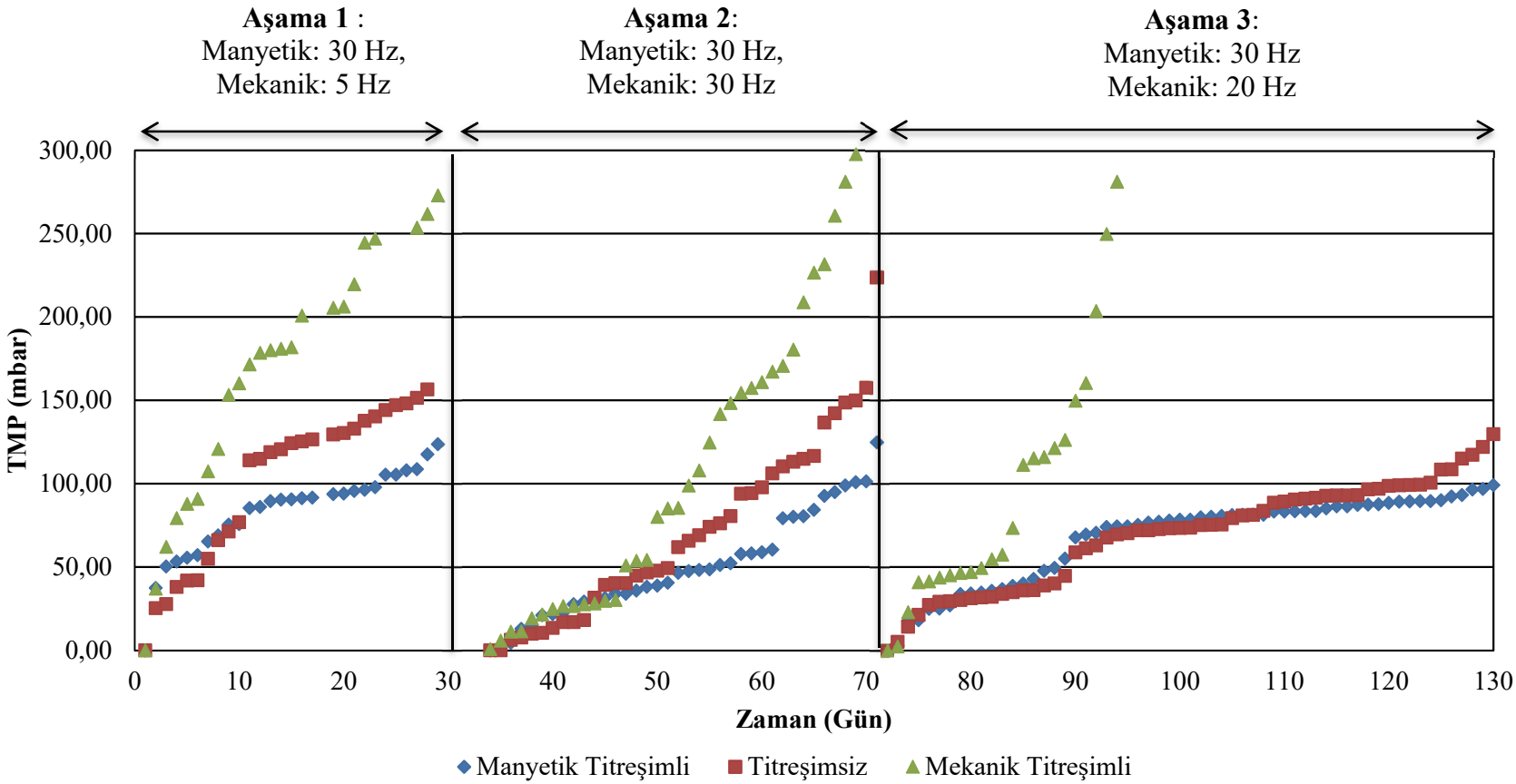
Laboratuvar ölçekli sistemin işletilmesi esnasında, akı değeri sabit tutulmuş ve TMP değerleri sürekli izlenmiştir. Titreşimsiz, manyetik ve mekanik titreşimli modüllerdeki TMP değişimi Şekil 4.15'de verilmektedir.

TMP profili grafiği incelendiğinde tüm aşamalarda; mekanik titreşimli modülün ortalama vakum basıncı 188,2±113,6 mbar, manyetik titreşimli modülün ortalama 66,8±27,6 mbar ve titreşimsiz modulün ise ortalama 80,1±43,5 mbar olarak ölçülmüştür. Ayrıca 3. Aşama sonrasında manyetik ve mekanik titreşimli sistemlerle ek deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde frekans değerleri sistemlerin ulaşabildiği maksimum frekans değerleri olan mekanik titreşim için 30 Hz, Manyetik titreşim için 150 Hz olarak ayarlanmıştır. 20 gün süren bu deneylerde, mekanik titreşimli sistemde vakum basıncı 41,6±18,9 mbar, manyetik titreşimli sistemde ise 11,1±4,9 mbar olarak gerçekleşmiştir. Bu son deneylerle beraber bütün TMP grafiği incelendiğinde en düşük TMP değerleri 150 Hz frekanstaki manyetik titreşimli sistem ile ulaşılmıştır. Filtrasyon performansı açısından değerlendirildiğinde, manyetik titreşimli modülün en iyi sonucu verdiği görülmektedir. Mekanik titreşimli sistemlerde elde edilen TMP değerleri titreşimsiz (kontrol) sistemdeki değerlerden daha yüksektir. Mekanik titreşimli sistemde yüksek TMP değerlerinin elde edilmesi, bu titreşim türünün membran yüzeyindeki büyük floklu kek tabakasını engelleyecek şekilde olması ve buna bağlı olarak por tıkanmasının artmasının desteklenmesi ile ilişkilendirilebilir. Manyetik titreşim türünün ise kek tabakasını mekanik titreşim kadar etkilemediği ve por tıkanmasını geciktirdiği düşünülmektedir.

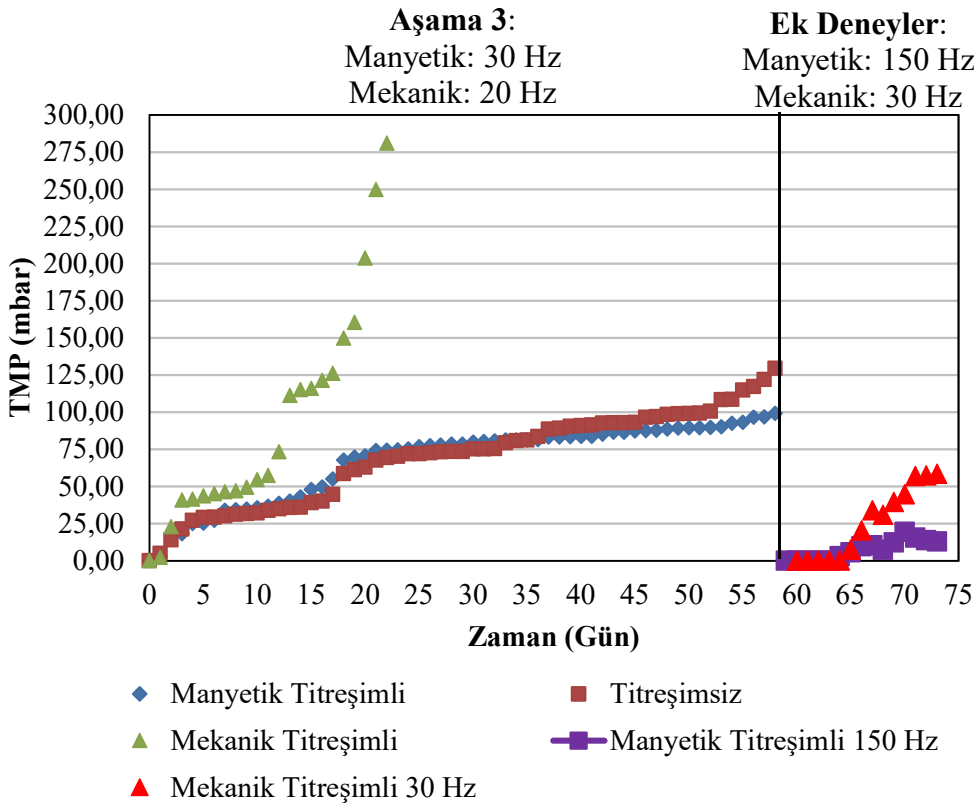
Her üç aşamaya bakıldığında deneyin başlangıcında özellikle titreşimsiz ve manyetik sistem olmak üzere her üç sistem için benzer giden TMP artış eğiliminin belirli bir süre geçtikten sonra manyetik titreşimli modülde en avantajlı hale geldiği görülmektedir. Bu durum, manyetik titreşimin olumlu etkisinin özellikle uzun dönemde daha etkin bir şekilde ortaya çıktığını göstermektedir.

4.2.4 İşletme sonrası filtrasyon dirençlerinin belirlenmesi

Modüllerin aktif çamur içerisinde TMP değişimlerininin gözlenmesini takiben, her aşama sonunda membranlar çeşitli temizleme aşamalarından geçirilmiş ve kek direnci, por tıkanmasına bağlı direnç ve geri kazanılamayan dirençler hesaplanmıştır.



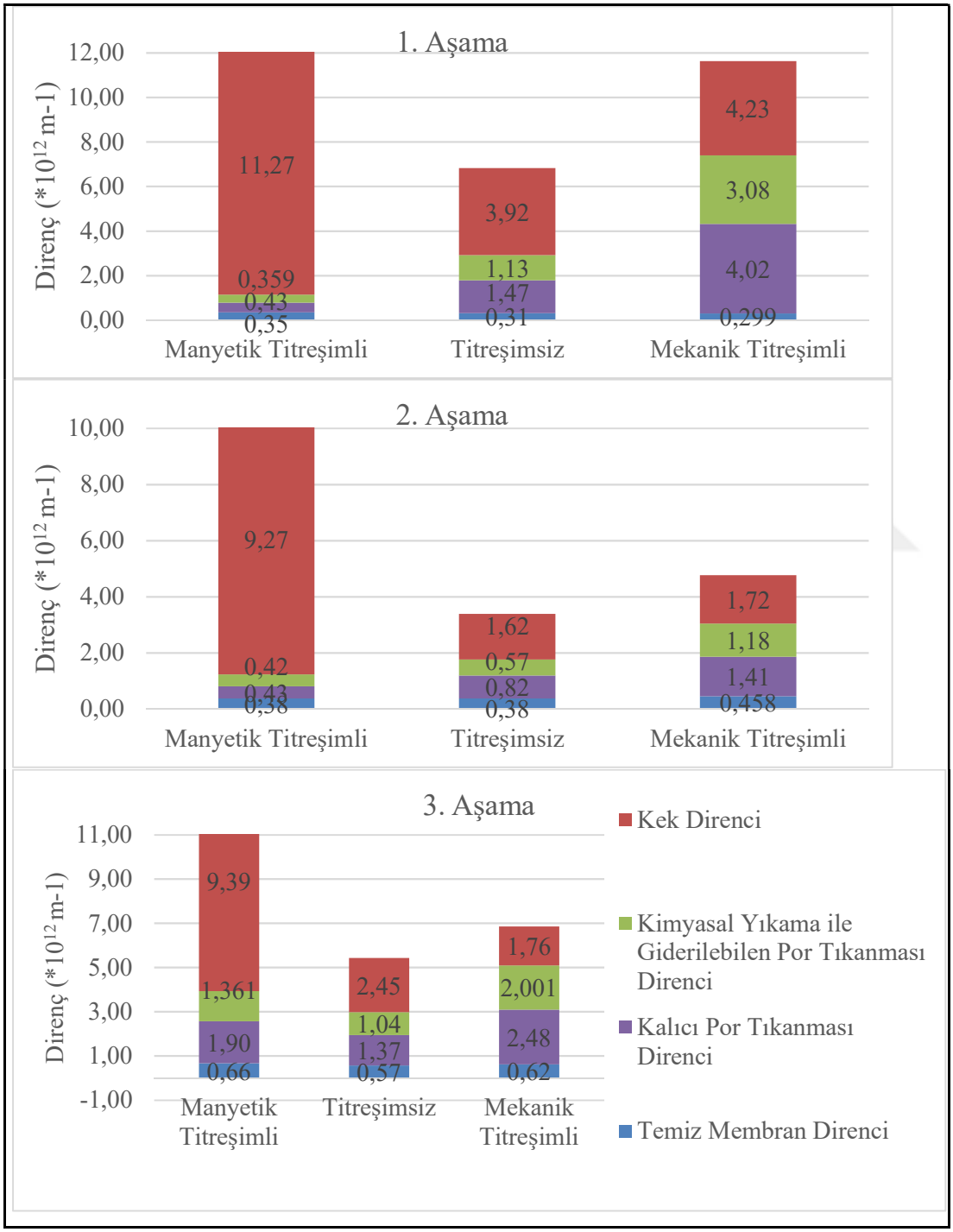
Şekil 4.15 : Titreşimsiz, manyetik ve mekanik titreşimli modüllerde TMP profili (Kaya R. ve diğ. 2017).



Şekil 4.16 : Aşama 3 ve maksmum frekans deneylerinin karşılaştırmalı TMP profili..

1., 2. ve 3. aşamada elde edilen direnç dağılımı sırasıyla Şekil 4.17'da karşılaştırmalı olarak verilmektedir (Kaya R. Ve diğ. 2017). Direnç grafikleri incelendiğinde en büyük kek direncinin manyetik titreşimli sistemde ölçüldüğü, buna karşılık bu sistemde, kalıcı por tıkanması direncinin ise düşük seviyelerde kaldığı görülmüştür. Bu durum en düşük TMP artış eğiliminin gözlendiği manyetik titreşimli sistemde elde edilen sonuçları desteklemektedir (Şekil 4.15). Titreşimsiz sistemde ise yine yüksek miktarda kek direnci ölçülmüştür. Ancak kalıcı por tıkanması direncinin toplam filtrasyon direnci içindeki miktarı 1. aşamada $1{,}47*10^{12}\ m^{-1}$, 2. Aşamada $0{,}82*10^{12}\ m^{-1}$,3. aşamada $1{,}37*10^{12}$ dir. Mekanik titreşimli sistemde ise kek direnci 1. aşamada $4{,}23*10^{12}\ m^{-1}$, 2. aşamada $1{,}72*10^{12}\ m^{-1}$, 3. aşamada ise $1{,}76*10^{12}\ m^{-1}$olarak belirlenmiş ve por tıkanmasının göstergesi olan, bazik ve asidik yıkama ile giderilebilen direncin de 1. aşamada $3{,}08*10^{12}\ m^{-1}$, 2. aşamada $1{,}18*10^{12}\ m^{-1}$, 3. aşamada $2*10^{12}\ m^{-1}$ olduğu görülmüştür. Kalıcı por tıkanması direnci ise mekanik titreşimli modülde, diğerlerine göre yüksek değerlerde ölçülmüştür. seviyesindedir. Bu durum mekanik titreşimli sistem için elde edilen TMP sonuçlarını desteklemektedir (Şekil 3.18).

Mekanik titreşimli sistemde, özellikle 1. aşamada ölçülen, kalıcı por tıkanması sebebiyle TMP değerleri, diğer sistemlere nazaran daha yüksek ölçülmüştür. 2. aşamada titreşim frekansının artırılmasıyla, TMP değerleri 1. aşamaya göre daha düşük ölçülmüştür. 3. aşamada titreşim frekansının tekrar azaltılmasıyla birlikte geri kazanılamayan tıkanma direncindeki artış TMP değerlerinde de yükselmeye neden olmuştur.



Şekil 4.17 : Modüllerin yıkama aşamalarından sonra elde edilmiş direnç değerleri, 1. aşama, 2. Aşama ve 3. Aşama.

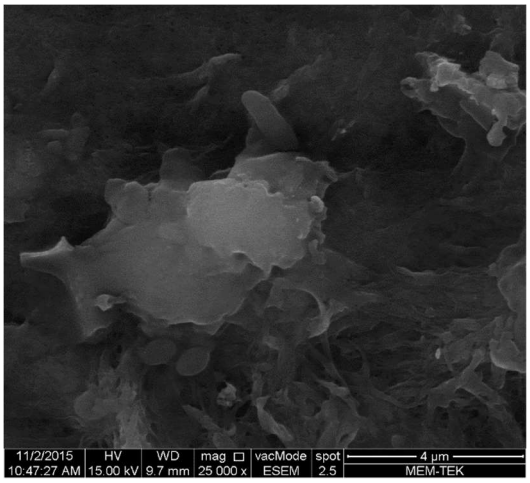
Titreşim türü, membran yüzeyinde oluşan kekin fizikokimyasal yapısını, sıkıştırılabilirliğini ve kalınlığını etkilemektedir. Manyetik ve titreşimsiz sistemlerde meydana gelen kek tabakası oluşumu sayesinde, bu sistemlerde bulunan membranlarda, mekanik titreşimli sistemde bulunan membrana göre daha az por tıkanması meydana gelmiştir. Mekanik titreşimli sistemde elde edilen yüksek miktardaki titreşim şiddetinin membran yüzeyinde kek tabakası oluşumunu önlediği, buna karşılık membran porlarının aktif çamur içerisinde bulunan maddelerle daha kolay tıkandığı, bu sonuçlar ile desteklenmiştir. Manyetik titreşimli sistemde oluşan kek tabakası titreşim ile birlikte zarar görmediği için por tıkanmasını destekleyici bir ortam oluşmamaktadır.

4.2.5 Morfolojik analiz sonuçları

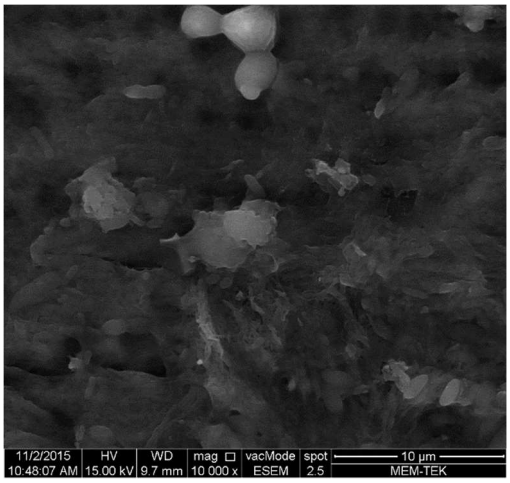
Deneysel işletme periyodu sonrası kullanılmış membranlar fiziksel ve kimyasal yıkama testlerine tabi tutulmuştur. Bu aşamaları takiben membranlardan alınan numunelerde SEM ve EDS analizleri yapılmıştır. Titreşimsiz, manyetik ve mekanik titreşimli sistemlerdeki membranlardan elde edilen SEM görüntüleri 1. 2. ve 3. aşama için sırasıyla Şekil 4.18, Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'de verilmiştir. Bu görüntüler temizleme sonrası çekildiği için sadece geri kazanılamayan direnç sonuçları ile ilişkilendirilebilir.

Titreşimsiz modüldeki membran yüzey kirlenmesi incelendiğinde, daha çok oval şekilli yapılar gözlenmiş ve membran yüzeyinde inorganik çökelek benzeri maddeler tespit edilmiştir. Manyetik titreşimli modülde inorganik çökelek benzeri maddelerin porların yüzeyinde tutulduğu gözlenmiştir. Mekanik titreşimli modülde, temizleme sonrasında dahi porların büyük bir bölümünün örtüldüğü ve bu sebeple tıkandığı görülmekte olup, bu maddelerin fiziksel ve kimyasal yıkama ile giderilemeyecek derecede yüzeye yapıştığı anlaşılmaktadır.

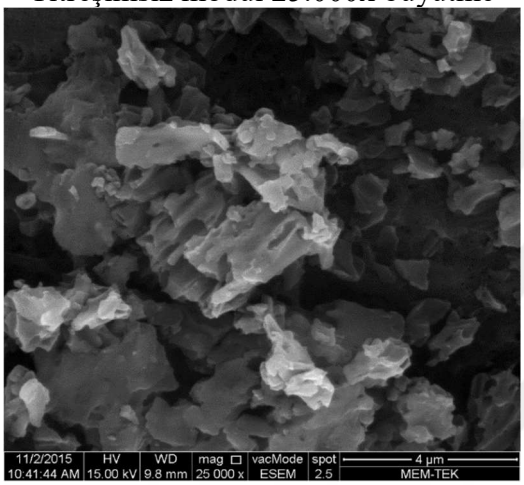
SEM görüntüleri incelendiğinde yıkama sonrasında geri kazanılamayan dirence sebep olan maddelerin mekanik titreşimli modülde yer alan membran yüzeyinde, titreşimsiz ve manyetik titreşimli membran yüzeyindekine göre daha fazla yer kapladığı tespit edilmiştir. Bu sonuç filtrasyon performansı ve yıkama sonrası hesaplanan filtrasyon direnci sonuçlarını desteklemektedir.



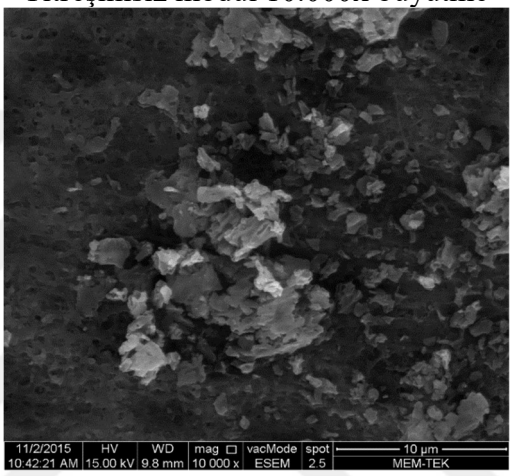
Titreşimsiz modül 25.000x büyütme



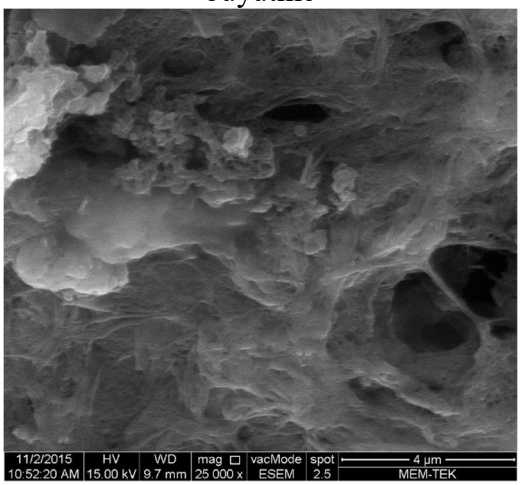
Titreşimsiz modül 10.000x büyütme



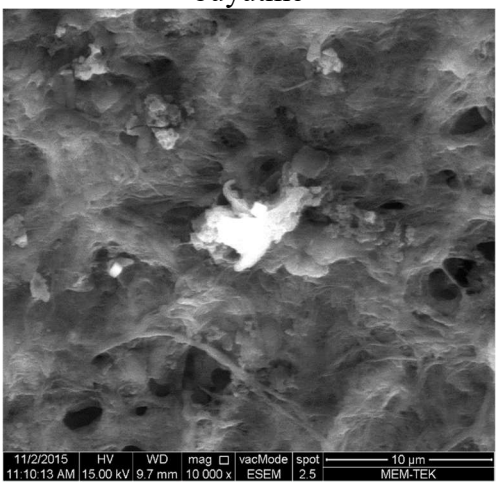
Manyetik titreşimli modül 25.000x büyütme



Manyetik titreşimli modül 10.000x büyütme

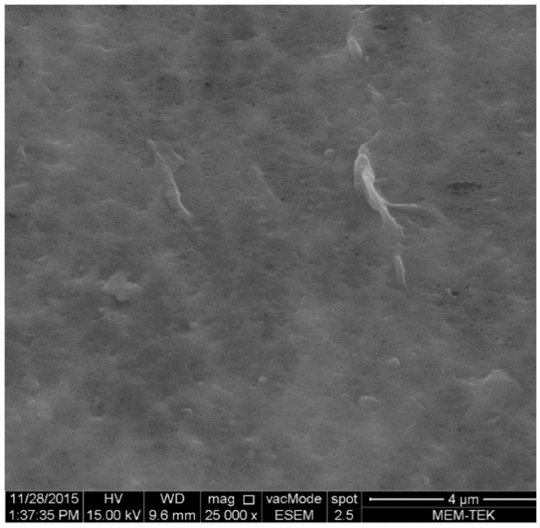


Mekanik titreşimli modül 25.000x büyütme

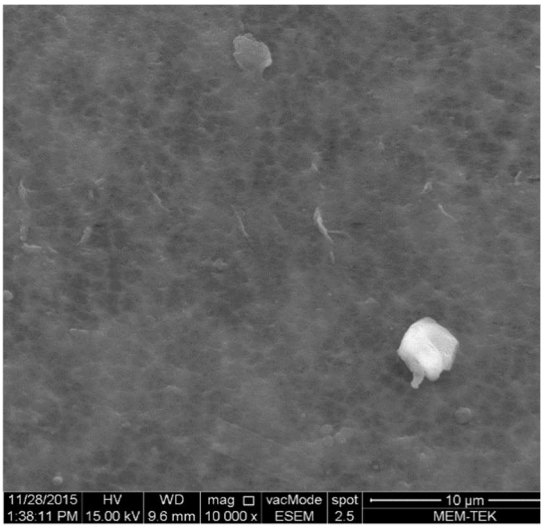


Mekanik titreşimli modül 10.000x büyütme

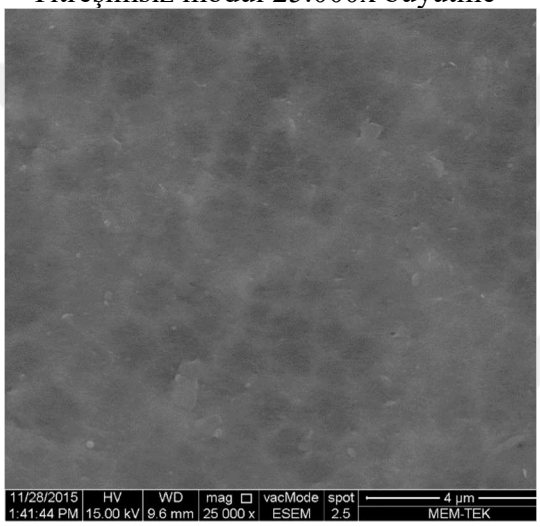
Şekil 4.18 : 1. aşamada kullanılmış modüllerdeki membranların fiziksel ve kimyasal yıkama sonrası SEM görüntüleri.



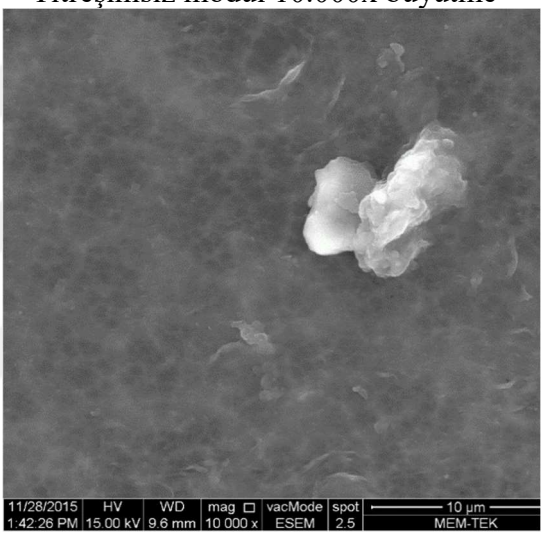
Titreşimsiz modül 25.000x büyütme



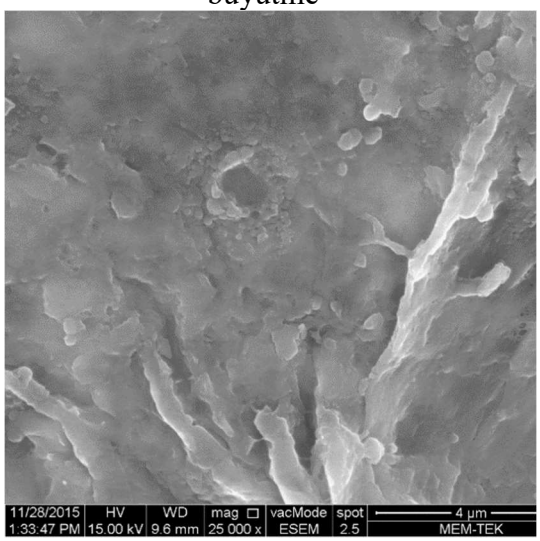
Titreşimsiz modül 10.000x büyütme



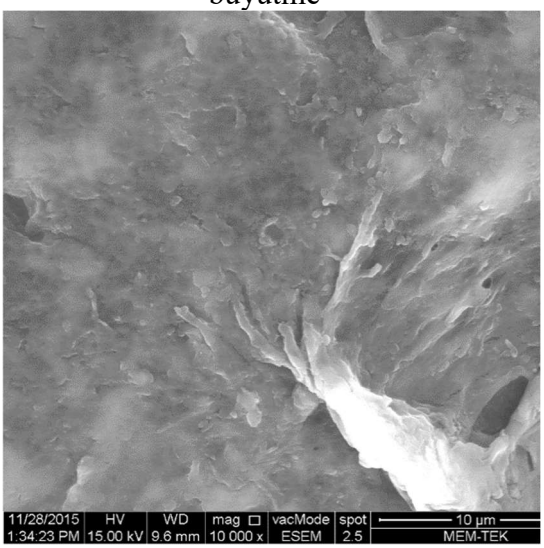
Manyetik titreşimli modül 25.000x büyütme



Manyetik titreşimli modül 10.000x büyütme

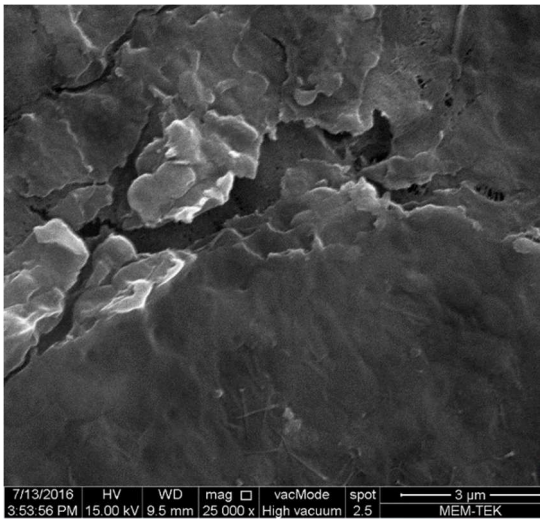


Mekanik titreşimli modül 25.000x büyütme

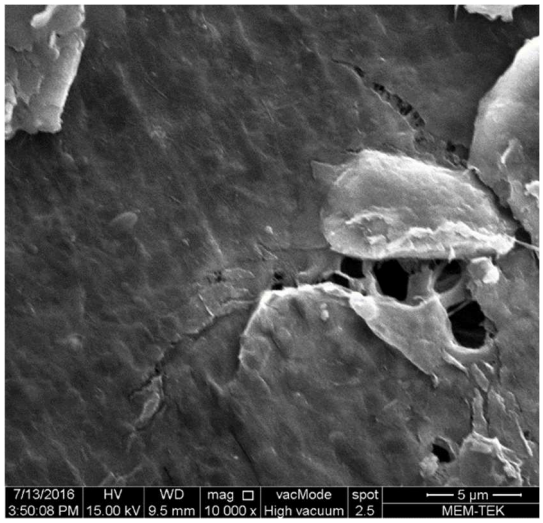


Mekanik titreşimli modül 10.000x büyütme

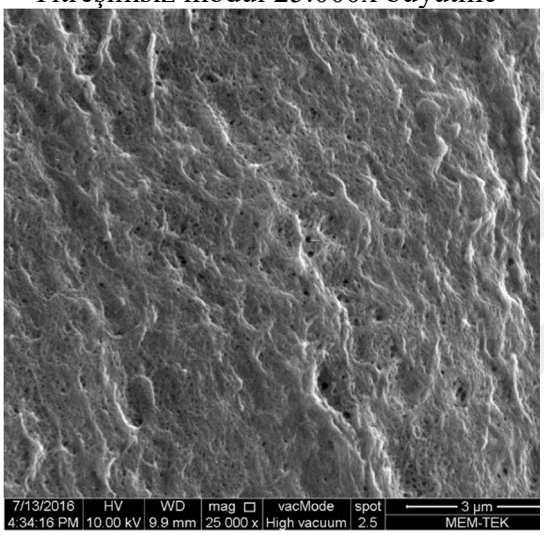
Şekil 4.19 : 2. aşamada kullanılmış modüllerdeki membranların fiziksel ve kimyasal yıkama sonrası SEM görüntüleri.



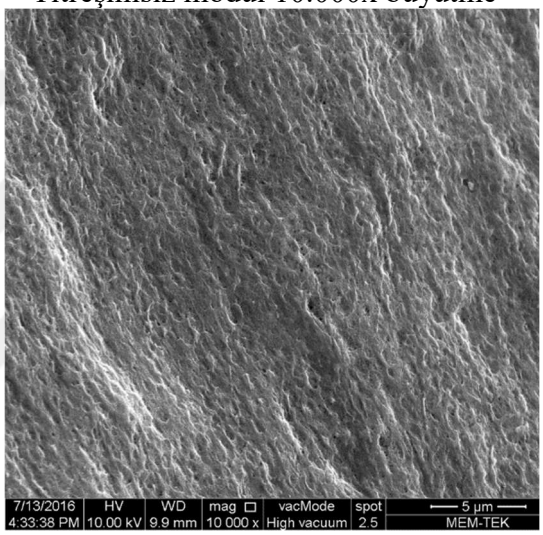
Titreşimsiz modül 25.000x büyütme



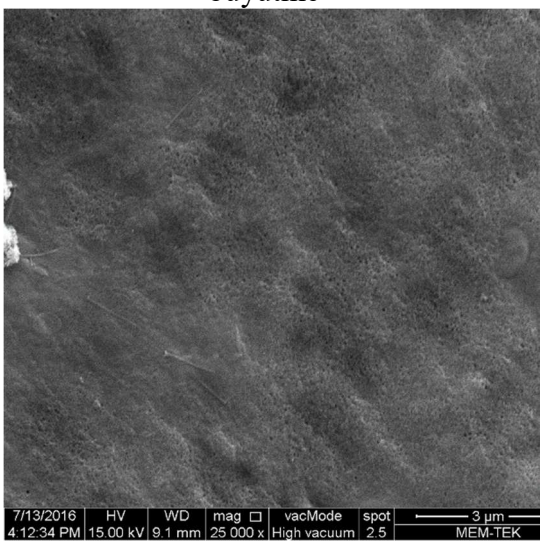
Titreşimsiz modül 10.000x büyütme



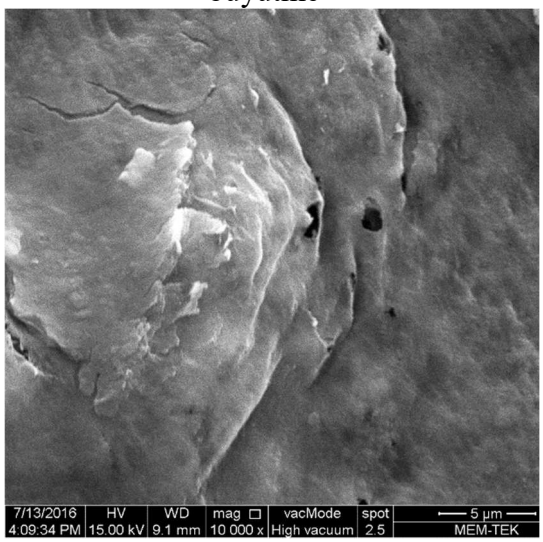
Manyetik titreşimli modül 25.000x büyütme



Manyetik titreşimli modül 10.000x büyütme



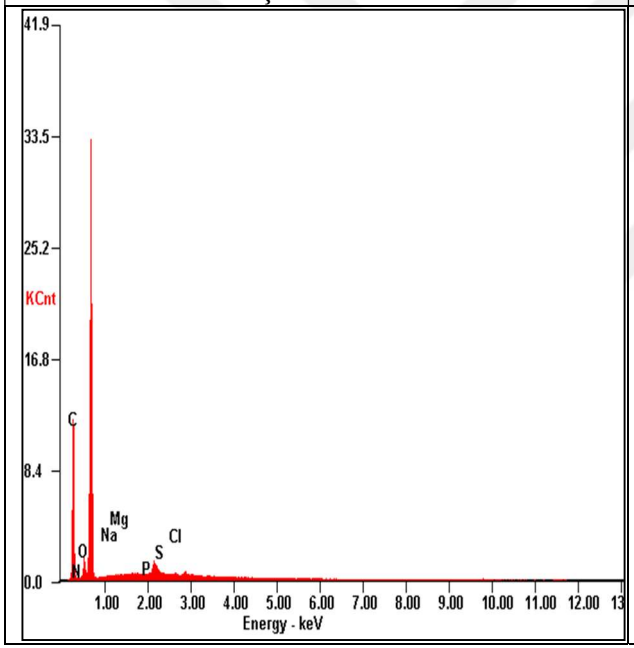
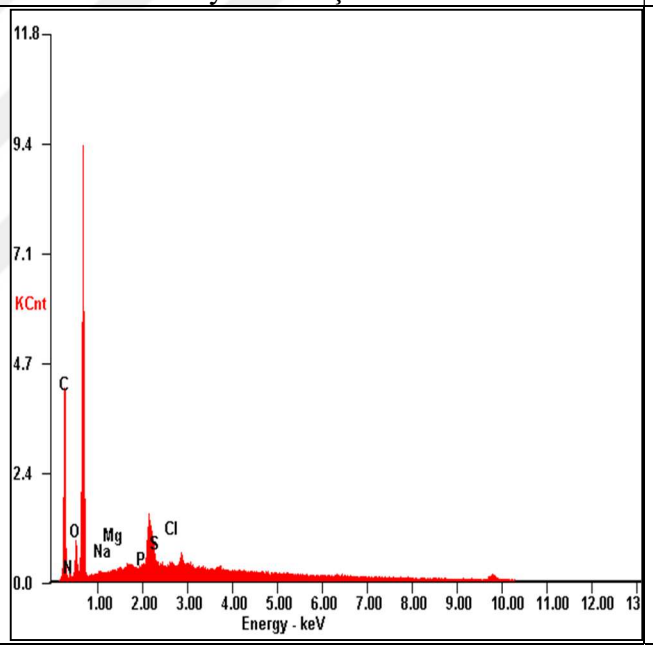
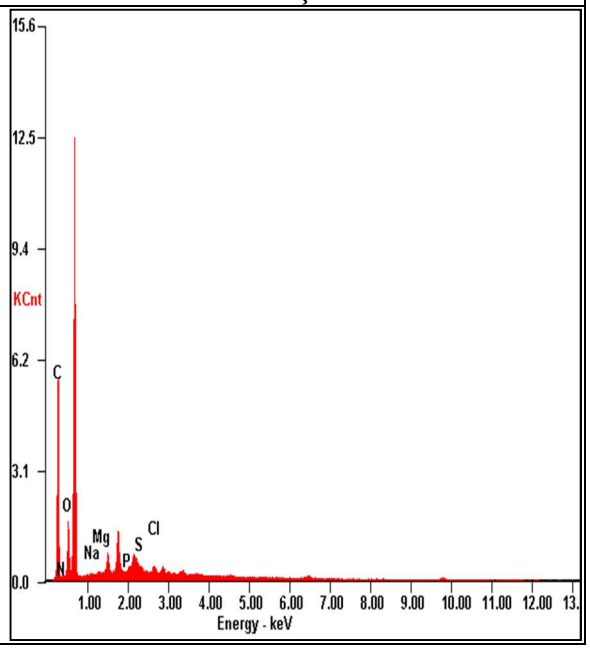
Mekanik titreşimli modül 25.000x büyütme



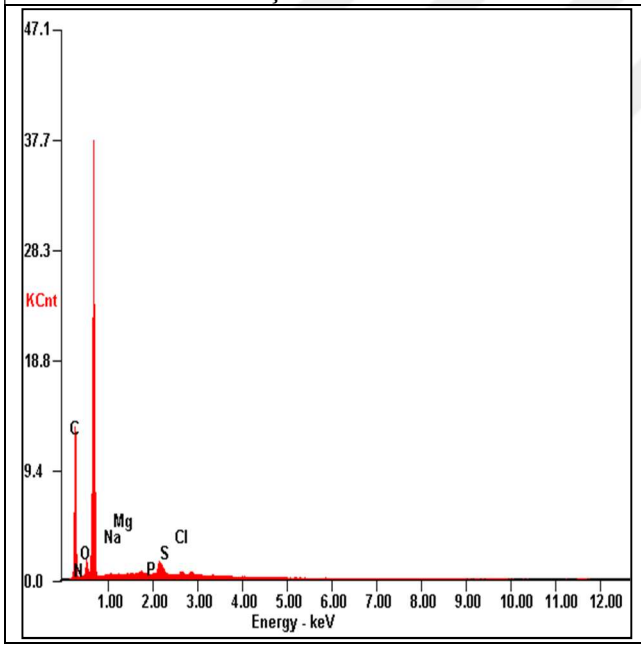
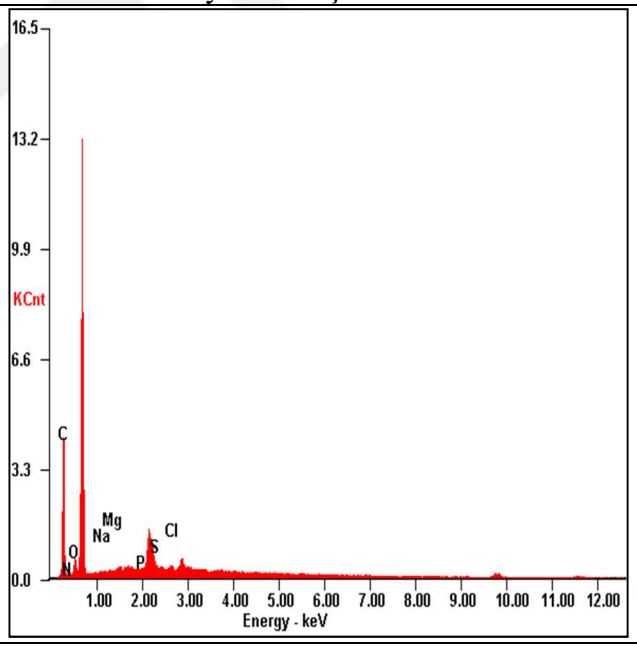
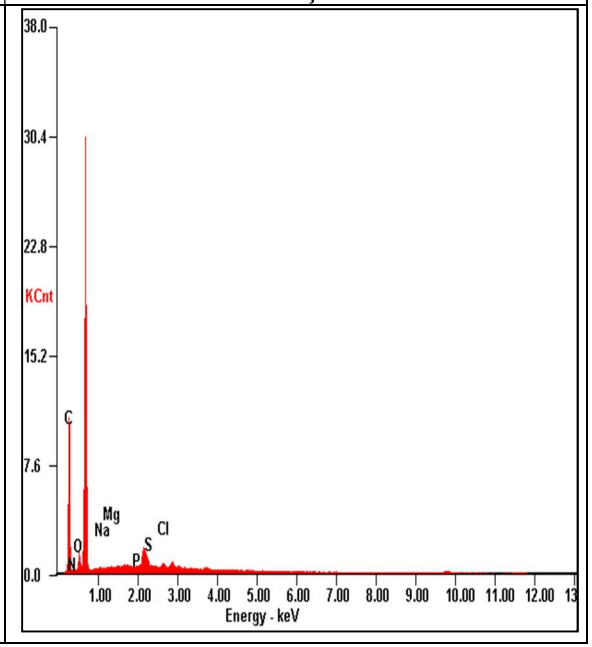
Mekanik titreşimli modül 10.000x büyütme

Şekil 4.20 : 3. aşamada kullanılmış modüllerdeki membranların fiziksel ve kimyasal yıkama sonrası SEM görüntüleri.

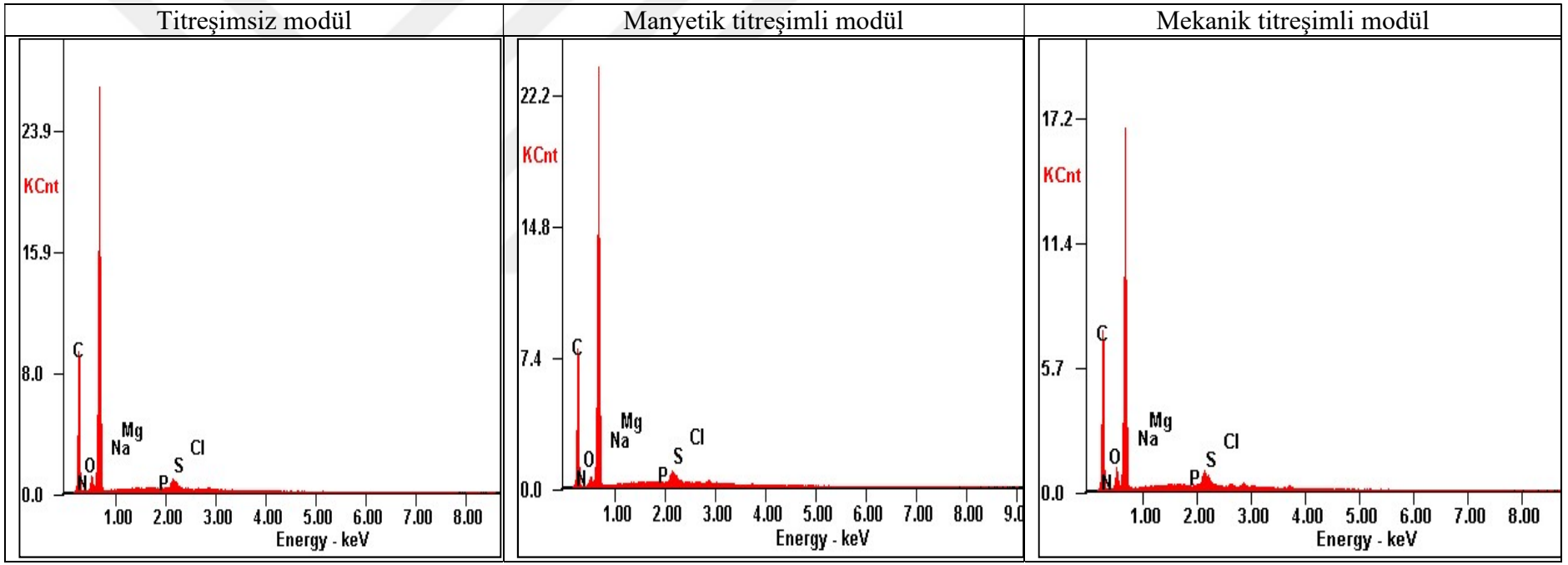
SEM görüntüleri alınan membranlar üzerindeki elementel kompozisyonu belirlemek amacıyla EDS analizi yapılmıştır. 1., 2. ve 3. aşamada kullanılan membranların temizlik sonrası elde edilen spektrumları sırasıyla Şekil 4.21, Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'de verilmiştir. Bu spektrumlara ait olan elementel yüzde dağılımı ise Çizelge 3.11'de verilmiştir. Yapılan taramada membran yüzeyinde Karbon (C), Azot (N), Oksijen (O), Sodyum (Na), Magnezyum (Mg), Kükürt (S), Klor (Cl), Fosfor (P) elementlerine rastlanılmıştır. Tespit edilen elementler genellikle beslenen atıksudan kaynaklanmaktadır. EDS sonuçları değerlendirildiğinde; ağırlıkça en fazla olan elementlerin karbon ve azot olduğu görülmektedir. Karbon elementi genellikle membran materyalinin yapısında da bulunmaktadır. Dolayısıyla karbon için elde edilen ağırlıkça yüksek oran, geri kazanılamayan tıkanmaya neden olan kirleticiler ile birlikte membran materyali ile ilişkilendirilebilir. Çizelge 4.11 incelendiğinde, üç farklı titreşim kaynağı içeren sistem için elementlerin ağırlıkça yüzdeleri bakımından ciddi seviyelerde fark olmadığı görülmektedir. Yıkama sonrasında alınan membran numunelerinde üç farklı titreşim kaynağı içeren sistem için geri kazanılamayan direnç yüzdelerinde özellikle mekanik titreşimli sistem ve diğerleri arasında ciddi seviyelerde fark gözlenirken, bu durum yapılan elementel analiz sonuçlarına elementel ağırlıkça yüzde açısından yansımamıştır. Bu sonuç yıkama sonrası geri kazanılamayan membran dirençleri arasındaki farkın elementel yüzde dağılımı ile ilişkisi olmadığını göstermektedir.

Titreşimsiz modül	Manyetik titreşimli modül	Mekanik titreşimli modül
		

Şekil 4.21 : 1. aşamada kullanılmış titreşimsiz, manyetik ve mekanik titreşimli modüllerde gerçekleştirilen EDS analizi spektrumu.

Titreşimsiz modül	Manyetik titreşimli modül	Mekanik titreşimli modül
		

Şekil 4.22 : 2. aşamada kullanılmış titreşimsiz, manyetik ve mekanik titreşimli modüllerde gerçekleştirilen EDS analizi spektrumu.



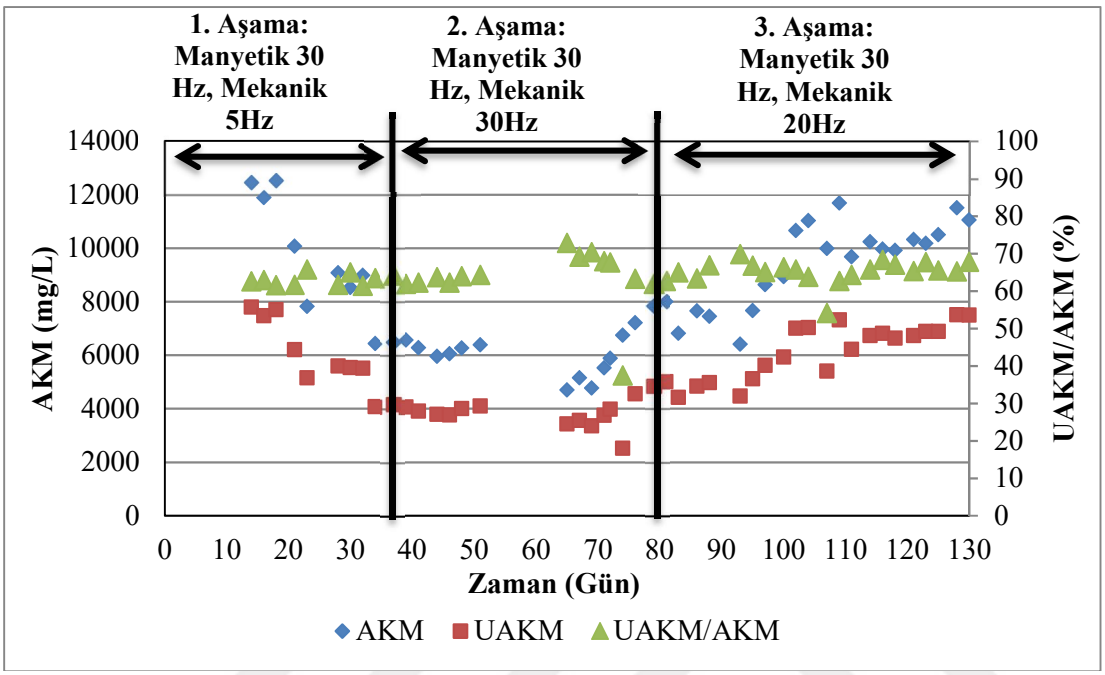
Şekil 4.23 : 3. aşamada kullanılmış titreşimsiz, manyetik ve mekanik titreşimli modüllerde gerçekleştirilen EDS analizi spektrumu.

Çizelge 4.11 : Membran yüzeyindeki elementlerin ağırlıkça yüzdesel dağılımı.

	1. aşama			2. aşama			3. aşama		
Element	**Titreşimsiz Ağırlık %**	**Manyetik Titreşimli Ağırlık %**	**Mekanik Titreşimli Ağırlık %**	**Titreşimsiz Ağırlık %**	**Manyetik Titreşimli Ağırlık %**	**Mekanik Titreşimli Ağırlık %**	**Titreşimsiz Ağırlık %**	**Manyetik Titreşimli Ağırlık %**	**Mekanik Titreşimli Ağırlık %**
C	68,58	61,75	59,47	70,05	69,42	70,11	68,50	75,21	68,32
N	7,74	10,42	6,93	6,71	7,80	7,15	8,99	7,01	6,74
O	22,13	24,36	30,51	21,08	20,03	20,34	21,35	15,62	22,78
Na	0,16	0,71	0,24	0,63	0,15	0,45	0,09	0,28	0,26
Mg	0,04	0,08	0,21	0,18	0,19	0,06	0,00	0,22	0,13
P	0,36	0,60	0,75	0,16	0,49	0,36	0,30	0,30	0,47
S	0,50	1,20	0,80	0,35	1,05	0,62	0,43	0,73	0,77
Cl	0,48	0,88	1,09	0,84	0,88	0,91	0,33	0,63	0,54

4.3 Arıtma Performansı Değerlendirmesi

Çalışma süresince reaktör içindeki çamurda ölçülen AKM ve UAKM konsantrasyonlarının değişimi Şekil 4.24'da verilmektedir.



Şekil 4.24 : MBR'daki çamurda AKM ve UAKM konsantrasyonlarının değişimi (Kaya R. ve diğ. 2017).

1. 2. ve 3. aşamada MBR içindeki çamurun ortalama AKM, UAKM konsantrasyonları ve UAKM/AKM oranları Çizelge 4.12'de verilmektedir.

Çizelge 4.12 : MBR içindeki çamurun AKM ve UAKM deney sonuçları.

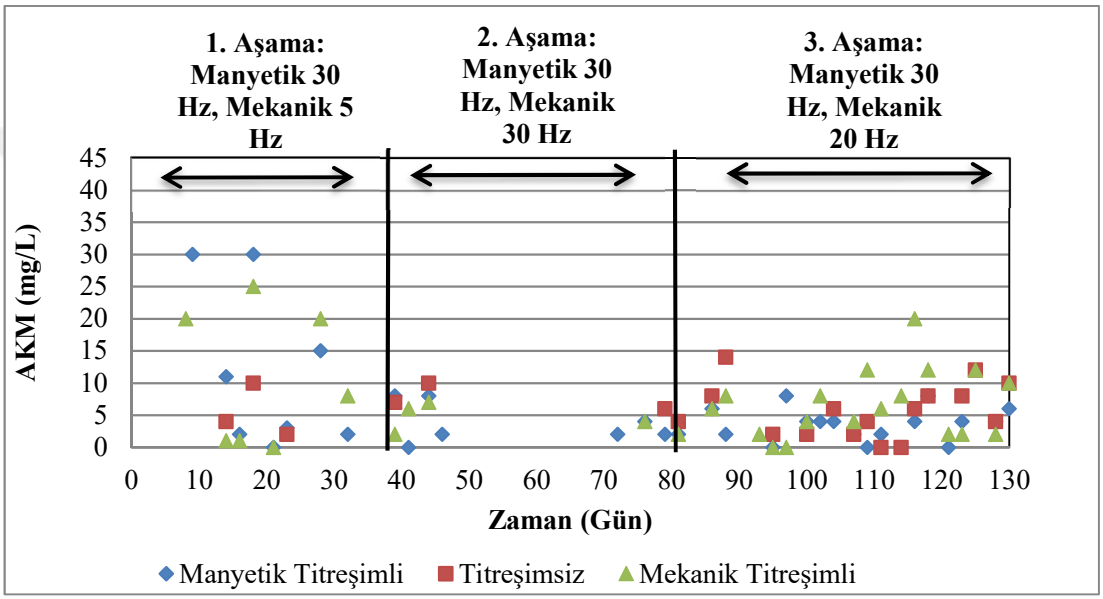
Numune	1. aşama	2. aşama	3. aşama
AKM	10061 ± 1788	6027 ± 752	8502 ± 162
UAKM	6288 ± 1075	3885 ± 285	5462 ± 101
UAKM/AKM	0.63 ± 0.02	0.63 ± 0.03	0.64 ± 0.05

Deneysel çalışma boyunca reaktör içinde ortalama AKM ve UAKM konsantrasyonları sırasıyla 6027-10061 mg/L ve 3885-6288 mg/L aralığında ölçülmüştür. İşletme boyunca çok sık yaşanan elektrik kesintileri sebebiyle çok sık geri yıkama yapılmak zorunda kalınmış ve bu nedenle reaktörde meydana gelen seyrelmeler dolayısıyla özellikle 2. ve 3. aşamalarda AKM ve UAKM konsantrasyonlarında düşüşler meydana gelmiştir. MBR içindeki çamurun UAKM/AKM oranında işletme boyunca önemli bir

değişim gözlenmemiştir. 2. aşamada titreşimsiz ve manyetik titreşimli modül için aynı koşullar altında işletim olmasına rağmen her bir modülde daha düşük TMP değerlerinin gözlemlenmesi çamur AKM konsantrasyonunda 2. aşamada gözlenen azalma ile ilişkilendirilebilir.

MBR içindeki çamurun SVI değeri ortalama 147 ± 4 mL/g, KOİ konsantrasyonu ortalama 5000 ± 369 mg/L olarak ölçülmüştür.

Reaktörün işletilmesi boyunca süzüntü akımında gerçekleştirilen deneylerde elde edilen AKM konsantrasyonları her üç sistem için Şekil 4.25'da verilmektedir.



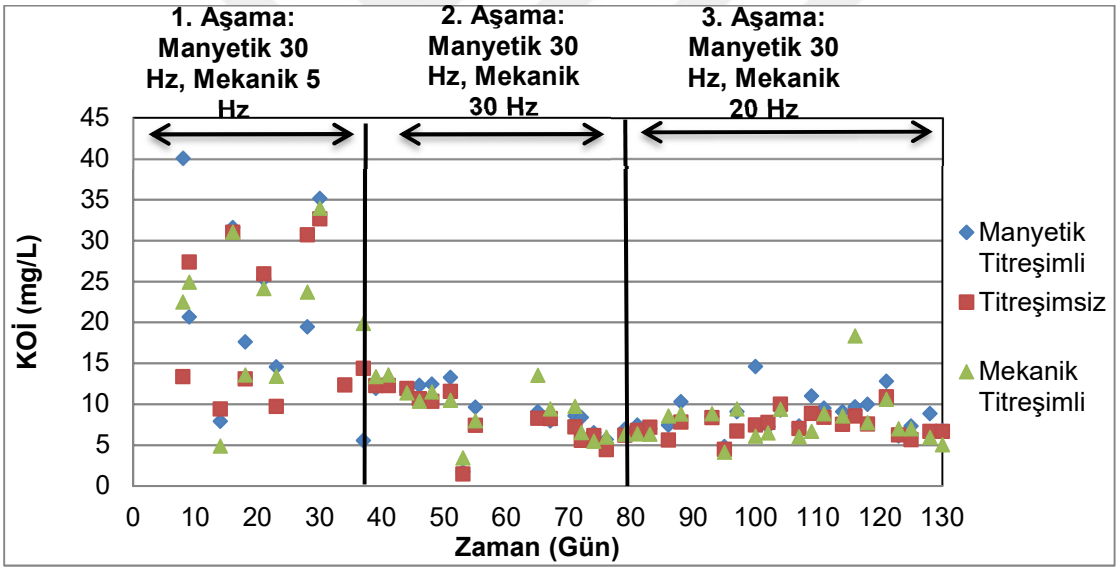
Şekil 4.25 : Titreşimsiz, manyetik ve mekanik titreşimli membran modüllerinin süzüntü akımında elde edilen AKM konsantrasyonlarının değişimi.

Süzüntü numunelerinin 1., 2. ve 3. aşamadaki AKM konsantrasyonları ve giderim verimleri Çizelge 4.13'de verilmektedir. Değerler incelendiğinde, farklı titreşim sistemleri için süzüntü numunelerinin AKM konsantrasyonlarında önemli bir fark gözlenmemiştir. 1. aşamada süzüntü suyu ortalama AKM konsantrasyonları tüm sistemlerde sırasıyla; titreşimsiz modülde < 10 mg/L, manyetik titreşimli modülde 12 mg/L ve mekanik titreşimli modülde 11 mg/L olarak tespit edilmiştir. 2. aşamada süzüntü suyu ortalama AKM konsantrasyonları tüm sistemlerde sırasıyla; titreşimsiz modülde < 10 mg/L, manyetik titreşimli modülde < 10 mg/L ve mekanik titreşimli modülde < 10 mg/L olarak tespit edilmiştir. 3. aşamada süzüntü suyu ortalama AKM konsantrasyonları tüm sistemlerde sırasıyla; titreşimsiz modülde < 10 mg/L, manyetik titreşimli modülde < 10 mg/L ve mekanik titreşimli modülde < 10 mg/L olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 4.13 : Titreşimsiz, manyetik titreşimli ve mekanik titreşimli membran modüllerinde süzüntü akımlarında AKM değerleri ve giderim verimleri.

	1. Aşama		2. Aşama		3. Aşama	
	AKM (mg/L)	**Giderim verimi (%)**	**AKM (mg/L)**	**Giderim verimi (%)**	**AKM (mg/L)**	**Giderim verimi (%)**
Titreşimsiz Modül	< 10	98	< 10	97	< 10	98
Manyetik Titreşimli Modül	12	95	< 10	98	< 10	99
Mekanik Titreşimli Modül	11	96	< 10	98	< 10	97

Reaktörün işletilmesi esnasında süzüntülerde ölçülen KOİ konsantrasyonları Şekil 4.26'de verilmektedir.



Şekil 4.26 : Titreşimsiz, manyetik ve mekanik titreşimli membran modüllerinde süzüntü akımında elde edilen KOİ değerlerinin değişimi.

Süzüntülerin KOİ konsantrasyonları ve giderim verimleri Çizelge 4.14'da verilmektedir. Farklı titreşim sistemi uygulanan modüllerin süzüntü akımlarında KOİ konsantrasyonları arasında önemli bir fark gözlenmemiştir. Tüm sistemlerde KOİ konsantrasyonları 25 mg/L'nin altındadır.

Çizelge 4.14 : Titreşimsiz, manyetik titreşimli ve mekanik titreşimli membran modüllerinde süzüntü akımlarında KOİ konsantrasyonları ve giderim verimleri.

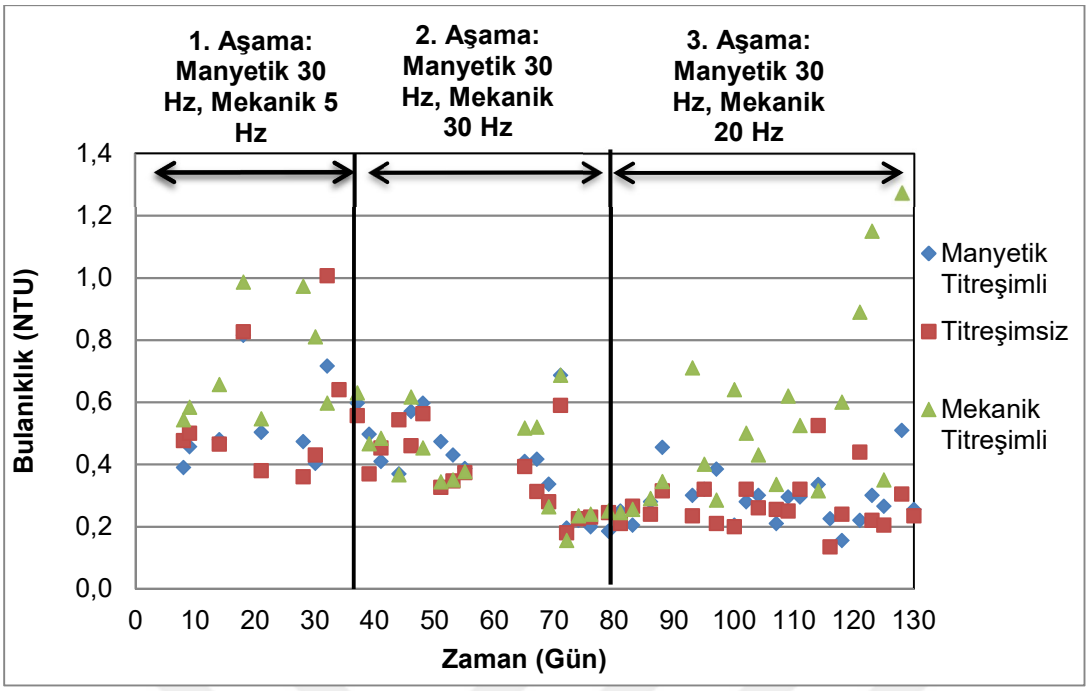
	1. aşama		2. aşama		3. aşama	
	KOİ (mg/L)	**Giderim verimi (%)**	**KOİ (mg/L)**	**Giderim verimi (%)**	**KOİ (mg/L)**	**Giderim verimi (%)**
Titreşimsiz Modül	< 25	96	< 25	98	< 25	99
Manyetik Titreşimli Modül	< 25	96	< 25	98	< 25	98
Mekanik Titreşimli Modül	< 25	96	< 25	98	< 25	99

Süzüntü akımında ölçülen azot ve fosfor konsantrasyonları Çizelge 4.15'de verilmektedir. 1., 2. ve 3. aşamada ölçülen azot ve fosfor değerleri arasında önemli bir fark görülmemiştir.

Çizelge 4.15 : Süzüntü akımında ortalama NO_3-N, NO_2-N, NH_4-N, TKN ve TP konsantrasyonları.

Parametre	**Birim**	**1. Aşama (Ortalama+St d.Sapma)**	**2. Aşama (Ortalama+St d.Sapma)**	**3. Aşama (Ortalama+St d.Sapma)**
NO_3-N	mg/L	36±5	31±1	25 ±3
NO_2-N	mg/L	< 0,1	< 0,1	< 0,1
NH_4-N	mg/L	< 0,5	< 0,5	< 0,5
TKN	mg/L	28±9	26±8	29±12
TP	mg/L	12±1	14±3	13±2

Reaktörün işletme periyodu boyunca süzüntü akımında bulanıklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.27'de, 1., 2. ve 3. aşama olmak üzere tüm süreç boyunca süzüntülerde elde edilen bulanıklık değerleri verilmektedir.



Şekil 4.27 : Titreşimsiz, manyetik ve mekanik titreşimli membran modüllerinde süzüntü akımında ölçülen bulanıklık değerlerinin değişimi.

Süzüntülerde ölçülen ortalama bulanıklık değerleri Çizelge 4.16'de verilmektedir.

Çizelge 4.16 : Titreşimsiz, manyetik titreşimli ve mekanik tireşimli modül süzüntülerinde ölçülen ortalama bulanıklık değerleri.

Numune	1. Aşama (Bulanıklık NTU)	2. Aşama (Bulanıklık NTU)	3. Aşama (Bulanıklık NTU)
Titreşimsiz Modül	0,56 ± 0,2	0,45 ± 0,1	0,27 ± 0,1
Manyetik Titreşimli Modül	0,53 ± 0,2	0,50 ± 0,1	0,28 ± 0,1
Mekanik Titreşimli Modül	0,71 ± 0,2	0,47 ± 0,1	0,48 ± 0,1

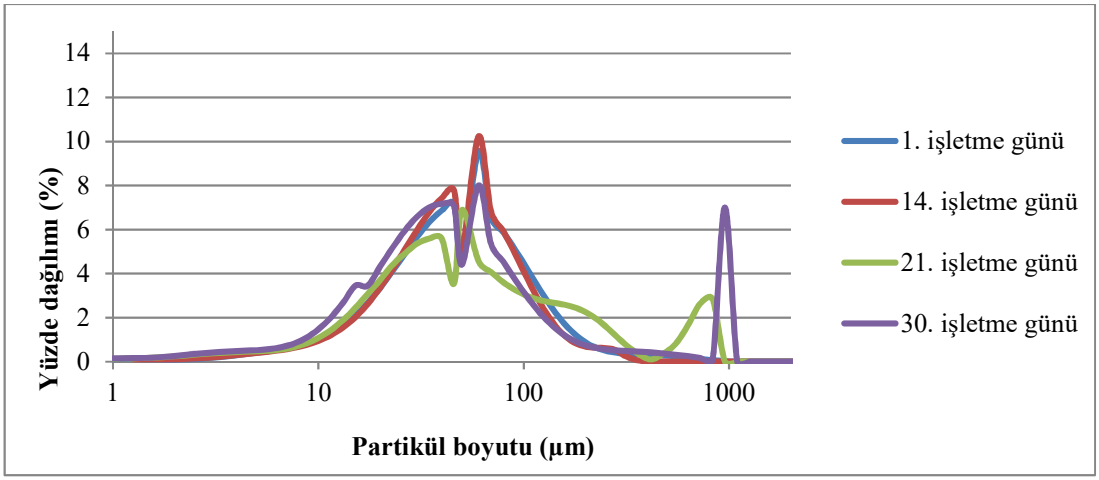
Farklı titreşim uygulanan her üç sistemde bulanıklık giderim verimi >%99 olarak gerçekleşmiş olup, 1. ve 3. Aşama deneylerinde mekanik titreşimli modülün süzüntü akımında bulanık değerleri manyetik titreşimli modül ve titreşimsiz modül ile karşılaştırıldığında bir miktar yüksek olduğu görülmüştür.

İşletme dönemi boyunca belirli aralıklarla çamurda ve süzüntü akımlarından alınan numunelerde partikül boyut dağılımı (PSD) ölçülmüş ve sonuçlar Çizelge 4.17'de verilmiştir.

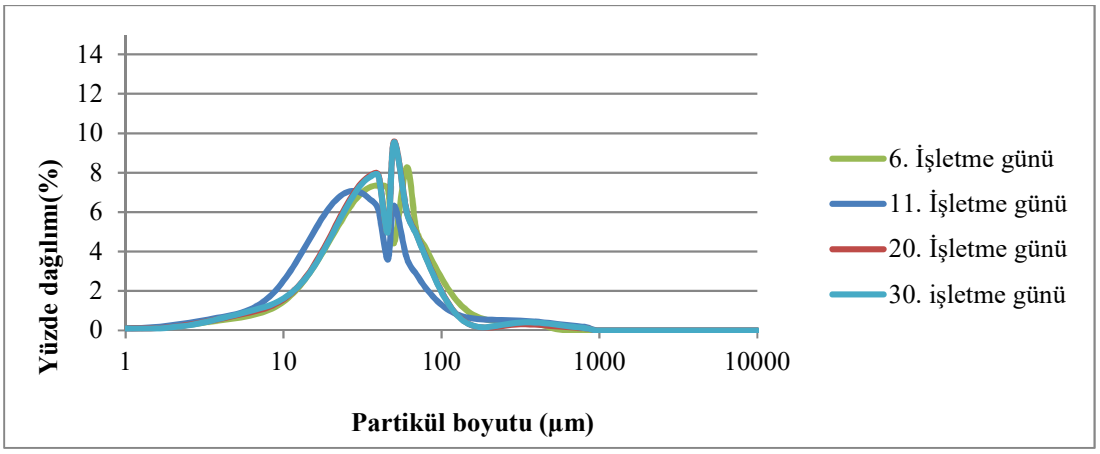
Çizelge 4.17 : Tüm işletme boyunca yapılan PSD analizlerinin sonuçları.

	Gün	Çamur d 50 (µm)	Titreşimsiz Modül Süzüntü Ortalama (nm)	Manyetik Titreşimli Modül Süzüntü Ortalama (nm)	Mekanik Titreşimli Modül Süzüntü Ortalama (nm)
1.AŞAMA	1	44,07	93,0	104,1	159,5
	14	42,99	85,2	71,5	270,6
	21	50,72	350,3	248,1	162,3
	30	37,35	202,9	161,9	280,9
2.AŞAMA	6	34,14	347,3	468,6	378,1
	11	29,21	771,1	414,3	254,8
	20	36,95	1431,4	1829,9	378,9
	30	37,23	634,6	497,6	129,0
3.AŞAMA	10	33,8	972,4	258,8	548,8
	30	39,2	519,5	124,4	352,2
	42	36,1	391,5	588,3	455,9
	57	29,8	90,1	747,1	332,9

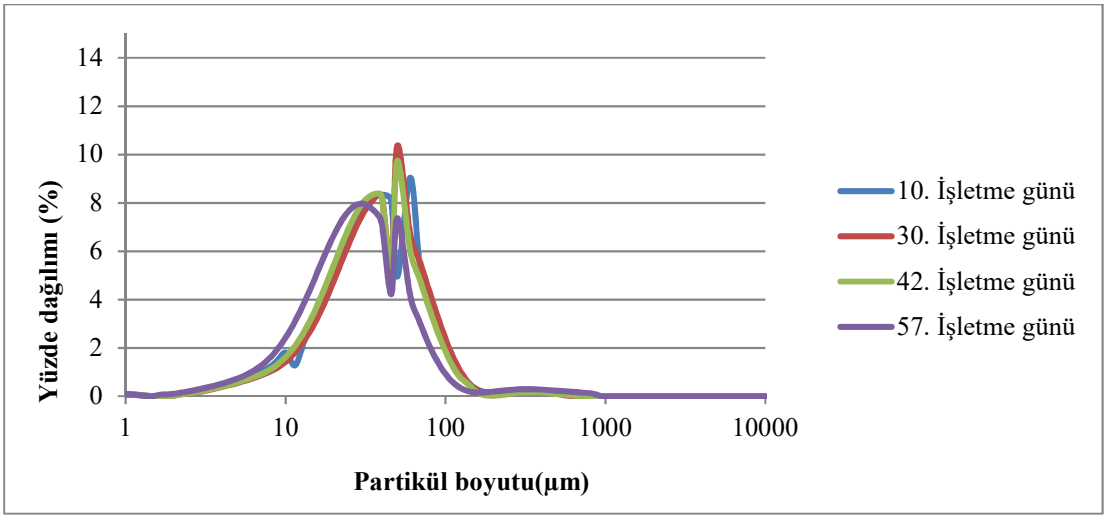
1., 2. ve 3. aşamanın reaktör içi çamur numunesinde PSD sonuçları sırasıyla Şekil 4.28, Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'da verilmektedir. Deney süresince partikül boyut dağılımı incelendiğinde aktif çamurda 1. aşamada d 50 değerinin 44 ± 6 µm, 2. aşamada 34 ± 4 µm, 3. aşamada ise 35 ± 3 µm olduğu görülmektedir.



Şekil 4.28 : 1. aşama reaktör içi çamur numunesinde ölçülen PSD sonuçları.

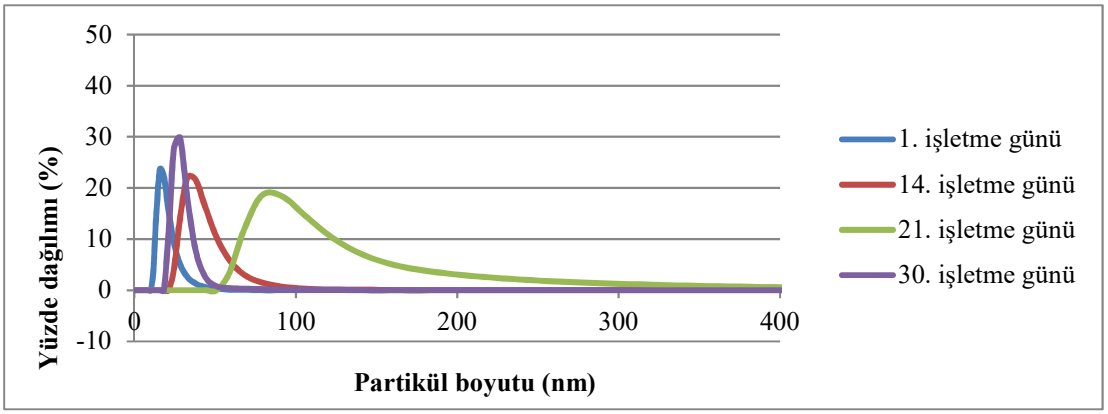


Şekil 4.29 : 2. aşama reaktör içi çamur numunesinde ölçülen PSD sonuçları.

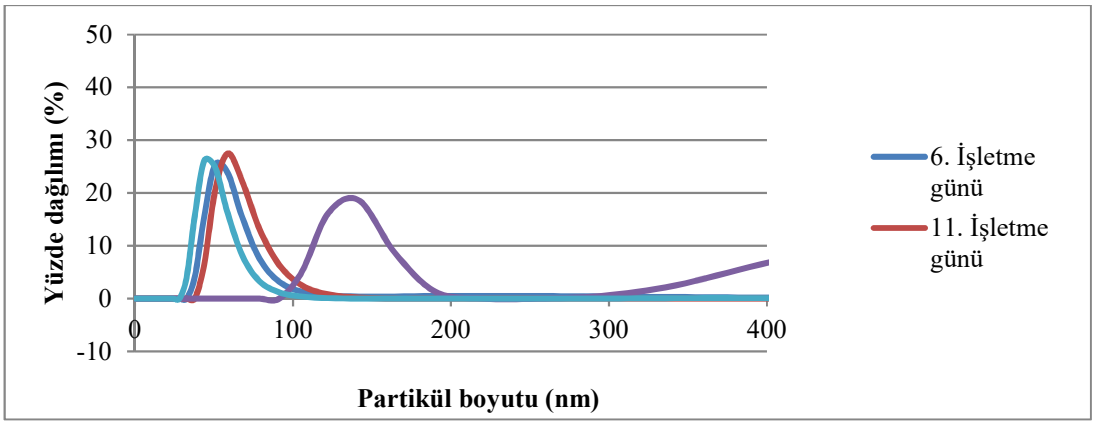


Şekil 4.30 : 3. aşama reaktör içi çamur numunesinde ölçülen PSD sonuçları.

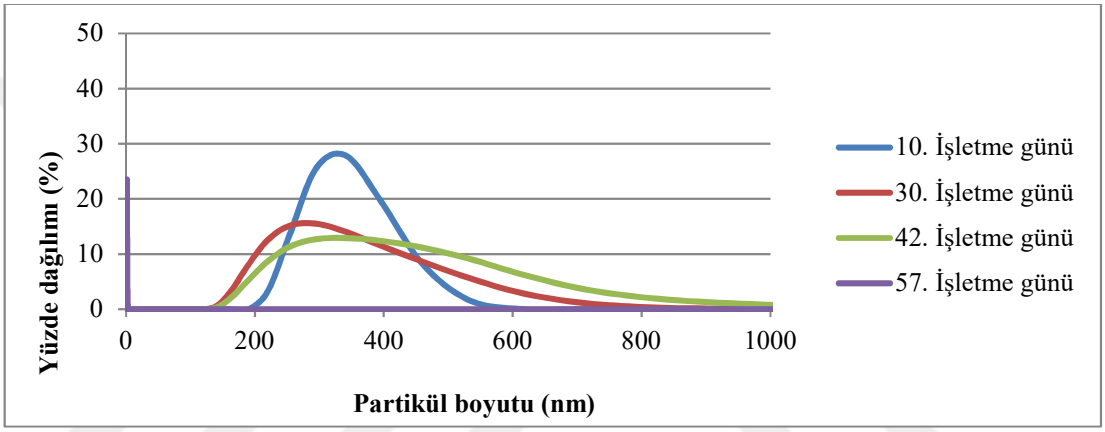
1., 2. ve 3. aşamanın titreşimsiz modülün süzüntü numunesinde PSD sonuçları sırasıyla Şekil 4.31, Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'da verilmektedir. Titreşimsiz modülün süzüntü numunesinde PSD sonuçları 1. aşamada ortalama 112 ± 37 nm, 2. aşamada 490 ± 94 nm, 3. aşamada ise 493 ± 317 nm olduğu görülmektedir.



Şekil 4.31 : 1. aşamada titreşimsiz modülün süzüntü akımında ölçülen PSD sonuçları.

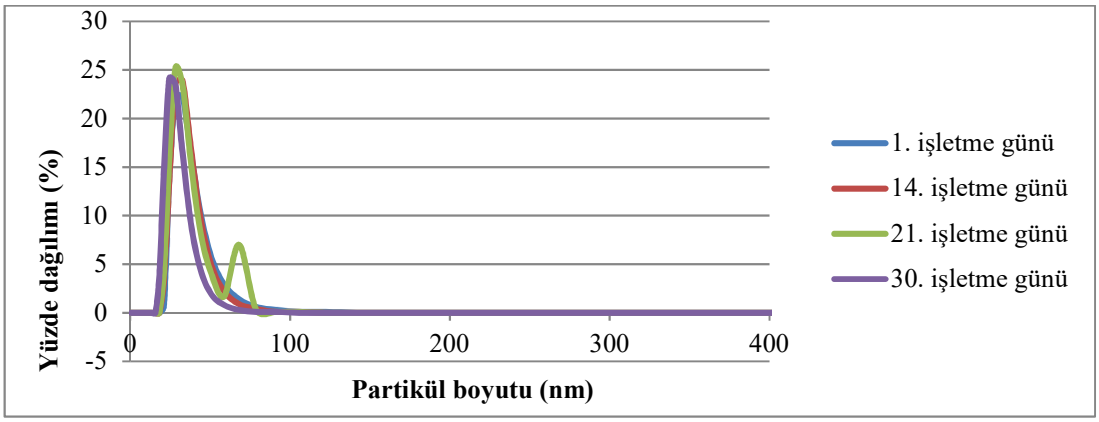


Şekil 4.32 : 2. aşamada titreşimsiz modülün süzüntü akımında ölçülen PSD sonuçları.

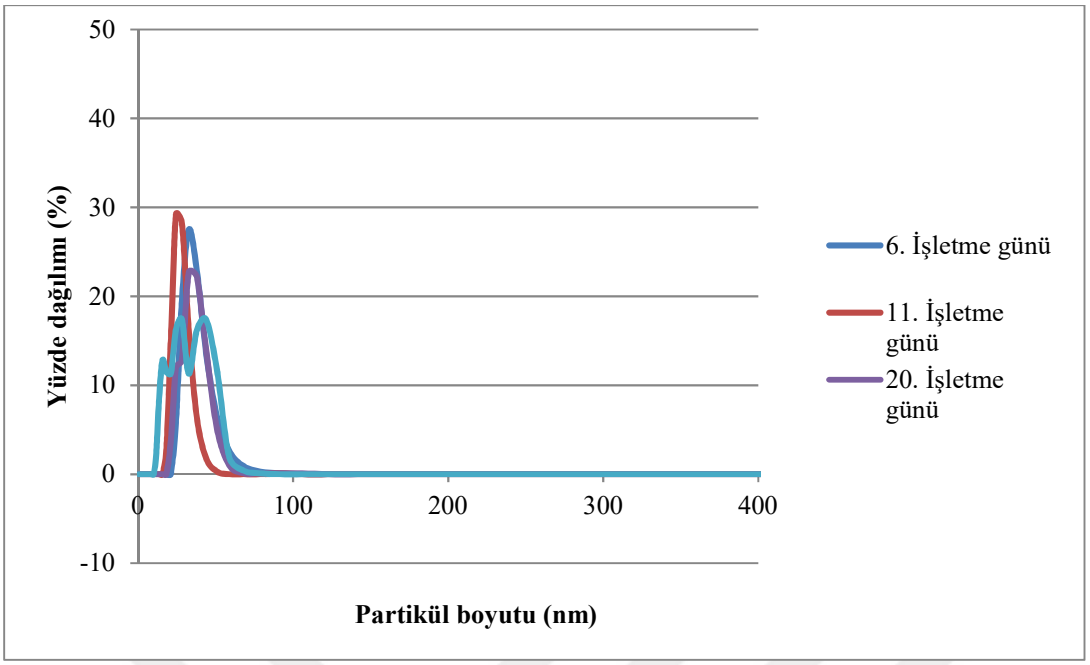


Şekil 4.33 : 3. aşamada titreşimsiz modülün süzüntü akımında ölçülen PSD sonuçları.

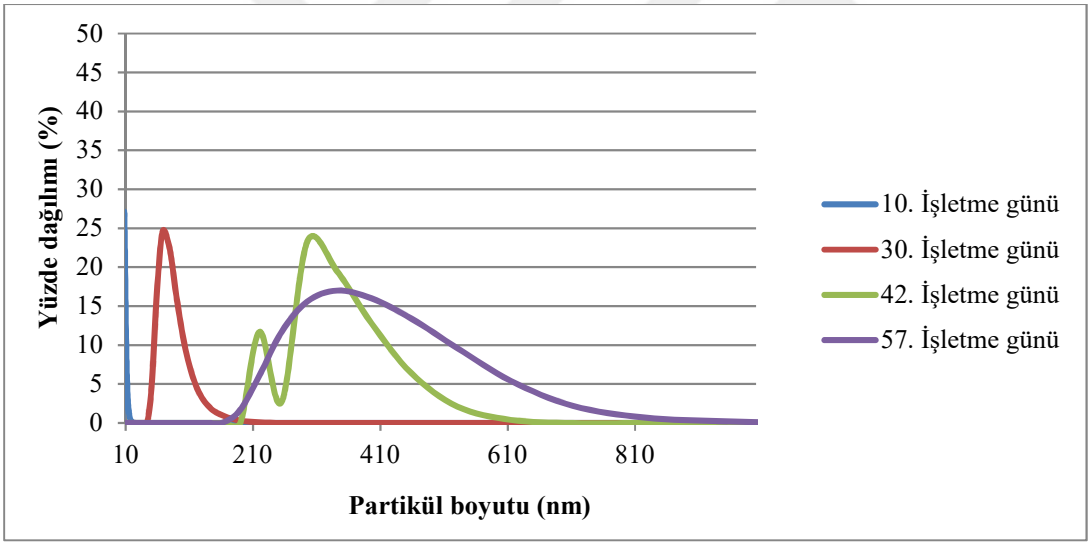
1., 2. ve 3. aşamada manyetik titreşimli modülün süzüntü numunesinde PSD sonuçları Şekil 4.34, Şekil 4.35 ve Şekil 4.36'da gösterilmiştir. Manyetik titreşimli modülün süzüntü numunesinde PSD sonuçları 1. aşamada ortalama 171 ± 72 nm, 2. aşamada 460 ± 42 nm, 3. aşamada ise 430 ± 249 nm'dir.



Şekil 4.34 : 1. aşamada manyetik titreşimli modülün süzüntü akımında ölçülen PSD sonuçları.

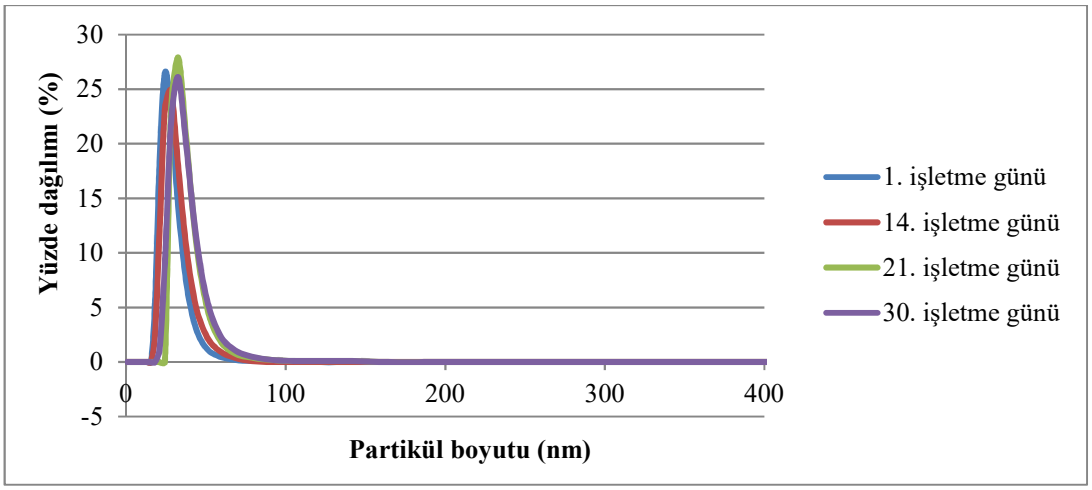


Şekil 4.35 : 2. aşamada manyetik titreşimli modülün süzüntü akımında ölçülen PSD sonuçları.

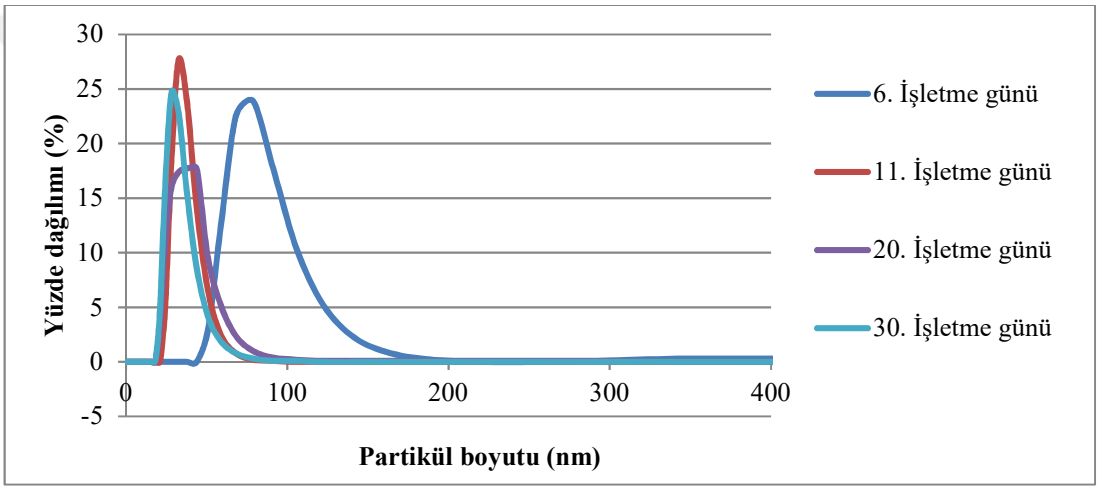


Şekil 4.36 : 3. aşamada manyetik titreşimli modülün süzüntü akımında ölçülen PSD sonuçları.

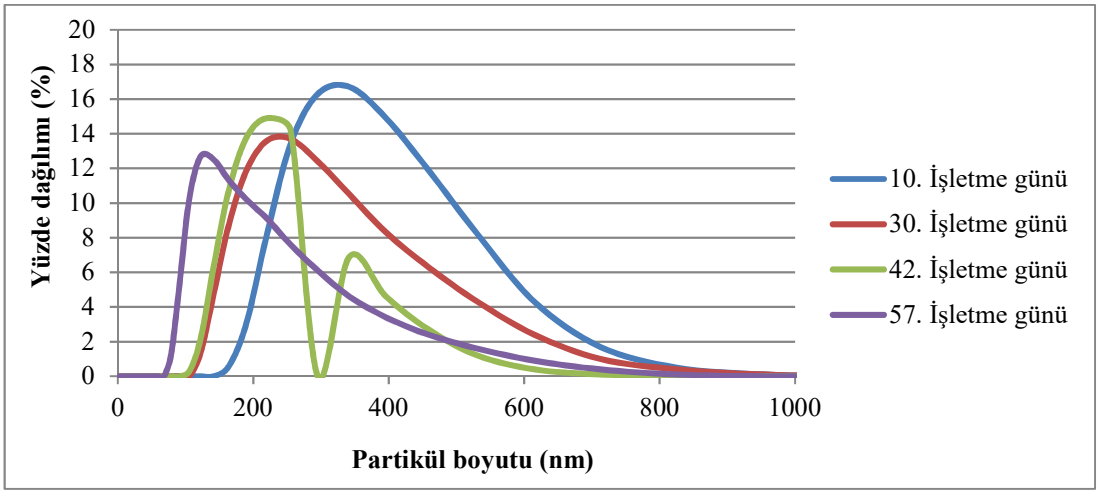
1., 2. ve 3. aşamada mekanik titreşimli modülün süzüntü numunesinde PSD sonuçları sırasıyla Şekil 4.37 Şekil 4.38 ve Şekil 4.39'de verilmektedir. Deney süresince partikül boyutu dağılımı incelendiğinde mekanik titreşimli modülün süzüntü numunesinde PSD sonuçları 1. aşamada ortalama 160 ± 2 nm, 2. aşamada 337 ± 21 nm, 3. aşamada ise 422 ± 87 nm olduğu görülmektedir.



Şekil 4.37 : 1. aşamada mekanik titreşimli modülün süzüntü akımında ölçülen PSD sonuçları.



Şekil 4.38 : 2. aşamada mekanik titreşimli modülün süzüntü akımında ölçülen PSD sonuçları.

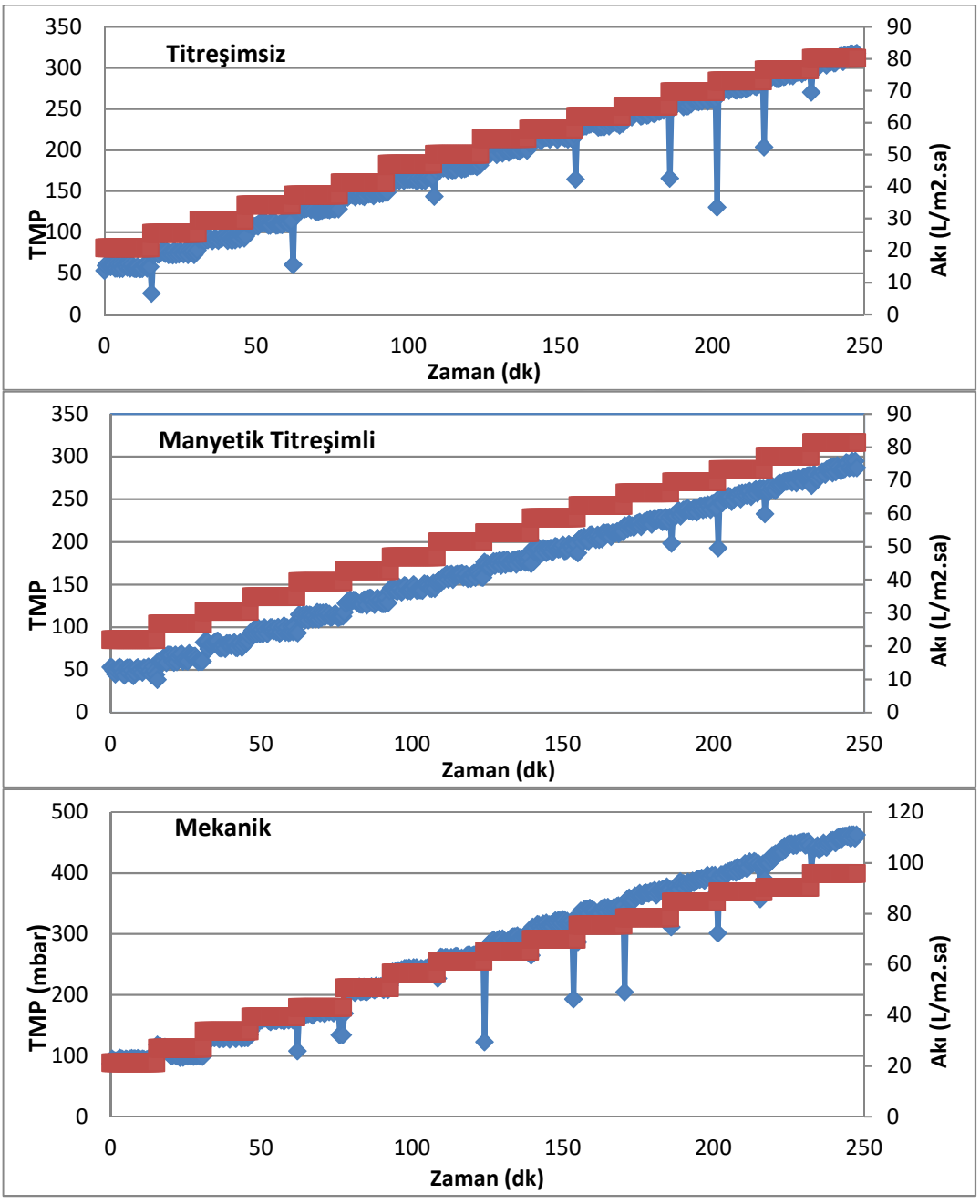


Şekil 4.39 : 3. aşamada mekanik titreşimli modülün süzüntü akımında ölçülen PSD sonuçları.

4.4 Farklı Frekanslarda Gerçekleştirilmiş Kritik Akı Deneyleri

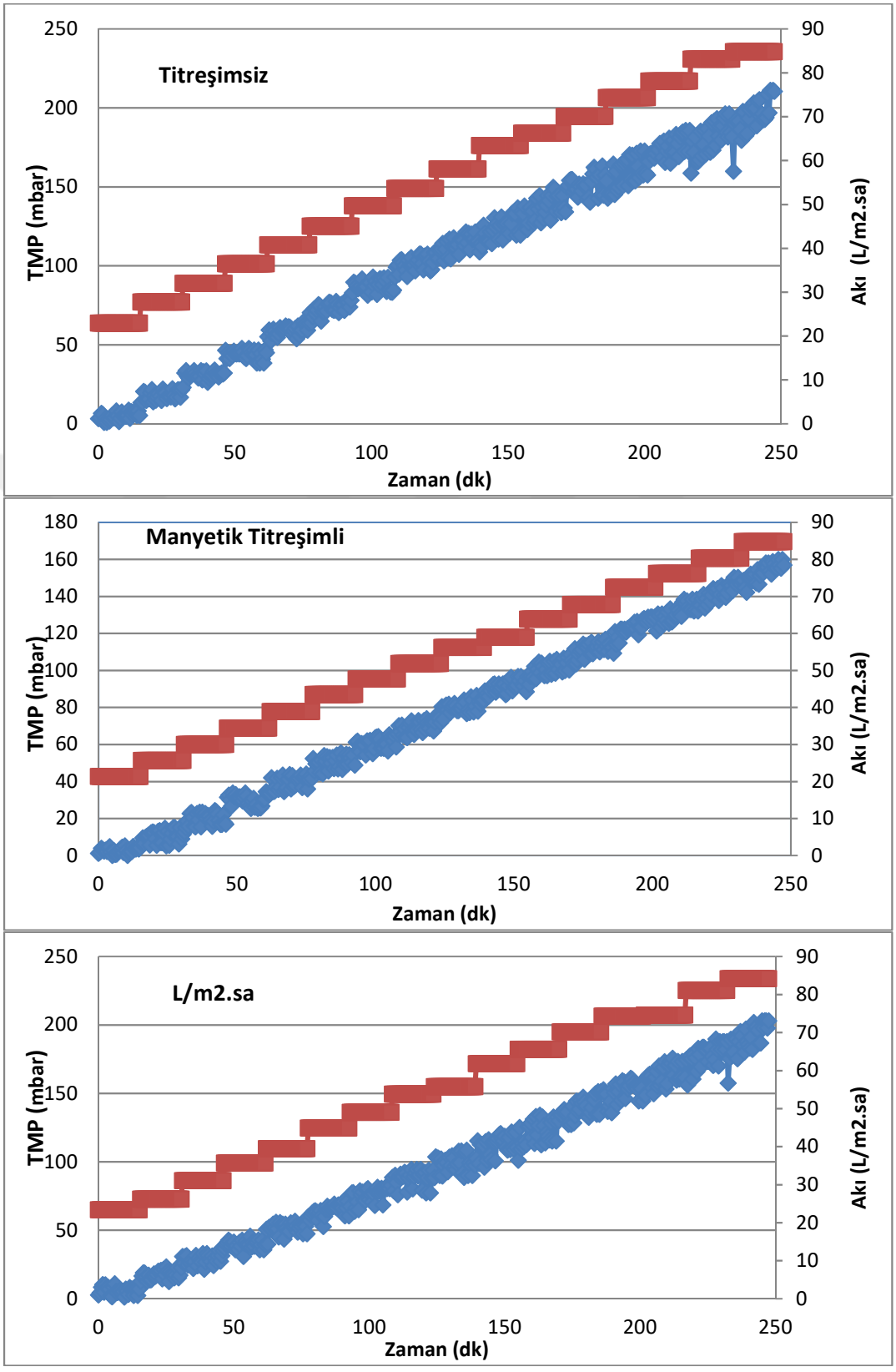
Uzun dönemli MBR deneyleri sonrasında, farklı frekansların filtrasyon performansı üzerinde kısa dönemli etkisini inceleyebilmek için 4 farklı deney seti ile kritik akı testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar sırasıyla Şekil 4.40, Şekil 4.41, Şekil 4.42, Şekil 4.43'da sunulmuştur.

Deney Seti 1'e ait kritik akı testlerinde elde edilen sonuçlar Şekil 4.40'da verilmiştir.



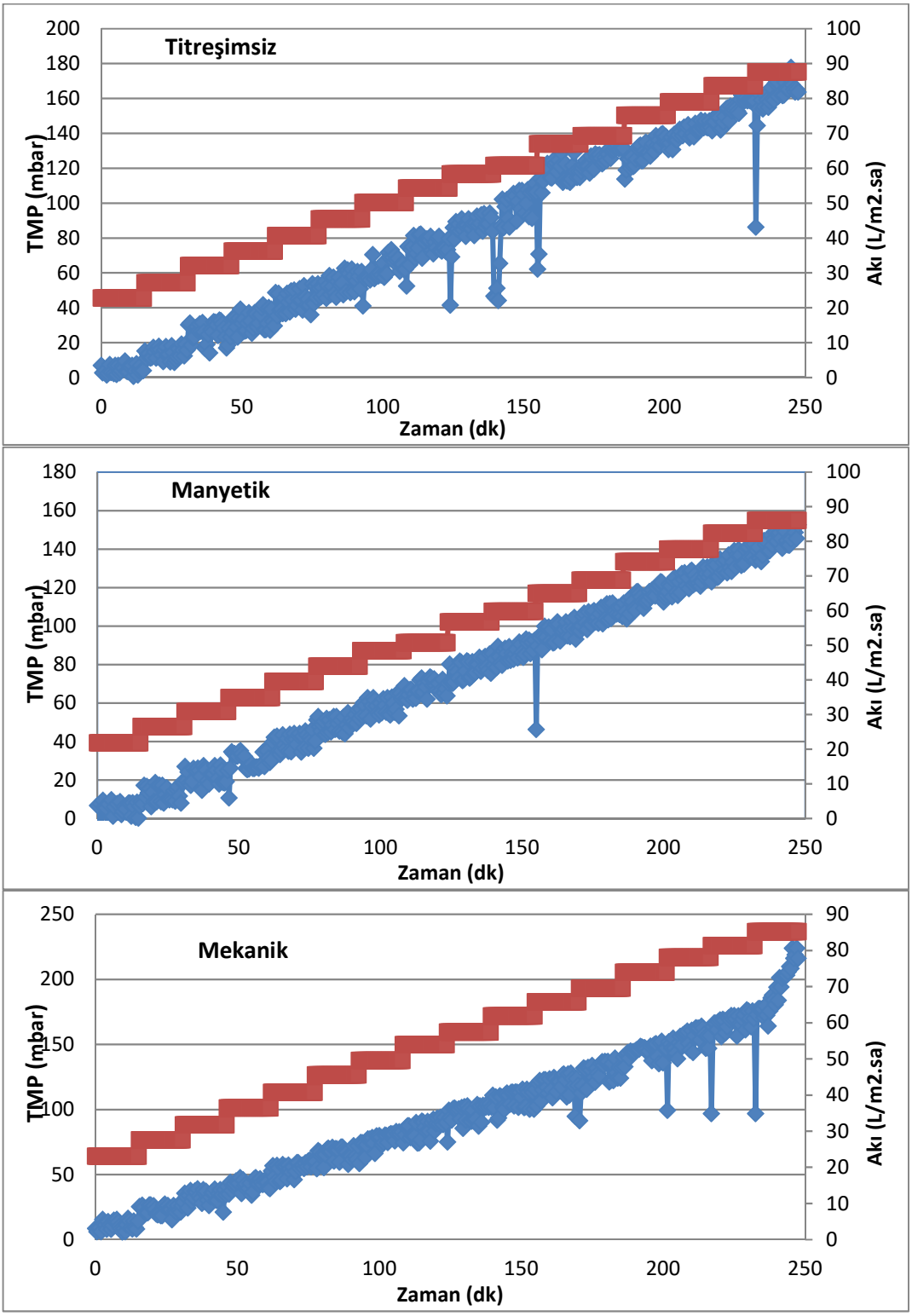
Şekil 4.40 : Deney seti 1' de titreşimsiz, manyetik ve mekanik titreşimli modüllere ait kritik akı grafikleri.

Deney Seti 2'ye ait kritik akı testlerinde elde edilen sonuçlar Şekil 4.41'de verilmiştir.



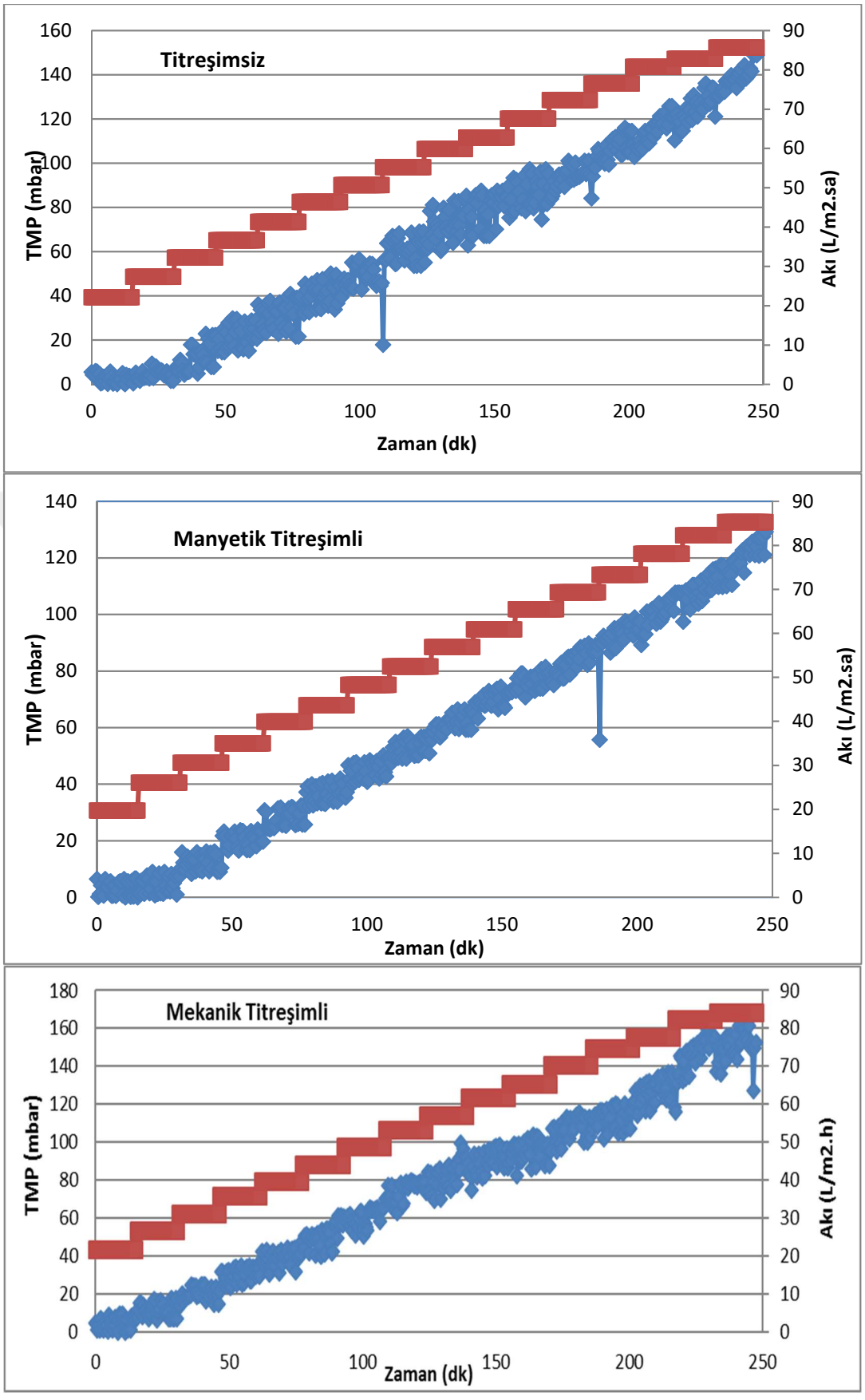
Şekil 4.41 : Deney seti 2'de titreşimsiz, manyetik ve mekanik titreşimli modüllere ait kritik akı grafikleri.

Deney Seti 3'e ait kritik akı testlerinde elde edilen sonuçlar Şekil 4.42'de verilmiştir.



Şekil 4.42 : Deney seti 3'te titreşimsiz, manyetik ve mekanik titreşimli modüllere ait kritik akı grafikleri.

Deney Seti 4'e ait kritik akı testlerinde elde edilen sonuçlar Şekil 4.43'da verilmiştir.



Şekil 4.43 : Deney seti 4'te titreşimsiz, manyetik ve mekanik titreşimli modüllere ait kritik akı grafikleri.

Çizelge 4.18 : Kritik akı grafiklerinden elde edilmiş akılar.

Modül Tipleri	Kritik Akı (L/m^2.sa)			
	1. Deney Seti (Manyetik sistem 0 Hz, mekanik sistem 0 Hz)	2. Deney Seti (Manyetik sistem 30 Hz, mekanik sistem 5 Hz)	3. Deney Seti (Manyetik sistem 75 Hz, mekanik sistem 20 Hz)	4. Deney Seti (Manyetik sistem 150 Hz, mekanik sistem 30 Hz)
Manyetik	54,2	59,0	56,8	60,9
Titreşimsiz	55,0	53,7	58,4	59,8
Mekanik	65,3	61,9	65,9	61,7

Uzun dönem çalışma başlangıcında gerçekleştirilen kritik akı deneylerinde elde edilen sonuçlar aynı şartlar altında gerçekleştirilen 1. deney setinde elde edilen değerlere göre daha düşüktür. Bu durum zamana bağlı olarak çamur karakterizasyonunda gerçekleşen değişim ile ilişkilendirilebilir.

Tüm deney setlerinde mekanik titreşimli modülün kritik akı değerleri diğer modüllere göre daha yüksektir. Bu durum TMP artışının en hızlı gerçekleştiği mekanik titreşimli modülün uzun dönem çalışma sonuçlarını desteklememektedir. Bu da kısa dönemli kritik akı deneylerinin uzun dönem deneyleri için temsil edilebilir olmadığını göstermektedir.

Titreşimsiz membran bütün deneylerde titreşimsiz olacak şekilde aynı koşullar altında çalıştırılmıştır. Buna bağlı olarak 4 deney setinde de benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Deneyler frekans değerlerindeki değişim bazında değerlendirildiğinde; aşamalar arasında ciddi bir fark olmadığı gözlenmiştir. Bu durum kısa dönemli çalışmalarda titreşim frekansının kritik akı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını göstermektedir.

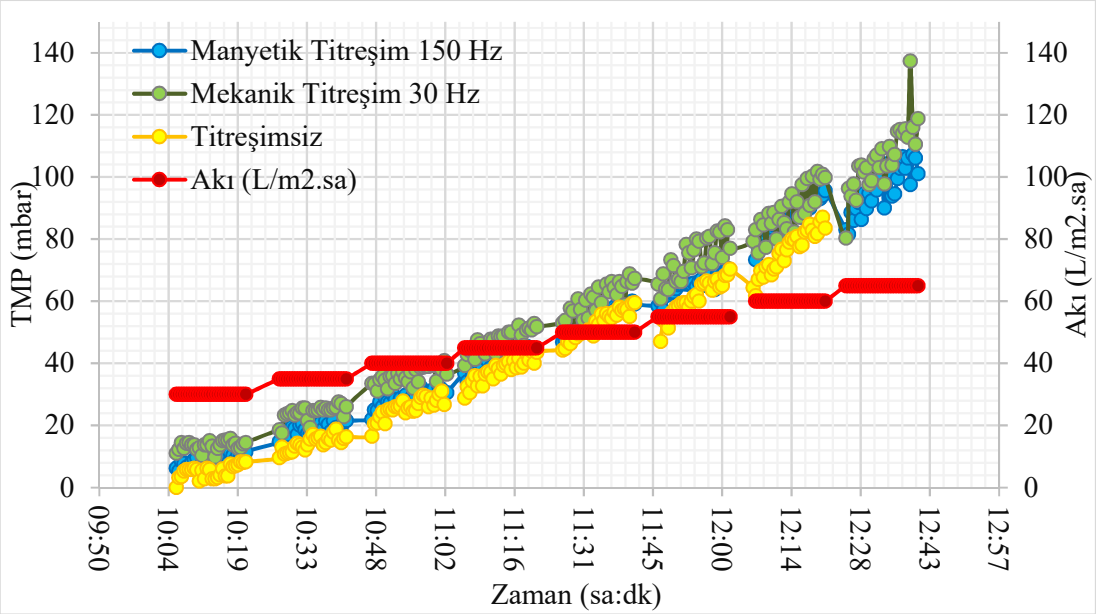
4.5 Üst-Kritik Akı Deneyleri

Üst-kirtik akı deneylerinde öncelikle modüllerin titreşimli ve titreşimsiz durumlardaki kritik aıdları belirlenmiş olup, kritik akının üzerinde uzun süreli deneylere tabi tutulmuşlardır. Elde edilen TMP değerleri kaydedilmiş ve grafik olarak sunulmuştur.

4.5.1 Kritik akının belirlenmesi

Titreşim sistemleri devreye alındıktan sonra, aklimasyonu tam olarak tamamlanmış aktif çamur içerisinde, sistemler maksimum kapasitede çalıştırılarak kritik akı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Manyetik titreşimli sistem 150 Hz frekans ile mekanik

titreşimli sistem ise 30 Hz frekans ile çalıştırılıp modüller kritik akı deneylerine tabi tutululmuştur. Ayrıca titreşimsiz olarak çalıştırılan kontrol modülünde de kritik akı deneyi yapılmıştır. Elde edilen kritik akı verileri grafik olarak Şekil 4.44'da sunulmuştur.



Şekil 4.44 : Manyetik, mekanik ve titreşimsiz modüllerin titreşim sistemleri devredeyken elde edilen kritik akı grafiği.

Grafik incelendiğinde titreşim sistemleri devredeyken kritik akıda herhangi bir değişikliğe sebep olmadığı üstüste bindirilmiş verilerden anlaşılmaktadır. Akı adımlarında, TMP artışları her üç modülde birbirine çok yakın olarak gerçekleşmiştir. Kritik akı 40 L/m^2.sa olarak belirlenmiştir. Sistemler kritik akının üzerinde çalıştırılacağından tüm modüller için akı 45 L/m^2.sa olarak seçilmiş olup, bu akıda sabitlenmiştir.

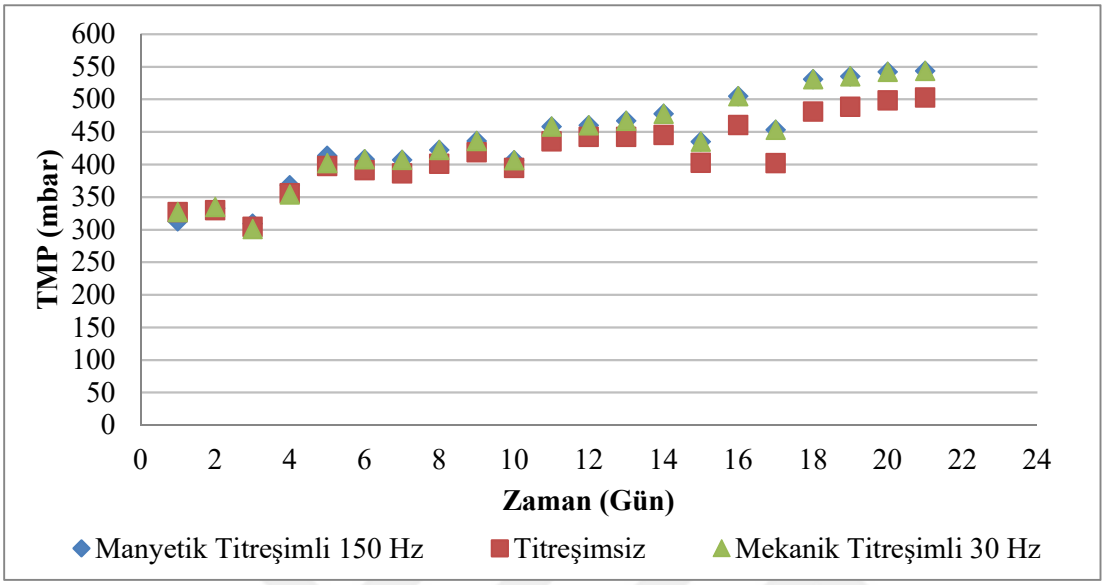
4.5.2 Uzun süreli üst-kritik akı deneyi TMP profili

Üst kritik akı deneyi boyunca akı değeri 45 L/m^2.sa değerinde sabit tutulmuş ve TMP değerleri sürekli izlenmiştir. Titreşimsiz, manyetik 150 Hz ve mekanik 30 Hz titreşimli modüllerdeki TMP değişimi Şekil 4.45'de verilmektedir.

Deney 24 gün boyunca sürdürülmüş ve TMP artışları izlenmiştir. Deney kritik akı üzerinde gerçekleştirildiği için başlangıç gününde tüm modüllerde 325 mbar vakum basıncı ölçülmüştür. Titreşimsiz, manyetik ve mekanik titreşimli modüllerin ortalama TMP değerleri Çizelge 4.19 'da verilmiştir.

Çizelge 4.19 : Tüm modüllerde deney boyunca ortalama TMP değerleri.

TMP	Titreşimsiz	Manyetik Titreşimli	Mekanik Titreşimli
Ortalama	439,5	415,1	438,7
Standart Sapma	70,7	56,0	71,2



Şekil 4.45 : Üst-kritik akı deneyi TMP profili.

İşletme koşulları 3. Aşamadaki koşullar ile aynıdır. Modüller 45 L/m^2.sa sabit akı ile kritik akı üzerinde işletildiğinde, hiçbir titreşim sistemi uzun dönemli deney boyunca etkin bir biçimde vakum basıncını düşürememiştir. Bu deney boyunca biyoreaktör içerisindeki çamurda AKM 7371±686 mg/L olarak ölçülmüştür. AKM konsantrasyonu deney boyunca sabit kalmıştır. TMP profili irdelendiğinde, 325 mbar vakum basıncı ile filtrasyona başlayan modüllerin her geçen gün basıncı artmaya devam etmiştir. Deneyin 22. günüde, 500 mbar üzerine çıkan vakum basıncı sebebiyle deney sonlandırılmıştır. Titreşim sistemlerinin, maksimum frekansda çalışmasına rağmen, kritik akı üzerinde işletildiğinde her hangi bir avantaj sağlamadığı anlaşılmıştır.

4.6 Sonuç ve Tartışma

Laboratuvar ölçekli uzun dönemli deneylerde elde edilen TMP grafikleri; kayma gerilimi hesaplamaları, membran direnç değerleri ve partikül boyutu dağılımı sonuçları ile beraber değerlendirildiğinde, mekanik titreşimli modülün yüksek değerlerde TMP profili oluştururken manyetik titreşimli sistemin neden en iyi performansı sergilediği net olarak anlaşılmaktadır.

Beier ve diğerleri bir araştırmasında Bird ve diğerleri tarafından ortaya konulan ampirik formulü modifiye ederek içi boşlulu fiber membranlarda, titreşim ile oluşan kayma gerilimi ve bu kayma geriliminin etki mesafesini hesaplamışlardır. (Beier ve diğ., 2006; Bird ve diğ. 2002) Bird ve diğerleri tarafından ortaya konulan formül Denklem 4.7'de verilmiştir.

$$\gamma_s = \upsilon_{ave}\sqrt{\frac{\omega}{2\upsilon}}[\sin(\omega t) - \cos(\omega t)] \qquad (4.7)$$

Burada;

t: zaman

ω: açısal frekans (2×π×frekans)

v_{ave}: ortalama genlik hızı (genlik x frekans)

ν: kinematik vizkozite

Denklem 4.7 kullanılarak laboratuvar ölçekli deneylerde kullanılan mekanik ve manyetik titreşimli sistemlerin kayma gerilimi ve kayma geriliminin etki mesafesi hesapları yapılmış ve Çizelge 4.20'de verilmiştir.

Çizelge 4.20 : Mekanik ve manyetik titreşimli sistemlerin kayma gerilimindeki değişimler.

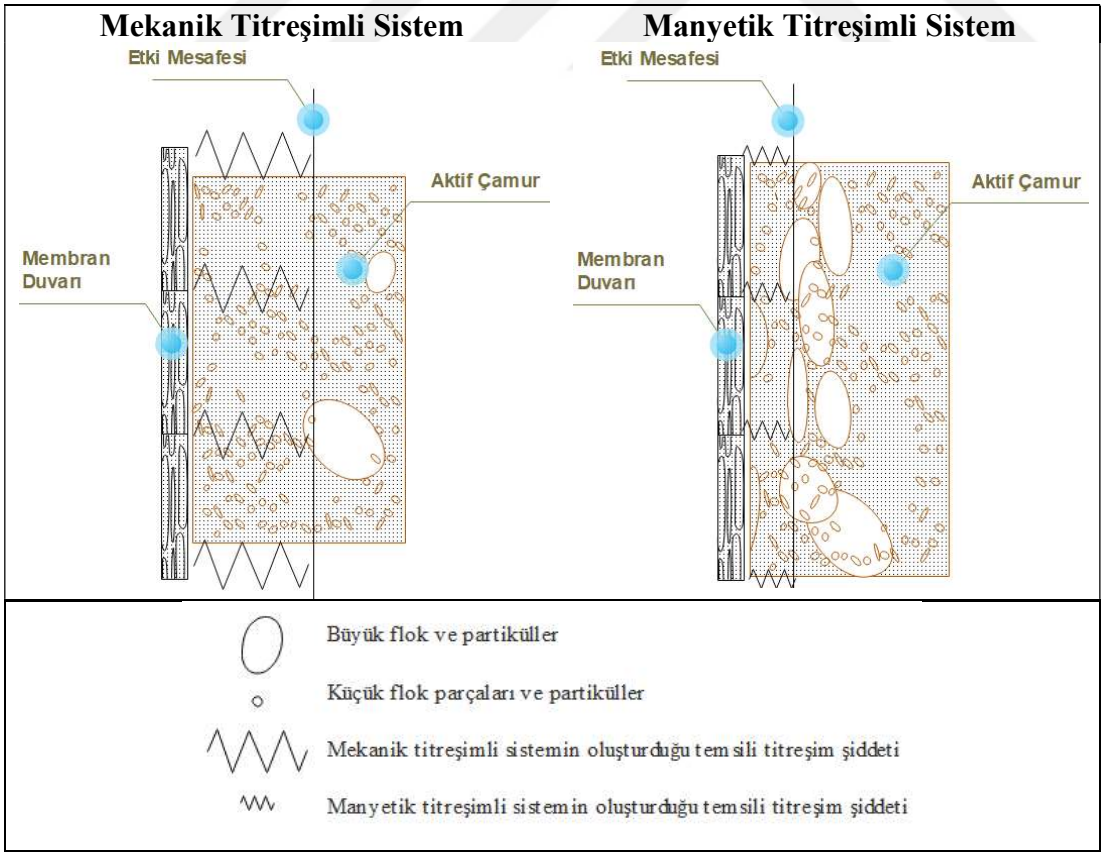
Genlik (mm)	Frekans (Hz)	Etki Mesafesi (μm)	Kayma Gerilimi Oranı (1/s, τ)
4*	5*	253	316
2,5*	20*	126	1582
2*	30*	103	2325
0,01**	30**	103	12
0,01**	150**	46	130

*:Mekanik titreşimli sisteme ait değerler
**:Manyetik titreşimli sisteme ait değerler

Çizelge 4.20'deki değerlere bakıldığında manyetik titreşimli sistemin teknik özellikleriyle uyuşan etki mesafesi değerleri ve kayma gerilimi değerleri mekanik sistemin oluşturduğu değerlere göre nispeten düşüktür. Ayrıca özellikle 150 Hz frekans değerinde oluşan etki mesafesinin 46 mikrometre olarak hesaplanması, bu frekansın, diğer frekans değerlerine göre, daha küçük partüküler parçacıklara etki ederken, bu boyutun üzerindeki partiküllere etkisinin sınırlı olacağı hesaplanmaktadır.

Deney süresince partikül boyut dağılımı incelendiğinde aktif çamurda ortalama partikül boyutu değerlerinin 1. aşamada 44 ± 6 µm, 2. aşamada 34 ± 4 µm, 3. aşamada ise 35 ± 3 µm olduğu görülmektedir. Bu boyutlar ve üzerinde değerler üyük boyutlu çamur floklarını temsil etmekte olup membranı tıkayıcı herhangi bir etkisi bulunmamakla beraber membran yüzeyinde kek oluşturarak ek bir bariyer oluşumuna destak vermektedir. Bu değerlerden daha düşük boyuttaki partiküller ise membran por boyutuna daha yakın olduğundan membran tıkanmasına yardımcı olmaktadır.

Mekanik titreşimli sisteme ait 5-20 ve 30 Hz değerlerinin 2-4 mm gibi yüksek genliklerde çalışması hem büyük boyutlu partikülleri (büyük aktif çamur flokları) etkilemesi hem de yüksek kayma gerilimi oranı oluşturması sebebiyle membran yüzeyine yakın büyük flokların parçalanıp ufalmasına sebeb olabileceği öngörülmektedir. Manyetik titreşimli sisteme ait 30 Hz ve 150 Hz frekansın küçük boyutlu partiküllere etki etmesi ve genlik değerinin nispeten çok küçük olması sebebiyle mekanik titreşim sistemine göre daha düşük partikül boyutu ve kayma gerilimi oranına ulaşmıştır. Şekil 4.46'da bu mekanizmanın şekilsel açıklaması görülmektedir.



Şekil 4.46 : Mekanik ve manyetik titreşimli sistemlerin tıkanma mekanizmasının karşılaştırması.

Manyetik titreşimli sistem membranlara yakın büyük boyutlu floklara zarar vermemiş, fakat küçük boyutlu flokların membrandan uzaklaşmasına sebeb olduğu anlaşılmaktadır. Manyetik titreşim sisteminde büyük boyutlu flokların zarar görmemiş olması, bu flokların membranlarda ek bir bariyer oluşturmasına ve membranları por tıkanmasına karşı korunmasına sebeb olmuştur.

Laboratuvar ölçekli çalışmalar sonrasında membranlara uygulanan temizlik çalışmaları, membran yüzeyinde kek tabakası oluşumu dolayısıyla manyetik ve titreşimsiz sistemlerde kullanılan membranların, mekanik titreşimli sistemde bulunan membrana göre, daha az por tıkanmasına maruz kaldığını göstermiştir. Filtrasyon performansı başlığı altında verilen Şekil 4.17'deki direnç değerleri incelendiğinde, tüm deney aşamalarında manyetik titreşim sisteminde kek direnci değerlerinin mekanik titreşimli ve titreşimsiz modüllere oranla daha yüksek değerlerde olduğu, por tıkanması direnç değerlerinin ise daha düşük ölçüldüğü görülmektedir. Bu sonuçlar, yukarıda bahsedilen ve Denklem 4.7 ile hesaplanan değerler ile karşılaştırıldığında, frekans değerinin kek tabakası oluşumunu etkilediği, genlik değerini ise kayma gerilimini arttırarak kek tabakası oluşumunu olumsuz etkilediği anlaşılmaktadır. Mekanik titreşimli sistemde elde edilen yüksek miktardaki titreşim şiddetinin membran yüzeyinde kek tabakası oluşumunu azaltıp, küçük partiküllerle tıkanmaya yol açtığı, buna karşılık membran porlarının aktif çamur içerisinde bulunan çözünmüş maddelerle daha kolay tıkandığı bu sonuçlar ile desteklenmiştir. Manyetik titreşimli sistemde oluşan kek tabakası titreşim ile birlikte zarar görmediği için ek bariyer görevi görerek membranda daha az por tıkanması oluşturmuştur.

Anusha Kola ve diğerleri yaptıkları bir çalışmada, anerobik membran biyoreaktörlerde enine titreşim modunu sabit 2.5 mm genlikte 6.7, 13.3 ve 20 Hz frekanslarında denemişlerdir. (Kola A. ve diğ., 2014) Bu frekanslarda elde ettikleri kayma gerilimi oranları ise 1375 ile 30108 1/s arasında değişmiş olup, Çizelge 4.20'de verilen ve bu tez çalışmasında denenen, mekanik titreşimli sisteme yakın kayma gerilimi oranlarını denemişlerdir. Filtrasyon esnasında sürekli titreşim vererek gerçekleştirdikleri çalışmada, düşük frekans ve düşük kayma gerilimi oranının uzun vadede daha faydalı olduğu, düşük kayma gerilimi oranında kek tabakasının tamamen sıyrılmamış olmasının kirlenmeye karşı ikincil bariyer oluşturduğu bu sebeble kimyasal yıkama ile gidrilebilen por tıkanmasını ve kalıcı por tıkanmasını azalttığı sonucuna ulaşmışlardır.

Bu tez çalışmaında da manyetik titreşim modunun yüksek frekansta çalıştırılması fakat genlik miktarının çok düşük olması sebebiyle etki mesafesi ve kayma gerilimi oranı düşük kalmasına rağmen kek tabakasına ve büyük floklara zarar vermeden küçük partiküllere engel oluşturduğu ve zarar göremeyen kek tabakasının ikincil bariyer oluşturarak daha uzun süreli düşük TMP değerlerine ulaştığı sonucuna verılmıştır.

5. PİLOT ÖLÇEKLİ UZUN SÜRELİ DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde pilot ölçekte çalıştırılan titreşimli modül sistemine ait deney sonuçları sunulmuştur. Öncelikle atıksu kaynağı ve çamur karaterizasyonuhakkında bilgi verilmiş, kullanılan pilot system ve deneysel plan açıklanmıştır. Daha sonar ise elde edilen deney sonuçları filtrasyon performansı ve arıtma performansı olarak iki farklı başlık altında değerlendirilmiştir.

5.1 Analiz Yöntemleri ve Test Metodolojisi

5.1.1 Atıksu kaynağı ve karakterizasyonu

Pilot ölçekli MBR çalışmalarında, laboratuvar ölçekli MBR çalışmalarından farklı olarak ham evsel atıksu kullanılmıştır. Ham evsel atıksu, İSKİ Baltalimanı Atıksu Ön Arıtma Tesisi kum tutucu çıkışından temin edilmiştir. Çizelge 5.1'de kullanılan evsel atıksuyun karakterizasyonu verilmiştir.

Çizelge 5.1 : Deneyde kullanılan evsel atıksu karakterizasyonu.

Parametre	Birim	Değer (Ortalama ± Std.Sapma)
Toplam KOİ	mg/L	453±137
Çözünmüş KOİ	mg/L	141±67
Toplam Katı Madde (TKM)	mg/L	5611±1604
Askıda Katı Madde (AKM)	mg/L	379±286
Toplam Azot (TN)	mg/L	58±10
NH_4	mg/L	44±8,5
NO_2	mg/L	0,09±0,03
NO_3	mg/L	0,611±0,25
Toplam Fosfor (TP)	mg/L	5±0,94
pH	-	7,88±0,28
Bulanıklık	NTU	277±150

5.1.2 Çamur karakterizasyonu

Pilot ölçekli MBR sisteminde kullanılan aşı çamuru İSKİ Paşaköy Biyolojik Arıtma Tesisi aktif çamur ünitesinin geri devir hattından alınmıştır. Aşı çamurunun karakterizasyonu Çizelge 5.2 :'te verilmektedir.

Çizelge 5.2 : Aşı çamuru karakterizasyonu.

Parametre	Birim	Değer (Ortalama ± Std.Sapma)
Toplam KOİ	mg/L	7356 ± 1289
TKM	mg/L	11036 ± 124
Toplam Uçucu Katı Madde (TUKM)	mg/L	5870 ± 1691
TUKM/TKM	-	0,43 ± 0,04
AKM	mg/L	9868 ± 900
Uçucu Askıda Katı Madde (UAKM)	mg/L	5850 ± 382
UAKM/AKM	-	0,60 ± 0,02
pH	-	7,41 ± 0,06

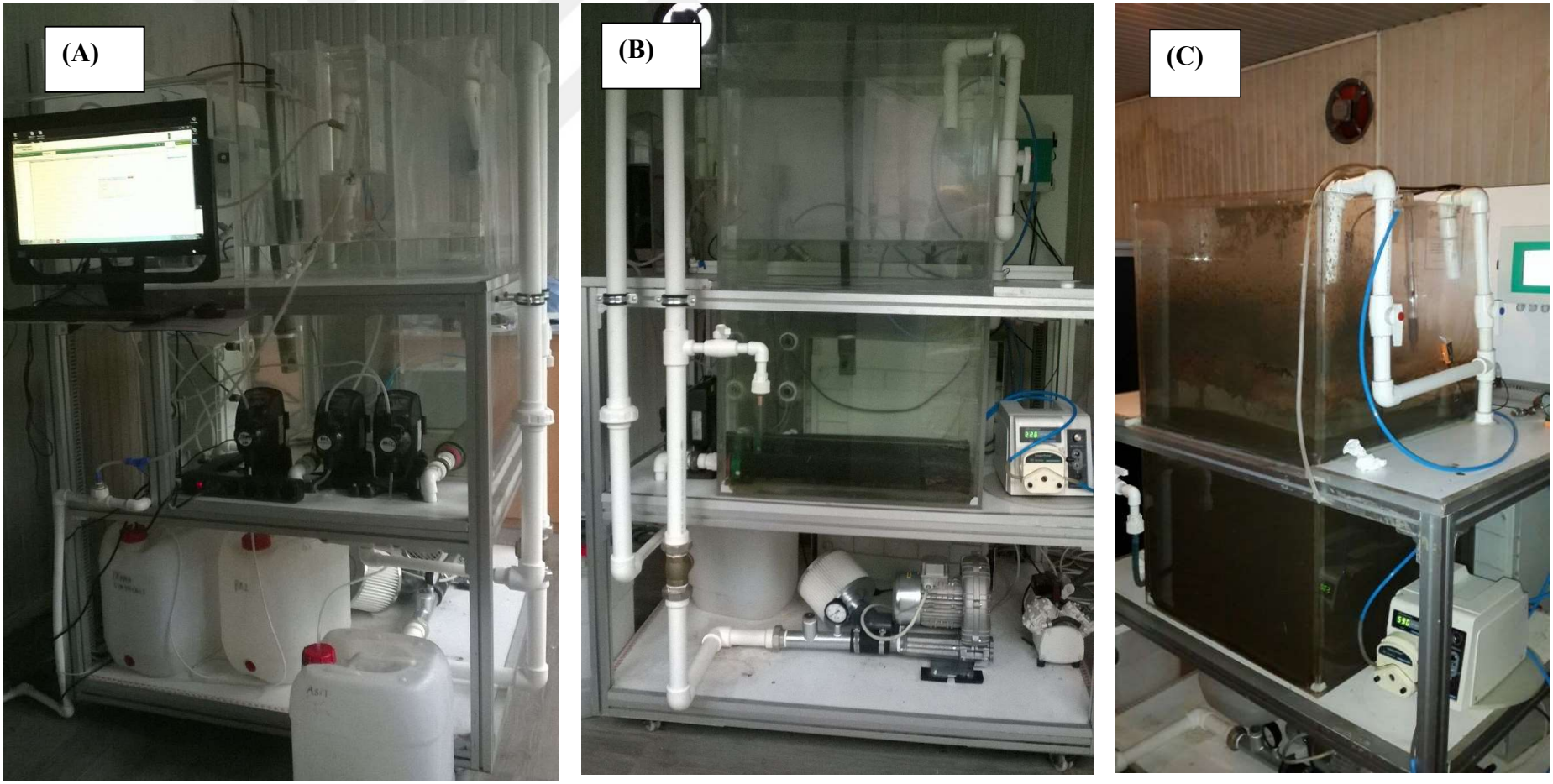
5.1.3 Pilot ölçekli MBR sistemi

Tez çalışmalarında laboratuvar ölçekli çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre seçilen titreşim sisteminin pilot ölçekli bir membran modülü ile gerçek evsel atıksu kaynağı besleyerek pilot ölçekli tesiste denenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, pilot ölçekli tesis İSKİ'ye ait Baltalimanı Atıksu Arıtma Tesisi'ne yerleştirilmiştir.

Pilot ölçekli çalışmalarda kullanılan MBR prosesi tam otomasyon SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) sistemi ile kontrol edilmiştir. MBR sistemi, pilot boyutta modülleri test etmeye imkan verecek şekilde tasarlanmıştır.

Pilot ölçekli sistem bir konteyner içerisine yerleştirilmiştir. Konteyner ve pilot sisteme ait görünümler Şekil 5.1 : ve Şekil 5.2 :'da verilmiştir. Pilot sisteminin teknik özellikleri ise Çizelge 5.3 :'te özetlenmektedir.

Şekil 5.1 : Pilot ölçekli MBR sisteminin yerleştirildiği konteynerin görünümü.



Şekil 5.2 : Pilot ölçekli MBR sisteminin görünümü; A) Sistemin yandan görünümü, B) Sistemin önden görünümü, C) Aklimasyon süreci başlatılmış aktif çamur içeren sistemin görünümü.

Çizelge 5.3 : Pilot ölçekli MBR sisteminin teknik özellikleri.

Birim	Değer
Besleme tankı kapasitesi	1000 L
Peristaltik pompa debisi	10-5000 mL/dk
Reaktör boyutları	Genişlik: 50 cm, Uzunluk: 100 cm, Derinlik: 60 cm

Reaktör içerisinde pH, ORP, sıcaklık ve çözünmüş oksijen değerlerinin ölçülebilmesi için dört adet prob bulunmaktadır. Ölçülen değerler, reaktörün bağlı olduğu bilgisayar sisteminde eş zamanlı olarak kaydedilmektedir.

Çözünmüş oksijen probu (TETHYS Instruments, Fransa), reaktör içerisindeki oksijen seviyesini anlık olarak ölçebilmektedir. MBR içerisinde istenen oksijen konsantrasyonu SCADA sistemine girilmektedir. Oksijen konsantrasyonu istenen değerin altına düştüğünde, reaktör içerisinde bulunan difüzörler devreye girerek reaktörü havalandırmakta ve oksijen istenilen konsantrasyona geldiğinde havalandırıcılar otomatik olarak durmaktadır.

pH probu (TETHYS Instruments, Fransa), MBR içerisindeki anlık pH değerlerini ölçmektedir. Reaktör içerisinde olması istenen pH aralığı, probun bağlı olduğu bilgisayar vasıtasıyla ayarlanabilmektedir. Reaktör içerisindeki pH değeri istenilen değerin üzerine çıkarsa asit, altına inerse baz pompaları devreye girerek sisteme asit veya baz dozlaması yapmak suretiyle pH istenilen seviyelerde tutulmaktadır.

Sistemde bir adet asit ve baz pompası bulunmaktadır. Asit ve baz pompaları, asit ve baz besleme tankına bağlıdır.

Vakum hattında basıncın ölçülerek kaydedilmesini sağlamak amacıyla dıştan diyaframlı basınç ölçer (Keller, Almanya) kullanılmıştır. Basınç transmitteri 0-4 bar aralığında ölçüm yapabilmektedir.

MBR sisteminde ORP değerinin online ölçümünün yapılabilmesi için bir adet ORP probu (TETHYS Instruments, Fransa) bulunmaktadır.

MBR sisteminde elde edilen süzüntü küçük bir numune haznesinde toplandıktan sonra atılmaktadır. Süzüntü miktarı elektromanyetik debimetre ile hassas olarak ölçülmekte ve online olarak SCADA sisteminde kayıt edilmektedir.

MBR sisteminde pilot ölçekli membran modülleri için uygun bir adet yüksek kapasiteli (10-5000 ml/dk) bir vakum pompası (Longerpump, BT300, Çin) bulunmaktadır.

Vakum pompası membrandan süzüntüyü çekmenin yanı sıra, belirli aralıklarla (9,5 dk filtrasyon, 0,5 dk geri yıkama) süzüntü suyunu kullanarak membranlarda geri yıkamanın yapılmasında da kullanılmaktadır. Geri yıkama sırasında vakum pompası normal çalışma yönününün tersi yönünde çalışarak vakum yerine geri yıkama işlemini gerçekleştirmektedir.

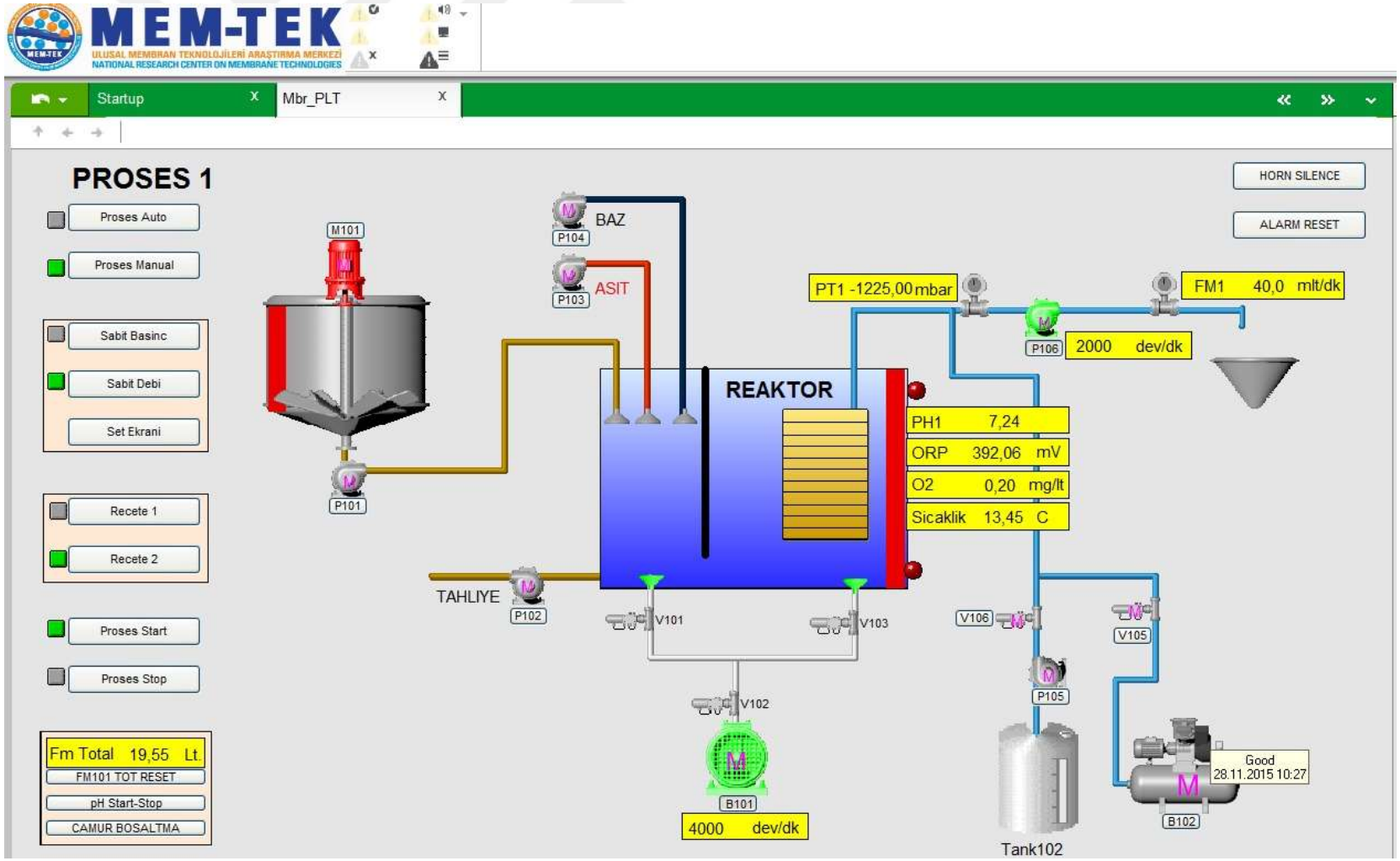
Pilot ölçekli sistemde, bir adet besleme dalgıç pompası (WILO-TMW 32/8, Almanya) bulunmaktadır. Bu pompa ham atıksuyun toplandığı giriş tankından MBR sistemine beslemeyi sağlamaktadır.

MBR'de istenilen çamur yüksekliğinin seviyesi SCADA sistemine girilerek reaktörde seviye kontrolü yapılabilmektedir. Reaktörden membran yardımı ile süzüntü suyu çekildikçe, seviye girilen değerin altına düşmekte ve sistem otomatik olarak besleme pompalarını çalıştırmaktadır. Besleme pompaları seviye tekrar istenilen değere gelene kadar çalışmasını sürdürmekte ve istenilen yükseklik sağlandığında besleme pompaları otomatik olarak durmaktadır.

Sistemdeki çamur yüksekliği, taşkın sensörleri kullanılarak kontrol edilmiştir. Bu sensörler yardımı ile reaktördeki seviye istenen değerde tutulmaktadır. Çamur seviyesi istenilen değeri geçtiğinde, seviye sensörü otomatik olarak bu durumu algılayarak taşma sinyalini devreye sokmakta ve besleme pompasının çalıştırmakta ve durdurmaktadır.

Pilot ölçekli MBR sistemi SCADA sistemine bağlıdır ve tüm kontroller bu SCADA sistemi ile yapılabilmektedir. SCADA'nın ana ekran görüntüsü Şekil 5.3 :'de verilmektedir.

SCADA ekranında tüm sistemin akım şeması görülebilmekte ve üniteler ile ilgili işletme parametreleri gerektiğinde bu ekrandan değiştirilebilmektedir. Geri yıkama, kimyasal dozlama, vanaların açılıp kapanması ve basıncın ayarlanması gibi bütün işlemler SCADA kontrol sistemi vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir.



Şekil 5.3 : Pilot ölçekli MBR Sistemi SCADA ana ekran görünümü.

5.1.4 Deneysel plan

Pilot ölçekli sistemde öncelikli olarak laboratuvar ölçekli sistemde diğer alternatiflere göre daha yüksek filtrasyon performansı sağlayan manyetik titreşimli sistem 30 Hz frekansta kullanılmıştır. Daha sonra manyetik titreşim sisteminin verdiği sonuçları karşılaştırabilmek açısından bu çalışmayı takiben titreşimsiz modül referans olarak pilot ölçekte çalıştırılmıştır. Son aşamada ise manyetik titreşimli sistemde frekans değeri 150 Hz'e çıkarılarak sistem işletilmiştir. Pilot sistemde uygulanan deneysel plan Çizelge 5.4 :'de verilmiştir.

Çizelge 5.4 : Pilot sistemde uygulanan deneysel plan.

Deney Aşamaları	Frekans Değeri
Manyetik titreşimli	30 Hz
Titreşimsiz	-
Manyetik titreşimli	150 Hz

Her bir aşama başlangıcından önce kullanılacak olan membran modülleri saf su ile permeabilite testine tabi tutulmuş ve membran dirençleri belirlenmiştir. Permeabilite ve direnç testlerini takiben kritik akı deneyi gerçekleştirilmiştir. Sistem, kritik akı deney sonuçlarına göre seçilen akıda işletilmiştir.

5.1.5 İşletme koşulları

Pilot ölçekli MBR reaktörü aerobik koşullarda işletilmiştir. MBR sistemi ham evsel atıksu ile beslenmiştir. Sistemin işletilmesinde kullanılan işletme parametreleri Çizelge 5.5 :'de verilmiştir.

5.1.6 Analiz metotları

Çalışma süresince laboratuvar ve pilot ölçekli sistemlerde arıtma ve filtrasyon performanslarının izlenmesi için Bölüm 4, Çizelge 4.8 :'de belirtilen analizler yapılmıştır. MBR sistemlerinin işletimi sırasında; giriş atıksuyunda, reaktör içerisinde ve reaktörün süzüntü akımında çeşitli analizler belirli sıklıklarla gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 5.5 : MBR sisteminin işletme parametreleri.

İşletme parametreleri	**1. Aşama Manyetik Titreşim (30 Hz)**	**2. Aşama Titreşimsiz**	**3. Aşama Manyetik Titreşim (150 Hz)**
Manyetik Sistem Titreşim Frekansı (Hz)	30	-	150
Debi (ml/dk)	150	150	150
Hidrolik bekleme süresi (HRT) (sa)	24	24	24
Çamur Yaşı (SRT) (gün)	∞	∞	∞
Çözünmüş oksijen (ÇO) (mg/L)	8,6 ± 0,85	5,4 ± 1,8	4,43 ± 1,46
Sıcaklık (°C)	10,3 ± 1,6	20,1 ± 2	23,7± 1,25
ORP (mV)	335,4 ± 563	237,7 ± 26,3	220,6 ± 44,5
pH	7,12 ± 0,25	7,80 ± 0,36	7,63 ± 0,28
Süzüntü üretim süresi* (s)	570 (her 10 dakikada 9,5 dakika süzüntü üretimi)	570 (her 10 dakikada 9,5 dakika süzüntü üretimi)	570 (her 10 dakikada 9,5 dakika süzüntü üretimi)
Rutin geri yıkama süresi* (s)	30 (9,5 dakikalık süzüntü üretimi sonrasında 0,5 dakika rutin geri yıkama)	30 (9,5 dakikalık süzüntü üretimi sonrasında 0,5 dakika rutin geri yıkama)	30 (9,5 dakikalık süzüntü üretimi sonrasında 0,5 dakika rutin geri yıkama)

Çizelge 5.6 : Laboratuvar ve pilot ölçekli MBR sistemlerinin işletiminde ölçülen parametreler, ölçüm noktaları ve ölçüm sıklıkları.

Parametre	MBR giriş akımı	MBR süzüntü akımı	MBR
Sıcaklık			Online olarak sürekli
pH	7 gün/hafta	7 gün/hafta	Online olarak sürekli
Çözünmüş oksijen			Online olarak sürekli
İletkenlik*	7 gün/hafta	7 gün/hafta	Online olarak sürekli
Giriş debisi (Q_g)	7 gün/hafta	-	-
Süzüntü debisi (Q_p)	-	Online olarak sürekli	-
Havalandırma debisi (Q_h)	-	-	Online olarak sürekli
TMP	-	Online olarak sürekli	-
Akı	-	Online olarak sürekli	-
Çamur hacim indeksi (SVI)	-	-	1 gün/hafta
KOİ	3 gün/hafta	3 gün/hafta	-
Çözünmüş KOİ	3 gün/hafta	3 gün/hafta	-
AKM	3 gün/hafta	3 gün/hafta	-
TKM	3 gün/hafta	3 gün/hafta	-
NO_3-N	Belirli aralıklarla	Belirli aralıklarla	-
NO_2-N	Belirli aralıklarla	Belirli aralıklarla	-
NH_4-N	Belirli aralıklarla	Belirli aralıklarla	-
TKN*	Belirli aralıklarla	Belirli aralıklarla	-
TN	Belirli aralıklarla	Belirli aralıklarla	-
TP	Belirli aralıklarla	Belirli aralıklarla	-
Bulanıklık	1 gün/hafta	1 gün/hafta	1 gün/hafta
PSD	1 gün/hafta	1 gün/hafta	1 gün/hafta
ORP			Online olarak sürekli

*:Bu parametreler sadece laboratuvar ölçekli sistemde ölçülmüştür.

Laboratuvar ölçekli çalışmalarda kullanılan analizlerin aynısı pilot ölçekli çalışmalarda da kullanılmıştır. Analiz metodlarına ait açıklamalar Bölüm 4.1.6'da ayrıntılı olarak işlenmiş olup burada tekrar edilmemiştir.

5.2 Filtrasyon Performansı Değerlendirmesi

Bu bölümde, pilot ölçekli manyetik titreşimli (30 ve 150 Hz'de) ve titreşimsiz MBR sistemi ile gerçekleştirilen deneysel çalışmaların sonuçları verilmiştir.

5.2.1 Güçlendirilmiş pilot ölçekli membran modüllerinin performansı

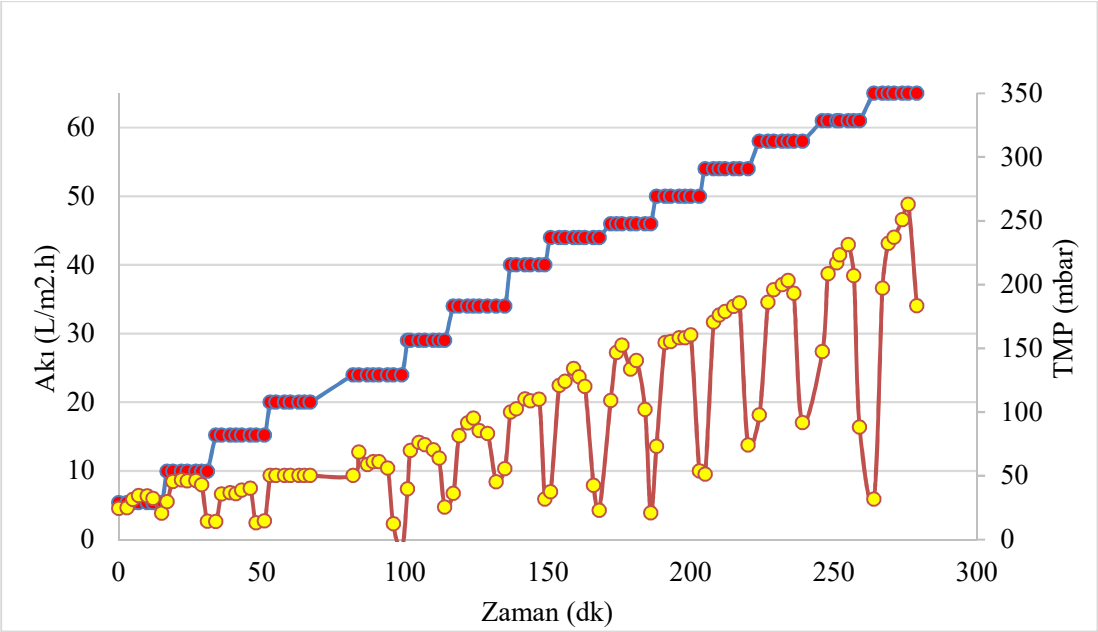
Laboratuvar ölçekli MBR denemelerinde güçlendirilmiş membranlar kullanılmıştır. Bu sebeple işletme şartlarının aynı olması açısından pilot ölçekli sistemde de bu membranlar kullanılmıştır. Bu membranlar ile üretilmiş modüllerden elde edilen permeabilite ve saf su membran direnç değerleri Çizelge 5.7'de belirtilmiştir.

Çizelge 5.7 : Manyetik titreşimli ve titreşimsiz çalışma öncesinde ölçülen permeabilite ve direnç değerleri.

	Ortalama Permeabilite Değerleri (L/m^2.sa.bar)	**Ortalama Direnç Değerleri (1/m)**
30 Hz Manyetik Titreşimli Çalışma Öncesi	212 ± 31	1,39±0,2*10^{12}
Titreşimsiz Çalışma Öncesi	213 ± 8	1,75±0,1*10^{12}
150 Hz Manyetik Titreşimli Çalışma Öncesi	280 ± 42	1,49±0,1*10^{12}

5.2.2 Kritik akı deney sonuçları

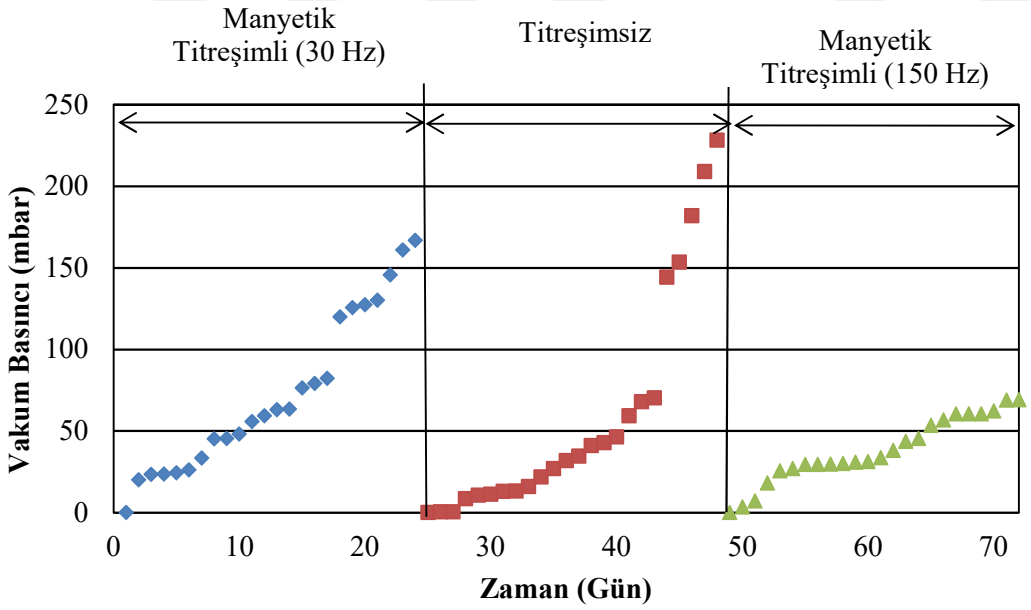
Kritik akı deneyi, çalışmanın başlangıcında reaktör içerisindeki çamurda kademeli akı metodu kullanılarak yapılmıştır. Kritik akı deney sonuçları Şekil 4.4'de verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere, kritik akı değeri 34 L/m^2.sa olarak tespit edilmiştir. Kritik akının belirlenmesini müteakip, pilot ölçekli sistem ilk olarak 30 Hz frekansta manyetik titreşimli modül (1.aşama) ardından sırasıyla titreşimsiz modül (2.aşama) ve 150 Hz frekansta manyetik titreşimli modül (3.aşama) ile işletilmiştir. Her üç aşamada da başlangıçta belirlenen kritik akı değerinden düşük olacak şekilde 26 L/m^2.sa işletme akısı kullanılmıştır.



Şekil 5.4 : Kritik akı deneyi akıya bağlı TMP değişimi.

5.2.3 TMP değişimi

Pilot ölçekli sistemin işletimi boyunca akı değeri sabit tutulmuş ve basınç profili sürekli izlenmiştir. Manyetik titreşimli (30 Hz ve 150 Hz) ve titreşimsiz modüllerin işletim süresi boyunca basınç değişimi Şekil 5.5'de verilmektedir.



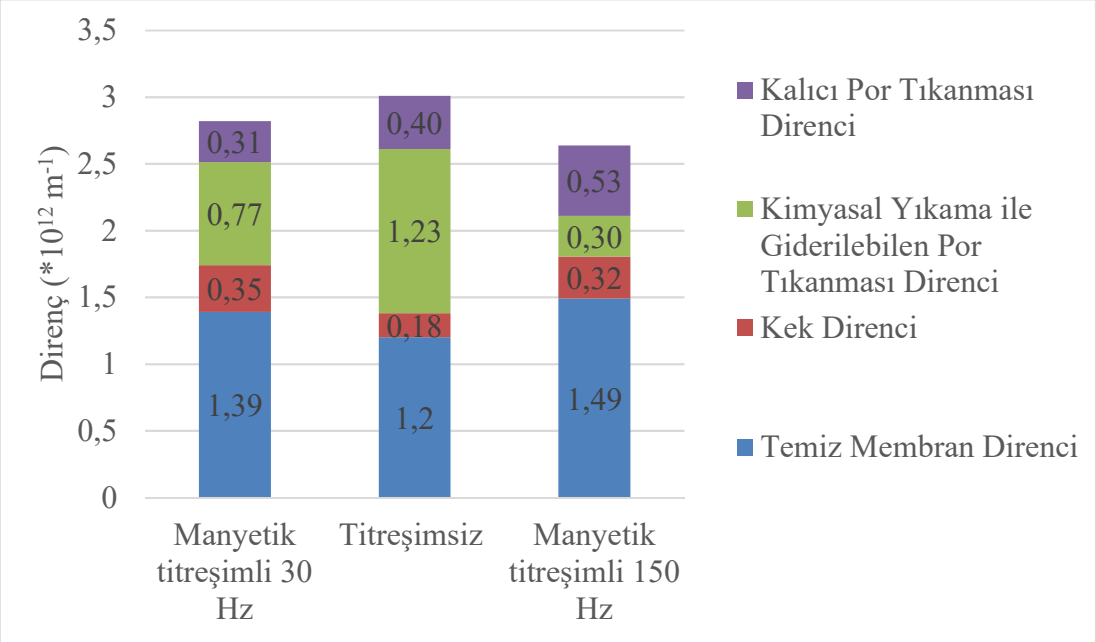
Şekil 5.5 : Manyetik titreşimli (30 Hz), titreşimsiz ve manyetik titreşimli (150 Hz) modüllerde basınç profili.

Eşit sürelerde peşpeşe (24 gün) işletilen modüllerden; manyetik titreşimli (30 Hz) modülde görülen en yüksek vakum basıncı değeri 161 mbar,titreşimsiz modülde 228 mbar ve manyetik titreşimli (150 Hz) modülde 69 mbar'dır. Basınç profilinden

görüldüğü üzere basınç artış hızının en düşük olduğu modül 150 Hz frekans değerinde işletilen manyetik titreşimli modüldür.

5.2.4 İşletme sonrası filtrasyon dirençlerinin belirlenmesi

Elde edilen direnç sonuçlarının yüzdesel dağılımı Şekil 5.6'da karşılaştırmalı olarak verilmektedir.



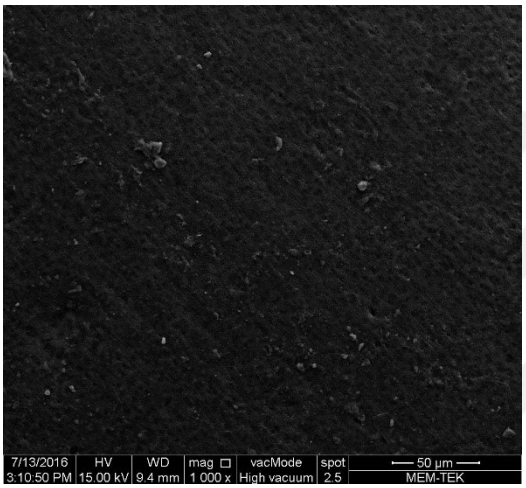
Şekil 5.6 : Modüllerin yıkama aşamalarından sonra elde edilmiş direnç değerleri.

Şekil 5.6 incelendiğinde kek direncininin manyetik titreşimli sistemlerde, titreşimsiz sisteme göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bazik ve asidik yıkama ile giderilebilen por tıkanması ile ilişkilendirilen direncin 30 Hz'te işletilen manyetik titreşimli sistemde $0,77*10^{12}$ m^{-1} , titreşimsiz sistemde $1,23*10^{12}$ m^{-1}, 150 Hz'te işletilen manyetik titreşimli sistemde ise $0,30*10^{12}$ m^{-1} olarak ölçüldüğü görülmektedir. Por tıkanmasının bir göstergesi olan bazik ve asidik yıkama ile giderilebilen direncin titreşimsiz sistemde manyetik titreşimli sistemlere göre daha fazla oluştuğu görülmektedir. Kalıcı por tıkanmasına bağlı direnç ise 30 Hz'te işletilen manyetik titreşimli sistemde $0,31*10^{12}$ m^{-1}, titreşimsiz sistemde $0,40*10^{12}$ m^{-1}, 150 Hz'te işletilen manyetik titreşimli sistemde ise $0,53*10^{12}$ m^{-1} olarak elde edilmiştir. Kalıcı por tıkanması direnç değeri 150 Hz'te işletilen manyetik titreşimli sistemde en yüksek değerde görülmektedir. Ancak bu durum, toplam kirlilik direncinin bu frekansta, diğer aşamalara göre düşük olması ile ilişkilidir. Basınç değişimi grafiği

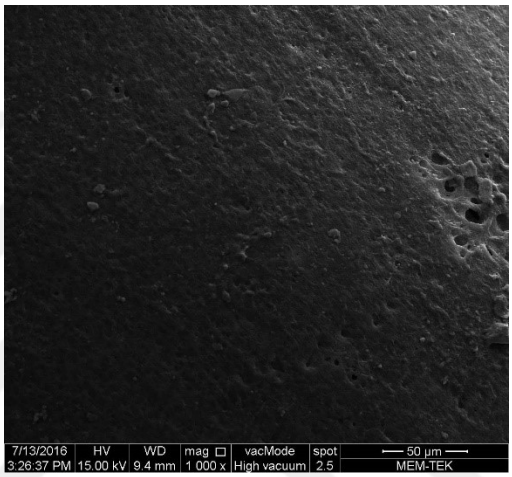
(Şekil 5.5) incelendiğinde,en fazla basınç artışının titreşimsiz modülde olduğu görülmektedir. Bu durum titreşimsiz sistemde görülen yüksek vakum basıncı artışının por tıkanması kaynaklı olduğunu göstermektedir.

5.2.5 Morfolojik analiz sonuçları

Deneysel işletim sonrası membranlardan alınan numunelerde SEM ve EDS analizleri yapılmıştır. Manyetik titreşimli ve titreşimsiz modülden kimyasal yıkama yapıldıktan sonra alınan membranlardan elde edilen SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 5.7, Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'da verilmiştir.

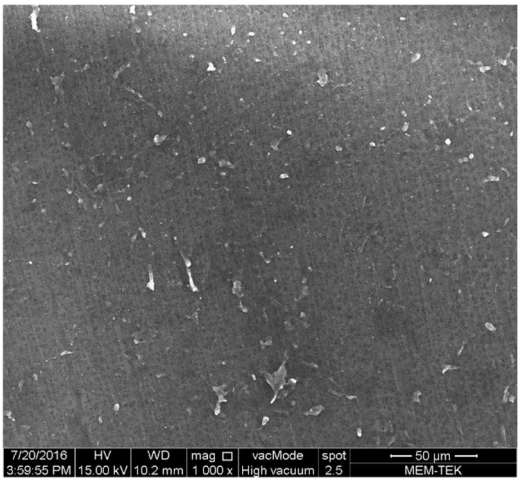


Manyetik 30 Hz titreşimli modül 1.000x büyütme

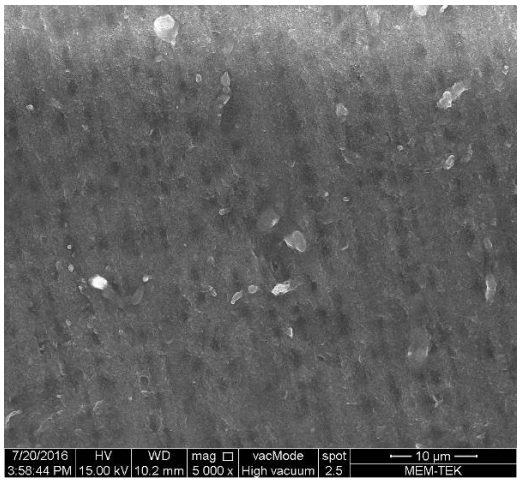


Manyetik 30 Hz titreşimli modül 1.000x büyütme

Şekil 5.7 : Manyetik 30 Hz titreşimli modülden alınan membranların fiziksel ve kimyasal yıkama sonrası SEM görüntüleri.

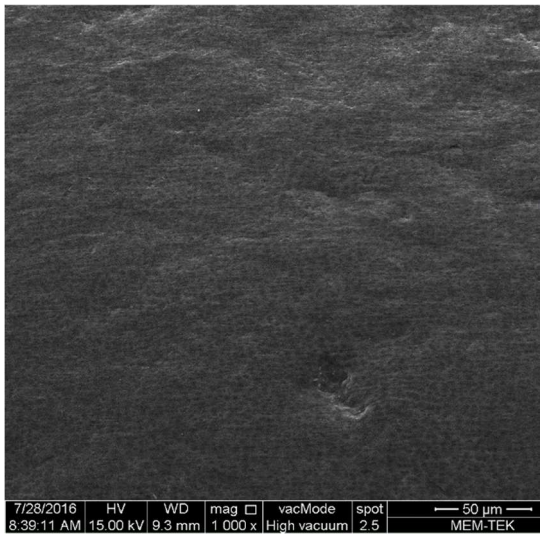


Titreşimsiz modül 1.000x büyütme

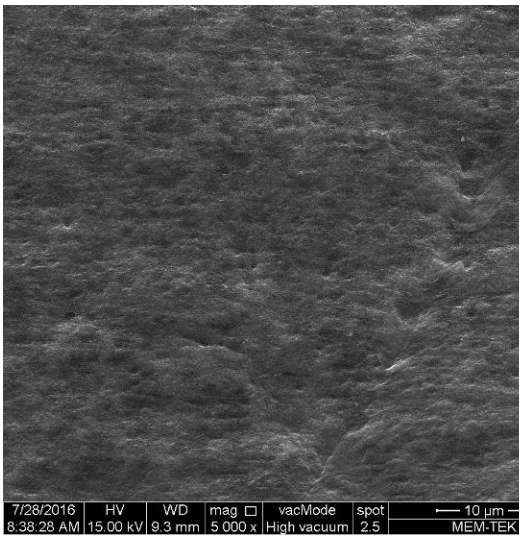


Titreşimsiz modül 5.000x büyütme

Şekil 5.8 : Titreşimsiz modülden alınan membranların fiziksel ve kimyasal yıkama sonrası SEM görüntüleri.



Manyetik 150 Hz titreşimli modül 1.000x büyütme



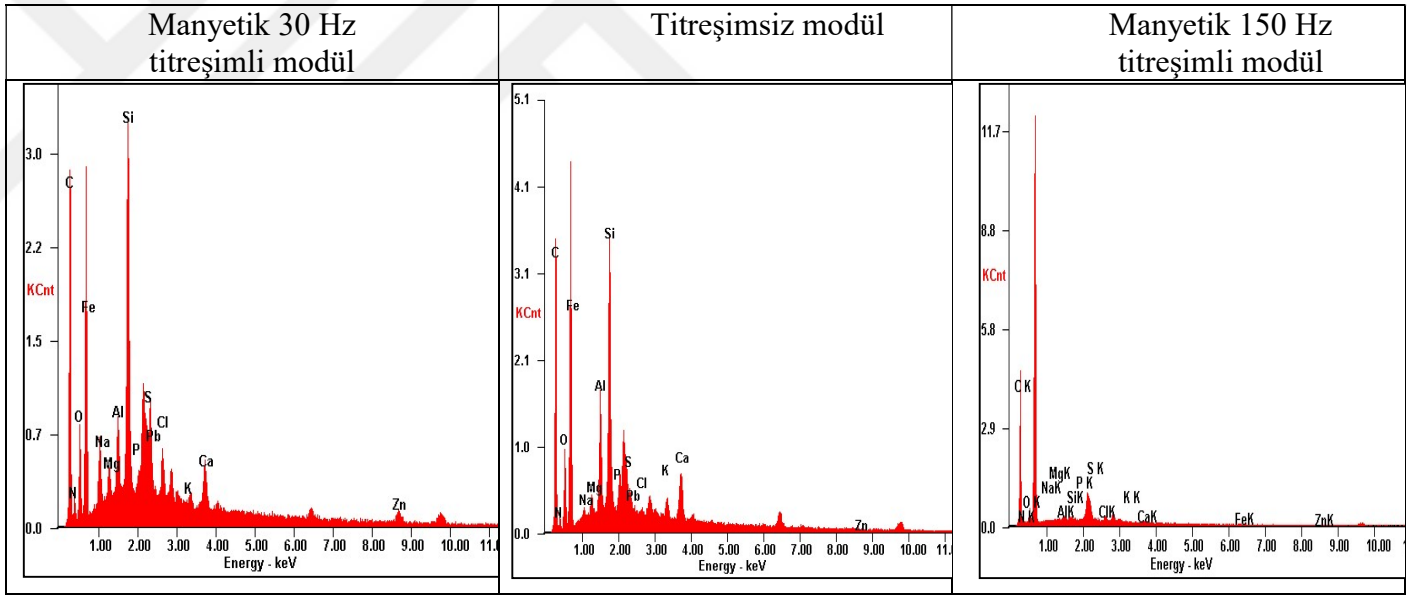
Manyetik 150 Hz titreşimli modül 5.000x büyütme

Şekil 5.9 : Manyetik 150 Hz titreşimli modülden alınan membranların fiziksel ve kimyasal yıkama sonrası SEM görüntüleri.

SEM görüntüleri incelendiğinde; kimyasal yıkama sonrasında en temiz membran yüzeyinin 150 Hz'te işletilen manyetik titreşimli modülde elde edildiği görülmektedir. Geri kazanılamayan direnç yüzdesi en yüksek 150 Hz'te işletilen manyetik titreşimli modülde görülmüştür. Geri kazanılamayan direnç yüzdesi 150 Hz'te işletilen manyetik titreşimli sistemde en yüksek oranda görülmektedir. Fakat en temiz membran SEM görüntülerinden de görüldüğü üzere bu koşullar altında elde edilmiştir. Bu durum, daha önce de belirtildiği gibi toplam direncin 3. aşamada, diğer aşamalara göre düşük olması ile ilgili yapılan yorumu desteklemektedir. Titreşimsiz modülün membran yüzeyi ise 30 Hz ve 150 Hz'te işletilen manyetik modüllerin membran yüzeylerine göre daha yüksek kirliliktedir.

SEM görüntüleri alınan membranlar üzerindeki elementel kompozisyonu belirlemek amacıyla EDS analizi yapılmıştır.

Kullanılan membranların temizlik sonrası elde edilen EDS spektrumları sırasıyla Şekil 5.10'de verilmiştir. Bu spektrumlara ait olan elementel yüzde dağılımı ise Çizelge 5.8'de verilmiştir. Yapılan taramada manyetik titreşimli modülden fiziksel ve kimyasal yıkama sonrası alınan membran üzerinde Karbon (C), Oksijen (O), Alüminyum (Al) ve Silisyum (Si) elementlerine rastlanmıştır. Titreşimsiz modülden yıkama öncesi alınan membranların üzerinde ise Karbon (C), Oksijen (O), Alüminyum (Al) ve Silisyum (Si), Sülfür (S), Klor (Cl), Sodyum (Na), Magnezyum (Mg), Fosfor (P), Kalsiyum (Ca) ve Demir (Fe) elementlerine rastlanmıştır.



Şekil 5.10 : Manyetik titreşimli (30 Hz - 150 Hz) ve titreşimsiz modüllerde gerçekleştirilen EDS analizi spektrumu.

Çizelge 5.8 : Membran yüzeyindeki elementlerin ağırlıkça yüzdesel dağılımı.

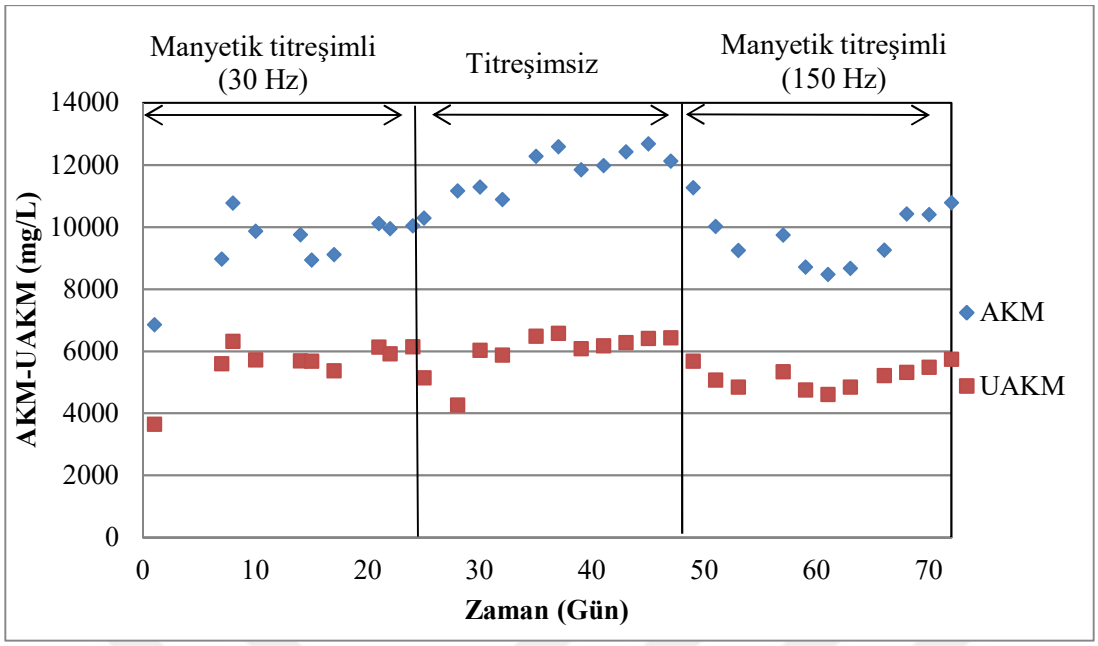
Element	Manyetik Titreşimli (30 Hz) Ağırlık %	Titreşimsiz Ağırlık %	Manyetik Titreşimli (150 Hz) Ağırlık %
C	35,83	34,42	70,73
N	3,70	2,07	8,70
O	5,63	5,72	14,67
Fe	32,70	40,59	0,71
Na	2,69	0,58	0,27
Mg	1,00	0,72	0,21
Al	1,90	3,47	0,59
Si	8,37	7,79	0,32
P	0,60	1,08	0,57
S	1,89	0,62	0,83
Pb	0,92	0,07	-
Cl	1,14	0,11	1,09
K	0,32	0,63	0,17
Ca	1,30	1,79	0,57
Zn	2,02	0,35	0,56

150 Hz'te işletilen manyetik titreşimli modülde membran yüzeyindeki karbonun (C) ağırlıkça yüzdesi diğer işletme koşullarında kullanılan membranlara göre daha yüksektir. Bunun sebebi membran yüzeyinin temiz olmasından dolayı, membran materyalindeki karbonun cihaz tarafından net bir şekilde ölçülebilmesidir. 150 Hz'te işletilen manyetik titreşimli sistemde diğer aşamalara göre demirin (Fe) ağırlıkça yüzdesinde ciddi oranda azalma gözlenmiştir. Bu durum demirin geri kazanılamayan kirliliğe neden olan elementler arasında önemli bir paya sahip olduğunu göstermektedir.

5.2.6 Arıtma performansı

Pilot ölçekli çalışmada ilk olarak membran modülü 30 Hz'de manyetik titreşimli olarak, sonrasında benzer permeabilite değerine sahip yeni bir membran modülü titreşimsiz olarak çalıştırılmıştır. En son aşamada ise benzer şekilde yeni bir modül 150 Hz'de manyetik titreşimli olarak işletilmiştir.

Şekil 5.11'de, tüm aşamalar boyunca reaktör içinde ölçülen AKM değerleri verilmektedir.



Şekil 5.11 : Reaktördeki AKM-UAKM konsantrasyonlarının değişimi.

Manyetik titreşimli ve titreşimsiz modül ile işletilen MBR içindeki çamurun ortalama AKM, UAKM konsantrasyonları ve UAKM/AKM oranları Çizelge 5.9'da verilmektedir.

Çizelge 5.9 : MBR içindeki çamurun AKM ve UAKM deney sonuçları.

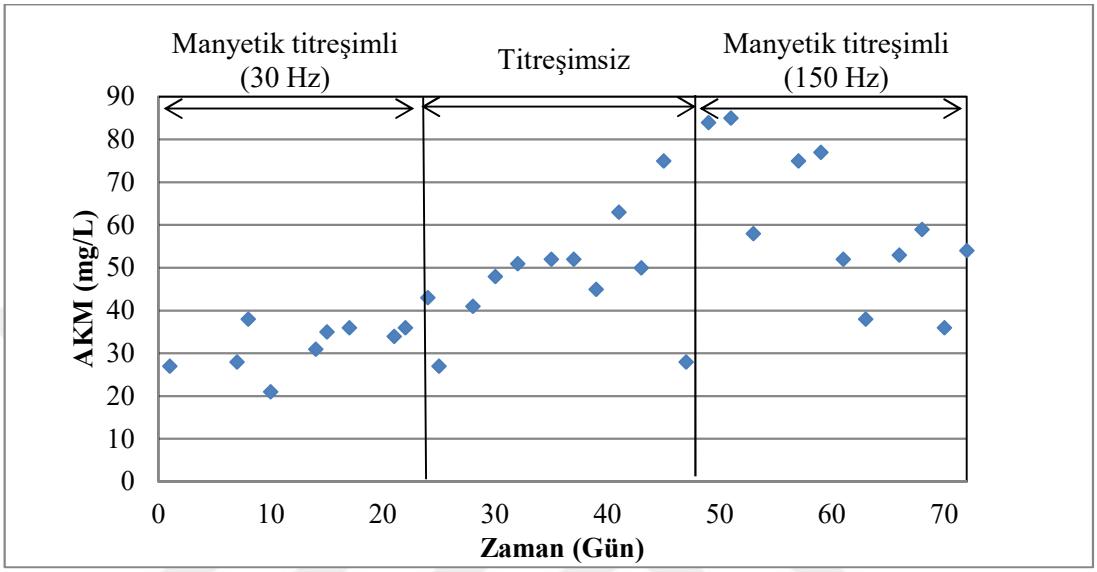
Numune	Manyetik Titreşimli (30 Hz)	Titreşimsiz	Manyetik Titreşimli (150 Hz)
AKM	9760 ± 1254	11775 ± 768	9724 ± 933
UAKM	5822 ± 862	5974 ± 690	5167 ± 382
UAKM/AKM	59 ± 2,35	50,3± 4,4	53,2 ± 2

Her iki aşamada AKM ve UAKM konsantrasyonları ve oranları arasında ciddi seviyelerde bir fark gözlenmemiş olup, bu durum modülleri karşılaştırma açısından çamur karakterizasyonundaki değişimlerin etkisinin ihmal edilebilir seviyede olduğunu göstermektedir.

Tüm işletim boyunca MBR içindeki çamurun çamur hacim indeksi (SVI) 64±13 civarında, KOİ konsantrasyonu ortalama 7070 ± 1304 mg/L olarak belirlenmiştir. Bu değer laboratuvar ölçekli sistemde elde edilen çamur hacim indeksine göre düşük seviyededir.

Tüm işletim periyodu boyunca MBR'deki çamurun ortalama TKM değeri 13632±2408 mg/L, ortalama TUKM değeri ise 5276±1151 mg/L civarındadır. TUKM/TKM oranı 0,39±0,048 olarak hesaplanmıştır.

Reaktörün işletilmesi boyunca süzüntü akımında gerçekleştirilen deneylerde elde edilen AKM konsantrasyonları Şekil 5.12'da verilmektedir.



Şekil 5.12 : . Süzüntüdeki AKM konsantrasyonunun değişimi.

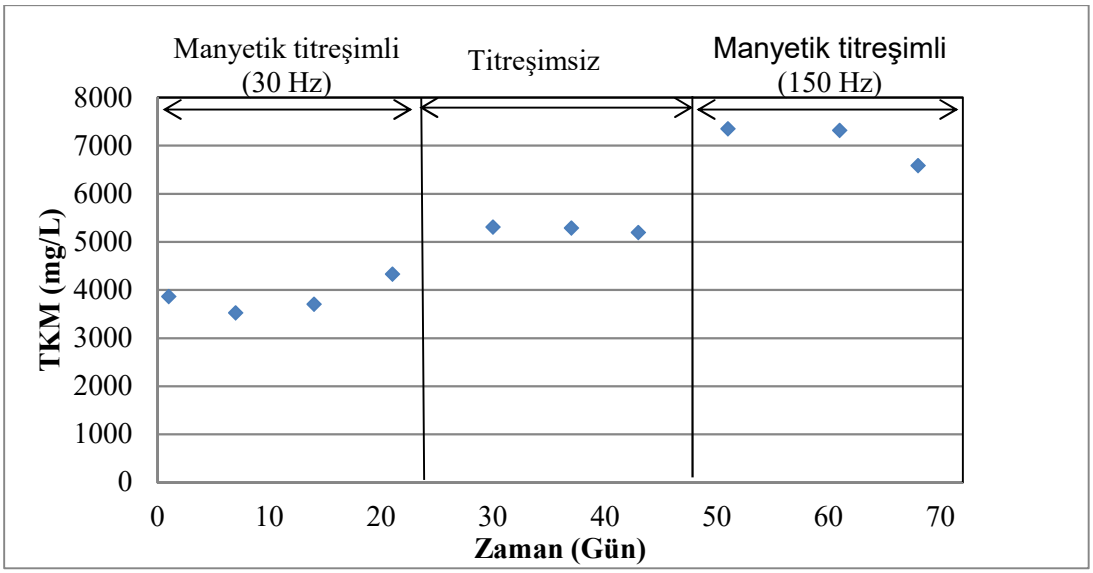
Süzüntüdeki AKM konsantrasyonu ortalama olarak 48±17 mg/L olarak ölçülmüştür. Tüm işletme süresi boyunca süzüntü akımlarında ölçülen AKM konsantrasyonları ve hesaplanan giderim verimleri Çizelge 5.10'da verilmektedir.

Çizelge 5.10 : Manyetik titreşimli ve titreşimsiz membran modüllerinde süzüntü akımlarında AKM değerleri ve giderim verimleri.

	Manyetik Titreşimli Modül (30 Hz)	**Titreşimsiz Modül**	**Manyetik Titreşimli Modül (150 Hz)**
AKM (mg/L)	33±6	48±14	61±17
Giderim verimi (%)	88±4	85±7	80±7

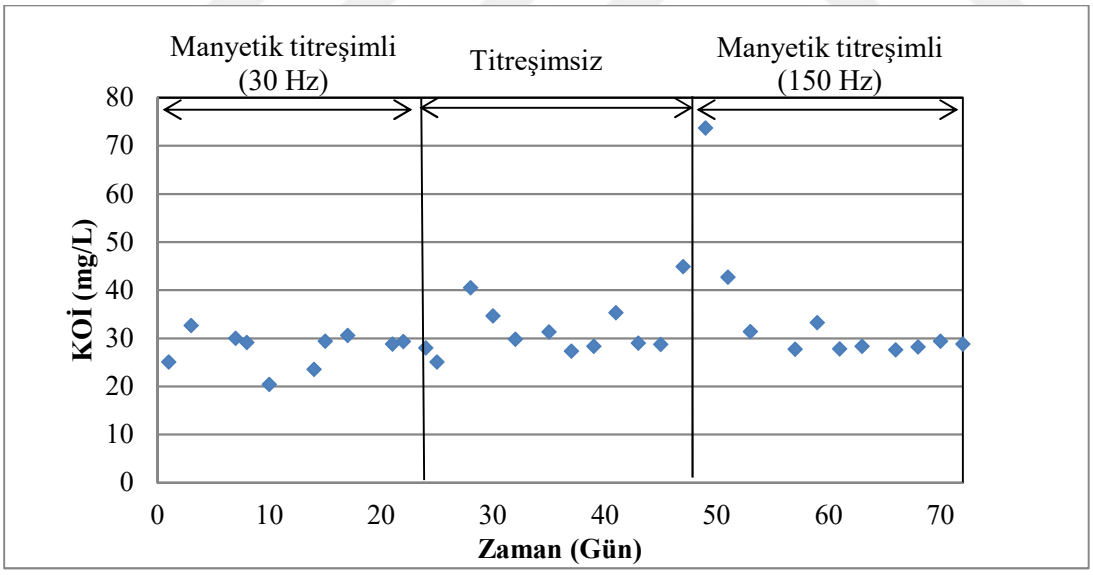
150 Hz'te işletilen manyetik titreşimli sistemde AKM giderim veriminde diğer aşamalara göre azalma gözlenmiştir. Bu durum bu aşamada gözlenen düşük TMP değeri ve buna bağlı olarak elde edilen düşük kek ve por direnci ile ilişkilendirilebilir.

Reaktörün işletimi boyunca belirli aralıklarla, süzüntü akımında TKM deneyleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.13'te süzüntü akımında gerçekleştirilen TKM deneylerinin sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 5.13 : Süzüntü akımında TKM konsantrasyonunun değişimi.

Tüm işletim süresi boyunca süzüntü akımında ölçülen ortalama TKM konsantrasyonu manyetik titreşimli 30 Hz aşamasında 3854 ± 299 mg/L, titreşimsiz modülün işletim aşamasında 5261 ± 58 mg/L ve son aşama olan manyetik titreşimli modülün 150 Hz'de işletimi esnasında 7083 ± 433 mg/L'dir. Şekil 5.14'de tüm işletim süresince elde edilen süzüntü KOİ konsantrasyonları gösterilmektedir.



Şekil 5.14 : Reaktörün işletildiği süreç boyunca süzüntüde KOİ konsantrasyonları.

KOİ konsantrasyonu, süzüntü akımında ortalama 32±9 mg/L olarak ölçülmüştür. Çizelge 5.11'te manyetik ve titreşimsiz modüllerin süzüntü akımlarında elde edilen KOİ konsantrasyonları ve giderim verimleri verilmiştir.

Çizelge 5.11 : Manyetik titreşimli ve titreşimsiz membran modüllerinin süzüntü akımlarında ölçülen KOİ konsantrasyonları ve giderim verimleri.

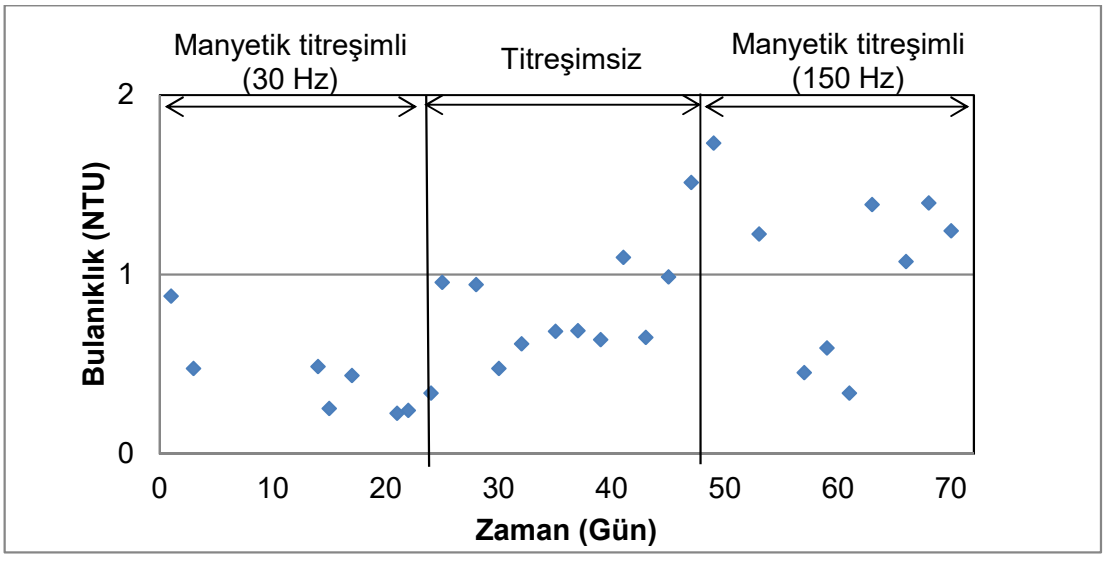
	Manyetik Titreşimli Modül (30 Hz)	**Titreşimsiz Modül**	**Manyetik Titreşimli Modül (150 Hz)**
KOİ (mg/L)	28±3	32±6	34±13
Giderim verimi (%)	94±1	93±2	90±5

Farklı titreşim sistemi uygulanan modüllerin süzüntü akımlarında KOİ konsantrasyonları arasında önemli bir fark gözlenmemiştir. KOİ giderim verimi her 3 aşama için de ortalama %92 civarındadır. Süzüntü akımında ölçülen azot ve fosfor konsantrasyonları Çizelge 5.12'de verilmektedir.

Çizelge 5.12 : Süzüntü akımında ortalama NO_3-N, NO_2-N, NH_4-N, TKN ve TP konsantrasyonları.

Parametre	**Birim**	**Manyetik Titreşimli (30 Hz) (Ortalama+Std.Sapma)**	**Titreşimsiz (Ortalama+Std .Sapma)**	**Manyetik Titreşimli (150 Hz) (Ortalama+Std.Sapma)**
NO_3-N	mg/L	26±10	35±19	25±6
NO_2-N	mg/L	< 0,15	< 0,15	< 0,25
NH_4-N	mg/L	< 0,5	< 0,5	< 1
TN	mg/L	40±19	45±15	32±6
TP	mg/L	2,3±0,5	4±1,7	3,7±2

İşletim süresi boyunca süzüntü akımında bulanıklık değerleri ölçülmüştür. Şekil 5.15'de süzüntü akımında ölçülen bulanıklık değerleri gösterilmektedir.



Şekil 5.15 : Süzüntü akımında ölçülen bulanıklık değerleri.

Çizelge 5.13'de manyetik titreşimli (30 Hz), titreşimsiz ve manyetik titreşimli (150 Hz) modüllerin süzüntü akımlarında ölçülen bulanıklık değerlerinin ortalaması verilmiştir.

Çizelge 5.13 : Süzüntü akımlarında ölçülen bulanıklık değerleri.

Modül Tipi	Bulanıklık (NTU) (Ortalama+Std.Sapma)
Manyetik Titreşimli Modül (30 Hz)	0,48±0,33
Titreşimsiz Modül	0,91±0,40
Manyetik Titreşimli Modül (150 Hz)	0,96±0,48

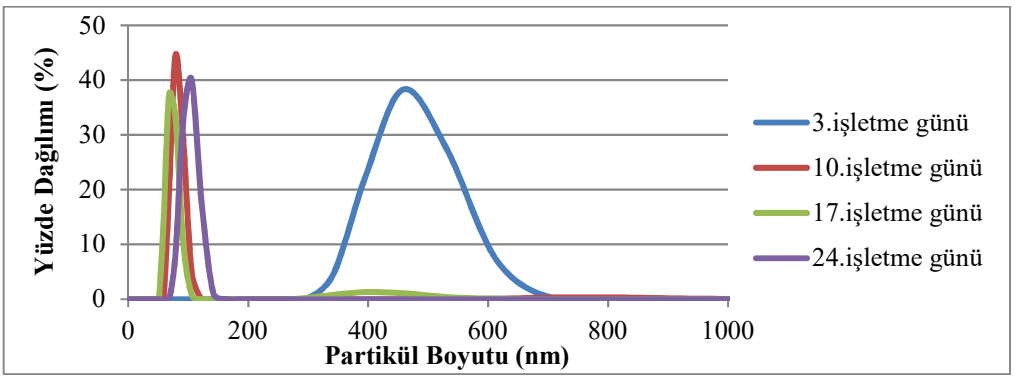
Tüm çalışma boyunca bulanıklık giderim verimi >%99 olarak elde edilmiştir. İşletme periyodu boyunca belirli aralıklarla çamur besleme ve süzüntü akımlarından alınan numunelerde partikül boyut dağılımı (PSD) ölçülmüş ve sonuçlar Çizelge 5.14'de verilmiştir.

Çizelge 5.14 : Tüm işletme periyodu boyunca çamur, besleme ve süzüntü akımlarında yapılan PSD analizlerinin sonuçları.

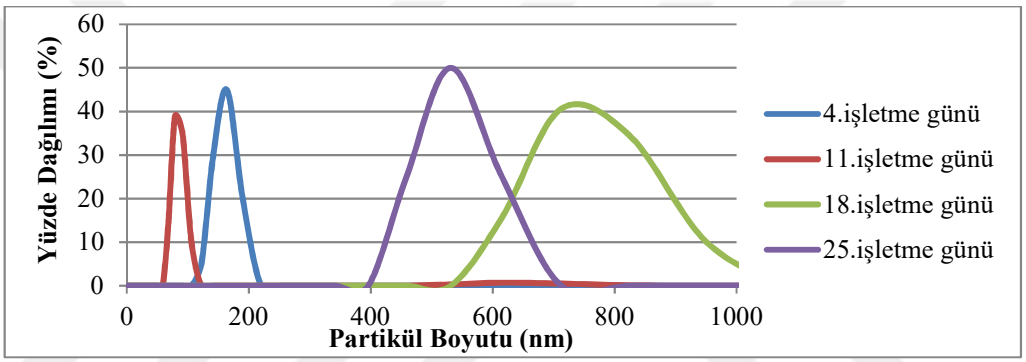
	Gün	Çamur d(0,5) (µm)	Besleme Ortalama (nm)	Süzüntü Ortalama (nm)
Manyetik titreşimli (30 Hz)	3	47,53	3919	729
	10	75,94	4769	250
	17	86,50	3418	134
	24	71,93	6161	607
Titreşimsiz	4	56,01	1405	984
	11	81,26	809	136
	18	85,97	2448	176
	25	60,00	2627	560
Manyetik titreşimli (150 Hz)	10	52,37	794	444
	17	51,80	656	709
	21	53,51	961	1333
	24	50,18	3018	1703

Manyetik (30 - 150 Hz) ve titreşimsiz modüllerin besleme numunesinde PSD sonuçları sırasıyla Şekil 5.16, Şekil 5.17 ve Şekil 5.18'de verilmiştir. Ham atıksuyun partikül boyutu ortalama olarak sırasıyla; titreşimli modülün işletim (30 Hz) döneminde

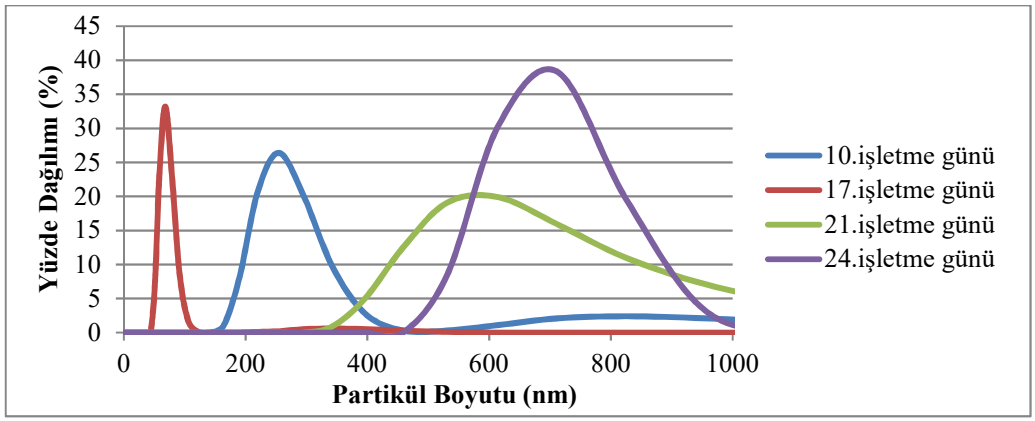
3938±2026 nm, titreşimsiz modülün işletim döneminde 1822±864 nm, titreşimli modülün işletim (150 Hz) döneminde 1357±1114 nm olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.16 : Manyetik titreşimli (30 Hz) modülün besleme akımında ölçülen PSD sonuçları.



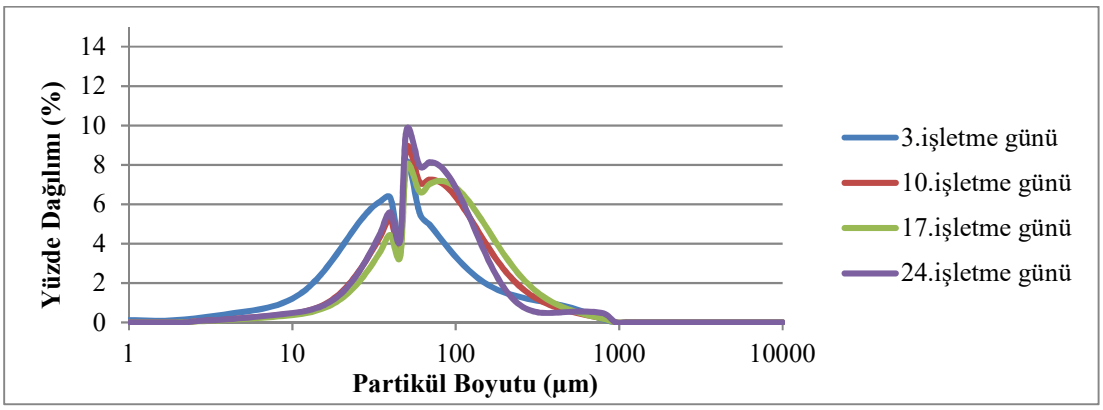
Şekil 5.17 : Titreşimsiz modülün besleme akımında ölçülen PSD sonuçları.



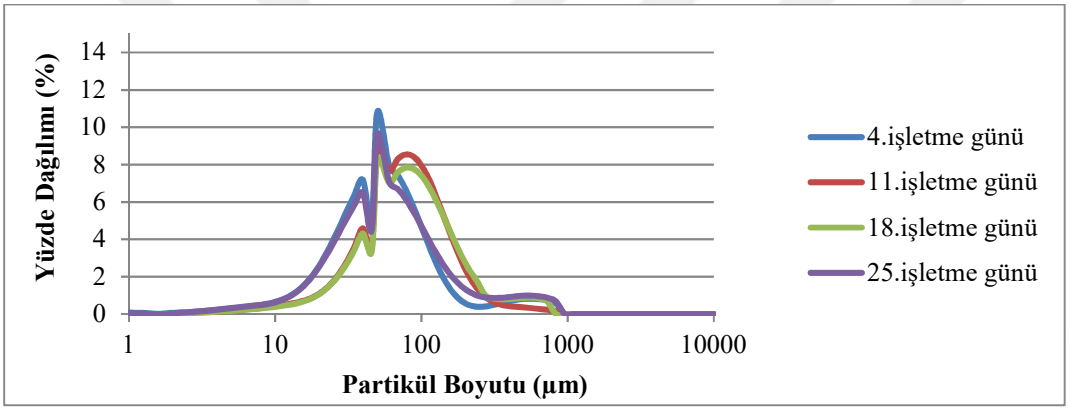
Şekil 5.18 : Manyetik titreşimli (150 Hz) modülün besleme akımında ölçülen PSD sonuçları.

Manyetik (30 - 150 Hz) ve titreşimsiz modüllerin çamur numunesinde PSD sonuçları sırasıyla Şekil 4.19, Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'de verilmiştir. Deney süresince partikül boyutu dağılımı incelendiğinde manyetik titreşimli modülün (30 Hz) çamur numunesinde d(0,5) değeri 70±16 µm, titreşimsiz modülün çamur numunesinde 71±15

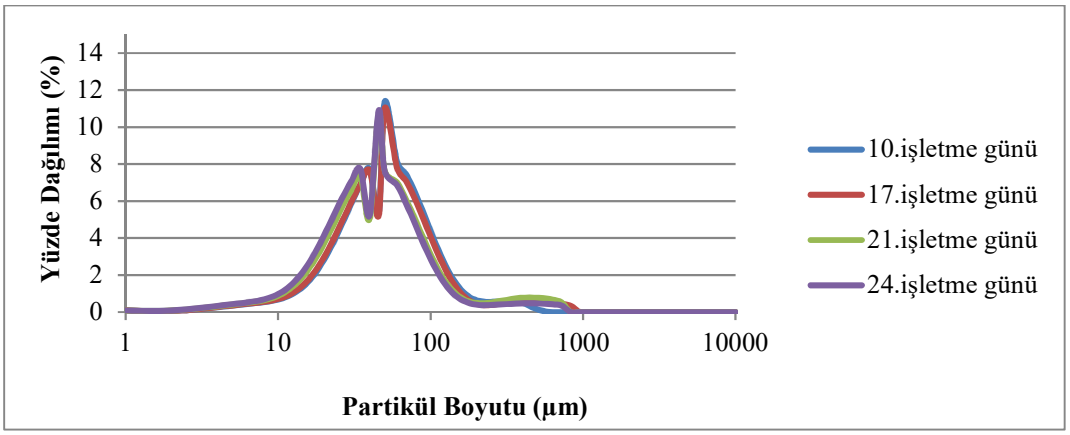
µm ve manyetik titreşimli (150 Hz) modülün çamur numunesinde d(0,5) değeri 52±1,4 µm olduğu görülmektedir.



Şekil 5.19 : Manyetik titreşimli (30 Hz) modülün işletildiği süreçte çamurda ölçülen PSD sonuçları.



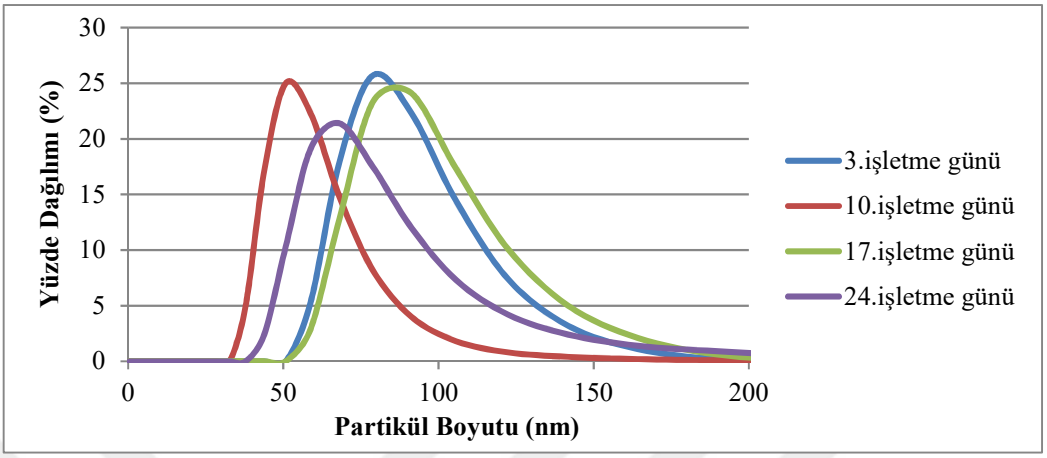
Şekil 5.20 : Titreşimsiz modülün işletildiği süreçte çamurda ölçülen PSD sonuçları.



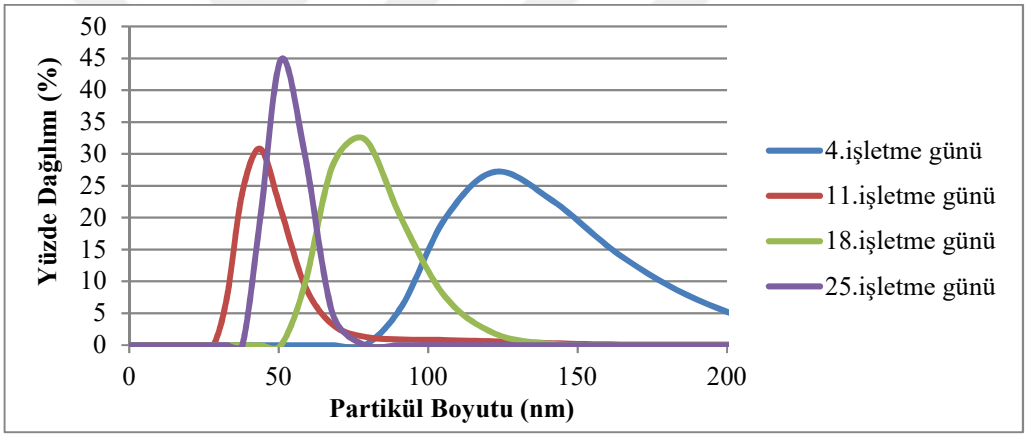
Şekil 5.21 : Manyetik titreşimli (150 Hz) modülün işletildiği süreçte çamurda ölçülen PSD sonuçları.

Manyetik (30 - 150 Hz) ve titreşimsiz modüllerin süzüntü numunesinde PSD sonuçları sırasıyla Şekil 4.22, Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'de verilmektedir. Deney süresince partikül boyutu dağılımı incelendiğinde manyetik titreşimli (30 Hz) modülün

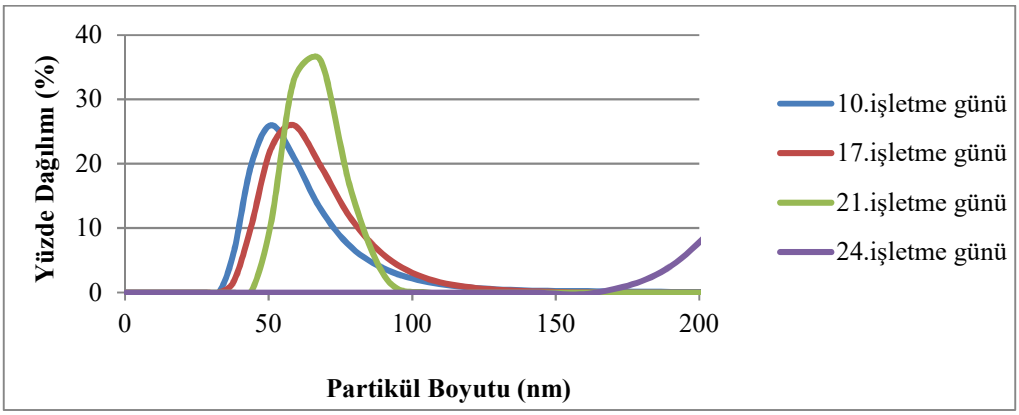
süzüntü numunesinde ortalama 430±283 nm, titreşimsiz modülün süzüntü numunesinde ortalama 464±396 nm ve manyetik titreşimli (150 Hz) modülün süzüntü numunesinde ortalama 1047±574nm olduğu görülmektedir.



Şekil 5.22 : Manyetik titreşimli (30 Hz) modülün süzüntü akımında ölçülen PSD sonuçları.



Şekil 5.23 : Titreşimsiz modülün süzüntü akımında ölçülen PSD sonuçları.



Şekil 5.24 : Manyetik titreşimli (150 Hz) modülün süzüntü akımında ölçülen PSD sonuçları.

5.3 Sonuç ve Tartışma

5.3.1 Frekansın etkisi

Pilot ölçekli olarak içi boşluklu fiber membranlara uygulanan, yenilikçi manyetik membran titreşimi, MBR sistemlerinde tıkanmayı geciktirici bir yöntem olarak başarılı sonuçlar vermiştir. Sistemin işletilmesi boyunca basınç profili incelendiğinde 150 Hz frekansın, 30 Hz ve titreşimsiz duruma göre en düşük vakum basıncında çalıştığı görülmektedir. Laboratuvar ölçekli sonuçlarda elde edilen ve hesaplanan değerlere göre, 150 Hz frekansta titreşimin etki mesafesi kısalmış ve böylece por tıkanmasına sebep olan küçük partiküllerde daha etkili olduğu anlaşılmıştır. Benzer durum, pilot ölçekli sistem deneylerinde gerçekleşmiş ve 150 Hz frekans değeri 30 Hz frekans değerinden daha düşük vakum basıncı artışı ile çalışmıştır.

Tıkanma dirençleri fraksiyonlarına bakıldığında, Şekil 5.6'daki 150 Hz frekansına ait kimyasal yıkama ile giderilebilen direnç ve toplam kirlilik direncinin (kimyasal yıkama ile giderilebilen + kalıcı por tıkanması), diğer iki aşamadaki değerlerle karşılaştırıldığında en düşük düzeyde olduğu görülmektedir. 150 Hz frekansta manyetik titreşimin membranın temizliğini diğer iki aşama ile karşılaştırıldığında membranı küçük partiküllerden koruyarak daha az kirlenmesine sebep olmuştur. Bu durum vakum basıncı profilinin daha uzun sürede yükselmesinin sebebi olarak anlaşılmaktadır. Bu tez çalışmasındaki düzeneğin bir benzeri olan sitemi Bilad ve diğ. (2011) ile Mezohegyi ve diğ. (2012) çalışmalarında manyetik kaynaklı membran titreşim sistemini kullanmışlardır. Kullandıkları uygulamada, doğrudan düz levha membran modülü üzerinde manyetik transduser kullanılarak titreşim verilmiştir genlik 1 mm altında olarak belirtilmiş ve frekans ise 60 Hz olarak ayarlanmıştır. 15 günlük süren deney sonucunda titreşimsiz modüle göre titreşimli modülde toplam tıkanma direncin nispeten daha az seviyede olduğu görülmüştür. Bu tez çalışmasındaki uygulamada ise 150 Hz frekans, içi boşluklu fiber membranlar üzerinde uygulanmış ve benzer sonuçlar elde edilmiştir.

5.3.2 Enerji sarfiyatı ve kimyasal maliyeti için ön hesaplamalar

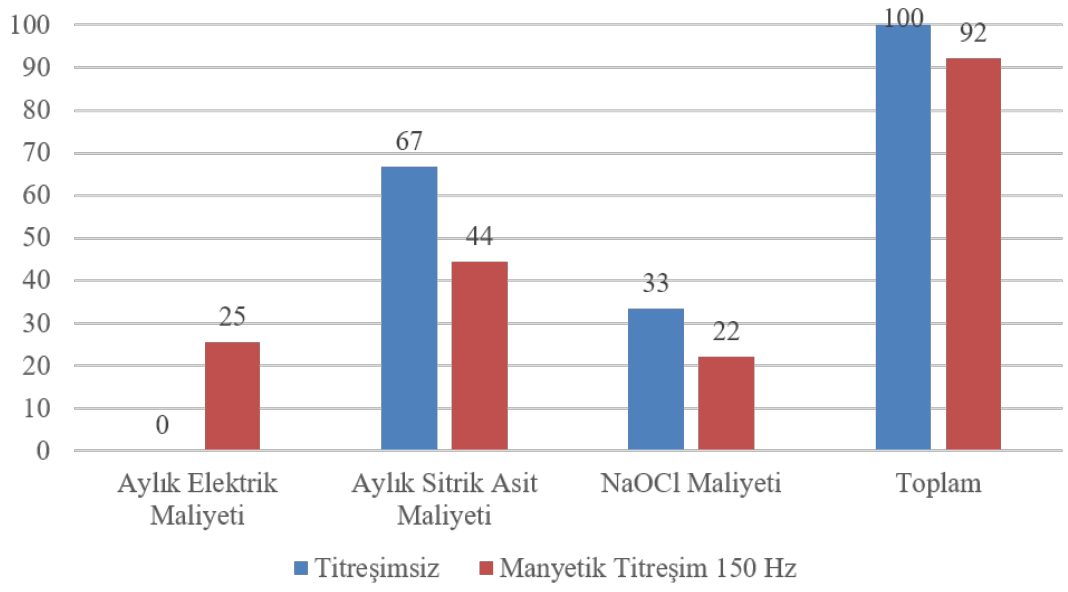
Pilot ölçekli sistemin titreşimsiz ve manyetik 150 Hz titreşimli deneylerde elede edilen basınç profili eğimine bakıldığında, titreşimsiz modülde 300 mbar değerine ulaşma ve kimyasal yıkama ihtiyacının ouşması 60 gün sürecek olup bu değer basınç artışının gecikmesinden ötürü 150 Hz frekans için yaklaşık olarak 90 gün tahmin edilmiştir.

Kimyasal sarfiyatı olarak sitrik asit ve sodyum hipoklorit kimyasalları kg fiyatları baz alınarak hesaplamalar yapılmış olup, elektrik sarfiyatı için sanayi kullanımı tipi elektrik fiyatı baz alınmıştır. Enerji sarfiyatı manyetik sürücü devresi elektrik kaynağında LogiLight EM0003 Wattmeter ile ölçülmüştür. Kimyasal malzeme ve elektrik maliyetleri Çizelge 5.15'te verilmiştir.

Çizelge 5.15 : Metreküp arıtılan su başına kimyasal ve enerji maliyetleri.

	Sitrik Asit Sarfiyatı Maliyeti (TL/m^3)	Sodyum Hipoklorit Sarfiyatı Maliyeti (TL/m^3)	Enerji Sarfiyatı (kWh/m^3)	Elektrik Sarfiyatı Maliyeti (TL/m^3)
Titreşimsiz Modül	0,94	0,47	0	0
Manyetik Titreşimli Modül (150 Hz)	0,63	0,31	0,30	0,36

Elde edilen bu maliyetler yüzdesel dağılım ile hesaplandığında manyetik titreşim kullanıldığında net %8 lik bir maliyet tasarrufu sağlandığı hesaplanmışır. Ayrıca membran tıkanmasının gecikmesi,kimyasal yıkama sıklığının azalması da membran ömrünü uzatacak ve bu da ek bir tasarruf sağlayacaktır. Maliyetlerin yüzdesel olarak dağılımı Şekil 5.25'te verilmiştir.



Şekil 5.25 : Maliyetlerin yüzdesel dağılımı ve karşılaştırılması.

Anusha Kola ve diğ. (2012) yaptıkları araştırmada enine mekanik titreşimli sistemde 21,8 Hz frekans ve 2.5 mm genlik için 0.20 kWh/m^3 enerji sarfiyatı elde etmişlerdir. Bu değerlere peristaltik vakum pompası sarfiyatı dahil değiltir. Cornel P. ve diğ.

(2006) çalışmalarında membran havalandırması için enerji sarfiyatının 0,4 – 1 kWh/m^3 arasında değiştiğini belirtmişlerdir. Gerçek ölçekli tesislerde bu maliyetler bir miktar daha düşecektir. Ayrıca mekanik titreşimli sistemlerde frekans ve genliğe bağlı olarak elektik sarfiyatı değişmektedir. Anusha Kola ve diğ. (2012) çalışmasında farklı frekanslar için enerji sarfiyatlarını hesaplamış ve frekans arttıkça sarfiyatın arttığını belirtilmiştir. Bu pilot uygulamada manyetik titreşimli sistemde ise enerji sarfiyatı frekans değişiminden etkilenmeden sabit olarak ölçüldüğü görülmüştür.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan deneyler ile atıksu arıtımı yapan MBR'lar için tıkanma kontrolü ve akı sürekliliğini sağlamak amacıyla yenilikçi titreşimli membran modüllerinin tasarlanması ve optimum frekansta işletme şartlarının belirlenmesi hedeflenmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar genel hatları ile aşağıda verilmiştir.

Çalışmada öncelikle membran üretiminde kullanılan malzemeler, membran performansı, membran tıkanması ve konsantrasyon polarizasyonu, MBR sistemleri, titreşim uygulamaları ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) modellemesi ile ilgili detaylı bir literatür taraması yapılmıştır. Elde edilen literatür bilgileri tez kapsamında sistematik bir şekilde verilmiştir. Daha sonrasında membran modüllerinin CFD modellemesi yapılmıştır. Modelleme sonuçları, frekans ve genliğin membranın tıkanma potansiyeli üzerinde farklı etkileri olduğunu göstermiştir.

Deneysel çalışmalar için iki farklı polimer (PAN ve PES) kullanılarak ince boşluklu membranların üretimi ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Üretilen PES ve PAN membranlardan MBR modülleri yapılarak performans testleri yürütülmüştür. Yapılan testler sonucunda, bu membranların (modül haline getirilmesi sırasında ve sonrasında yaşanan problemler nedeniyle) titreşimli sistemlerde kullanımının mümkün olmadığı belirlenmiştir. Bu sebeple, uzun dönem laboratuvar ve pilot ölçek MBR deneylerinde PES ve PAN bazlı membranların yerine güçlendirilmiş ince boşluklu PVDF bazlı membranlar kullanılmıştır.

Uzun dönem laboratuvar ölçekli çalışmalarda sentetik evsel atıksu ile beslenen bir MBR sistemine yerleştirilmiş üç adet güçlendirilmiş membran modülü (mekanik titreşimli, manyetik titreşimli ve titreşimsiz) eş zamanlı olarak test edilmiştir. Bu kapsamda 30 Hz frekansta işletilen manyetik titreşim sistemi, titreşimsiz sisteme göre daha iyi sonuç verdiği için, manyetik sistem bu frekansta sabit tutulmuş ve mekanik titreşim sisteminin performansı farklı frekanslar (5, 20 ve 30 Hz) için test edilmiştir. Laboratuvar ölçekli çalışmalarda en iyi sonuç 150 Hz frekanslı manyetik titreşim sistemi ile elde edilmiştir. Laboratuvar ölçekli çalışmalar sonrasında membranlara uygulanan temizlik çalışmaları, membran yüzeyinde kek tabakası oluşumu dolayısıyla

manyetik ve titreşimsiz sistemlerde kullanılan membranların, mekanik titreşimli sistemde bulunan membrana göre, daha az por tıkanmasına maruz kaldığını göstermiştir. Mekanik titreşimli sistemde elde edilen yüksek miktardaki titreşim şiddetinin membran yüzeyinde kek tabakası oluşumunu azaltıp, küçük partşküllerle tıkanmaya yol açtığı, buna karşılık membran porlarının aktif çamur içerisinde bulunan çözünmüş maddelerle daha kolay tıkandığı bu sonuçlar ile desteklenmiştir. Manyetik titreşimli sistemde oluşan kek tabakası titreşim ile birlikte zarar görmediği için ek baiyer görevi görerek membranın daha az tıkanmasına sebeb olmuştur.

Uzun dönem laboratuvar ölçekli deneyleri takiben, farklı titreşim frekanslarının filtrasyon performansı üzerindeki kısa dönemli etkisini inceleyebilmek için 4 farklı deney seti ile kritik akı testleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar frekanslardaki değişim bazında değerlendirildiğinde; elde edilen kritik akı değerleri arasında ciddi bir fark olmadığı gözlenmiştir. Bu durum kısa dönemli çalışmalarda titreşim frekansının kritik akı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını göstermiştir. Elde edilen sonuçlar, kritik akı parametresinin uzun dönem çalışmalar açısından temsil edici olmadığını ortaya koymuştur.

Uzun dönem pilot ölçekli çalışmalarda ise ham evsel atıksu ile beslenen MBR sistemi, öncelikle laboratuvar ölçekli çalışmalarda en iyi performans gösteren 30 Hz frekanslı manyetik titreşim modülü ile işletilmiştir. Daha sonra karşılaştırma yapabilmek için aynı sistem, titreşimsiz modül ile çalıştırılmıştır. Son aşamada ise manyetik titreşim frekansı 150 Hz'e arttırılarak ilave bir çalışma daha yapılmıştır. Elde edilen veriler, filtrasyon performansı açısından sırasıyla 150 Hz, 30 Hz ve titreşimsiz sistemin en iyi sonuç verdiğini göstermiştir. Manyetik titreşimli sistemde frekans arttıkça tıkanmadaki artış hızı azalmaktadır. Pilot ölçekli çalışmalar sonrasında membranlara uygulanan temizlik çalışmaları, por tıkanmasına bağlı kimyasal yıkama ile giderilebilen direnç yüzdesinin 150 Hz'te işletilen manyetik titreşimli sistemde en düşük oranda olduğunu göstermektedir. Bu durum, titreşimsiz sistemde görülen yüksek TMP artışının por tıkanması kaynaklı olduğunu desteklemektedir.

Son yıllarda polimer teknolojisindeki gelişmeler ve membran üretim maliyetlerindeki azalmalar neticesinde MBR'ların kullanımı dünyada büyük bir artış göstermiştir. Bununla birlikte membranlarda TMP artışı ve membran tıkanması MBR teknolojisinin kullanımını kısıtlayan en önemli faktörlerdir. Bu çalışmada geliştirilen yenilikçi manyetik titreşimli membran modülü ile, MBR'larda TMP artışlarının kontrol

edilebileceği gösterilmiş, böylece membran tıkanmalarının kontrol edilmesi ile ilgili başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu şekilde MBR'lar için sürdürülebilir akı temini sağlanarak işletme, membran modülü değişimi ve enerji maliyetleri azaltılabilecektir. Sonuç olarak geliştirilen yenilikçi manyetik titreşimli sistem, MBR teknolojisinin gerek ülkemizde, gerekse dünyada daha yaygın olarak kullanılmasına katkı sağlayacak niteliktedir.

Gelecek çalışmalarda manyetik ve mekanik titreşim sistemlerinde farklı frekans ve genliklerde;

- Titreşimli geri yıkama sıklığının azaltılması veya arttırılması ile optimize edilmesi
- Periyodik dinlenme süresi sıklığının titreşim ile ve titreşimsiz belirlenmesi farklarının ortaya konması
- Kimyasallı geri yıkamanın titreşim ile etkinliğinin belirlenmesi ve optimizasyonu
- Endüstriyel atıksu kaynağı kullanılarak çalıştırılan pilot modüllerin bu tezde anlatılan sistemler kullanılarak denenmesi

gibi çalışmalar gerçekleştirilebilir.

Ayrıca sonraki çalışmalarda bu titreşimli modüllerin son yıllarda gelişen anaerobik MBR'larda kullanımının araştırılması da önerilmektedir.

KAYNAKLAR

Agtas, M., Ersahin, M. E., Ozgun, H. ve Koyuncu, I. (2015). Impact of Module Design on the Performance of Membrane Bioreactors Treating Municipal Wastewater. *Separation Science and Technology*, *6395*(March 2016). doi:10.1080/01496395.2015.1119848

APHA, AWWA ve WEF. (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*.

Arabi, S. ve Nakhla, G. (2009). Impact of cation concentrations on fouling in membrane bioreactors. *Journal of Membrane Science*. doi:10.1016/j.memsci.2009.07.016

Baker, Richard W. (2004). Membrane Technology and Applications, 2nd Edition. *Membrane Technology and Applications*.

Beier, S. P. (2008). *Dynamic Microfiltration- Critical Flux and Macromolecular Transmission*.

Beier, S. P., Guerra, M., Garde, A. ve Jonsson, G. (2006). Dynamic microfiltration with a vibrating hollow fiber membrane module: Filtration of yeast suspensions. *Journal of Membrane Science*, *281*(1–2), 281–287. doi:10.1016/j.memsci.2006.03.051

Bilad, M. R., Mezohegyi, G., Declerck, P. ve Vankelecom, I. F. J. (2012). Novel magnetically induced membrane vibration (MMV) for fouling control in membrane bioreactors. *Water Research*, *46*(1), 63–72. doi:10.1016/j.watres.2011.10.026

Bird, M. R. ve Bartlett, M. (2002). Measuring and modelling flux recovery during the chemical cleaning of MF membranes for the processing of whey protein concentrate. *Journal of Food Engineering*. doi:10.1016/S0260-8774(01)00151-0

Blazek, J. (2005). *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*. *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*. doi:10.1016/B978-008044506-9/50016-3

Brepols, C., Drensla, K., Janot, A., Trimborn, M. ve Engelhardt, N. (2008). Strategies for chemical cleaning in large scale membrane bioreactors. *Water Science and Technology*. doi:10.2166/wst.2008.112

Buonomenna, M. G. (2013). Nano-enhanced reverse osmosis membranes. *Desalination*. doi:10.1016/j.desal.2013.01.006

Chae, S. R., Wang, S., Hendren, Z. D., Wiesner, M. R., Watanabe, Y. ve Gunsch, C. K. (2009). Effects of fullerene nanoparticles on Escherichia coli K12 respiratory activity in aqueous suspension and potential use for membrane biofouling control. *Journal of Membrane Science*. doi:10.1016/j.memsci.2008.12.023

Chang, I., Clech, P. Le ve Jefferson, B. (2002). Membrane fouling in membrane bioreactors for wastewater treatment. *Journal of Environmental Engineering*, (November), 1018–1030. http://link.aip.org/link/?JOEEDU/128/1018/1 adresinden erişildi.

Chang, I. S., Bag, S. O. ve Lee, C. H. (2001). Effects of membrane fouling on solute rejection during membrane filtration of activated sludge. *Process Biochemistry*. doi:10.1016/S0032-9592(00)00284-3

Cho, B. D. ve Fane, A. G. (2002). Fouling transients in nominally sub-critical flux operation of a membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science*. doi:10.1016/S0376-7388(02)00321-6

Choo, K. H. ve Lee, C. H. (1996). Effect of anaerobic digestion broth composition on membrane permeability. *Water Science and Technology* içinde . doi:10.1016/S0273-1223(96)00801-3

Chou, W. L. ve Yang, M. C. (2005). Effect of take-up speed on physical properties and permeation performance of cellulose acetate hollow fibers. *Journal of Membrane Science*. doi:10.1016/j.memsci.2004.10.030

Chua, H. C., Arnot, T. C. ve Howell, J. A. (2002). Controlling fouling in membrane bioreactors operated with a variable throughput. *Desalination*. doi:10.1016/S0011-9164(02)00764-6

Cicek, N., Dionysiou, D., Suidan, M. T., Ginestet, P. ve Audic, J. M. (1999). Performance deterioration and structural changes of a ceramic membrane bioreactor due to inorganic abrasion. *Journal of Membrane Science*. doi:10.1016/S0376-7388(99)00149-0

Cornel P., Krause S., (2006) Membrane bioreactors in industrial wastewater treatment European experiences, examples and trends, *Water Science and Technology* 53 37–44, doi: 10.2166/wst.2006.074

Cui, Z. F., Chang, S. ve Fane, A. G. (2003). The use of gas bubbling to enhance membrane processes. *Journal of Membrane Science*. doi:10.1016/S0376-7388(03)00246-1

Culkin, B., Armando, A. D. ve Inter-, N. L. (1992). New separation system extends the use of membranes. *Filtration & Separation*, *29*(5), 376–378. doi:http://dx.doi.org/10.1016/0015-1882(92)80196-P

Defrance, L. ve Jaffrin, M. Y. (1999). Comparison between filtrations at fixed transmembrane pressure and fixed permeate flux: Application to a membrane bioreactor used for wastewater treatment. *Journal of Membrane Science*. doi:10.1016/S0376-7388(98)00220-8

Delikanlı, N. E., Yiğit, N. Ö. ve Dalı, (2013). *Pamuklu tekstil endüstrisi atıksularının membran biyoreaktör (MBR) ile arıtılması ve renk giderimi*. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Drews, A. (2010). Membrane fouling in membrane bioreactors-Characterisation, contradictions, cause and cures. *Journal of Membrane Science*. doi:10.1016/j.memsci.2010.06.046

Eren, B. (2006). *Boyalı tekstil endüstrisi atıksuyu arıtımında kullanılan nanofiltrasyon membran proses veriminin yapay sinir ağları (YSA) ile analizi*. (Yüksek Lisans Tezi), Sakarya Üniversitesi.

Fabrega, J., Renshaw, J. C. ve Lead, J. R. (2009). Interactions of silver nanoparticles with Pseudomonas putida biofilms. *Environmental Science and Technology*. doi:10.1021/es901706j

Field, R. W., Wu, D., Howell, J. A. ve Gupta, B. B. (1995). Critical flux concept for microfiltration fouling. *Journal of Membrane Science*, *100*(3), 259–272. doi:10.1016/0376-7388(94)00265-Z

Geilvoet. (2010). *The Delft Filtration Characterisation method Assessing membrane bioreactor activated sludge filterability*. TU Delft.

Genkin, G., Waite, T. D., Fane, A. G. ve Chang, S. (2006). The effect of vibration and coagulant addition on the filtration performance of submerged hollow fibre membranes. *Journal of Membrane Science*, *281*(1–2), 726–734. doi:10.1016/j.memsci.2006.04.048

Germain, E., Stephenson, T. ve Pearce, P. (2005). Biomass characteristics and membrane aeration: Toward a better understanding of membrane fouling in submerged membrane bioreactors (MBRs). *Biotechnology and Bioengineering*. doi:10.1002/bit.20411

Goh, P. S., Ismail, A. F. ve Ng, B. C. (2013). Carbon nanotubes for desalination: Performance evaluation and current hurdles. *Desalination*, *308*, 2–14. doi:10.1016/J.DESAL.2012.07.040

Gomaa, H. G. ve Rao, S. (2011). Analysis of flux enhancement at oscillating flat surface membranes. *Journal of Membrane Science*, *374*(1–2), 59–66. doi:10.1016/j.memsci.2011.03.011

Gryta, M., Karakulski, K. ve Morawski, A. . (2001). Purification of oily wastewater by hybrid UF/MD. *Water Research*, *35*(15), 3665–3669. doi:10.1016/S0043-1354(01)00083-5

Guo, W. S., Vigneswaran, S., Ngo, H. H., Van Nguyen, T. B. ve Ben Aim, R. (2006). Influence of bioreaction on a long-term operation of a submerged membrane adsorption hybrid system. *Desalination*. doi:10.1016/j.desal.2005.06.034

Hong, S. P., Bae, T. H., Tak, T. M., Hong, S. ve Randall, A. (2002). Fouling control in activated sludge submerged hollow fiber membrane bioreactors. *Desalination*. doi:10.1016/S0011-9164(02)00260-6

Iversen, V., Drews, A., Schaller, J., Lesjean, B. ve Kraume, M. (2007). Verringerung des Foulings in Membranbelebungsanlagen Durch Zugabe von Filtrationshilfsmitteln. *Chemie-Ingenieur-Technik*. doi:10.1002/cite.200700135

Iversen, V., Mohaupt, J., Drews, A., Lesjean, B. ve Kraume, M. (2008). Side effects of flux enhancing chemicals in membrane bioreactors (MBRs): Study on their biological toxicity and their residual fouling propensity. *Water Science and Technology*. doi:10.2166/wst.2008.660

Jefferson, B., Laine, A. L., Judd, S. J. ve Stephenson, T. (2000). Membrane bioreactors and their role in wastewater reuse. *Water Science and Technology*.

Jiang, T. (2007). *Characterization and Modelling of Soluble Microbial Products in Membrane Bioreactors*. *Sciences-New York*.

Judd, S. (2002). Submerged membrane bioreactors: flat plate or hollow fibre? *Filtration & Separation*. doi:10.1016/S0015-1882(02)80169-0

Judd, S. ve Judd, C. (2011). *The MBR Book (second edition): principles and applications of membrane bioreactors for water and wastewater treatment*. *Order A Journal On The Theory Of Ordered Sets And Its Applications*. doi:10.1016/B978-0-08-096682-3.10007-1

Karakulski, K., Morawski, W. A. ve Grzechulska, J. (1998). Purification of bilge water by hybrid ultrafiltration and photocatalytic processes. *Separation and Purification Technology*. doi:10.1016/S1383-5866(98)00071-9

Kaya R., Özgün H., Erşahin,M. E., Yılmaz M. D., Damirchi M., Koyuncu İ., Arikan, O. A. (2017). Impact of vibration on treatment and filtration performance of membrane bioreactors treating municipal wastewater. *Desalination and Water Treatment*, *99*. doi:10.5004/dwt.2017.21685

Kola, A., Ye, Y., Le-Clech, P. ve Chen, V. (2012), Application of low frequency transverse vibration on fouling limitation in submerged hollow fiber membranes, *Journal of Membrane Science*, *409*, 54–65. doi:10.1016/j.memsci.2012.03.017

Kola, A., Ye, Y., Le-Clech, P. ve Chen, V. (2014). Transverse vibration as novel membrane fouling mitigation strategy in anaerobic membrane bioreactor applications. *Journal of Membrane Science*, *455*, 320–329. doi:10.1016/j.memsci.2013.12.078

Koyuncu, İ. (2001). *Nanofiltrasyon membrantları ile tuz gideriminde organik iyon etkisi*. (Doktora Tezi), İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü

Le-Clech, P., Chen, V. ve Fane, T. A. G. (2006). Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment. *Journal of Membrane Science*. doi:10.1016/j.memsci.2006.08.019

Le-Clech, P., Jefferson, B. ve Judd, S. J. (2003). Impact of aeration, solids concentration and membrane characteristics on the hydraulic performance of a membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science*. doi:10.1016/S0376-7388(03)00164-9

Le Clech, P., Jefferson, B., Chang, I. S. ve Judd, S. J. (2003). Critical flux determination by the flux-step method in a submerged membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science*, *227*(1–2), 81–93. doi:10.1016/j.memsci.2003.07.021

Lee, W. N., Chang, I. S., Hwang, B. K., Park, P. K., Lee, C. H. ve Huang, X. (2007). Changes in biofilm architecture with addition of membrane fouling reducer in a membrane bioreactor. *Process Biochemistry*. doi:10.1016/j.procbio.2006.12.003

Li, T., Law, A. W. K., Cetin, M. ve Fane, A. G. (2013). Fouling control of submerged hollow fibre membranes by vibrations. *Journal of Membrane Science*, *427*, 230–239. doi:10.1016/j.memsci.2012.09.031

Li, T., Law, A. W. K. ve Fane, A. G. (2014). Submerged hollow fibre membrane filtration with transverse and longitudinal vibrations. *Journal of Membrane Science*, *455*, 83–91. doi:10.1016/j.memsci.2013.12.042

Liu, S. (2007). *CFD Applications in Membrane Separations Systems*. Taylor and Francis publishing.

Low, S. C., Juan, H. H. ve Siong, L. K. (2005). A combined VSEP and membrane bioreactor system. *Desalination*, *183*(1–3), 353–362. doi:10.1016/j.desal.2005.04.028

Malamis, S., Katsou, E., Chazilias, D. ve Loizidou, M. (2009). Investigation of Cr(III) removal from wastewater with the use of MBR combined with low-cost additives. *Journal of Membrane Science*. doi:10.1016/j.memsci.2009.01.028

Marcel, M. (1996). *Basic Principles of Membrane Technology*. *(2nd Edition) KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS*. doi:10.1017/CBO9781107415324.004

Marrot, B., Barrios-Martinez, A., Moulin, P. ve Roche, N. (2004). Industrial wastewater treatment in a membrane bioreactor: A review. *Environmental Progress*. doi:10.1002/ep.10001

Merz, C., Scheumann, R., El Hamouri, B. ve Kraume, M. (2007). Membrane bioreactor technology for the treatment of greywater from a sports and leisure club. *Desalination*. doi:10.1016/j.desal.2006.10.026

Mezohegyi, G., Bilad, M. R. ve Vankelecom, I. F. J. (2012). Direct sewage up-concentration by submerged aerated and vibrated membranes. *Bioresource Technology*. doi:10.1016/j.biortech.2012.05.022

Mishra, A. K. ve Ramaprabhu, S. (2011). Functionalized graphene sheets for arsenic removal and desalination of sea water. *Desalination*. doi:10.1016/j.desal.2011.01.038

Moin, P. ve Kim, J. (1997). Tackling turbulence with supercomputers. *Scientific American*. doi:10.1038/scientificamerican0197-62

Muñoz-Aguado, M. J., Wiley, D. E. ve Fane, A. G. (1996). Enzymatic and detergent cleaning of a polysulfone ultrafiltration membrane fouled with BSA and whey. *Journal of Membrane Science*. doi:10.1016/0376-7388(96)00066-X

Munz, G., Gori, R., Mori, G. ve Lubello, C. (2007). Powdered activated carbon and membrane bioreactors (MBRPAC) for tannery wastewater treatment: long term effect on biological and filtration process performances. *Desalination*. doi:10.1016/j.desal.2006.08.010

Ng, L. Y., Mohammad, A. W., Leo, C. P. ve Hilal, N. (2013). Polymeric membranes incorporated with metal/metal oxide nanoparticles: A comprehensive review. *Desalination*. doi:10.1016/j.desal.2010.11.033

Ngo, H. H. ve Guo, W. (2009). Membrane fouling control and enhanced phosphorus removal in an aerated submerged membrane bioreactor using modified green bioflocculant. *Bioresource Technology*. doi:10.1016/j.biortech.2009.03.057

Pendergast, M. M. ve Hoek, E. M. V. (2011). A review of water treatment membrane nanotechnologies. *Energy & Environmental Science*. doi:10.1039/c0ee00541j

Remy, M., van der Marel, P., Zwijnenburg, A., Rulkens, W. ve Temmink, H. (2009). Low dose powdered activated carbon addition at high sludge retention times to reduce fouling in membrane bioreactors. *Water Research*. doi:10.1016/j.watres.2008.10.033

Rosenberger, S., Krüger, U., Witzig, R., Manz, W., Szewzyk, U. ve Kraume, M. (2002). Performance of a bioreactor with submerged membranes for aerobic treatment of municipal waste water. *Water Research*. doi:10.1016/S0043-1354(01)00223-8

Sagbo, O., Sun, Y., Hao, A. ve Gu, P. (2008). Effect of PAC addition on MBR process for drinking water treatment. *Separation and Purification Technology*. doi:10.1016/j.seppur.2007.05.003

Song, K. G., Kim, Y. ve Ahn, K. H. (2008). Effect of coagulant addition on membrane fouling and nutrient removal in a submerged membrane bioreactor. *Desalination*. doi:10.1016/j.desal.2007.01.107

Speziale, C. (1991). Analytical Methods For The Development Of Reynolds-Stress Closures In Turbulence. *Annual Review of Fluid Mechanics*. doi:10.1146/annurev.fluid.23.1.107

Stephenson, T., Judd, S., Jefferson, B. ve Brindle, K. (2001). Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment. *Journal of Membrane Science*.

Tchobanoglous, G., Burton, F. L. ve Stensel, H. D. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. Metcalf & Eddy, Inc. Engineering* (C. 4). doi:10.1016/0309-1708(80)90067-6

T. Poele, S. ve van der Graaf, J. (2005). Enzymatic cleaning in ultrafiltration of wastewater treatment plant effluent. *Desalination*. doi:10.1016/j.desal.2004.11.056

Tomaszewska, M., Orecki, A. ve Karakulski, K. (2005). Treatment of bilge water using a combination of ultrafiltration and reverse osmosis. *Desalination*. doi:10.1016/j.desal.2005.03.078

Turken, T., Sengur-Tasdemir, R., Koseoglu-Imer, D. Y. ve Koyuncu, I. (2015). Determination of Filtration Performances of Nanocomposite Hollow Fiber Membranes with Silver Nanoparticles. *Environmental Engineering Science*. doi:10.1089/ees.2014.0080

Uyak, V., Güçlü, S. ve Koyuncu, İ. (2018). Membranlar ve Membranların Sınıflandırılması. İ. Koyuncu (Ed.), *Membran Teknolojileri ve Uygulamaları (Cilt-1)* içinde . Ankara: TÜÇEV.

Van Der Bruggen, B., Vandecasteele, C., Van Gestel, T., Doyen, W. ve Leysen, R. (2003). A review of pressure-driven membrane processes in wastewater treatment and drinking water production. *Environmental Progress*. doi:10.1002/ep.670220116

Van Dijk, L. ve Roncken, G. C. G. (1997). Membrane bioreactors for wastewater treatment: The state of the art and new developments. *Water Science and Technology* içinde . doi:10.1016/S0273-1223(97)00219-9

Versteeg, H. K. ve Malaskekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. *Fluid flow handbook. McGraw-Hill …* (C. M). doi:10.2514/1.22547

Visvanathan, C., Aim, R. Ben ve Parameshwaran, K. (2000). Membrane Separation Bioreactors for Wastewater Treatment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, *30*(1), 1–48. doi:10.1080/10643380091184165

Xia, L., Law, A. W.-K. ve Fane, A. G. (2013). Hydrodynamic effects of air sparging on hollow fiber membranes in a bubble column reactor. *Water research*, *47*(11), 3762–72. doi:10.1016/j.watres.2013.04.042

Yamanoi, I. ve Kageyama, K. (2010). Evaluation of bubble flow properties between flat sheet membranes in membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science*. doi:10.1016/j.memsci.2010.05.006

Yang, W., Cicek, N. ve Ilg, J. (2006). State-of-the-art of membrane bioreactors: Worldwide research and commercial applications in North America. *Journal of Membrane Science*. doi:10.1016/j.memsci.2005.07.010

Yeon, K. M., Cheong, W. S., Oh, H. S., Lee, W. N., Hwang, B. K., Lee, C. H., … Lewandowski, Z. (2009). Quorum sensing: A new biofouling control paradigm in a membrane bioreactor for advanced wastewater treatment. *Environmental Science and Technology*. doi:10.1021/es8019275

Yiğit, N. Ö. (2007). *Membran biyoreaktörü ile (MBR) evsel atıksu arıtımı*. (Doktora Tezi), SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.

Yoon, S. H., Collins, J. H., Musale, D., Sundararajan, S., Tsai, S. P., Hallsby, G. A., … Cachia, P. (2005). Effects of flux enhancing polymer on the characteristics of sludge in membrane bioreactor process. *Water Science and Technology*.

Yoon, S. H., Kang, I. J. ve Lee, C. H. (1999). Fouling of inorganic membrane and flux enhancement in membrane-coupled anaerobic bioreactor. *Separation Science and Technology*. doi:10.1081/SS-100100676

Yun, M. A., Yeon, K. M., Park, J. S., Lee, C. H., Chun, J. ve Lim, D. J. (2006). Characterization of biofilm structure and its effect on membrane permeability in MBR for dye wastewater treatment. *Water Research*. doi:10.1016/j.watres.2005.10.035

Zhang, J., Chua, H. C., Zhou, J. ve Fane, A. G. (2006). Factors affecting the membrane performance in submerged membrane bioreactors. *Journal of Membrane Science*. doi:10.1016/j.memsci.2006.06.022

Zhang, K., Cui, Z. ve Field, R. W. (2009). Effect of bubble size and frequency on mass transfer in flat sheet MBR. *Journal of Membrane Science*. doi:10.1016/j.memsci.2009.01.033

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Recep Kaya

Doğum Tarihi ve Yeri : 01.05.1987 Bakıtköy/İstanbul

E-posta : recepkaya01@gmail.com, rkaya@itu.edu.tr

Adres : Serakent Sitesi Gelincik Blok Hamidiye Mahallesi Kağıthane – İstanbul

Telefon : 0 (506) 411 61 91

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2010, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : 2012, İstanbul Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Çevre Bilimleri, Mühendisliği ve Yönetimi Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2009-2012 yılları arasında İstanbul Teknik Üniversitesi ve TPAO (Türkiye Petroleri Anonim Ortaklığı) ile birlikte pilot arıtma tesislerinde çalıştı.
- 2013 - 2018 yıllarında İstanbul Teknik Üniversitesi'nde Araştırma Görevlisi olarak çalıştı.
- 2012 – Halen MEM-TEK araştırma merkezinde modül üretimi ve geliştirilmesi laborauvarı soumlusu.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Kaya R.,** Özgün H., Erşahin M.E., Durmuş M., Damirchi M. Koyuncu İ., Yiğit N.Ö., Kitiş M., Demir İ., Arıkan O.A., (2017). Impact of vibration on treatment

and filtration performance of membrane bioreactors treating municipal wastewater, Desalination and Water Treatment, 99 177–184

- **Kaya R.,** Tirol N., Özgün H., Erşahin M. E., Arıkan O. A., Yiğit N. Ö., Kitiş M., Koyuncu İ. 2017. Vibratory shear enhanced hollow fiber membrane module in a pilot-scale MBR. *8 th International Water Association Membrane Technology Conference Exhibition for Water and Wastewater Treatment and Reuse*, September 05-09, 2017 Singapore.

- **Kaya R.,** Tirol N., Özgün H., Erşahin M. E., Arıkan O. A., Yiğit N. Ö., Kitiş M., Koyuncu İ. 2017. Manyetik titreşimli MBR modülünün pilot ölçekli denenmesi. *Membran Teknolojileri ve Uygulamaları Çalıştayları (MEMTEK),* Nisan 18-20 2017, İstanbul.

- **Kaya R.,** Tirol N., Özgün H., Erşahin M. E., Arıkan O. A., Yiğit N. Ö., Kitiş M., Koyuncu İ. 2017. Manyetik Titreşimli MBR Modülünün Pilot Ölçekli Denenmesi. *Membran Teknolojileri Çalıştayı*, Nisan 20, 2017 Istanbul.

- **Kaya R.,** Tirol N., Özgün H., Erşahin M. E., Arıkan O. A., Yiğit N. Ö., Kitiş M., Koyuncu İ. 2017. Manyetik Titreşimli MBR Modülünün Pilot Ölçekli Denenmesi. *Membran Teknolojileri Çalıştayı*, Nisan 20, 2017 Istanbul.

- **Kaya R.,** Durmuş M., Özgün H., Erşahin M. E., Arıkan O. A., Yiğit N. Ö., Kitiş M., Koyuncu İ. 2016. Vibratory Shear Enhanced Systems in Lab Scale MBR. *IMSTEC - 9th International Membrane Science and Technology Conference*, December 05-08, 2016 Sydney, Australia

- **Kaya R.,** Durmuş M., Özgün H., Erşahin M. E., Arıkan O. A., Yiğit N. Ö., Kitiş M., Koyuncu İ. 2016. Comparison of Different Fouling Control Technics in Lab Scale MBR Experiments. *MBR for the Next Generation*, May 10, 2016 Istanbul.

- **Kaya R.,** Durmuş M., Özgün H., Erşahin M. E., Arıkan O. A., Yiğit N. Ö., Kitiş M., Koyuncu İ. 2015. Membran Biyoreaktörlerde (MBR) Tıkanma Kontrolü İçin Titreşim Uygulamaları. *4. Ulusal Membran Teknolojileri ve Uygulamaları Sempozyumu (MEMTEK 2015)*, 6-9 Ekim 2015 Isparta.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

Erşahin M. E., Özgün H., **Kaya R.,** Koyuncu İ., Kose Mutlu B., Kınacı C. (2017). Treatment of produced water originated from oil and gas production wells: a pilot study and cost analysis, Environmental Science and Pollution Research

Köse Mutlu B., Erşahin M. E., Özgün H., **Kaya R.,** Kınacı C., Koyuncu İ. (2017). Influence of powdered and granular activated carbon system as a pre-treatment alternative for membrane filtration of produced water, Journal of Chemical Technology and Biotechnology

Şengür Taşdemir R., Deveci G., **Kaya R.,** Türken T., Güçlü S., İmer D. Y., Koyuncu İ. (2015). CFD modeling of submerged membrane bioreactors sMBRs A review, Desalination and Water Treatment

Demir İ., Koyuncu İ., Güçlü S., Türken T., Paşaoğlu M. E., **Kaya R.,** Şengür Taşdemir R. (2015). An Autopsy of Nanofiltration Membrane Used for Landfill Leachate Treatment, Scientific World Journal

Kaya R., Türken T., Şengür Taşdemir R., Güçlü S., İmer D.Y., Koyuncu İ. (2014). Analysis of wall shear stress on the outside in type hollow fiber membrane modules by CFD simulation, Desalination

Özgün H., Erşahin M. E., **Kaya R.,** Altınbaş M., Kınacı C., Koyuncu İ. (2013). Effects of the pre treatment alternatives on the treatment of oil gas field produced water by nanofiltration and reverse osmosis membranes, Journal of Chemical Technology and Biotechnology

Köse B., Özgün H., Erşahin M. E., Dizge N., İmer D. Y., Atay B., **Kaya R.,** Altınbaş M., Sayılı S., Hoşhan P., Atay D., Eren E., Kınacı C., Koyuncu İ. (2012). Performance evaluation of a submerged membrane bioreactor for the treatment of brackish oil and natural gas field produced water, Desalination

Koyuncu İ., İmer D. Y., Türken T., Güçlü S., Paşaoğlu M. E., Şengür T. R., **Kaya R.** 2017. Recent Membrane Manufacturing Studies in MEMTEK. *International Workshop Application of Membrane Technologies for Water Reclamation and Whey Desalination in Food Industry*, May 22, 2017 Izmir.

Koyuncu İ., İmer D. Y., Güçlü S., Türken T., **Kaya R.,** Paşaoğlu M. E. 2017. Recent Advances in Membrane Bioreactors. *MBR for the Next Generation*, May 10, 2017 Istanbul.

Kaya R., Türken T., Güçlü S., Paşaoğlu M. E., Şengür T. R., İmer D. Y., Koyuncu İ. 2014. History of Membrane Module Technology and Membrane Module Studies in MEM TEK. *MBR for the Next Generation - VI*, September 11, 2014 Antalya.

Naci Köse, Sema Sayılı, Şebnem Doğa Atay Bali, Pelin Hoşhan, Esra Eren Tokoğlu, Erkan Buzpınar, Hatice Selcen Köse, İsmail Koyuncu, Cumali Kınacı, **Recep Kaya,** Mustafa Evren Erşahin, Hale Özgün, Börte Köse Mutlu, Serdar Doğan 2016. Petrol ve doğal gaz üretim atıksuları için bir arıtma prosesi. *İsmail Koyuncu, Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı*, (Patent No: TR-2014-12949).