İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PİLOT ÖLÇEKLİ MEMBRAN BİYOREAKTÖRDE TIKANMA KONTROLÜ İÇİN MANYETİK TİTREŞİM UYGULAMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nilüfer TİROL

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Bilimleri ve Mühendisliği Programı

ARALIK 2016

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PİLOT ÖLÇEKLİ MEMBRAN BİYOREAKTÖRDE TIKANMA KONTROLÜ İÇİN MANYETİK TİTREŞİM UYGULAMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nilüfer TİROL
(501151729)

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Bilimleri ve Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Osman Atilla ARIKAN

ARALIK 2016

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501151729 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Nilüfer TİROL, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "PİLOT ÖLÇEKLİ MEMBRAN BİYOREAKTÖRDE TIKANMA KONTROLÜ İÇİN MANYETİK TİTREŞİM UYGULAMASI" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Doç. Dr. Osman Atilla ARIKAN** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Prof. Dr. İsmail KOYUNCU** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Prof. Dr. Bülent KESKİNLER Gebze Teknik Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : 25.01.2017
Savunma Tarihi : 23.12.2016

Aileme,

ÖNSÖZ

Öncelikle proje ve tez aşamam süresince çalışma disiplini ve sevgisi sayesinde kendisinden çok şey öğrendiğim danışmanım Doç. Dr. Osman Atilla Arıkan'a ve deneysel çalışmalarımı gerçekleştirmemde gerekli çalışma ortamını bulmamı sağlayan hocam Prof. Dr. İsmail Koyuncu'ya teşekkürlerimi sunuyorum.

Hayatımın her alanında, her kararımda yanımda olan ve bugünlere gelmemi sağlayan annem Gamze Tirol, babam Hakan Tirol ve anneannem Emine Jale Üğdül başta olmak üzere bütün aileme, öğrencilik yaşantım boyunca her sorunu ve her mutluluğu birlikte paylaştığım arkadaşlarım Mehmet Ali Can, Büşra Ecem Öner, Tuğba Sapmaz, Çisil Eriş ve Ezgi Akyüz'e en içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Çalışmamın hayata geçmesinde emek veren hocalarım Yrd. Doç. Dr. Evren Erşahin, Ar. Gör. Dr. Hale Özgün ve Ar. Gör. Recep Kaya'ya, Barış Yegen ve Elif Afacan başta olmak üzere bütün MEM-TEK ailesine, bütün öğrenim hayatım boyunca her birinden birçok şey öğrendiğim tüm İTÜ Çevre Mühendisliği Bölümü öğretim üyeleri ve yardımcılarına teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak, TÜBİTAK 113Y341 numaralı proje kapsamında gerçekleştirilen tez çalışmama maddi destek sağlayan TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Aralık 2016

NilüferTİROL
(Çevre Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ…. vii
İÇİNDEKİLER ix
KISALTMALAR xi
SEMBOLLER xiii
ÇİZELGE LİSTESİ xv
ŞEKİL LİSTESİ xvii
ÖZET…… xix
SUMMARY xxi
1. GİRİŞ…. 1
1.1 Çalışmanın Anlamı ve Önemi 1
1.2 Amaç ve Kapsam 2
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 3
2.1 Genel Bilgiler 3
2.2 Membran Sürücü Kuvvetleri ve Prosesleri 5
2.3 Membran Performansı 7
2.3.1 Akı 8
2.3.2 Giderim verimi 9
2.3.3 Direnç 10
2.4 Membran Modül Çeşitleri 11
2.5 Membran Biyoreaktörler 12
2.6 Konsantrasyon Polarizasyonu ve Membran Tıkanması 16
2.7 Membran Biyoreaktörlerde Temizleme Yöntemleri 20
2.7.1 Fiziksel yöntemler 20
2.7.2 Kimyasal yöntemler 20
2.8 Membran Tıkanmasını Azaltıcı Yöntemler 23
2.8.1 Ön arıtma işlemleri 23
2.8.2 Kimyasal ilavesi 23
2.8.3 Nanomateryal katkılı membran kullanımı 26
2.8.4 Bakterilerin iletişiminin kesilmesi (Quorum Quenching) metodu 26
2.8.5 Titreşim uygulamaları 26
3. MATERYAL VE METOT 35
3.1 MBR Sisteminin ve Membran Modüllerinin Teknik Özellikleri 35
3.2 Atıksu Kaynağı ve Karakterizasyonu 40
3.3 Aşı Çamuru Karakterizasyonu 42
3.4 Deneysel Plan ve İşletme Koşulları 42
3.5 Analiz Metotları 44
3.5.1 Toplam ve çözünmüş KOİ 46
3.5.2 Amonyum azotu (NH_4–N) 46
3.5.3 Nitrat azotu (NO_3-N) 46
3.5.4 Nitrit azotu (NO_2-N) 46

3.5.5 Toplam azot (TN) 46
3.5.6 Toplam fosfor (TP) 46
3.5.7 Bulanıklık 46
3.5.8 Askıda katı madde (AKM) 46
3.5.9 Uçucu askıda katı madde (UAKM) 47
3.5.10 Toplam katı madde (TKM) 47
3.5.11 Çamur hacim indeksi (SVI) 47
3.5.12 SEM-EDS analizi 47
3.5.13 PSD analizi 47
3.5.14 Akı hesabı 47
3.5.15 Permeabilite deneyi 48
3.5.16 Kritik akının belirlenmesi 48
3.5.17 Membran dirençlerinin belirlenmesi 49
3.5.18 Membran modüllerine uygulanan temizlik prosedürü 50
4. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME 51
4.1 Kritik Akı 51
4.2 Permeabilite 52
4.3 Filtrasyon Performansı 52
4.3.1 Zaman içerisindeki TMP değişiminin gözlemlenmesi 52
4.3.2 İşletme sonrası filtrasyon dirençlerinin belirlenmesi 53
4.3.3 Morfolojik analiz 54
4.4 Arıtma Performansı 58
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 69
KAYNAKLAR 71
ÖZGEÇMİŞ 77

KISALTMALAR

AAT : Atıksu Arıtma Tesisi
AKM : Askıda Katı Madde
EDTA : Etilendiamin Tetraasetik Asit
Hz : Hertz
İSKİ : İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi
mbar : Milibar
MBR : Membran Biyoreaktör
MF : Mikrofiltrasyon
NF : Nanofiltrasyon
NH_4-N : Amonyak Azotu
NO_2-N : Nitrit Azotu
NO_3-N : Nitrat Azotu
ORP : Oksijen İndirgenme Potansiyeli
PSD : Parçacık büyüklük dağılımı
RO : Ters osmoz
SCADA: Uzaktan Kontrol ve Gözleme Sistemi
SDI : Silt Density Index
SMP : Çözünmüş Mikrobiyal Ürünler
SVI : Çamur Hacim İndeksi
TMP : Trans Membran Basıncı
TN : Toplam Azot
TP : Toplam Fosfor
UAKM: Uçucu Askıda Katı Madde
UF : Ultrafiltrasyon
VSEP : Vibratory Shear-Enhanced Process

SEMBOLLER

$\mathbf{A_{membran}}$	**:** Kullanılan modülün nominal membran yüzey alanı (m^2)
cf	**:** Besleme suyu konsantrasyonu
cm	**:** Membran yüzeyindeki konsantrasyon
cp	**:** Süzüntü akımı konsantrasyonu
J	**:** Akı (L/m^2-sa)
n	**:** Kademe numarası
$\mathbf{Q_g}$	**:** Giriş debisi
$\mathbf{Q_h}$	**:** Havalandırma debisi
$\mathbf{Q_p}$	**:** Süzüntü debisi
$\mathbf{R_0}$	**:** Gerçek giderim verimi
$\mathbf{R_{ef}}$	**:** Membran yüzeyindeki katıların fiziksel-kimyasal etkileşiminden oluşan kek tabakası üstünde dışardan gelen direnç
$\mathbf{R_g}$	**:** Gerçek giderim verimi
$\mathbf{R_{if}}$	**:** Adsorbsiyon veya por tıkanması nedeniyle oluşan membranın iç direnci
$\mathbf{R_m}$	**:** Membran direnci
$\mathbf{R_p}$	**:** Konstrasyon polarizasyonu farkından oluşan direnç
t	**:** Zaman (dk)
$\mathbf{TMP_f^{n-1}}$	**:** (n-1). kademe t=15 dk TMP değeri (mbar)
$\mathbf{TMP_i^n}$	**:** n. kademe t=0 TMP değeri (mbar)
ΔP	**:** Membrandaki basınç farkı
$\boldsymbol{\mu}$	**:** Akışkan vizkositesi

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Membran teknolojisinin tarihçesi (Membrane Technology and Engineering for Water Purification, 2014). **4**
Çizelge 2.2 : Sürücü kuvvetlerine göre membranlar (Türken, 2013). **6**
Çizelge 2.3 : Farklı taşınımlar için kullanılan akı denklemleri ve itici kuvvetler (Beier, 2008). **8**
Çizelge 2.4 : Harici ve dahili MBR sistemlerinin karşılaştırılması (Jiang, 2007). **16**
Çizelge 2.5 : Kimyasal temizleme yöntemlerinde kullanılan kimyasallar ve etki ettikleri kirletici maddeler (Membrane Technology and Engineering for Water Purification, 2014). **21**
Çizelge 3.1 : Pilot ölçekli MBR sisteminin teknik özellikleri. **36**
Çizelge 3.2 : Modül özellikleri. **39**
Çizelge 3.3 : Tüm işletme süreleri boyunca ham evsel atıksu karakterizasyonu. **41**
Çizelge 3.4 : Aşı çamuru karakterizasyonu. **42**
Çizelge 3.5 : Pilot sistemde uygulanan deneysel plan. **42**
Çizelge 3.6 : MBR sisteminin işletme parametreleri. **43**
Çizelge 3.7 : MBR sisteminin işletiminde ölçülen parametreler, ölçüm noktaları ve ölçüm sıklıkları. **45**
Çizelge 4.1: Manyetik titreşimli ve titreşimsiz çalışma öncesinde ölçülen permeabilite ve direnç değerleri. **52**
Çizelge 4.1 : Membran yüzeyindeki elementlerin ağırlıkça yüzdesel dağılımı. **56**
Çizelge 4.2 : MBR içindeki çamurun AKM ve UAKM konsantrasyonları. **59**
Çizelge 4.3 : Manyetik titreşimli ve titreşimsiz membran modüllerinde süzüntü akımlarında AKM değerleri ve giderim verimleri. **60**
Çizelge 4.4 : Manyetik titreşimli ve titreşimsiz membran modüllerinin süzüntü akımlarında ölçülen KOİ konsantrasyonları ve giderim verimleri. **61**
Çizelge 4.5 : Süzüntü akımında ortalama NO3-N, NO2-N, NH4-N, TKN ve TP konsantrasyonları. **62**
Çizelge 4.6 : Süzüntü akımlarında ölçülen bulanıklık değerleri. **63**
Çizelge 4.7 : Tüm işletme periyodu boyunca çamur, besleme ve süzüntü akımlarında yapılan PSD analizlerinin sonuçları. **63**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Yeryüzündeki toplam su miktarı dağılımı. **3**
Şekil 2.2 : Membran ayırma prosesi (URL 1). **5**
Şekil 2.3 : Basınç sürücülü membran proseslerde tutulabilen kirletici maddeler (Sadr, 2015)..... **7**
Şekil 2.4 : Filtrasyon mekanizmaları (URL 2). **7**
Şekil 2.5 : Membrana etki eden dirençler. **11**
Şekil 2.6 : Membran modül tipleri (URL 3). **12**
Şekil 2.7 : Dahili ve harici MBR (Membrane Technology and Engineering for Water Purification, 2014). **15**
Şekil 2.8 : Konsantrasyon sınır tabakası oluşumu (Membrane Technology and Engineering for Water Purification,2014). **17**
Şekil 2.9 : Konsantrasyon/jel polarizasyonu şematik gösterimi (Jel tabakası olması durumunda) (Membrane Technology and Engineering for Water Purification, 2014). **17**
Şekil 2.10 : MBR'larda tıkanmayı etkileyen faktörler (Judd, 2001; Chang ve diğ., 2002)..... **18**
Şekil 2.11 : Kirleticilerin deterjan yardımıyla temizlenme mekanizması (a) Yüzey yapışkan kek tabakası ile kaplıdır. (b) Su ile kirletici maddeler biraz daha esnek bir hale gelir. (c) Suya deterjan eklenir. Deterjanın hidrofobik kısımları kirletici maddelere tutunur. (d) Deterjan molekülleri membran yüzeyi ve kirletici maddelere tutunur bu sebeple kirletici maddeler sıvı içinde yüzer hale gelir (Membrane Technology and Engineering for Water Purification, 2014). **22**
Şekil 2.12 : VSEP sistemi ile çapraz akış farkı (URL 4). **27**
Şekil 2.13 : Boyuna titreşimli membran sistemi (Low ve diğ., 2009). **28**
Şekil 2.14 : Kola ve diğ. (2012) tarafından kullanılan çapraz titreşim sistemi (a) Membran test düzeneği, (b) Çalkalama vasıtasıyla titreşim (c) Modüle uygulanan enine titreşim. **28**
Şekil 2.15 : Manyetik MBR sisteminin şematik gösterimi. (a) MBR sistemi. (b) Modül haznesinin görünümü. (c) Modülün yandan görünümü (Bilad ve diğ., 2012). **30**
Şekil 2.16 : Li ve diğ. (2013) tarafından kullanılan deney düzeneği. **31**
Şekil 2.17 : Levha membranlı batık titreşimli sistem (Gomaa ve diğ., 2011). 32
Şekil 2.18 : Genkin ve diğ. (2006) tarafından kullanılan laboratuvar ölçekli batık membran titreşim ünitesi. **33**
Şekil 2.19 : Kullanılan VSEP sistemi (Low ve diğ., 2005). **34**
Şekil 2.20 : (a) Titreşimsiz kontrol sistemi (b) Dinamik (Titreşimli) sistem (Nurra ve diğ., 2014). **34**
Şekil 3.1 : Çalışmanın gerçekleştirildiği konteynerın görünümü. **35**
Şekil 3.2 : Pilot ölçekli MBR sisteminin görünümü; (a) Sistemin boş durumdaki hali, (b)Aklimasyon süreci başlatılmış aktif çamur içeren sistemin görünümü..... **36**

Şekil 3.3 : Pilot ölçekli MBR Sistemi SCADA ana ekran görünümü. **37**
Şekil 3.4 : Membran modülü hazırlık aşaması. **39**
Şekil 3.5 : Bağlantıları yapılmış kullanıma hazır MBR modülü. **40**
Şekil 3.6 : Bağlantıları yapılmış kullanıma hazır pilot ölçekli MBR modülünün farklı açıdan görüntüsü. **40**
Şekil 4.1 : Kritik akı deneyi akıya bağlı TMP değişimi. **51**
Şekil 4.2 : Manyetik titreşimli (30 Hz), titreşimsiz ve manyetik titreşimli (150 Hz) modüllerde TMP profili. **53**
Şekil 4.3 : Modüllerin yıkama aşamalarından sonra elde edilmiş direnç grafikleri. . **54**
Şekil 4.4: Manyetik 30 Hz titreşimli modülden alınan membranların fiziksel ve kimyasal yıkama sonrası SEM görüntüleri. **54**
Şekil 4.5: Titreşimsiz modülden alınan membranların fiziksel ve kimyasal yıkama sonrası SEM görüntüleri. **55**
Şekil 4.6: Manyetik 150 Hz titreşimli modülden alınan membranların fiziksel ve kimyasal yıkama sonrası SEM görüntüleri. **55**
Şekil 4.7: Manyetik titreşimli (30 Hz - 150 Hz) ve titreşimsiz modüllerde gerçekleştirilen EDS analizi spektrumu. **57**
Şekil 4.8 : Reaktördeki AKM-UAKM konsantrasyonlarının değişimi. **58**
Şekil 4.9 : Süzüntüdeki AKM konsantrasyonunun değişimi. **59**
Şekil 4.10 : Süzüntü akımında TKM konsantrasyonunun değişimi. **60**
Şekil 4.11 : Reaktörün işletildiği süreç boyunca süzüntüde KOİ konsantrasyonları. **61**
Şekil 4.12 : Süzüntü akımında ölçülen bulanıklık değerleri. **62**
Şekil 4.13: Manyetik titreşimli (30 Hz) modülün besleme akımında ölçülen PSD sonuçları. **64**
Şekil 4.14 : Titreşimsiz modülün besleme akımında ölçülen PSD sonuçları. **64**
Şekil 4.15: Manyetik titreşimli (150 Hz) modülün besleme akımında ölçülen PSD sonuçları. **65**
Şekil 4.16: Manyetik titreşimli (30 Hz) modülün işletildiği süreçte çamurda ölçülen PSD sonuçları. **65**
Şekil 4.17: Titreşimsiz modülün işletildiği süreçte çamurda ölçülen PSD sonuçları. **66**
Şekil 4.18: Manyetik titreşimli (150 Hz) modülün işletildiği süreçte çamurda ölçülen PSD sonuçları. **66**
Şekil 4.19: Manyetik titreşimli (30 Hz) modülün süzüntü akımında ölçülen PSD sonuçları. **67**
Şekil 4.20 : Titreşimsiz modülün süzüntü akımında ölçülen PSD sonuçları. **67**
Şekil 4.21: Manyetik titreşimli (150 Hz) modülün süzüntü akımında ölçülen PSD sonuçları. **68**

PİLOT ÖLÇEKLİ MEMBRAN BİYOREAKTÖRDE TIKANMA KONTROLÜ İÇİN MANYETİK TİTREŞİM UYGULAMASININ KULLANILMASI

ÖZET

Su, doğanın ve içerisinde barındırdığı bütün varlıkların canlılığını sürdürebilmesi için gerekli olan en önemli maddedir. Yeryüzünün 2/3'ü sularla kaplı olmasına rağmen bu kaynakların %97,5'ini tuzlu sular, %2,5'ini ise tatlı sular oluşturmaktadır. İçilebilir su kaynakları; düzensiz kentleşme, aşırı nüfus artışı ve artan sanayileşme gibi nedenlere bağlı olarak giderek azalmaktadır. Ülkeler, yılda kişi başına düşen su miktarı bakımından su fakiri, su azlığı çeken ve su zengini ülkeler olarak üç grupta sınıflandırılır. Su stresi çeken bir ülke olarak tanımlanan ülkemizde kişi başına düşen su miktarı 1520 m^3'tür. 15 yıl içinde kişi başına düşen su miktarının 1100 m^3'e düşeceği ve su fakiri kategorisinde yer alan ülkelerden olacağımız öngörülmektedir. Bu riskin önüne geçebilmenin en iyi yolu ise mevcut kaynakların tasarruflu kullanılmasından ve atıksuların yüksek kalite ve verimle arıtılmasından geçmektedir.

Her geçen gün daha da artan su ihtiyacını karşılayabilmek için su tasarrufu bilincinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması, atıksuların daha verimli tekniklerle arıtılması ve sudan geri dönüşümle yararlanılması gerekmektedir. Bunun için mevcut teknolojilerin yerini ileri teknoloji yöntemlerinin alması zorunlu hale gelmiştir.

Membran sistemleri, kullanımı dünya çapında giderek artan bir teknolojidir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda membran maliyetlerini azaltıcı uygulamalar hayata geçirilmiş ve böylelikle su arıtımında membran teknolojileri daha çok kullanılmaya başlamıştır. Özellikle aynı sistem içerisinde hem biyolojik aktiviteye hem de filtrasyon prosesine olanak sağlayan membran biyoreaktörler (MBR) adından sıkça söz ettirmeye başlamıştır. Bu sistemler daha az alan kullanarak daha yüksek askıda katı madde (AKM) konsantrasyonlarında çalıştırılabilmektedirler.

MBR'lerin en büyük dezavantajı tıkanma problemidir. Zamanla membran yüzeyinde ve gözeneklerinde biriken kirletici maddeler aynı akıyı sağlayabilmek için ihtiyaç duyulan basıncı (trans membran basıncı, TMP) arttırarak filtrasyon performansını düşürür. Akıyı sabit tutabilmek için arttırılan basınç ile harcanan enerji artarak maliyetin artmasına neden olur.

Bu çalışmanın amacı tıkanmayı kontrol altında tutarak işletme basıncı artış hızının azalmasını sağlamaktır. Bu çalışmadan önce gerçekleştirilen laboratuvar ölçekli çalışmalarda titreşim sistemleri kıyaslanmış ve bunun sonucunda manyetik titreşim sisteminin mekanik titreşim sistemine göre tıkanma hızının kontrolünde daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sebeple gerçekleştirilen pilot ölçekli çalışmada manyetik titreşim sistemi kullanılmıştır.

Çalışmada kullanılan MBR sistemi İSKİ Baltalimanı Atıksu Arıtma Tesisi'nde konumlandırılan prefabrik bir oda içerisinde aerobik olarak ve oda şartlarında işletilmiştir. Membran modülünde 0,04µm por çapına sahip ince boşluklu membranlar kullanılmıştır. MBR tankının kapasitesi 300 L'dir. Besleme olarak

adlandırılan ham atıksu, İSKİ Baltalimanı AAT'nin ön arıtma ünitesi çıkışından temin edilmiştir. Besleme tankının kapasitesi 1000 L'dir.

Çalışmada ilk olarak batık MBR 24 gün süresince 30 Hz frekansında manyetik titreşim uygulaması ile işletilmiştir. Daha sonrasında aynı sürede aynı özellikte başka bir modül titreşimsiz olarak işletilmiştir. En son olarak frekansın basınç artışı üzerindeki etkisini gözlemleyebilmek açısından aynı özellikteki bir başka modül 150 Hz frekans değerinde işletilmiştir.

Çalışmanın sonucunda, titreşimsiz, 30 Hz ve 150 Hz frekans ile işletilen sistemlerin aynı süre zarfındaki TMP artışları gözlemlenmiştir. Manyetik titreşimli olarak 30 Hz'de işletilen modül ile titreşimsiz olarak işletilen modül karşılaştırıldığında 30 Hz'de işletilen modülün TMP artışı daha uzun sürede gerçekleştiği görülmüştür. Frekans artışının etkisi ise sistemin 150 Hz'de işletilmesinden sonra anlaşılabilmiştir. 150 Hz frekans değerinde işletilen modüldeki TMP artışının diğer sistemlere göre çok daha yavaş olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, bu çalışmada elde edilen verilere göre kullanılan manyetik titreşim uygulaması ile membran modülünde TMP artışları kontrol edilebilmiş ve membran modülünde tıkanma kontrolü sağlanabilmiştir. Membran modülüne dahil edilebilen manyetik titreşim uygulaması ile MBR'lar için sürdürülebilir akı temini sağlanabilecektir. Böylece işletme ve enerji maliyetleri azaltılabilecektir. Bu avantajların yanı sıra membranlarda en çok karşılaşılan sorun olan tıkanma sorunu bu yöntemle azaltıldığı için membran teknolojisi kullanımının artacağı öngörülmektedir.

USING MAGNETIC VIBRATION APPLICATION FOR CONTROLLING FOULING IN PILOT-SCALE MBR

SUMMARY

All the livings in nature needs the water to continue aliveness. 2/3 of the earth has been covered by water. This water resource is formed by only 2,5% of fresh water and the rest is saline. The largest part of fresh water is frozen and the other big part is in remote aquifers. As a result directly reachable fresh water is only 0,007% of total global water. Regrettably, this accessible water is polluted because of population growth, conurbation and increase in industrialisation.

In this day and age, water saving and using recycle and reuse techniques become a necessity to provide the water requirement. For this reason, advanced treatment technologies replace conventional methods.

Membrane technology is one of the advanced technology which the usage of this technology has been increased over the years. A membrane can be identified as a permselective barrier between two homogeneous phases. Their pores do not permit materials that bigger than pore sizes. Membrane systems are generally used for desalination, producing potable water and treating industrial effluents. Advantages of well-designed membrane filtration system can be summarised as follows:

- High quality
- High efficiency
- Long-term compliance with regulations
- Easy to operate
- Longevity
- Less area
- Small footprint

During the recent years, membrane experiments are made for reducing the cost. Esspecially, membrane bioreactors (MBRs) have been commonly used worlwide since end of 1990s because these systems enable both biological activity and filtration process in same tank. Membranes are either submerged within the activated sludge reactor or configured externally in a separate tank. Membrane bioreactors have many advantages as the following:

- They need less area because of eliminating the clarifier.
- MBR's can be operated in more MLSS concentration.
- Their sludge age is long.
- They produce lower sludge.

- Their quality of effluent is suitable and stable.

The biggest disadvantage of MBR's is fouling problem. Fouling affects membrane lifetime and permeate flux. Foulants accumulate on the membrane surface and pores in time and consequently trans membrane pressure (TMP) increase because of supplying the continuity of initial flux. This effort causes to remain to the energy costs. Fouling is occured by four main mechanism:

- Adsorption
- Pore blockage
- Gel formation
- Biofouling

Fouling type consists of reversible and irreversible fouling. Fouling is cleaned by physical and chemical cleaning methods. Backwashing with air or water, air flushing, forward and reverse flushing are methods of physical cleaning. These methods sometimes remain incapable. Chemical cleaning methods are applied when physical cleaning is unsatisfying. MBR system is stopped and membrane modules are washed with chemical solutions. Fouling that is not removed by both chemical and physical methods named irreversible fouling. This fouling is permanent so it leads to decrease membrane productivity. Nevertheless, cleaning methods and periods cause increase in operational and maintenance costs.

The aim of this study is to enhance the filtration performance of a pilot-scale MBR system with a magnetic vibration unit. Before this study, both magnetic and mechanical vibration systems were tested in lab-scale experiments. It has been observed that magnetically vibration induced MBR system gives better results compare to mechanical vibration system with regard to their TMP (trans membrane pressure) profiles. Therefore, magnetically induced MBR was tested in pilot-scale MBR.

The pilot scale MBR system is located at ISKI Baltalimani Wastewater Treatment Plant. The reactor volume is 240 liter and includes ORP, DO and temperature sensors. Commercial available reinforced hollow fibre UF membranes with a pore size of 0,04 μm were used in membrane modules. Vibrations are created by a magnetic vibration driver. The membrane module could be vibrated by I-BEAM Vibro Transducer at the frequency between 20-150 Hz. The frequency was controlled by NCH tone generator software. Magnetic vibrator motor's electrical power range changes between 50 and 250 W.

MBR was operated with magnetic vibration's frequency of 30 Hz and 150 Hz. Moreover, MBR was operated without vibration for making comparison in similar conditions. Considering the results, magnetic vibration system at a frequency of 150 Hz achieved the best performance.

Additionally, these different operating conditions were compared according to their treatment performances. It has been observed that there is no significant diffirence beetween removal efficiencies of measured parameters.

The innovative membrane module with magnetic vibration developed in this study had the capability to control TMP increase, confirming the success of this system in terms of membrane fouling prevention. Sustainable fluxes can be achieved by using this innovative system in the MBR. Thus, operation, membrane replacement,

chemical and energy costs will be reduced. The innovative magnetic vibration system will provide the widespread applicability of MBR technology both in Turkey and throughout the world.

1. GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Anlamı ve Önemi

Günümüzde hızlı nüfus artışı ve sanayileşmenin sonucu olarak su tüketimi ve atıksu üretiminde ciddi bir artış görülmektedir. Konvansiyonel atıksu arıtım yöntemleri birçok parametre açısından yetersiz kalmaktadır. Bu sebeple ileri arıtım teknolojilerinin maliyetleri düşürülerek kullanımlarının yaygınlaştırılması hedeflenmektedir. İleri arıtım teknolojilerinden biri olan membran teknolojisi, su ve atıksu arıtımı, deniz suyundan içme suyu eldesi (desalinasyon), endüstriyel suların arıtımı ve geri kazanılması amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır.

Membran, ayırma ve saflaştırma işlemleri için kullanılan seçici geçirgen yapıda bir malzeme olarak tanımlanmaktadır. Membran filtrasyonu ile, membranın por çapından daha büyük çaptaki tüm maddeler membran yüzeyinde tutulurken por çapından daha küçük maddeler porlardan geçer. Membranın porlarından geçemeyen akımda kalan kısım konsantre akım, porlardan geçebilen akım ise süzüntü akımı olarak adlandırılır. Ayrıca bu ayrım mekanizmasının gerçekleşebilmesi için itici bir güce ihtiyaç vardır. Bu itici güç sürücü kuvvet olarak adlandırılır. Basınç, elektriksel potansiyel, sıcaklık veya kimyasal potansiyel farkının biri veya kombinasyonları kullanılarak itici güç oluşturulur ve ayrım gerçekleşir.

Membran filtrasyonu, konvansiyonel sistemlere göre daha az yer kaplaması, çeşitli parametrelere karşı dayanıklı oluşu ve arıtma süresini kısaltması nedenleriyle daha avantajlı olabilmektedir. Bu avantajların yanısıra temizleme, bakım ve işletme maliyetleri membran proseslerin dezavantajları olarak sayılabilir. Membran yüzeyinde zaman içinde biriken kirletici maddeler, membranın tıkanmasına sebep olarak membran performansını düşürür. Membran tıkanması, işletme zorluğu oluşturarak maliyetleri arttırıcı yönde etki yaptığı için bu sistemlerin yaygın olarak kullanılmasını kısıtlar. Son yıllarda, tıkanmayı etkileyen faktörleri en az düzeye indirip membranların kullanım ömrünü uzatmaya yönelik çalışmalar hız kazanmıştır.

1.2 Amaç ve Kapsam

Yapılan çalışmanın amacı, membran biyoreaktör sisteminde manyetik titreşim uygulamasının membran tıkanması üzerine etkilerinin incelenmesidir. Bu kapsamda, pilot ölçekli aerobik MBR sistemi 2 farklı manyetik titreşim frekansı ile ve titreşimsiz olarak işletilerek titreşimin tıkanma üzerindeki etkisi filtrasyon ve arıtma performansları açısından incelenmiştir. Yakın özelliklere sahip 3 membran modülü, İSKİ Baltalimanı Atıksu Arıtma Tesisi'nden temin edilen ham evsel atıksu ile 30 Hz, 150 Hz ve titreşimsiz koşullarda test edilmiştir.

Tezin birinci bölümünde çalışmanın anlam ve önemi vurgulanmış, amaç ve kapsamı verilmiştir.

İkinci bölümde membran teknolojileri, membran performansını etkileyen faktörler, membran biyoreaktör sistemleri, membranlarda tıkanma sorunu ve tıkanma sorununun çözümü için kullanılan teknikler hakkında literatür araştırması ortaya konmuştur.

Üçüncü bölümde, deneysel çalışmalarda kullanılan pilot ölçekli MBR sisteminin teknik özellikleri, kullanılan modülün teknik özellikleri, MBR sisteminin işletilmesi, deney planlaması ve analizler için kullanılan metotlar ve cihazlar hakkında bilgiler yer almaktadır.

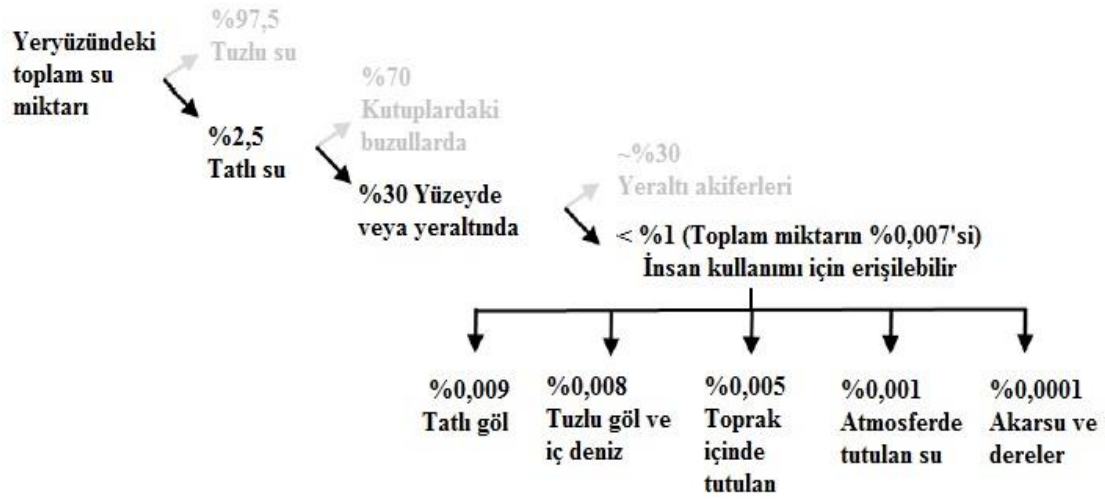
Dördüncü bölümde, çalışmada izlenen parametrelerin sonuçları verilmiştir.

Beşinci bölümde ise yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçların değerlendirilmesi yapılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 Genel Bilgiler

Su ve enerji, ekonomik, kültürel ve sosyal gelişim için gerekli iki temel bileşendir. Sanayi devrimi ile başlayan ve günümüzde hala devam eden gelişmeler ve hızlı nüfus artışı enerji ve suya olan ihtiyacı arttırmış; dünya su kıtlığı, hassas türlerin yok olması, küresel ısınma, çevreye verilen zararın artışıyla ekolojik dengenin bozulması sorunları ile karşı karşıya kalmıştır. Yeryüzünün 2/3'ü sularla kaplı olmasına rağmen bu kaynakların sadece %2,5'ini tatlı sular oluşturmaktadır. Yeryüzündeki toplam su miktarının dağılımı Şekil 2.1'de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.1 : Yeryüzündeki toplam su miktarı dağılımı.

Şekil 2.1'de görüldüğü gibi yeryüzündeki toplam su miktarının %0,007'si insan kullanımı için elverişlidir. Bu kaynaklar da günden güne azalmakta ve kirletilmektedir. Dünya nüfus artışına bağlı olarak evsel ve endüstriyel su kullanımının artması ile birlikte çevreye verilen kirlilik yükü de artmıştır. Bu sebeple, sürdürülebilir bir ekosistem için kirlilik yükünün gerekli arıtım teknolojileri kulllanılarak azaltılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Su ekosistemlerini korumak için atıksu deşarj standartlarını sağlamak gerekmektedir. Günümüzde konvansiyonel

arıtım teknolojilerine göre daha düşük çıkış değerleri sağlayabilen ileri arıtım teknolojileri kullanılarak su ekosistemleri daha etkin bir şekilde korunabilmektedir.

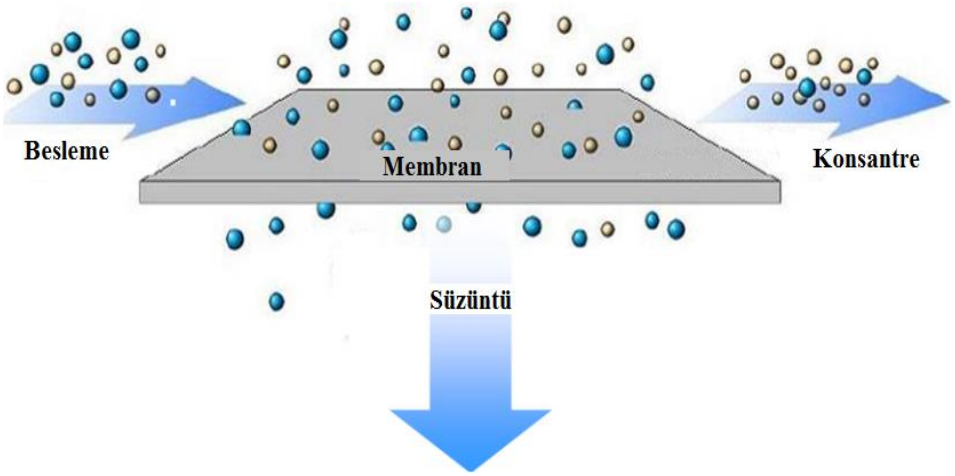
İleri arıtım teknolojilerinden biri olan membran teknolojisinin geçmişi 18. yüzyılın sonlarına doğru osmozun tanımlanmasına dayanmaktadır. Abbe Nollet'in 1748 yılında osmozu keşfetmesiyle başlayan serüven sonraki yıllarda difüzyon, diyaliz, osmotik basınç gibi kavramların tanımlanabilmesiyle devam etmiştir. Yapılan birçok laboratuvar ölçekli çalışmaların neticesinde büyük ölçekteki sistemlerde de membran kullanımı yaygınlaşmıştır. Özellikle 1980'li yıllardan sonra basınç sürücülü membranlar olarak adlandırılan mikrofiltrasyon (MF), ultrafiltrasyon (UF), nanofiltrasyon (NF) ve ters osmoz (RO) membranları arıtma tesislerinde kullanılmaya başlamıştır. Günümüze kadar yapılan birçok çalışma neticesinde membran üretim teknolojileri geliştirilmiş ve böylelikle membran teknolojisinin çok çeşitli alanlarda kullanılabilmesine olanak sağlanmıştır. Çizelge 2.1'de membran teknolojisinin bugünlere gelebilmesine katkı sağlayan bilim insanları ve buluşları yer almaktadır.

Çizelge 2.1 : Membran teknolojisinin tarihçesi (Membrane Technology and Engineering for Water Purification, 2014).

Buluş	**Bilim İnsanı**	**Yıl**
Osmoz	Abbe Nollet	1748
Difüzyon Kanunu	Fick	1855
Dializ, gaz permeasyonu	Graham	1861,1866
Osmotik basınç	Traube,Preffer,Van't Hoff	1860-1887
Mikroporlu membranlar	Zsigmondy	1907-1918
Dağılım Kanunu	Donnan	1911
Membran potansiyeli	Teorell,Meyer,Sievers	1930'lar
Hemodiyaliz	Kolff	1944
Skinned membran	Sourirajan and Loeb	1959
Membran taşınım modeli	Kedem, Katachalsky, Lonsdale, Merten, Pusch, Sourirajan	1960-1970
Spiral sargılını membran	Westmoreland, Bray	1965-1970
İnce boşluklu RO membranı	Mahon, Hoehn ve Milford	1965-1970
İnce film kaplamalı kompozit membran	Cadotte and Rozelle	1972

Membran, belirli türlerin geçişini engelleyen, seçici geçirgen yapıya sahip iki fazı birbirinden ayıran gözenekli bir maddedir. Membran sayesinde bir fazda istenilmeyen maddeler tutularak filtrasyon işlemi gerçekleştirilir.

Membran filtrasyonu genel olarak sıvı ve gazlardan mikron boyutundaki partiküllerin filtrasyonu, sıvılardan kolloidal ve daha büyük çaptaki maddelerin ayrımı, iyonik yapıdaki maddelerin ayrımı ve konsantre çözelti elde etme amaçları doğrultusunda kullanılmaktadır (Kaleli, 2006). Özetle bir fazda istenilmeyen maddelerin tümü membranın por çapının bu maddeleri geçirmeyecek boyutta seçilmesiyle tutulabilmektedir. Por çapından geçen maddeler süzüntü akımına karışırken, geçemeyen maddeler konsantre akımını oluştururlar. Şekil 2.2'de membran filtrasyon prosesi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.2 : Membran ayırma prosesi (URL 1).

2.2 Membran Sürücü Kuvvetleri ve Prosesleri

Tüm membran prosesleri iki fazı birbirinden ayırabilmek için bir itici güce ihtiyaç duyar. Bu itici güç, sürücü kuvvet olarak da adlandırılabilir. Membranlardaki sürücü kuvvetler genel olarak dört farklı grupta incelenir:

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

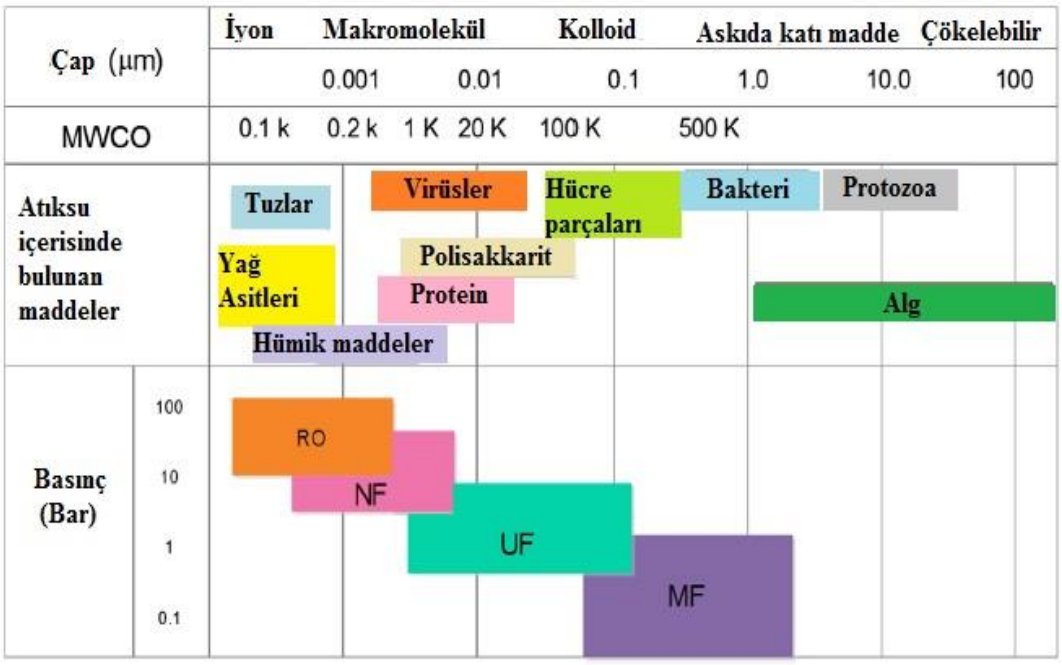
Basınç sürücülü membran prosesler; MF, UF, NF, RO, pervaporasyon ve gaz ayrımıdır. Konsantrasyon farkını sürücü kuvvet olarak kullanan membranlarda uygulanan prosesler; diyaliz, membran ekstraksiyonu ve ileri osmozdur. Elektrik potansiyelini sürücü kuvvet olarak kullanan membran prosesler ise elektrodiyaliz, elektroforez ve membran elektrozudur. Sıcaklık sürücülü membran proseslerde, ayırma işlemi sıcaklık farkı ile gerçekleşir (Kaushik, 2008). Çizelge 2.2'de sürücü kuvvetlerine göre membranlar ve kullanıldıkları prosesler listelenmiştir.

Çizelge 2.2 : Sürücü kuvvetlerine göre membranlar (Türken, 2013).

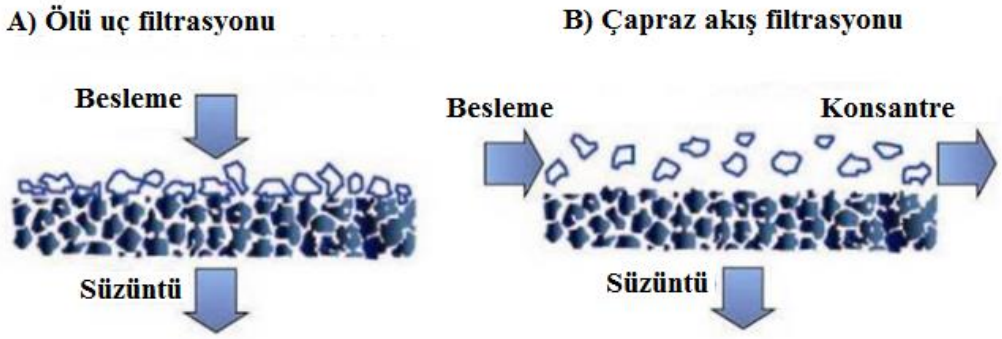
Membran Prosesi	Faz I	Faz II	Sürücü Kuvvet
MF	Sıvı	Sıvı	Basınç farkı
UF	Sıvı	Sıvı	Basınç farkı
NF	Sıvı	Sıvı	Basınç farkı
RO	Sıvı	Sıvı	Basınç farkı
Gaz Ayırma	Gaz	Gaz	Basınç farkı
Diyaliz	Sıvı	Sıvı	Konsantrasyon farkı
Osmoz	Sıvı	Sıvı	Konsantrasyon farkı
Pervaporasyon	Sıvı	Gaz	Basınç farkı
Elektrodiyaliz (ED)	Sıvı	Sıvı	Elektriksel potansiyel farkı
Termo-Osmoz	Sıvı	Sıvı	Sıcaklık/Basınç farkı
Membran Distilasyonu	Sıvı	Sıvı	Sıcaklık/Basınç farkı

Su ve atıksu arıtımında en sık kullanılan sınıflandırma basınç sürücü kuvvetine göre sınıflandırmadır. MF en büyük gözenekli membranken RO en seçici prosestir. MF ve UF membranları 0,1 ile 5 bar aralığında çalıştırılabilirken NF ve RO membranları 3 ile 100 bar aralığında işletilebilmektedirler. MF ve UF membranları bakteri, patojen, büyük boyuttaki virüsleri tutabilmektedir. NF ve RO membranları ise sudaki bu kirleticilerin yanısıra proteinler, polisakkaritler, hümik maddeler gibi çözünmüş organik birleşikleri ve daha küçük boyutlardaki virüsleri tutabilmektedir. RO membranları ayrıca +1 değerlikli iyonları da sudan ayrıştırabilmektedir (Sadr, 2015). Şekil 2.3'de basınç sürücülü membran prosesler ve sudan ayırdıkları kirletici maddeler şematik olarak verilmiştir.

Basınç sürücülü membran prosesler iki tip filtrasyon mekanizmasını kullanırlar. Konsantre akımın olmadığı durum ölü uç filtrasyonu olarak adlandırılırken, konsantre akımın olduğu durum ise çapraz akışlı filtrasyon olarak adlandırılır (Judd, 2010). Şekil 2.4'de membranlarda filtrasyon mekanizmaları şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.3 : Basınç sürücülü membran proseslerde tutulabilen kirletici maddeler (Sadr, 2015).



Şekil 2.4 : Filtrasyon mekanizmaları (URL 2).

2.3 Membran Performansı

Arıtılan suyun kalitesi ve arıtım verimi membran performansına bağlı olarak değişir. Membran filtrasyonunun performansını etkileyen parametreler akı, membran direnci, konsantrasyon polarizasyonu ve tıkanma olarak sıralanabilir.

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 Çizelge 2.3'de verilmektedir.

Çizelge 2.3 : 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

2.3.1 Akı

Birim zamanda membranın birim alanından geçen akım miktarına akı denir. Akı birimi genellikle m^3/m^2.sn veya L/m^2.sa olarak ifade edilir. Filtrasyon başlangıcında temiz su akısı Darcy Kanunu'na göre ifade edilmektedir (Eren, 2006) (2.1).

$$J = \frac{\Delta P}{\mu . R_m} \tag{2.1}$$

J : Akı

ΔP : Membrandaki basınç farkı

μ : Akışkan vizkositesi

R_m : Membran direnci

Membran filtrasyonunda, membrandan geçen süzüntü akımı, membrana uygulanan basınç (ΔP) ile doğru orantılı iken akışkanın viskozitesi ve membranın direnci ile ters orantılıdır.

Kritik akı kavramı sürdürülebilir membran permeabilitesindeki (sabit akı ve transmembran basıncı) işletme limitini temsil eder. İşletme akısı kritik akıdan fazla olduğunda TMP artar ve daha sık periyodik geri yıkama ve/veya temizleme gerektirir (Germain ve diğ., 2005; Le Clech ve diğ., 2006). Membran ayırma proseslerinde artan akıyla birlikte tıkanma da artmakta olduğundan işletme akısı kritik akı değerinden düşük olmalıdır. Kritik akı altında işletilen membran sistemi, uygun bir temizleme metodu ile kombine edilirse çok uzun süre birikim olmaksızın veya daha az birikmeyle çalışmasına devam edebilir. Fakat MBR'lar kritik akı altında işletilseler dahi belirli bir süre sonra permeabilite değeri azalacaktır. Bu sebeple tıkanmayı önleyici farklı yöntemlere başvurulması gerekmektedir (Kitiş ve diğ., 2003; Gürel ve Büyükgüngör, 2011). İnce boşluklu membran geri yıkanabilir özellikte olduğundan dolayı kısa sürelerde kritik akı üzerinde çalışmak maliyet açısından daha avantajlı olabilmektedir. Fakat düz tabakalı membranlarda geri yıkanma özelliği mevcut olmadığından kritik akı altında çalışmak gerekir (Judd, 2001, 2002b; Zhang ve diğ., 2006).

2.3.2 Giderim verimi

Atıksuyun alıcı ortam deşarj standartlarını sağlayabilmesi için kullanılacak arıtım yönteminin giderim verimi önemli bir parametredir. Membran filtrasyonunda giderim verimi bir kirleticinin veya tutulmak istenen maddenin membran tarafından tutulan kısmının bir ölçüsüdür. Giderim verimi yüzde (%) olarak ifade edilir ve R ile gösterilir. Bu ifade "0" ile "1" arasında değişmektedir. "0" tutulmak istenen maddedin tamamıyla membrandan geçtiği durumu, "1" ise membranın bu maddenin tamamının 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 (R_0), tutulmak istenen maddenin süzüntü akımındaki konsantrasyonu ile besleme akımı konsantrasyonu arasındaki farka bağlıyken, gerçek giderim verimi (R_g) ise tutulmak istenen maddenin süzüntü akımı konsantrasyonu ile membran yüzeyindeki konsantrasyonu arasındaki ilişkiden hesaplanır.

$$R_0=\frac{(cf-cp)}{cf}=1-\frac{cp}{cf} \quad (2.2)$$

$$R_g=\frac{(cm-cp)}{cm}=1-\frac{cp}{cm} \quad (2.3)$$

cp : Süzüntü akımı konsantrasyonu

cf : Besleme suyu konsantrasyonu

cm : Membran yüzeyindeki konsantrasyon

2.3.3 Direnç

Membran filtrasyonunda dört farklı dirençten söz edilebilir. İlki membranın kendi yapısından dolayı sahip olduğu membran direncidir (R_m). Bu direnç membranın materyali, por çapı, yüzey porozitesi ve kalınlığı gibi parametrelere bağlıdır (Judd, 2006). Bir diğer direnç membran yüzeyinde konstastrasyon polarizasyonundan dolayı oluşan dirençtir. Üçüncü olarak membranın porlarının tıkanması veya adsorpsiyon nedeniyle oluşan dirençtir. Son olarak membranın işletilmeye alınmasından belirli bir süre sonra membran yüzeyinde biriken maddelerin sebep olduğu kek direnci oluşur. Toplam direnç ise bu dört direncin toplamı olarak ifade edilir (2.4).

$$R_t = R_m + R_p + R_{ef} + R_{if} \quad (2.4)$$

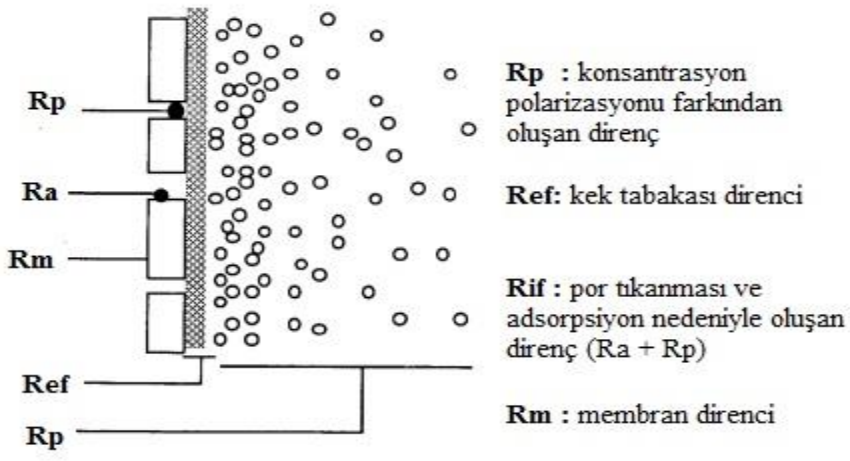
R_m : Membran direnci

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

Şekil 2.5'de membrana etki eden dirençler şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.5 : Membrana etki eden dirençler.

2.4 Membran Modül Çeşitleri

Membran alanının paketlendiği en küçük birime modül adı verilmektedir. Bütün ticari membranlar geçirecekleri su akısına uyum sağlayabilecek geometride modül haline getirilip piyasaya sürülürler. Membran alanı akı ile doğru orantılı bir şekilde artar. Membran maliyetlerini düşürmek için membranların doğru modüler yapıda kullanılması gerekmektedir. Modül konfigürasyonları düz ve tübüler yapıda olmak üzere temelde iki tipten oluşur (Membrane Technology and Engineering for Water Purification, 2014).

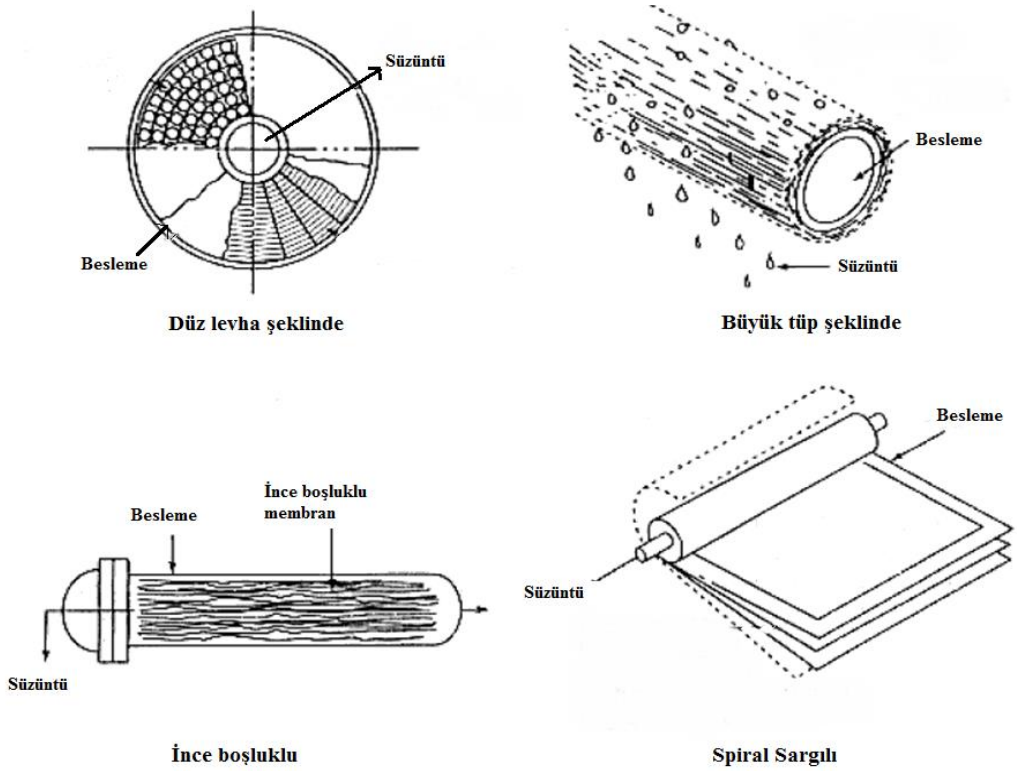
Düz yapıdaki modül tipleri:

- Düz levha (flat sheet)
- Spiral sargılı (sprial wound)

Tübüler yapıdaki modül tipleri:

- İnce boşluklu (hollow fibre)
- Multi-tübüler (multi-tubular)
- İnce tübüler (capillary tube)

Düz levha, ince boşluklu ve multi tübüler modül yapıları MBR teknolojisi için daha elverişlidir. Spiral sargılı ve ince boşluklu membran modülleri yüksek paketleme yoğunluğu ve daha küçük por çaplarına sahip olduğu için NF ve RO prosesleri için kullanılmaktadırlar. Şekil 2.6'da membran modül tipleri gösterilmiştir.



Şekil 2.6 : Membran modül tipleri (URL 3).

2.5 Membran Biyoreaktörler

Membran biyoreaktörler, aktif çamur prosesi ile biyolojik arıtıma olanak sağlarken aynı zamanda MF veya UF membranları ile filtrasyon mekanizmasını gerçekleştiren sistemlerdir (Judd, 2011). Bu sistemler aerobik veya anaerobik olarak işletilebilmektedirler. Biyolojik ünite, atıksu içindeki organik bileşiklerin biyodegredasyonundan sorumluyken; membran modülü fiziksel ayrımı sağlar. Çökeltme tankının yerini alarak partikül ve bakteri tutulumunu gerçekleştiren membran filtrasyon prosesinde membranların por çapı genellikle 0,01 ile 0,1 mμ arasında değişmektedir. MBR teknolojisi aynı zamanda yüksek kalitede çıkış suyu ve düşük karbon ayak izine olanak sağlar. Vakum pompası yardımıyla membran gözeneklerinden çekilen arıtılmış su, konvansiyonel sistemlere göre çok daha yüksek kalitededir çünkü kayıp kaçak oranı çok azdır. Arıtma sırasında zamanla membran yüzeyi üzerinde oluşan kek tabakası, bu gözenekleri daha da küçültmekte ve sıvı/biyokütle ayrımını, askıda katı madde ve mikroorganizma giderim verimini arttırıcı yönde etki yapabilmektedir (Yiğit, 2007). Membran yüzeyinde oluşan kek tabakası arıtma verimini arttırıcı yönde etki yapabilirken aynı zamanda bu tıkanmanın süzüntü akısını düşürmesi membran performansını olumsuz yönde

etkilemektedir. Membran yüzeyinde oluşan kek tabakasının hem arıtma veriminin yüksek olduğu hem de membran performansını düşürmediği optimum noktada çalıştırılması için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır.

Evsel ve endüstriyel atıksu arıtımı ve geri kazanımında MBR teknolojisi sağladığı birçok avantajından dolayı yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Avrupa'da 2006 yılında 100 evsel atıksu arıtma tesisi (>500 eşdeğer nüfus) ve 300 endüstriyel atıksu arıtma tesisi (>20 m^3/gün) membran teknolojisini kullanılarak işletilmekteydi (Lesjean & Huisjeslow, 2008). MBR kurulum kapasitesi 2007 yılında artış göstermiş fakat 2008 ve 2009 yıllarında ekonomik krizin etkileriyle düşüş yaşamıştır. 2010 yılında itibaren ise büyük ölçekte MBR tesislerinin kurulumu önemli ölçüde artmıştır (GIA, 2013). Ayrıca mevcut işletimde olan konvansiyonel aktif çamur sistemleri, kolaylıkla MBR sistemlerine dönüştürülebilmektedir. Havalandırma tankına batık membranlar yerleştirilerek bu işlem gerçekleştirilebilmektedir (Yiğit, 2007).

MBR sistemleri konvansiyonel aktif çamur sistemlerine göre birçok avantaja sahiptir. Bu avantajlardan en önemlileri şu şekilde sıralanabilir (Cho, 2002):

1. Konvansiyonel aktif çamur sistemlerinde olduğu gibi ayrım mekanizması çamurun çökelebilirlik özelliğine bağlı olmadığı için çıkış kalitesinin değişim aralığı daha azdır.
2. Sistem ani yüklemelerde bile aynı çıkış kalitesini sağlayabilmektedir.
3. Alan ihtiyacı azdır. Çok yüksek AKM konsantrasyonlarında sistem düzgün bir şekilde çalışabilir.
4. Çamur yaşı fazladır. Çamur oluşumu konvansiyonel aktif çamur sistemlerine göre %50 daha azdır. Ayrıca uzun çamur yaşı, soğuk havalarda dahi nitrifikasyon prosesinin tamamlanmasını sağlar. Bu sebeple çıkıştaki amonyum konsantrasyonu yıl boyunca düşüktür.

MBR sistemlerinin dezavantajları ise şu şekilde sıralanabilir:

1. Bu sistemlerin en önemli dezavantajı konvansiyonel sistemlere göre yüksek işletme ve bakım maliyetidir.
2. İşletme akısı, membran alanıyla orantılı olarak yeterli seviyelere yükseltilemezse, artan enerji sarfiyatı yüzünden MBR tam kapasitede çalıştırılamaz.

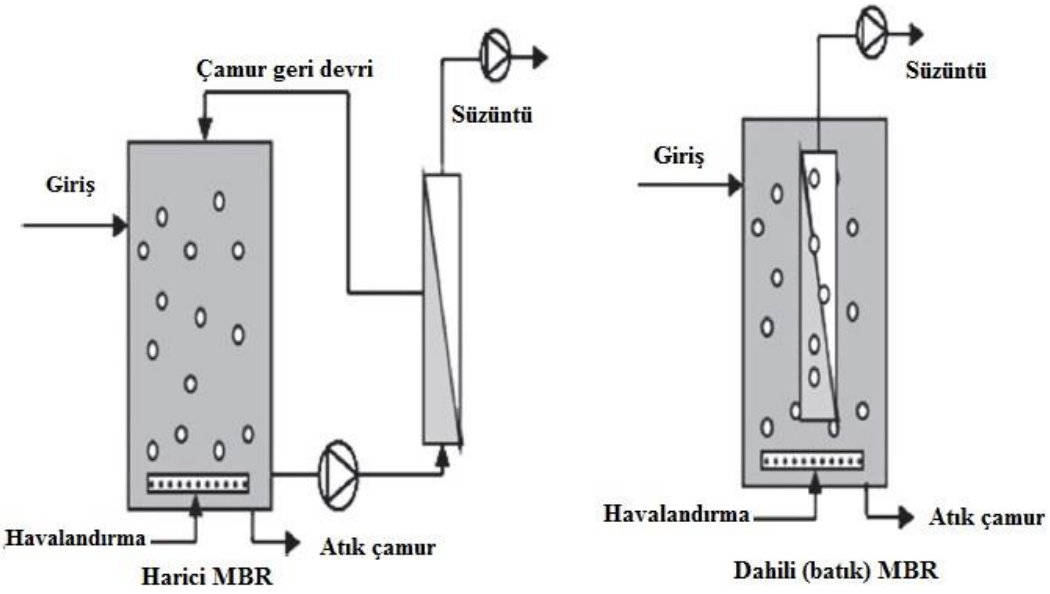
3. Zaman içerisinde tıkanma nedeniyle akı değeri düşer. Membran performansı etkilenir (Metcalf&Eddy, 2003; Stephenson ve diğ., 2000; Marrot, 2004; Merz ve diğ., 2007).
4. MBR'larda tıkanma temizleme ve işletme maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır (Jefferson ve diğ., 2000, Tomaszewska ve diğ., 2005).

MBR sistemleri dahili ve harici olmak üzere iki tip konfigürasyona sahiptir. Harici MBR sistemlerinde membran modülü biyoreaktörün içinde değildir. Biyoreaktörün içindeki çamur pompa yardımıyla membran modülüne gönderilir ve membran yüzeyinden çapraz akış sağlanarak süzüntü suyu elde edilir. Membrandan geçemeyen konsantre akım tekrar tanka gönderilir. Harici MBR sistemleri henüz yeni keşfedilmişken TMP ve çapraz akış hızı geri devir pompası ile sağlanmaktaydı. Daha sonra sisteme vakum pompası dahil edilerek işletim esnekliği arttırılmış ve çapraz akış oranı düşürülerek enerji tüketimi azaltılmıştır (Shimizu, Okuno, Uryu, Ohtsubo, & Watanabe, 1996). Son yıllarda ise, membran modülüne hava akışı sağlanarak besleme tarafındaki türbülans arttılmış, tıkanma ve işletme maliyetleri azaltılmıştır (Jiang, 2007).

Dahili MBR sistemi Yamamoto ve diğ. tarafından 1989 yılında harici MBR'daki enerji tüketimini azaltmak için geliştirilmiştir. Dahili MBR sistemlerinde membran modülü direkt olarak tankın içine yerleştirilir. Süzüntü oluşumu için vakum pompasına ihtiyaç vardır. Bu durumda geri devir pompasına gerek duyulmaz çünkü çapraz akış havalandırma ile sağlanır. Biyokütlenin oksijen ihtiyacı, tank tabanına yerleştirilen difüzörlerden verilen kaba hava kabarcıkları ile karşılanır. Membran yüzeyine verilen ince hava kabarcıkları türbülanslı akım yaratarak kirletici maddelerin membran yüzeyi ve porlarında birikmesini engeller. Böylece akı sabit tutulabilemektedir. Membran yüzeyinin temiz kalması ve biyokütlenin oksijen gereksinimini karşılayabilmek için her iki havalandırma türü de pratikte uygulanmaktadır (Yiğit, 2007). Şekil 2.7'de harici ve dahili MBR sistemleri gösterilmiştir.

Dahili MBR sistemleri harici MBR sistemlerine göre daha basit bir yapıdadır. Bunun sebebi daha az ekipman ihtiyacına sahip olmasıdır. Tanktaki havalandırma aynı anda hem membran tıkanmasını azaltmaya yararken hem de biyolojik prosesin devamlılığı için tank içinde gerekli oksijeni sağlar. Dahili MBR sisteminin harici MBR sistemine

göre en büyük avantajı enerji tüketimi fazla olan resirkülasyon pompası yerine havalandırma yardımıyla çapraz akışı sağlamasıdır.



Şekil 2.7 : Dahili ve harici MBR (Membrane Technology and Engineering for Water Purification, 2014).

İnce boşluklu membranlar dahili MBR sistemlerinde kullanılabilmektedir. Bu da yüksek paketleme yoğunluğuna olanak sağlayarak maliyetleri düşürmektedir. Harici MBR sistemlerinde ise paketleme yoğunluğu düşük, tübüler membranlar kullanılmakta olduğundan dahili MBR sistemlerine göre maliyeti fazla olmaktadır. Gander ve diğ. (2000) yaptıkları çalışmada dört adet dahili ve dört adet harici MBR sistemlerini inceleyerek harici MBR sistemlerinin yüksek geri devir hızına sahip olması ve membran modülünde yaşanan yük kayıplarının fazla olması sebebiyle daha fazla enerji harcadıkları sonucuna varmışlardır. Dahili MBR sistemlerinin bir diğer avantajı ise temizlenmesinin daha kolay olmasıdır (Gander ve diğ., 2000). Harici MBR sistemleri, fiziksel açıdan daha dayanıklı, çapraz akış hızının ve hidrolik yüklemenin ayarlanabilir oluşu nedeniyle daha esnek şartlarda işletilebilmektedir. Birçok parametreye karşı dayanıklı ve esnek oluşu nedeniyle harici MBR sistemleri, giriş debisi ve atıksu kompozisyonu oldukça değişiklik gösterebilen endüstriyel ve küçük ölçekli atıksu arıtım tesislerinde kullanılmaktadır (Jiang, 2007).

Dahili (batık) MBR'ların en önemli dezavantajı, membran tıkanması ile birlikte süzüntü akı değerinin düşmesidir. Aynı akıyı sağlamak amacıyla membranların temizlenmesi veya yeni membranlar ile değiştirilmesi gerekmektedir. Bu temizleme

veya değiştirme işlemleri ise artı bir işletme maliyeti anlamına gelmektedir. Batık MBR'larda tıkanma kontrolü için günümüzde uygulanmakta olan bazı kontrol yöntemleri şu şekilde sıralanabilir (Li ve diğ.,2016):

1. Beslemede ön arıtım,
2. Membran özelliklerini geliştirme,
3. Hava ile sıyırma işlemi ile hidrodinamik koşulları optimize etme.

Çizelge 2.4'de dahili ve harici MBR sistemlerinin karşılaştırması verilmiştir.

Çizelge 2.4 : Harici ve dahili MBR sistemlerinin karşılaştırılması (Jiang, 2007).

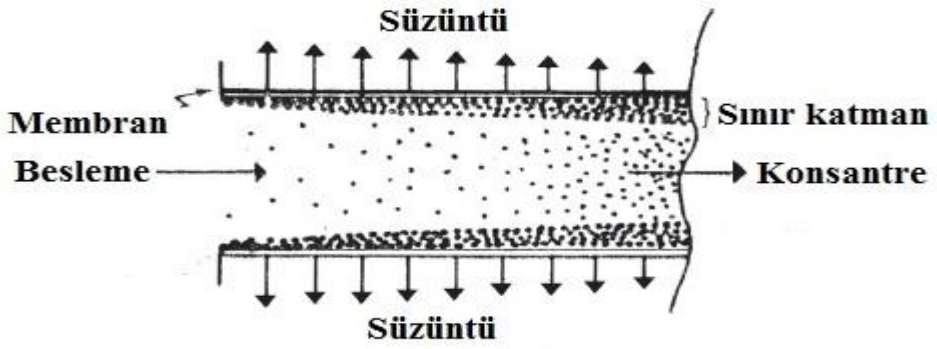
Parametre	Harici MBR	Dahili MBR
Karmaşıklık	Karmaşık	Basit
Esneklik	Esnek	Esnekliği az
Dayanıklılık	Dayanıklı	Dayanıklılığı az
Akı	Yüksek (40-100 L/m^2h)	Düşük (10-30 L/m^2h)
Tıkanmayı azaltıcı metotlar	• Çapraz akış • Hava ile sıyırma • Geri yıkama • Kimyasal yıkama	• Hava ile karıştırma • Geri yıkama (her zaman mümkün olmayabilir) • Kimyasal temizleme
Paketteki membran yoğunluğu	Düşük	Yüksek
Enerji tüketimi	Yüksek (2-10 kWh/m^3)	Düşük (0,2-0,4 kWh/m^3)

Membran üretim maliyetlerinin azalması ve MBR uygulamalarının artmasına rağmen, bu yeni teknoloji alanında dikkate alınması gereken en önemli unsur membranların tıkanmasıdır. Çünkü membranların tıkanması pompaj ve havalandırma gereksinimlerini, dolayısıyla da sistem maliyetini önemli ölçüde etkiler. Daha uzun sürede ve daha az tıkanan veya daha düşük maliyetle kolay temizlenebilen membranların geliştirilmesi için yoğun araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılmaktadır (Yiğit, 2007).

2.6 Konsantrasyon Polarizasyonu ve Membran Tıkanması

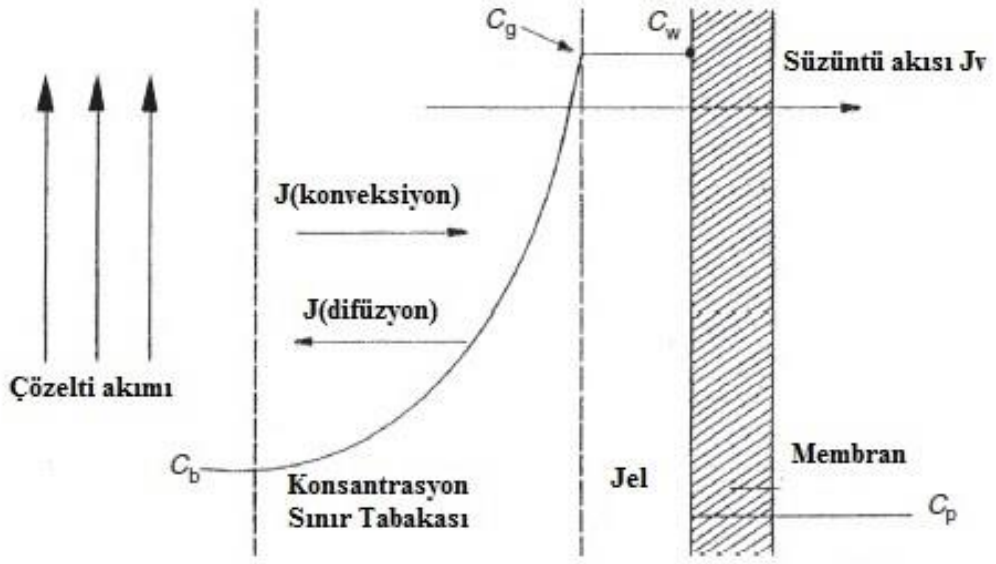
Basınç sürücülü membran proseslerde (MF,UF,NF ve RO) çözücü fazındaki partiküller membran yüzeyinden konveksiyon ile taşınır. Konsantrasyon polarizasyonu, kirletici maddelerin membran yüzeyinde birikimini ifade eder. Konveksiyon ile membran yüzeyinde biriken maddelere yavaş bir geri difüzyon

mekanizması etki eder. Konsantrasyon polarizasyonunun şiddeti, konveksiyon ve geri difüzyon mekanizmalarının bileşke gradyanı olarak tanımlanabilir (Membrane Technology and Engineering for Water Purification, 2014). Konsantrasyon polarizasyonunun oluşumu Şekil 2.8'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.8 : Konsantrasyon sınır tabakası oluşumu (Membrane Technology and Engineering for Water Purification,2014).

Membran filtrasyonunda beslemedeki bileşikler süzüntü kısmına farklı hızlarda geçer. Membran yüzeyinden geçemeyen veya çok yavaş hızlarda geçebilen kirleticiler membran yüzeyinde birikime neden olur. Sınır tabakası olarak adlandırılan membran yüzeyinde hız sıfıra düşmektedir. Membran yüzeyinde oluşan bu konsantrasyon artışına konsantrasyon polarizasyonu denilmektedir (Koyuncu, 2001; Eren, 2006). Şekil 2.9'da konsantrasyon polarizasyonunun şematik gösterimi verilmiştir.

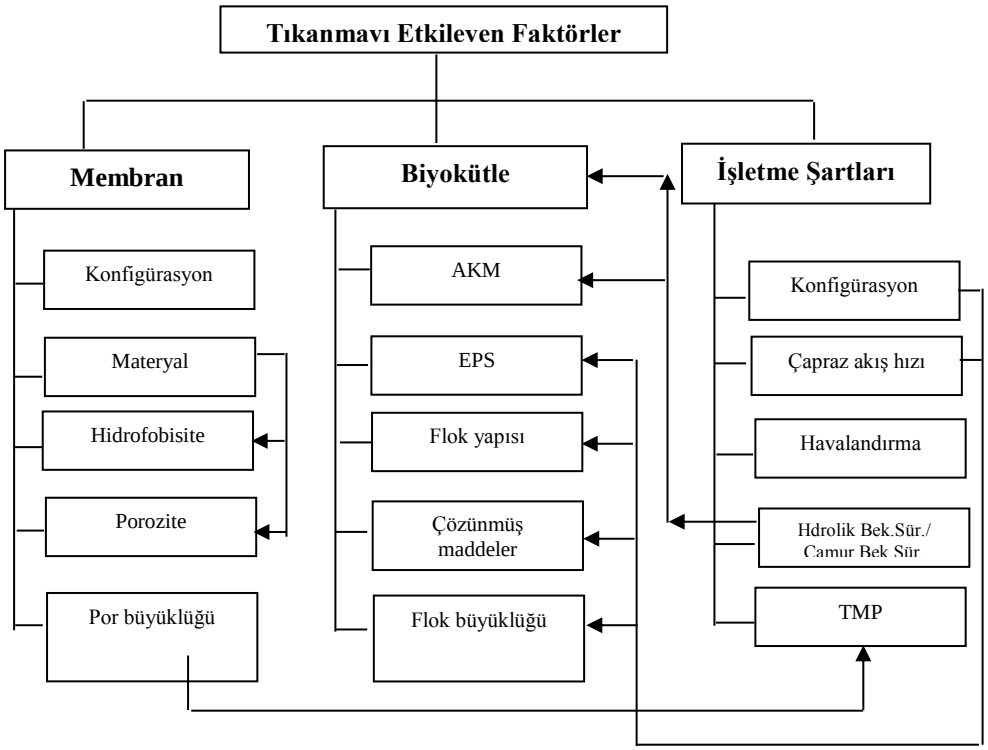


Şekil 2.9 : Konsantrasyon/jel polarizasyonu şematik gösterimi (Jel tabakası olması durumunda) (Membrane Technology and Engineering for Water Purification, 2014).

Tıkanma; besleme kompozisyonuna, beslemenin kimyasal yapısına (pH, iyonik kuvvet, iki değerlikli iyon konsantrasyonu), membran özelliklerine (yüzey morfolojisi, hidrofobisite, yük, moleküler ağırlık kesme değeri), sıcaklığa, işletme şartlarına ve hidrodinamik koşullara (başlangıç akısı, çapraz akış hızı) bağlıdır (Li ve Elimelech, 2004)

Membran sistemler sabit süzüntü akısına karşılık değişken TMP değeri veya sabit TMP değerine karşılık değişken süzüntü akısı prensiplerine dayanarak işletilmektedir. Genellikle tercih edilen sabit akıda değişken TMP ile işletmedir. Membran tıkanması gerçekleştikçe sabit akıyı sağlayabilmek için TMP değeri artış gösterir. Tersinebilir (geri dönüşümlü) tıkanma, membran yüzeyinde oluşan konsantrasyon polarizasyonu ve kek tabakası nedeniyle meydana gelmektedir. Bu tıkanma geri yıkama, yüzey yıkama veya havalandırma ile giderilebilirken, giderilemeyen tıkanma yalnızca kimyasal yıkama yöntemleri ile giderilebilir. Kalıcı (geri dönüşümsüz) tıkanma ise bazı maddelerin membran porlarına tutunması ve kimyasal bağ oluşturmaları neticesinde gerçekleşir. Bu tıkanma fiziksel veya kimyasal temizleme yöntemleri ile giderilemez (Guo ve diğ., 2012).

Tıkanmayı etkileyen faktörler ayrıntılı olarak Şekil 2.10'da verilmiştir.



Şekil 2.10 : MBR'larda tıkanmayı etkileyen faktörler (Judd, 2001; Chang ve diğ., 2002).

Özetle tıkanma üzerine etkili olan dört ana faktör vardır. Bunlar (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'dur.

Tıkanmaya sebep olan maddeler genel olarak dört kategoride incelenir:

- Partiküller
- Organik maddeler
- İnorganik maddeler
- Mikrobiyal organizmalar

Partiküller, fiziksel olarak membran yüzeyine bağlanarak porları tıkar ve kek oluşumuna neden olur. Organik maddeler ise, çözünmüş bileşikler ve kolloid maddelerden oluşur. Örnek olarak humik asitler, fulvik asitler, hidrofobik- hidrofilik maddeler ve proteinler verilebilir. Bu maddeler membrana adsorpsiyon mekanizması ile bağlanır. İnorganik maddeler, çözünmüş bileşiklerden meydana gelir. Demir, mangan ve silika bu maddelere örnek olarak verilebilir. Bu maddeler pH değişimleri veya oksidasyon nedeniyle oksitlenerek membran yüzeyine çökelir. Son olarak bakteri, alg gibi mikrobiyal organizmalar biyofilm tabakasını oluşturarak membran tıkanmasına neden olur (Guo ve diğ., 2012).

Son dönemde yapılan çalışmalar altı farklı tıkanma çeşidi olduğunu göstermiştir (Guo ve diğ., 2012):

1. Por tıkanması
2. Kek oluşumu
3. Konsantrasyon polarizasyonu
4. Organik adsorpsiyon
5. İnorganik çökelme
6. Biyofilm tabakasının oluşması

2.7 Membran Biyoreaktörlerde Temizleme Yöntemleri

Membran filtrasyonunda, bir süre sonra etkili bir arıtımın gerçekleşemediği durumda membran yüzeyinden kirletici maddelerin temizlenmesi ihtiyacı doğar. Temizleme metodu ve sıklığı, tıkanmayı sağlayan kirletici maddeye ve kimyasal maddelere karşı membran direncine bağlıdır. Membranların temizlenmesi, fiziksel ve kimyasal yöntemler uygulanarak yapılabilmektedir. Fiziksel yöntemler, tersinir veya geçici tıkanmayı yaratan büyük katıların temizlenmesini sağlarken, kimyasal yöntemler ile membran yüzeyi ve porlarına adsorbe olmuş maddeler giderilir.

2.7.1 Fiziksel yöntemler

Membran yüzeyinde sıyırma etkisi ile gerçekleştirilen temizleme yöntemlerine fiziksel yöntemler denilmektedir. Bu yöntemde kimyasal kullanılmaz. Kimyasal temizleme yöntemlerine göre daha kısa sürelerde temizlik gerçekleşir. Fakat fiziksel temizleme yöntemleri bazı durumlarda yetersiz kalabilmektedir. Özellikle porların içine adsorbe olmuş maddelerin fiziksel temizleme yöntemleri ile temizlenmeleri mümkün olmaz. Bu durumda membran gözeneklerine adsorbe olan maddelerin bağlarını kırıp membran yüzeyinden temizleyebilmek için kimyasal temizleme yöntemlerine başvurulur (Geilvoet, 2010). MBR'larda kirletici maddelerin fiziksel yöntemlerle temizlenmesi; geri yıkama, durdurma, büyük ölçekte tübüler membranlarda süngerle ovalama ve membranlardan geri yönde karbondioksit geçirilmesi ile yapılır. Geri yıkama işlemi membrandan süzülen suyun bir kısmının ters yönlü olarak vakumlanması ile sağlanır. Geri yıkama işlemi MBR'larda SCADA sistemi ile ayarlanabilmektedir. Ayrıca MBR sistemi belirli bir süre durdurulur ve hava sıyırması devam eder. Böylece geri akış taşınımı etkileri artar ve tıkanma hızı azalır (Judd, 2006).

2.7.2 Kimyasal yöntemler

Kimyasal temizleme, kimyasal reaksiyonlara dayanır. Membran yüzeyindeki bağ ve kohezyon kuvvetini kırmak için hidroliz, sabunlaştırma, çözünürleştirme, ayrıştırma, şelatlaştırma ve peptinleştirme gibi reaksiyon mekanizmalarından yararlanılır (Schafer ve diğ., 2004). 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). Kullanılan kimyasallara nitrik asit, hidroklorik asit, karbonat, fosfat, EDTA, sodyum hipoklorit örnek olarak

verilebilir. Sıcaklığı arttırmak kimyasal temizleme verimini arttırıcı yönde etki yapmaktadır. Fakat birçok organik membran materyali genellikle yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklı değildir. Temizleme yönteminin optimizasyonu; sıcaklık, kullanılan temizlik maddesi ve miktarının doğru seçimi ile sağlanır (Bartlett, 1995). Kullanılan kimyasal, kirliliği önleyebildiği gibi membrana en az düzeyde zarar vermeli ve maliyet açısından uygun olmalıdır. Deneme ve yanılma yöntemleriyle optimum şartları sağlayan kimyasal seçilebilmektedir. Membran proseslerde, genelde kullanılan kimyasal maddeler ve etki ettikleri kirletici maddeler Çizelge 2.5'de verilmiştir.

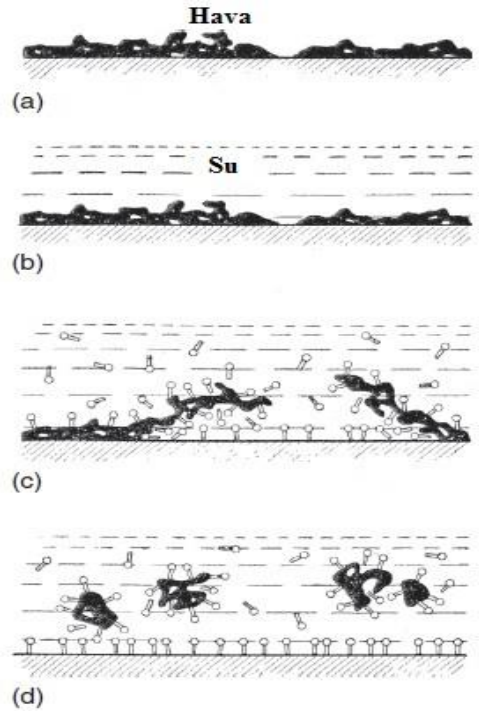
Çizelge 2.5 : Kimyasal temizleme yöntemlerinde kullanılan kimyasallar ve etki ettikleri kirletici maddeler (Membrane Technology and Engineering for Water Purification, 2014).

Kirletici Madde	Örnek	Kullanılan Kimyasal
Tuzlar	$CaCO_3$ $CaSO_4$ $BaSO_4$ $SrSO_4$ SiO_2	• 0,1-0,5 M asit (asetik,sitrik veya nitrik) Citrik asit %0,2 (w/w), HCl %0,5 (w/w) • Fosforik asit veya EDTA bazlı çözeltiler
Kolloidal maddeler	SiO_2 $Fe(OH)_3$ $Al(OH)_3$ $FeSiO_3$	• Yüksek pH'ta EDTA veya BIZ tipi deterjanlar • Silikat
Biyolojik kirleticiler	Demir bakterileri, Sülfür bakterisi, Mikobakteri, Pseudomonas	• Yüksek pH'ta EDTA veya BIZ tipi deterjanlar • Hidrojen peroksit ile şok dezenfeksiyon uygulaması • Perasetik asit
Organik kirleticiler	Yağ ve gres	• Deterjan ve sürfaktanlar • İzopropanol, • 2–50% etanol
Biyoorganik maddeler	Yağ, Protein, Biyopolimerler	• 0.1% sodyum dodesil sülfat • 0,1% TritonX-100

Bazlar organik madde ve proteinleri temizlemek için kullanılmaktadırlar. Polifosfatlar karbonat ve suda çözünmeyen yağların çözünebilmesine yardımcı olmaktadırlar. Kostik çözeltiler ise kirletici ve membran yüzeyindeki bağı kırarlar (Membrane Technology and Engineering for Water Purification, 2014).

Kimyasal temizleme uygulamalarında kullanılan kimyasalın konsantrasyonu, membrana etki ettiği süre (temas süresi), sıcaklık, çapraz akış hızı ve TMP temizliğin verimine direkt olarak etki etmektedir (Bird ve Bartlett, 2002). İşletme akısı, fiziksel veya kimyasal yöntemlerle yapılan temizliklerin periyodunu belirleyen ana faktördür. Fiziksel yıkama sonrası olduğu gibi kimyasal yöntemlerle temizleme sonrasında da membran ilk permeabilitesine sahip olmayabilir. Bu tıkanma türü nihai tıkanma olarak adlandırılır ve membranın ekonomik ömrünü belirler.

Kirleticilerin deterjan yardımıyla temizlenme mekanizması Şekil 2.11'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.11 : Kirleticilerin deterjan yardımıyla temizlenme mekanizması (a) Yüzey yapışkan kek tabakası ile kaplıdır. (b) Su ile kirletici maddeler biraz daha esnek bir hale gelir. (c) Suya deterjan eklenir. Deterjanın hidrofobik kısımları kirletici maddelere tutunur. (d) Deterjan molekülleri membran yüzeyi ve kirletici maddelere tutunur bu sebeple kirletici maddeler sıvı içinde yüzer hale gelir (Membrane Technology and Engineering for Water Purification, 2014).

Membranın reaktör dışında temizlenme sıklığı haftada bir veya ayda bir periyotlarında değişebilmektedir. Reaktör dışı ve reaktörde yıkamalarda en çok kullanılan kimyasal yıkama yöntemleri aşağıda sıralandığı gibidir (Membrane Technology and Engineering for Water Purification, 2014):

- Alkali çözelti içinde çözdürme ile organik tıkanma giderilir. (Örnek: NaOH, sodyum hipoklorit)
- Asit çözeltisi içinde çözdürme ile inorganik tıkanma giderilir. (Örnek: HCl, H_2SO_4, veya sitrik asit)
- Canlı öldürücü (biyosit) çözeltisinde bekletme ile biyolojik tıkanma giderilir. (Örnek: H_2O_2 veya sodyum metabisülfit)

2.8 Membran Tıkanmasını Azaltıcı Yöntemler

2.8.1 Ön arıtma işlemleri

Membran sistemine girmeden yapılan tipik ön arıtma işlemleri membran tıkanmasını azaltmak için kullanılmaktadır. Ön arıtma teknikleri, genellikle tıkayıcı maddelerin uzaklaştırılması, geri kazanım, sistem üretkenliğinin optimize edilmesi, membran ömrünün uzatılması ve bazı zamanlarda membranların fiziksel olarak zarar görmesinin engellenmesi amaçlarıyla uygulanmaktadırlar. Besleme atıksuyu kaynağına bağlı olarak çok çeşitli çözünmüş maddeler ve askıda katı maddeler içermektedir. Askıda katılar partiküller, kolloidler ve biyolojik artıklardan oluşurken; çözünmüş maddeler klor, tuzlar ve az çözünür tuzlardan oluşmaktadır (Koyuncu ve diğ., 2015). Ham atıksu kalitesine bağlı olarak ön arıtım prosesi aşağıda sıralanmış adımları içerebilir (Membrane Fouling Considerations, 2001):

- Kaba filtre veya ızagara ile büyük partiküllerin tutulması
- Klor ile dezenfeksiyon
- Yumaklaştırarak veya yumaklaştırmadan durultma
- Kireç ile sertlik giderimi
- Filtrasyon
- pH ayarlanması ile alkalinite giderimi
- Kazantaşı önleyicisi eklenmesi
- Sodyum bisülfit veya aktif karbon ile serbest klor giderimi
- UV ile sterilizasyon
- Kartuş filtre yardımıyla askıda katıların giderilmesi.

2.8.2 Kimyasal ilavesi

Kimyasal ilavesi pH'ın ayarlaması, koagülant eklemesi ile istenilen maddelerin ayrıştırılabilir yapıya gelmesi, membran yapısına zarar veren kimyasal maddelerin

uzaklaştırılması, çökelek oluşumunun en aza indirilerek tıkanma hızının kontrol edilmesi gibi işlemler için kullanılabilmektedir. RO ve NF membranları ile çalışan tesislerde çalışmayı durdurmadan tıkanma ve çökelti oluşumunu minimize etmek için ek olarak bir arıtım gerekebilirken, MF ve UF membranları ile işletilen tesislerde ise genellikle geri yıkama ve aylık temizlik yöntemleri uygulanmaktadır.

Polimerik koagülantların düşük dozajlarda (<10 ppm) eklenmesi ile 0,5 μm boyutuna kadar olan partiküller uzaklaştırılabilir. Tipik koagülant dozaj aralığı 0,5 ile 20 ppm arasında değişebilmektedir. Genellikle inorganik koagülantların polimerik koagülantlardan daha yüksek dozlarda eklenmesi gerekmektedir. Yeterli dozun belirlenmesinde kullanılan en iyi teknik, doğrudan koagülant beslendikten sonra süzüntüde SDI (silt density index-silt yoğunluk endeksi) parametresinin ölçülmesidir. Böylece koagülasyon besleme oranı hesaplanabilmektedir (Membrane Technology and Engineering for Water Purification, 2014).

Wu ve diğ. (2006) yaptıkları çalışmada membran tıkanmasını kontrol altında tutabilmek için inorganik koagülant kullanımının etkilerini araştırmışlardır. Bu çalışmada monomerik ve polimerik koagülantlar denenmiştir. Polimerik koagülantların monomerik koagülantlara oranla filtre edilebilme özelliğini arttırıcı yönde etkilerinin daha fazla olduğu görülmüştür. Polimerik koagülantların daha etkili olmasının nedeni içerisinde daha fazla yük barındırması ve daha fazla kirletici madde ile bağ yaparak büyük floklar oluşturabilmelerinden kaynaklanmaktadır. Flok boyutundaki artış sebebiyle başlangıç TMP değeri ve TMP artış oranlarında ciddi derecede azalış görülmüştür. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

- Polimerik koagülantların kullanımı kek tabakası oluşumunu sınırlamıştır.
- Seçilen koagülantlar içerisinde membran tıkanmasını kontrol etmede en etkili olan koagülant PFS (polimerik demir sülfat)'dir.
- Koagülant, MBR'ı çalıştırmadan eklendiği takdirde daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Kimyasal eklemesi kalsiyum karbonat çökelmesini önlemek için gerekebilmektedir. pH'ın belirli aralıkta tutulması ile kalsiyum karbonatın çözünmüş kalsiyum bikarbonat olarak sistemde kalması sağlanabilmektedir. Kalsiyum bikarbonat olarak kalması için pH'ın asit eklemesi ile 6 civarına getirilmesi gerekmektedir. Sülfonat,

fosfonat, karboksilik asit gibi fonksiyonel grupları içeren organik bileşikler ve şelatlama ajanı olarak kullanılan karbon, alüm ve zeolitler partiküler iyonları ayırır ve nötralize eder. Örneğin şelatlama ajanı olan EDTA, sertlik ve metalik iyon birikimini kontrol etmeye yaramaktadır. Anti-skalantlar çeşitli kirleticileri absorbe ederek kristal yapısının büyümesini ve mineral çökelmesini önlemektedir. Anti skalantlar tek başlarına uygulanabildiği gibi asit beslemesi ile de kullanılabilirler (Membrane Technology and Engineering for Water Purification, 2014).

Son yıllarda öne çıkan tıkanma kontrolü uygulamalarından bir diğeri ise kimyasallar ile biyokütle modifikasyonudur. Kimyasallar, tıkanma kontrolünü iki ana mekanizma üzerinden gerçekleştirir. İlki metal tuzları ve polimerlerin kullanıldığı flokülasyon mekanizması, diğeri ise toz aktif karbonun kullanıldığı adsorpsiyon mekanizmasıdır. Bu çalışmalarda öne çıkan hedef çözünmüş mikrobiyal ürünler (soluble microbial pollutants-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 etkileri üzerine yaptıkları çalışmadan sonra membran tıkanmasını önleme yöntemi olarak kimyasallar daha çok kullanılmaya başlanmıştır. Kimyasallar SMP adsorpsiyonu, koagülasyon, floklar ve/veya SMP arasındaki çapraz bağlar gibi mekanizmaların bir veya daha fazlasını kullanarak çalışırlar. Lee ve diğ. (2007) katyonik bir polimer kullanarak yürüttükleri çalışmada çözünmüş kirleticilerin çözelti fazından flok bünyesine geçtiğini bulmuşlardır. Membran yüzeyinde oluşan biyofilmin porozitesi ve hacmini incelediklerinde katyonik polimer eklenmesi ile biyofilm porozitesinin arttığı görülmüştür. Böylece filtrasyon performansında da artış gerçekleşmiştir. 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 için mikrobiyal aktiviteye zarar verdiği gözlemlenmiştir (Zhang ve diğ., 2004). 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 etkilerinin araştırılması ile maliyetlerin ve optimum dozların belirlenmesi önem taşımaktadır.

2.8.3 Nanomateryal katkılı membran kullanımı

MBR kirlenme kontrolü çalışmalarında nanoteknoloji alanında gerçekleşen çeşitli testlerin sonucunda nanomateryal kullanımı artmaktadır. Fullerene C_{60} (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.

2.8.4 Bakterilerin iletişiminin kesilmesi (Quorum Quenching) metodu

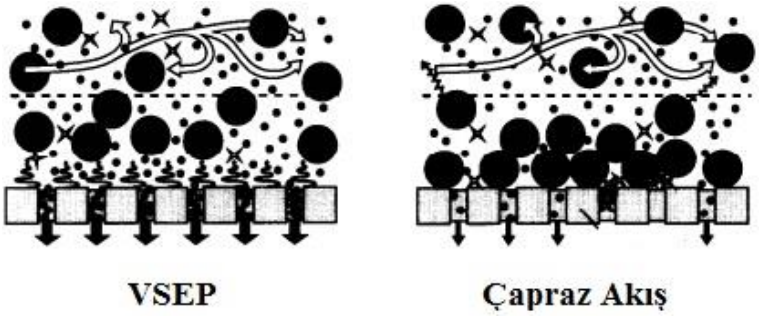
Mikroorganizmalar sinyal molekülleri (Acyl homoserin lactone, AHL) ile iletişim kurarak biyofilm oluştururlar. Bu iletişim filtrasyonun ilk aşamlarında zayıfken TMP'nin zamanla arttığı durumda kuvvetli olduğu görülmüştür (Yeon ve diğ., 2009a). Araştırmacılar ortama asilaz ekleyerek amid bağlarının kırılması 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).

2.8.5 Titreşim uygulamaları

MBR sistemlerinde membran yüzeyinde tıkanmanın önüne geçebilmek için kullanılan başlıca yöntem membran yüzeyini hava ile sıyırmadır. Yenilikçi yöntem olarak MBR sistemlerinde titreşim sistemleri kullanılmaya başlamıştır. Titreşim sistemli batık membranlar dönel, boyuna, yatay titreşim doğrultularında veya manyetik ve ses dalgası gibi titreşimler uygulanarak işletilmektedir. Bu sistemlerin frekans ve genlikleri uygulamalara ve sistem kapasitelerine göre değiştirilebilir.

Armando ve diğ. (1992) membran yüzeyindeki kayma oranını arttırarak tıkanmanın önüne geçebilmek için titreşimle zenginleştirilmiş proses (VSEP)'i geliştirmiştir. Bu proseste egzantrik ağırlıklı bir motor, burulma yayı ile sismik bir kütleye bağlanmıştır. Titreşimlerin frekansı 70 Hz'e kadar çıkarılabilmektedir. VSEP modüllerinin MBR sistemlerine entegrasyonu ile VSEP ve MBR teknolojileri birlikte çalışabilmektedir. VSEP prosesinin uygulanması ile membran yüzeyine tutunan çamurun akışkan halde kalması sağlanmış ve elde edilen filtrasyon oranında beş kat

artış görülmüştür. Şekil 2.12'de VSEP sistemi uygulandıktan sonra membran yüzeyindeki akış mekanizması şematik olarak gösterilmiştir.

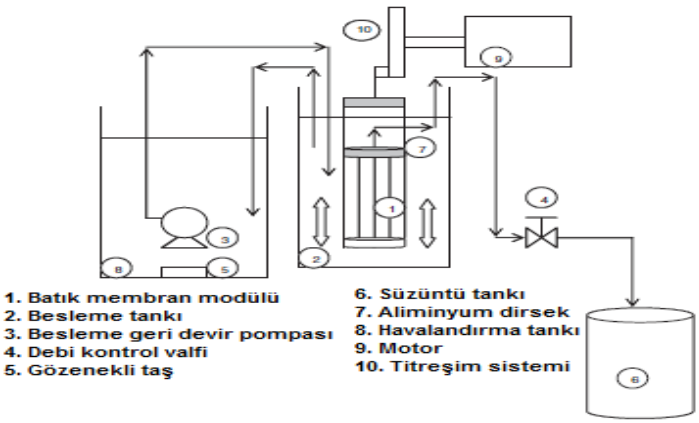


Şekil 2.12 : VSEP sistemi ile çapraz akış farkı (URL 4).

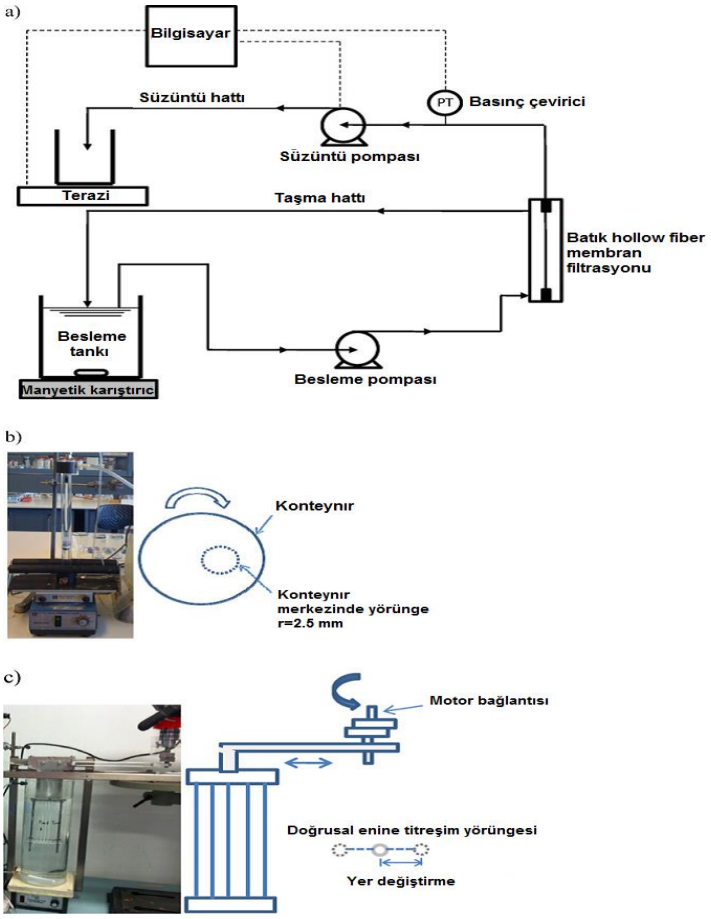
Lim ve Bai (2003) gerçekleştirdikleri çalışmada ses dalgası uygulamasının tıkanmayı azaltıcı yönde etkisi olduğunu keşfetmişlerdir. Bu çalışmada elde edilen bir diğer sonuç ise, kimyasal yıkama, ses dalgası ve iyonsuzlaştırılmış su ile geri yıkama uygulamalarının birlikte kullanılması süzüntü akısının geri kazanılmasında en etkili yöntemdir. İyonsuzlaştırılmış su ile geri yıkama tek başına etkili olmazken, kimyasal yıkama ile partiküller arası bağlar koparılarak membran porları ve yüzeyi etkili bir şekilde temizlenebilmektedir. Fakat kimyasal yıkama da tek başına etkili bir yöntem değildir. Ses dalgaları partiküllerin membrana tutulumlarını gevşeterek kek oluşumunu önleyici etki göstermektedir. Fakat ses dalgası uygulamasının da dezavantajlı olabileceği düşünülmektedir. Ses dalgaları membran yüzeyindeki daha büyük partikülleri kırarak por tıkanmasını kolaylaştırıcı yönde bir etki yapabilir.

Low ve diğ. (2009)'nin gerçekleştirdikleri çalışmada boyuna titreşim uygulaması kullandıkları sistem Şekil 2.13'de verilmiştir. Uzun dönem boyuna titreşim uygulaması ile gerçekleştirilen çalışmalarda yüksek AKM konsantrasyonlarında membran yüzeyinin temiz kalabildiği gözlemlenmiştir. Bunun için en etkili yolun ise MBR sistemini 6 Hz'den düşük frekans değerlerinde işletilmesi olduğu bulunmuştur.

Avusturalya'da ince boşluklu ve batık membranlar ile yapılan çalışmada çapraz titreşim uygulaması kullanılmıştır. Bu titreşim uygulamasının konsantrasyon polarizasyonunu önleyerek kek oluşum süresini uzattığı keşfedilmiştir. Çapraz titreşim uygulaması ile membranda gerçekleşen TMP artışı daha uzun sürede gerçekleşmiştir (Kola ve diğ., 2012). Kola ve diğ. tarafından kullanılan çapraz titreşim sistemi Şekil 2.14'de verilmiştir.



Şekil 2.13 : Boyuna titreşimli membran sistemi (Low ve diğ., 2009).



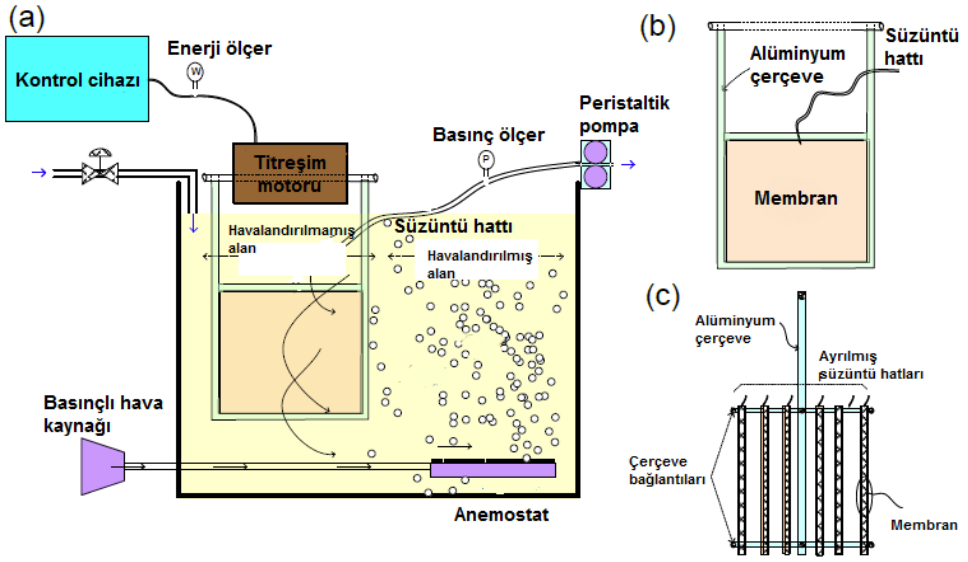
Şekil 2.14 : Kola ve diğ. (2012) tarafından kullanılan çapraz titreşim sistemi (a) Membran test düzeneği, (b) Çalkalama vasıtasıyla titreşim (c) Modüle uygulanan enine titreşim.

Kola ve diğ. (2014) ayrıca anaerobik reaktörde tıkanma kontrolü için titreşim sistemlerini test etmişlerdir. Kritik akının titreşim sistemi uygulaması ile önemli derece arttığı görülmüştür. Çok yüksek AKM konsantrasyonlarında bile titreşim sistemi uygulaması ile tıkanmanın önüne geçilebilmiştir. Ayrıca kek tabakası incelendiğinde konvansiyonel yöntemler olan çapraz akış ve gaz ile sıyırma

yöntemlerinin aksine, tıkanmaya sebep olan maddelerin çoğunun tersinebilir tıkanma olduğu görülmüştür.

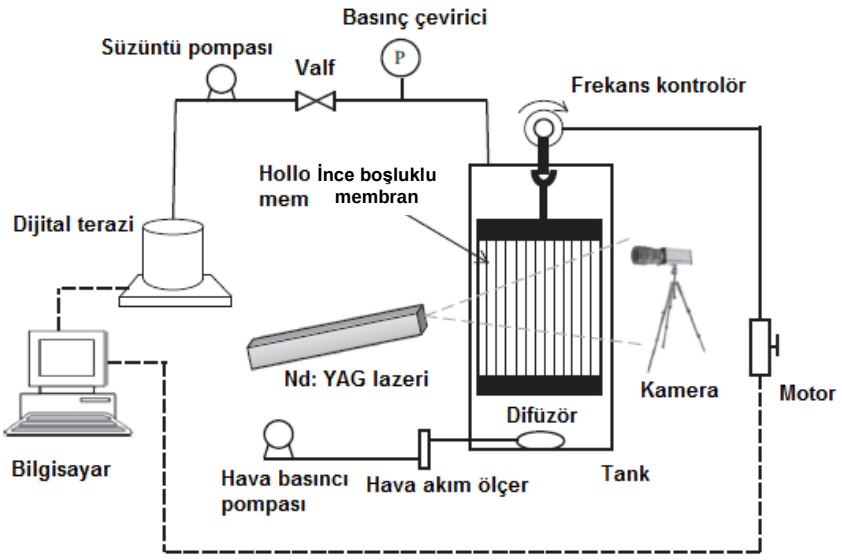
Dahili MBR sistemleri tıkanmayı kontrol edebilmek ve sıvı-membran etkileşimini arttırmak için kaba hava kabarcığı yöntemiyle işletilmektedirler. Fakat bu yöntem çok fazla enerji tüketirken süzüntü miktarının düşüşüne de istenilen derecede etki edememektedir. Bilad ve diğ. (2012) yaptıkları çalışmada manyetik titreşim uygulaması kullandıkları bir laboratuvar ölçekli MBR sistemini işleterek titreşim uygulamasının tıkanma ve enerji tüketimi üzerine olan etkilerini araştırmışlardır. Bu çalışmada sentetik atıksu kullanılarak farklı işletim koşulları denenmiştir. Manyetik titreşim uygulamasının tıkanma kontrolü ve akının korunmasında etkili ve umut verici bir yöntem olduğu görülmüştür. Uzun dönem gerçekleştirilen deneylerde uygun membran modülü ve dizilimi sağlandığında manyetik titreşim uygulamasının olumlu yöndeki etkisini doğrulamıştır. Çalışma sayesinde manyetik titreşim uygulamasının kritik akıyı önemli ölçüde arttırdığı görülmüştür. Filtrasyonun titreşim gücü, süresi ve akının bir fonksiyonu olduğu sonucuna varılmıştır. Bilad ve diğ. tarafında gerçekleştirilen çalışmada kullanılan sistem düzeneği Şekil 2.15'de verilmiştir.

Li vd. (2013) mekanik titreşim, ince boşluklu membran ve ölü uç filtrasyonu ile gerçekleştirdikleri çalışmalarda titreşim frekansının eşik şiddete kadar membran performansını arttırdığını keşfetmiştir. 8 mm genişlikte ve 8 Hz frekansta titreşimli membranda titreşimsiz membrana göre membran tıkanmasının %90 ve üstü oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmada elde edilen diğer bir önemli sonuç ise titreşim uygulaması ile membran yüzeyindeki dinamik kayma artışına bağlı olarak kek direncinin önemli ölçüde azalmasıdır. Li ve diğ. (2016) yürüttükleri diğer çalışmada ise enine titreşimin tıkanma üzerine etkilerini de araştırmıştır. Bu çalışmada batık MBR sisteminde ince boşluklu membranlar kullanılmıştır. Çalışmada titreşimin kısa ve uzun süreli etkileri araştırılmıştır. Titreşim uygulaması kesikli olarak ve sürekli olarak iki farklı şekilde test edilmiştir. Enine titreşim uygulamasına ek olarak boyuna titreşim ve hem enine hem boyuna titreşim uygulaması da karşılaştırma yapabilmek adına denenmiştir. Yapılan bu çalışmaların sonucunda, düşük frekansta sürekli enine titreşimin tıkanmayı önleyici etkisinin en fazla olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Şekil 2.16'da yapılan çalışmada kullanılan deney düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 2.15 : Manyetik MBR sisteminin şematik gösterimi. (a) MBR sistemi. (b) Modül haznesinin görünümü. (c) Modülün yandan görünümü (Bilad ve diğ., 2012).

Li vd. (2013) mekanik titreşim, ince boşluklu membran ve ölü uç filtrasyonu ile gerçekleştirdikleri çalışmalarda titreşim frekansının eşik şiddete kadar membran performansını arttırdığını keşfetmiştir. 8 mm genişlikte ve 8 Hz frekansta titreşimli membranda titreşimsiz membrana göre membran tıkanmasının %90 ve üstü oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmada elde edilen diğer bir önemli sonuç ise titreşim uygulaması ile membran yüzeyindeki dinamik kayma artışına bağlı olarak kek direncinin önemli ölçüde azalmasıdır. Li ve diğ. (2016) yürüttükleri diğer çalışmada ise enine titreşimin tıkanma üzerine etkilerini de araştırmıştır. Bu çalışmada batık MBR sisteminde ince boşluklu membranlar kullanılmıştır. Çalışmada titreşimin kısa ve uzun süreli etkileri araştırılmıştır. Titreşim uygulaması kesikli olarak ve sürekli olarak iki farklı şekilde test edilmiştir. Enine titreşim uygulamasına ek olarak boyuna titreşim ve hem enine hem boyuna titreşim uygulaması da karşılaştırma yapabilmek adına denenmiştir. Yapılan bu çalışmaların sonucunda, düşük frekansta sürekli enine titreşimin tıkanmayı önleyici etkisinin en fazla olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Şekil 2.16'da yapılan çalışmada kullanılan deney düzeneği gösterilmiştir.

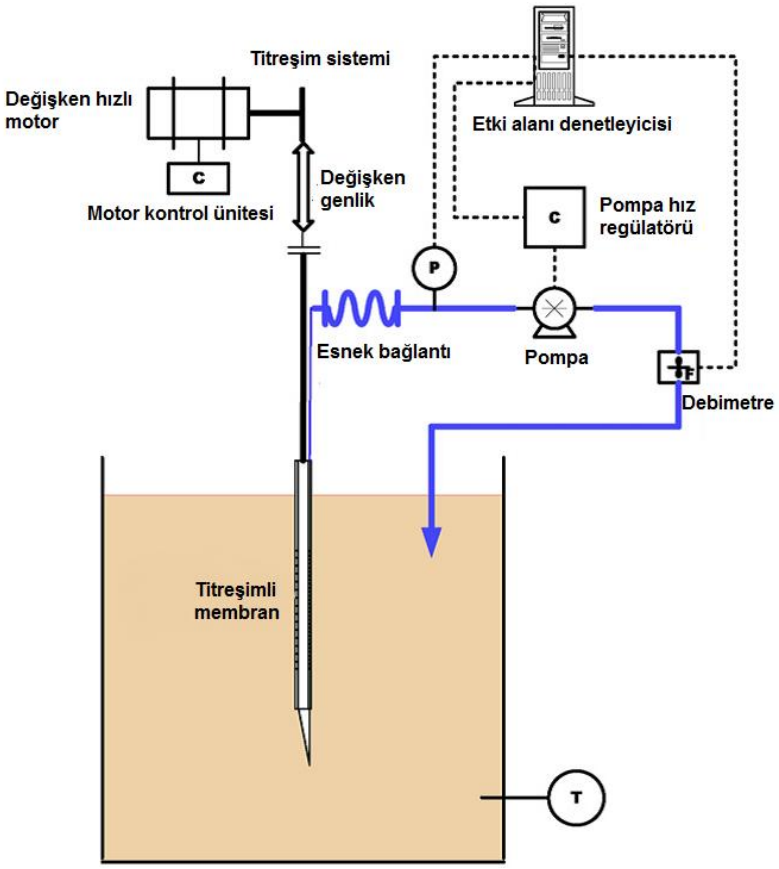


Şekil 2.16 : Li ve diğ. (2013) tarafından kullanılan deney düzeneği.

Başka bir batık membran sistemi Gomaa ve diğ. (2011) tarafından kullanılmıştır. Sistem 40 litrelik bir tanka batırılmış olan MF levha membran modülünden oluşmaktadır (Şekil 2.17). 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. Batık titreşimli membran sisteminin görünümü Şekil 2.17'de 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. Bu çalışmada frekans değerinin yükseltilmesi ile akının doğru orantılı şekilde arttığı görülmüştür.

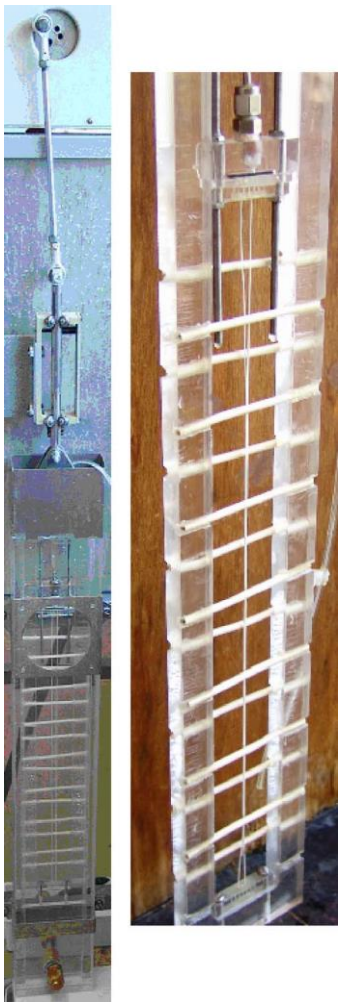
Genkin ve diğ.(2006) yaptıkları çalışmada boyuna titreşim uygulaması kullanarak kritik akıda membran tıkanmasını önlemeye çalışmışlardır. Bu çalışmada batık ince boşluklu membran modülleri, 250 w değerinde bir düz akım motoru ve 4 cm genlikli, 10 Hz frekansa çıkabilen bir sistem kullanılmıştır. Motor ile modül arasında kranklı bir aktarma sistemi bulunmaktadır. Çapraz akış ve havalandırma ile tıkanma kontrolü uygulanan batık MBR sistemlerinde kritik akı genelde 30-40 L/m^2.sa arasında değişirken, bu çalışmada 10 Hz frekans değerinden küçük frekans değerlerinde uygulanan boyuna titreşim yöntemiyle kritik akının 60-80 L/m^2.sa aralığında olduğu görülmüştür. Bu çalışmada ek olarak çapraz titreşim uygulaması da denenmiştir. Çapraz titreşim uygulamasının 10 Hz frekans değerinde kritik akıyı

yaklaşık olarak iki katına (130 L/m^2.sa) çıkardığı görülmüştür. Genkin ve diğ. (2006)'nin kullandıkları deney düzeneğinin görüntüsü Şekil 2.18'de verilmiştir.



Şekil 2.17 : Levha membranlı batık titreşimli sistem (Gomaa ve diğ., 2011).

Genkin ve diğ.(2006) yaptıkları çalışmada boyuna titreşim uygulaması kullanarak kritik akıda membran tıkanmasını önlemeye çalışmışlardır. Bu çalışmada batık ince boşluklu membran modülleri, 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. Çapraz akış ve havalandırma ile tıkanma kontrolü uygulanan batık MBR sistemlerinde kritik akı genelde 30-40 L/m^2.sa arasında değişirken, bu çalışmada 10 Hz frekans değerinden küçük frekans değerlerinde uygulanan boyuna titreşim yöntemiyle kritik akının 60-80 L/m^2.sa aralığında olduğu görülmüştür. Bu çalışmada ek olarak çapraz titreşim uygulaması da denenmiştir. Çapraz titreşim uygulamasının 10 Hz frekans değerinde kritik akıyı yaklaşık olarak iki katına (130 L/m^2.sa) çıkardığı görülmüştür. Genkin ve diğ. (2006)'nin kullandıkları deney düzeneğinin görüntüsü Şekil 2.18'de verilmiştir.

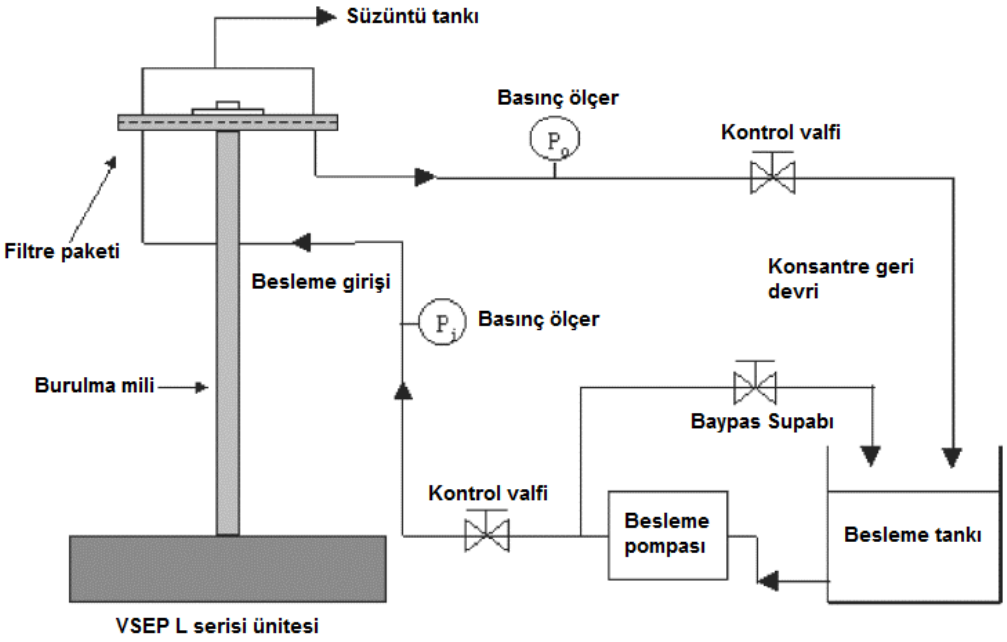


Şekil 2.18 : Genkin ve diğ. (2006) tarafından kullanılan laboratuvar ölçekli batık membran titreşim ünitesi.

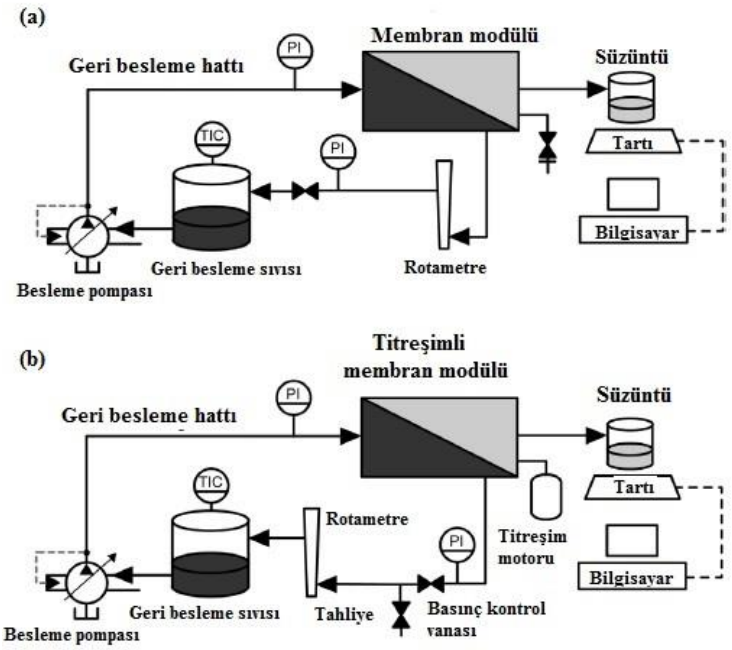
Low ve diğ. (2005), VSEP sistemi ile birleştirilmiş bir MBR sistemi kullanmıştır. Çalışmada PAN, UF ince boşluklu membranlar kullanılmıştır. Salınım hızı 5,33 m/s frekans ise 70 Hz'dir. VSEP sistemi ile işletilen MBR'ın batık MBR sistemlerine göre 6,8 kat daha fazla akı değerine sahip olduğu görülmüştür. Aynı çalışmada elde edilen bir diğer sonuç ise VSEP sistemiyle işletilen membranların batık MBR sistemine göre işletilen membranlara oranla %70 oranında daha temiz olduğudur. Şekil 2.19'da Low ve diğ.'nin kullandığı VSEP sistemi gösterilmiştir.

Nurra ve diğ. (2014) yaptıkları çalışmada titreşim uygulamasının kayma gerilmesi ve teknik performans üzerine etkilerini araştırmışlardır. Yapılan çalışmalarda endüstriyel ölçekte ticari bir kurulum denenmiştir. Polietersülfon, poliakrilonitril gibi çeşitli yapılarda ve por çaplarındaki membranlar kullanılmıştır. Çalışma mikroalg beslemesi ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda membran tipi ve por çapına bakılmaksızın titreşimli membran uygulamasının konvansiyonel membran

uygulamalarına göre çok daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Konvansiyonel membran sistemlerinde permeabilite değeri 10 L/sa.m^2.bar değerindeyken dinamik filtrasyon(titreşim uygulaması) ile bu değer 30 L/sa.m^2.bar değerini geçmiştir. Şekil 2.20'de Nurra ve diğ.'nin kullandığı titreşimsiz ve titreşimli sistem şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.19 : Kullanılan VSEP sistemi (Low ve diğ., 2005).



Şekil 2.20 : (a) Titreşimsiz kontrol sistemi (b) Dinamik (Titreşimli) sistem (Nurra ve diğ., 2014)

3. MATERYAL VE METOT

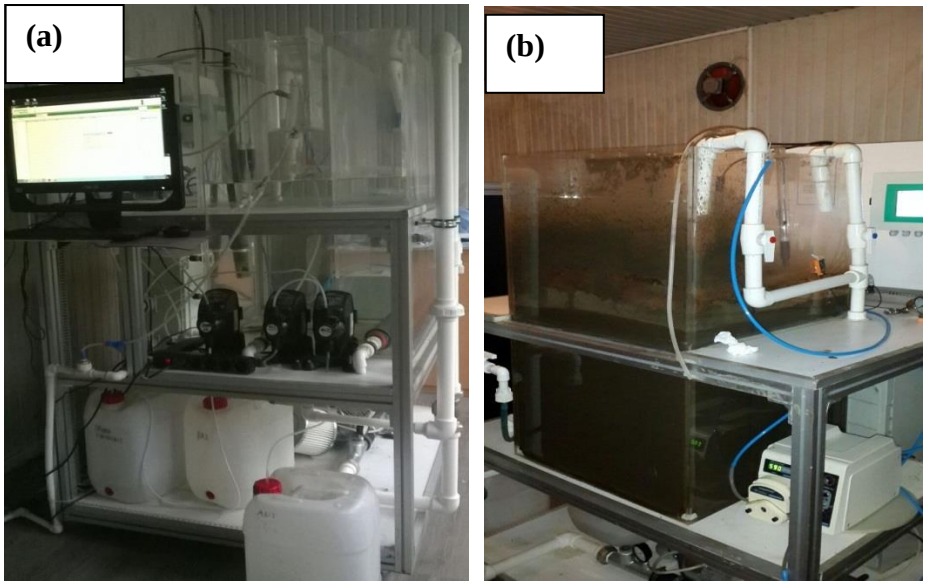
3.1 MBR Sisteminin ve Membran Modüllerinin Teknik Özellikleri

Pilot ölçekli tesis İSKİ'ye ait Baltalimanı Atıksu Arıtma Tesisi'nde bir konteyner içine yerleştirilmiştir. MBR sisteminin yerleştirildiği konteyner ve MBR sisteminin görüntüsü sırasıyla Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de verilmiştir.

MBR sistemi tam otomasyon SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) sistemi ile sürekli olarak kontrol edilmiştir. 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 3.3).



Şekil 3.1 : Çalışmanın gerçekleştirildiği konteynerın görünümü.



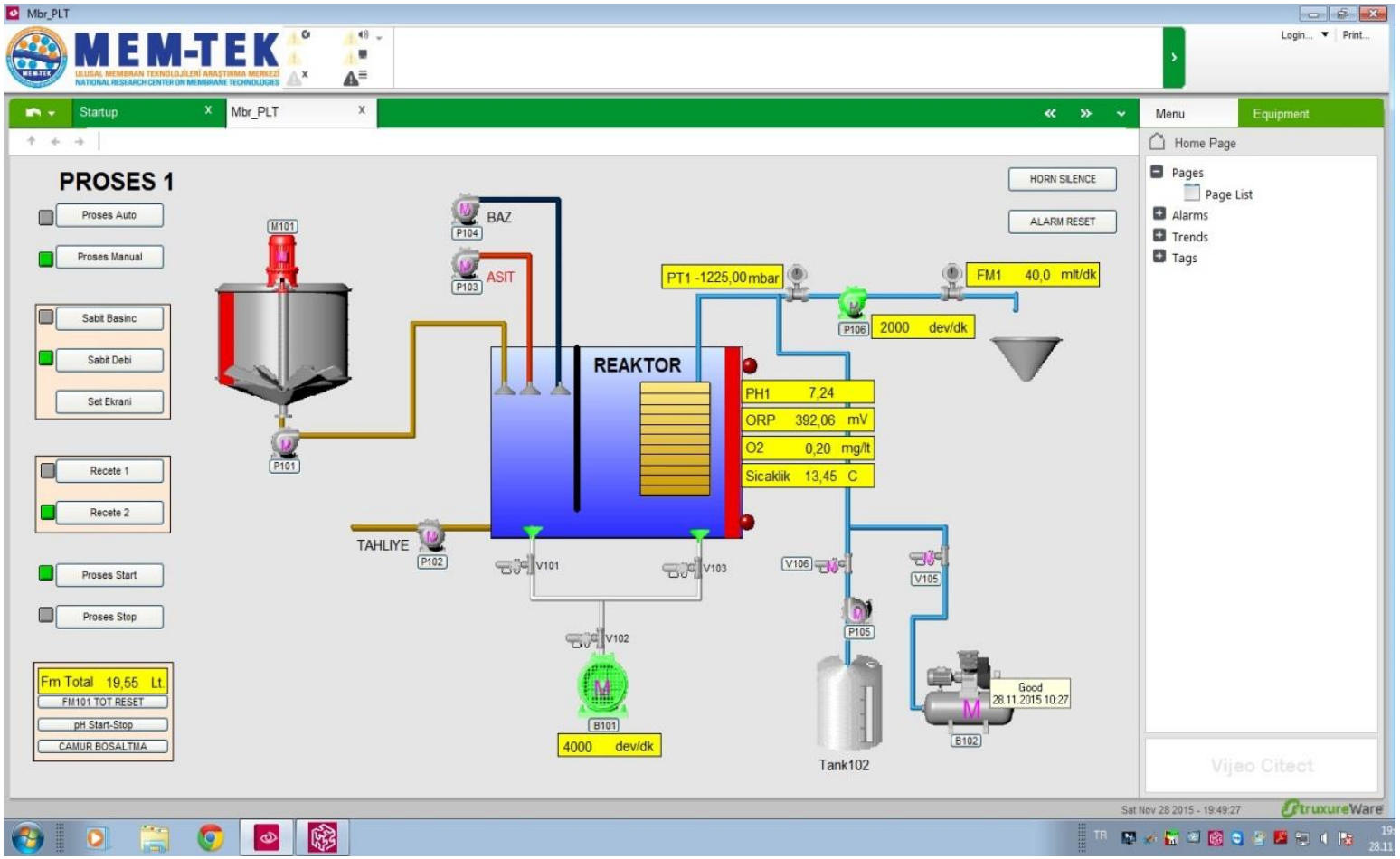
Şekil 3.2 : Pilot ölçekli MBR sisteminin görünümü; (a) Sistemin boş durumdaki hali, (b) Aklimasyon süreci başlatılmış aktif çamur içeren sistemin görünümü.

Çizelge 3.1'de MBR sisteminin teknik özellikleri verilmiştir. Reaktörün genişliği 100 cm, uzunluğu 100 cm ve derinliği 60 cm'dir.

Çizelge 3.1 : 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

MBR sistemi içerisinde bulunan pH, ORP, sıcaklık ve çözünmüş oksijen probları (TETHYS Instruments, Fransa) ile bu parametreler işletme süresi boyunca sürekli olarak ölçülmüştür. Ölçülen değerler, reaktörün bağlı olduğu bilgisayar sisteminde eş zamanlı olarak kaydedilmektedir. Bu değerlerde herhangi istenilmeyen bir durum olduğunda uzaktan kontrol yardımıyla müdehale edilerek ya da otomatik ayarlar sayesinde giderilmektedir.



Şekil 3.3 : Pilot ölçekli MBR Sistemi SCADA ana ekran görünümü.

Elektromanyetik debimetre ile hassas olarak ölçülebilen süzüntü debisi SCADA sisteminde kayıdedilmektedir. Süzüntü MBR tankının yanındaki başka bir tankta depo edilip atılmaktadır. Sistem bir adet vakum pompası (Longerpump, BT300, Çin) ile 9,5 dk filtrasyon 0,5 dk geri yıkama olacak şekilde çalıştırılmıştır. Vakum hattında basıncın ölçülerek kaydedilmesini sağlamak amacıyla dıştan diyaframlı basınç ölçer (Keller, Almanya) kullanılmıştır. Süzüntü küçük bir numune haznesinde toplandıktan sonra geri yıkama işlemi için kullanılmış, fazlalığı ise atıksu hattına deşarj edilmiştir.

Sistemde bir adet besleme dalgıç pompası (WILO-TMW 32/8, Almanya) bulunmaktadır. Bu pompa ham atıksuyun toplandığı giriş tankından MBR sistemine beslemeyi sağlamaktadır.

Çamur yüksekliği sensörler yardımıyla SCADA sisteminden kontrol edilmiştir. Reaktörden vakum pompası ve membran modülü 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.

Kullanılan manyetik titreşim sisteminin frekans aralığı 20–150 Hz arasında değişmektedir. Sistemde manyetik sürücü olarak 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 amfi devresi (Behringer Europower 2000) ile sürülmüştür.

Sistemde kullanılan modüllerde Philos marka membranlar kullanılmıştır. Modüllerin özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Şekil 3.4'de membran modüllerinin hazırlık aşaması, Şekil 3.5'te bağlantıları yapılmış kullanıma hazır MBR modülü ve Şekil 3.6'da kullanıma hazır MBR modülünün farklı açıdan görüntüleri verilmiştir.

Çizelge 3.2 : Modül özellikleri.

Parametre	Özellikler
İnce boşluklu bir membranın çapı (mm)	2
İnce boşluklu bir membranın yüzey alanı (m^2)	0,002
Toplam ince 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



Şekil 3.4 : Membran modülü hazırlık aşaması.



Şekil 3.5 : Bağlantıları yapılmış kullanıma hazır MBR modülü.



Şekil 3.6 : Bağlantıları yapılmış kullanıma hazır pilot ölçekli MBR modülünün farklı açıdan görüntüsü.

3.2 Atıksu Kaynağı ve Karakterizasyonu

Çalışmada MBR'ın işletilmesi için gereken ham evsel atıksu İSKİ Baltalimanı Atıksu Ön Arıtma Tesisi kum tutucu çıkışından temin edilmiştir. Çizelge 3.3'de ham evsel atıksuyun her işletme aşamasındaki karakterizasyonu verilmiştir.

Çizelge 3.3'te görüldüğü üzere ilk aşamadaki çözünmüş KOİ konsantrasyonu diğer iki aşamaya göre yaklaşık olarak yarı yarıya daha düşüktür. Bunun nedeni ilk aşamanın işletildiği tarih aralığının kış mevsimine denk gelmesidir. Kış mevsiminde artan yağışlar ile birlikte besleme atıksuyundaki çözünmüş KOİ konsantrasyonu azalmıştır.

Çizelge 3.3 : Tüm işletme süreleri boyunca ham evsel atıksu karakterizasyonu.

Parametre	Birim	1. Aşama (30 Hz) 23.02.2016-17.03.2016	2. Aşama (Titreşimsiz) 20.05.2016-14.06.2016	3. Aşama (150 Hz) 28.06.2016-25.07.2016
Toplam KOİ	mg/L	473±107	466±89	393±206
Çözünmüş KOİ	mg/L	91±45	195±44	144±66
Toplam Katı Madde (TKM)	mg/L	3844±278	6100±1183	6889±1151
Askıda Katı Madde (AKM)	mg/L	278±79	314±81	247±97
Toplam Azot (TN)	mg/L	57±10	59±17	48±6
NH_4	mg/L	43±5	51±7	34±3
NO_2	mg/L	0,08±0,01	0,11±0,04	0,07±0,02
NO_3	mg/L	0,51±0,23	0,73±0,32	0,51±0,04
Toplam Fosfor (TP)	mg/L	5±0,5	5,5±1	4,3±1,1
pH	-	7,82±0,06	8±0,42	7,79±0,19
Bulanıklık	NTU	263±97	270±84	177±74

3.3 Aşı Çamuru Karakterizasyonu

MBR sisteminde kullanılan aşı çamuru İSKİ Paşaköy Biyolojik Arıtma Tesisi aktif çamur ünitesinin geri devir hattından alınmıştır. Aşı çamurunun karakterizasyonu Çizelge 3.4'te verilmektedir. Çizelge 3.4'te görüldüğü üzere AKM konsantrasyonu ortalama 9868 mg/L iken, KOİ konsantrasyonu ortalama 7356 mg/L'dir.

Çizelge 3.4 : 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

3.4 Deneysel Plan ve İşletme Koşulları

Çalışmada MBR sistemi ilk olarak manyetik titreşim ile 30 Hz frekansta işletilmiştir. Bu çalışmayı takiben aynı sürede benzer nitelikte başka bir modül titreşimsiz olarak işletilmiştir. Son olarak titreşimin farklı frekansta etkisini görmek amacıyla bir başka benzer nitelikte modül 150 Hz frekansta işletilmiştir. Deneysel plan ve işletme tarihleri Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5 : Pilot sistemde uygulanan deneysel plan.

Deney Aşamaları	**İşletme Tarihleri**
Manyetik titreşimli (30 Hz)	23.02.2016-17.03.2016
Titreşimsiz	20.05.2016-14.06.2016
Manyetik titreşimli (150 Hz)	28.06.2016-25.07.2016

3 aşamada da yapılan modüllerin saf su ile permeabilite testleri yapılmıştır. Bu testin sonucuna göre membranların permeabiliteleri ve dirençleri belirlenmiştir.

Pilot ölçekli MBR reaktörü aerobik koşullarda işletilmiştir. MBR sisteminin işletme parametreleri Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6 : 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
Akı (L/m^2.sa)	22,5	22,5	22,5
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)	220,6 ± 44,5	237,7 ± 26,3	220,6 ± 44,5

Çizelge 3.6 (devam): MBR sisteminin işletme parametreleri.

İşletme parametreleri	1. Aşama Manyetik Titreşim (30 Hz)	2. Aşama Titreşimsiz	3. Aşama Manyetik Titreşim (150 Hz)
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 3.6'da görüldüğü üzere her 3 aşamada işletme akısı aynıdır. Akı sabit tutularak TMP değişiminin gözlenebilmesi sağlanmıştır. Çözünmüş oksijenin 3 aşamada değişiklik göstermesinin sebebi ilk aşamada ayarlamanın yapılamaması sonraki aşamalarda yapılabilmesidir. MBR'ın sıcaklığı aşama aşama artmıştır bunun sebebi ise mevsimsel değişikliklerdir.

3.5 Analiz Metotları

MBR sistemlerinin işletimi sırasında; giriş atıksuyunda, reaktör içerisinde ve reaktörün süzüntü akımında çeşitli analizler belirli sıklıklarla gerçekleştirilmiştir. Çalışma süresince ölçülen paramtreler, ölçüm sıklığı ve ölçüm noktaları Çizelge 3.7'de verilmiştir.

Çizelge 3.7 : MBR sisteminin 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
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	-
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

3.5.1 Toplam ve çözünmüş KOİ

Arıtma performansının belirlenebilmesi için KOİ konsantrasyonu ölçülmüştür. 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.

3.5.2 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.

3.5.3 Nitrat azotu (NO_3-N)

Nitrat azotu ölçümü, kadmiyum indirgenme metoduna (APHA, 2005) göre, DR 5000 Hach Spektrofotometrede, 500 nm dalga boyunda gerçekleştirilmiştir.

3.5.4 Nitrit azotu (NO_2-N)

Nitrit azotu, diazotizasyon metoduna (APHA, 2005) göre, DR 5000 Hach Spektrofotometrede, 530 nm dalga boyunda ölçülmüştür.

3.5.5 Toplam azot (TN)

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.

3.5.6 Toplam fosfor (TP)

Toplam fosfor analizi Standart Metot (APHA, 2005)'a göre, DR 5000 Hach Spektrofotometrede, 507 nm dalga boyunda ölçülmüştür.

3.5.7 Bulanıklık

Bulanıklık analizi için Hach-Lange 2100Q bulanıklık ölçer kullanılmıştır. Cihazın kalibrasyonu yapıldıktan sonra ölçümler yapılmıştır.

3.5.8 Askıda katı madde (AKM)

AKM parametresi, Standart Metotlar'da yer alan 2540B no'lu metoda (AWWA, 2005) göre belirlenmiştir.

3.5.9 Uçucu askıda katı madde (UAKM)

UAKM parametresi Standart Metotlar'da yer alan 2540B no'lu metoda (AWWA, 2005) göre tayin edilmiştir.

3.5.10 Toplam katı madde (TKM)

TKM parametresi Standart Metot'a göre tayin edilmiştir (APHA, 2005).

3.5.11 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).

3.5.12 SEM-EDS analizi

Membranların morfolojik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağılımlı X-Işını Spektrofotometrisi (EDS) analizleri yapılmıştır. Ölçümlerde FEI Quanta FEG 200 marka elektron mikroskobu ve EDAX METEK marka EDS cihazı kullanılmıştır. Elektron mikroskobu ile numune görüntülerine bakılmadan önce, numuneler altın-palladyum ile 3-4 nm kalınlıkta kaplanmıştır. Kaplama işlemi Quorum SC7620 marka cihaz ile gerçekleştirilmiştir.

3.5.13 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 yapılmıştır. Ölçüm aralığı MasterSizer cihazı için 0,1-10000 µm, NanoSizer cihazı için 0,1-10000 nm'dir.

3.5.14 Akı hesabı

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.

$$J = \frac{Q_{süzüntü}}{A_{membran}} \tag{3.1}$$

Burada;

- J: Su akısı (L/m^2-sa)
- $Q_{süzüntü}$: Süzüntü debisi (L/sa)
- $A_{membran}$: Membran yüzey alanı (m^2)

3.5.15 Permeabilite deneyi

Filtrasyon başlangıcında temiz su akısı Darcy kanununa göre aşağıdaki ilişki ile ifade edilmektedir (Eren, 2006) (3.2).

$$J = \frac{\Delta P}{\mu . R_m} \tag{3.2}$$

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.

3.5.16 Kritik akının belirlenmesi

Kritik akı belirlenirken kademeli akı metdou kullanılmıştır. Literatür araştırmalarından elde edilen bilgilere göre en sık kullanılan metot kademeli akı metodudur (Field ve diğ., 1995; Le-Clech ve diğ., 2003a,b; Yiğit, 2007). 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 sonrasında test edilecek 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 (ya da tıkanma hızı, 0-15 dakika arası), ortalama TMP, permeabilite ve toplam direnç (R_t) (seri direnç modeli kullanılarak) ölçülür ve/veya hesaplanır (Denklem 3.3-3.6). Kritik akı hesaplamasında kullanılan bağıntılar aşağıda gösterilmiştir.

Başlangıç TMP artışı:

$$\Delta Po = TMP_i^n - TMP_f^{n-1} \tag{3.3}$$

TMP artış hızı:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{TMP_f^n - TMP_i^n}{t_f^n - t_i^n} \tag{3.4}$$

Ortalama TMP:

$$P_{ave} = \frac{TMP_f^n + TMP_i^n}{2} \tag{3.5}$$

Kademe akısı:

$$J = \frac{Q_{süzüntü}}{A_{membran}} \tag{3.6}$$

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)
- *Qsüzüntü*: süzüntü debisi (L/sa)
- $A_{membran}$: kullanılan modülün nominal membran yüzey alanı (m^2).

3.5.17 Membran dirençlerinin belirlenmesi

Membran direnci, membran materyalinin kendisinden, por çapı yüzey porozitesinden ve membran kalınlığından kaynaklanmaktadır (Judd, 2006). Membran direnci permeabilite deneyinde kullanılan denklemde (3.2) R_m değeri çekilerek hesaplanmıştır.

3.5.18 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. 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. NaOCl ile giderilebilen direncin belirlenmesi:

Bu basamakta modüller %2 NaOCl çözeltisi içerisinde 30 dakika bekletilmiş ve sonrasında membranların permeabilitesi ve direnci belirlenmiştir.

3. Sitrik Asit ile giderilebilen direncin belirlenmesi:

Bu basamakta modüller %8 sitrik asit çözeltisi içerisinde 60 dakika bekletilmiş ve sonrasında membranların permeabilitesi ve direnci belirlenmiştir.

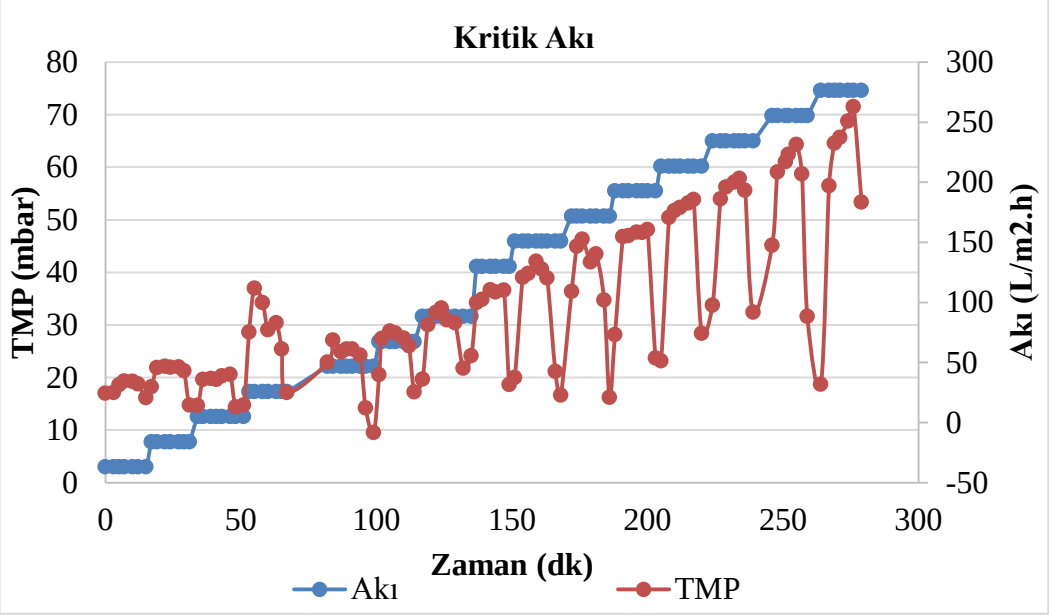
Tüm bu işlemler sonucunda elde edilen direnç ile temiz membran direnci arasındaki fark da geri kazanılamayan direnç olarak tanımlanmıştır.

4. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu bölümde manyetik titreşimli (30 ve 150 Hz'de) ve titreşimsiz modüller ile işletilen MBR sisteminden elde edilen deneysel çalışmaların sonuçları verilmiştir.

4.1 Kritik Akı

Kritik akı deneyi, çalışmanın başlangıcında reaktör içerisindeki çamurda kademeli akı metodu kullanılarak yapılmıştır. Kritik akı deney sonuçları Şekil 4.1'de verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere, kritik akı değeri TMP'deki sıçramanın en çok olduğu noktada 34,7 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 sabit bir işletme akısı (22,5 L/m^2.sa) kullanılmıştır. Sistem bu akı değerinden yola çıkarak hesaplanan debi değerinde (150 ml/dk) işletilmiştir.



Şekil 4.1 : Kritik akı deneyi akıya bağlı TMP değişimi.

4.2 Permeabilite

Çalışmalara başlamadan önce her membran modülü için permeabilite ve saf su membran direnç değerleri yapılan deneyler sonucunda hesaplanmıştır. Çizelge 4.1'de görüldüğü gibi 3 aşama için üretilen membran modüllerinin her birinin ortalama permeabilite ve direnç değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Çizelge 4.1'den görüldüğü üzere 3 aşama (30 Hz, titreşimsiz, 150 Hz) için çalışma öncesi ortalama permeabilite değerleri sırasıyla 212, 213 ve 280 L/m^2-saat /bar iken, ortalama direnç değerleri sırasıyla $1,39*10^{12}$, $1,75*10^{12}$ ve $1,49*10^{12}$ m^{-1} 'dir.

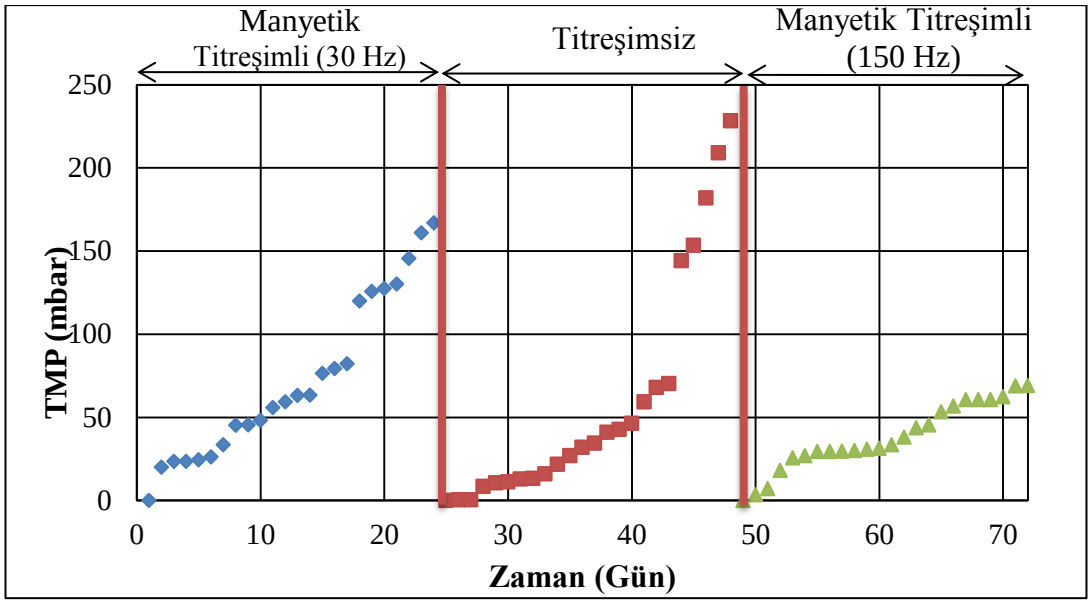
Çizelge 4.1 : Manyetik titreşimli ve titreşimsiz çalışma öncesinde ölçülen permeabilite ve direnç değerleri.

	Ortalama Permeabilite Değerleri (L/m^2-saat /bar)	**Ortalama Direnç Değerleri (m^{-1})**
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	$1,49±0,1*10^{12}$

4.3 Filtrasyon Performansı

4.3.1 Zaman içerisindeki TMP değişiminin gözlemlenmesi

MBR sisteminin işletimi boyunca akı değeri sabit tutularak zamana bağlı TMP artışı sürekli izlenmiştir. Manyetik titreşimli (30 Hz ve 150 Hz) ve titreşimsiz modüllerin işletim süresi boyunca TMP değişimi Şekil 4.2'de verilmektedir.



Şekil 4.2 : Manyetik titreşimli (30 Hz), titreşimsiz ve manyetik titreşimli (150 Hz) modüllerde TMP profili.

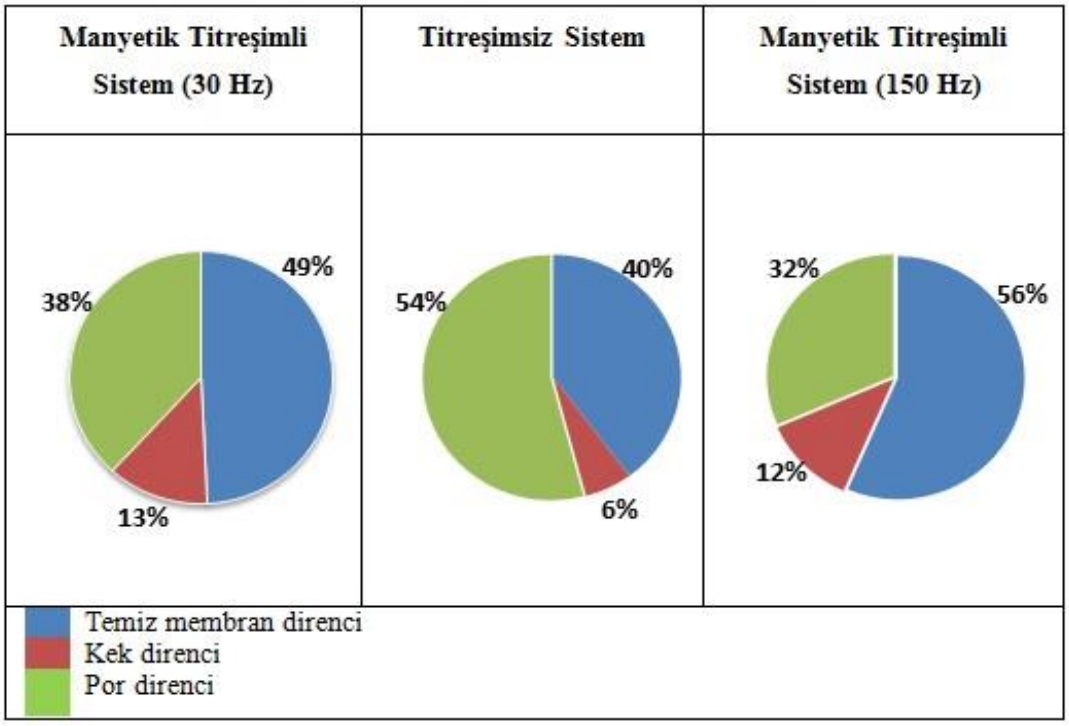
Her aşama 24 gün boyunca işletilmiştir. Şekil 4.2'de görüldüğü üzere manyetik titreşimli (30 Hz) modülde görülen en yüksek TMP değeri 161 mbar, titreşimsiz modülde 228 mbar ve manyetik titreşimli (150 Hz) modülde 69 mbar'dır. Günlük ortalama TMP artışı titreşimsiz işletilen modülde 9,5 mbar, manyetik titreşimli olarak 30 Hz'de işletilen modülde 7 mbar ve manyetik titreşimli olarak 150 Hz'de işletilen modülde ise yaklaşık 3 mbar'dır.TMP profilinden görüldüğü üzere basınç artış hızının en düşük olduğu modül 150 Hz frekans değerinde işletilen manyetik titreşimli modüldür.

4.3.2 İşletme sonrası filtrasyon dirençlerinin belirlenmesi

Elde edilen direnç sonuçlarının yüzdesel dağılımı Şekil 4.3'te karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

Şekil 4.3 incelendiğinde kek direncininin manyetik titreşimli sistemlerde, titreşimsiz sisteme göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Por tıkanmasına bağlı direncin 30 Hz'te işletilen manyetik titreşimli sistemde toplam direncin %38'ini, titreşimsiz sistemde %54'ünü, 150 Hz'te işletilen manyetik titreşimli sistemde ise %32'sini oluşturduğu görülmektedir. Por direncinin titreşimsiz sistemde manyetik titreşimli sistemlere göre yaklaşık %15-20 oranında daha fazla oluştuğu görülmektedir. TMP değişimi grafiği (Şekil 4.2) incelendiğinde de, en fazla TMP artışının titreşimsiz

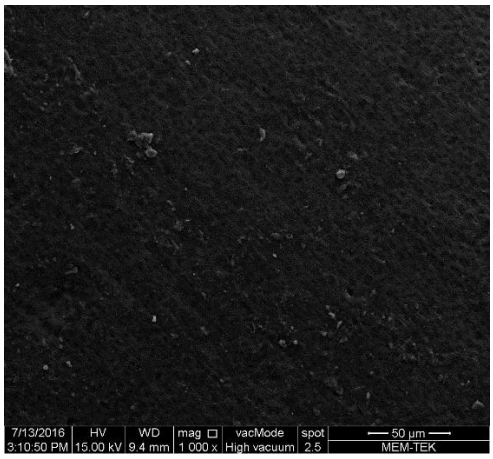
modülde olduğu görülmektedir. Bu durum titreşimsiz sistemde görülen yüksek TMP artışının por tıkanması kaynaklı olduğunu göstermektedir.



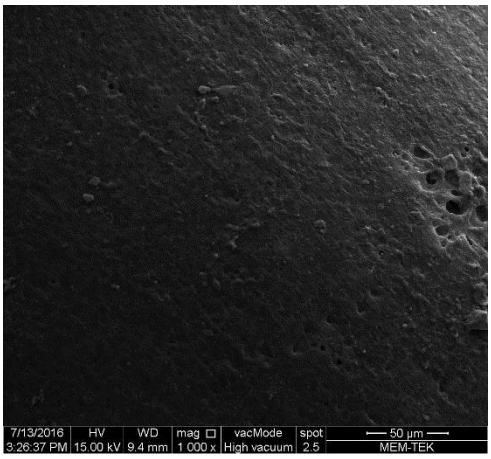
Şekil 4.3 : Modüllerin yıkama aşamalarından sonra elde edilmiş direnç grafikleri.

4.3.3 Morfolojik analiz

Deneysel işletim sonrası membranlardan alınan numunelerde SEM ve EDS analizleri yapılmıştır. Modüllerde fiziksel ve kimyasal yıkama yapıldıktan sonra alınan membranlardan elde edilen SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 4.4-4.6'da verilmiştir.

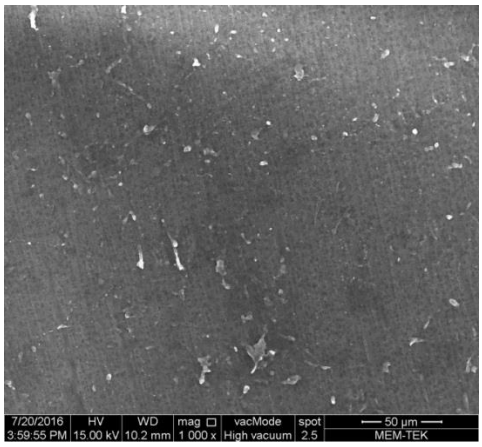


(a)Manyetik 30 Hz titreşimli modül 1.000x büyütme

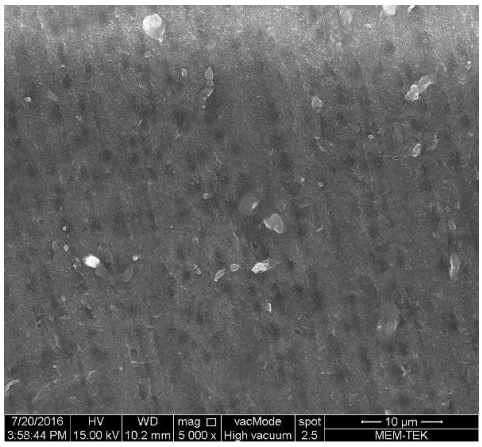


(b)Manyetik 30 Hz titreşimli modül 5.000x büyütme

Şekil 4.4 : Manyetik 30 Hz titreşimli modülden alınan membranların fiziksel ve kimyasal yıkama sonrası SEM görüntüleri.

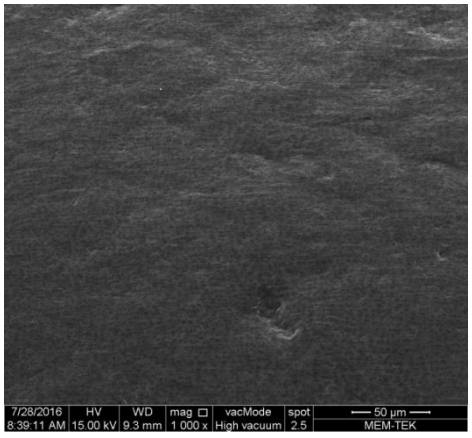


(a)Titreşimsiz modül 1.000x büyütme

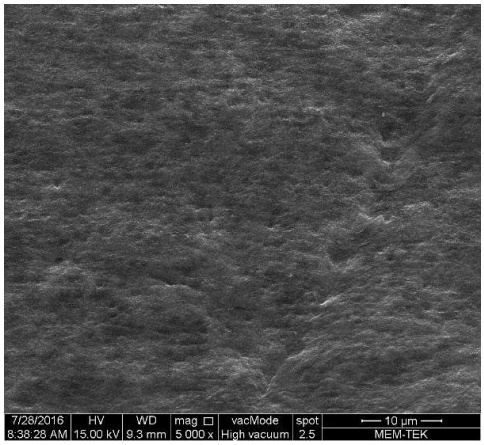


(b)Titreşimsiz modül 5.000x büyütme

Şekil 4.5 : Titreşimsiz modülden alınan membranların fiziksel ve kimyasal yıkama sonrası SEM görüntüleri.



(a)Manyetik 150 Hz titreşimli modül 1.000x büyütme



(b)Manyetik 150 Hz titreşimli modül 5.000x büyütme

Şekil 4.6 : 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 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.

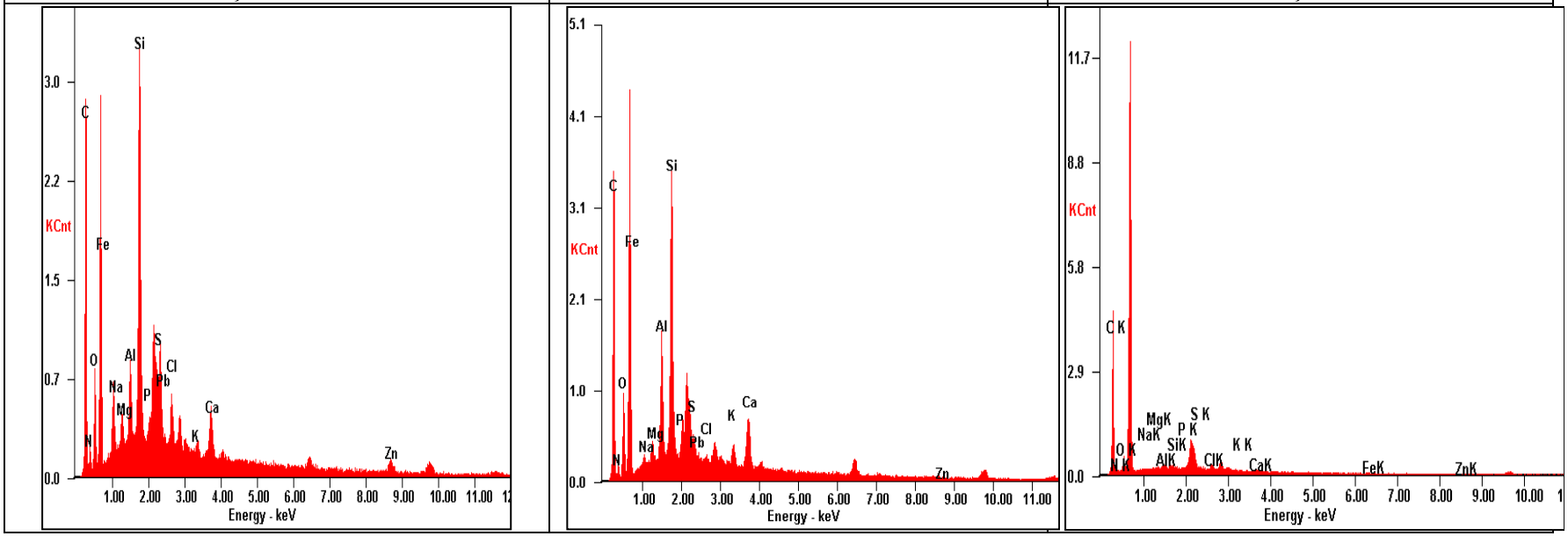
SEM görüntüleri alınan membranlar üzerindeki elementel kompozisyonu belirlemek amacıyla EDS analizi yapılmıştır.

Kullanılan membranların temizlik sonrası elde edilen EDS spektrumları Şekil 4.7'de verilmiştir. Bu spektrumlara ait olan elementel yüzde dağılımı ise Çizelge 4.2'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.

Çizelge 4.1 : Membran yüzeyindeki elementlerin ağırlıkça yüzdesel dağılımı.

	Manyetik Titreşimli (30 Hz)	**Titreşimsiz**	**Manyetik Titreşimli (150 Hz)**
Element	**Ağırlık %**	**Ağırlık %**	**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

(a) Manyetik 30 Hz titreşimli modül	(b) Titreşimsiz modül	(c) Manyetik 150 Hz titreşimli modül

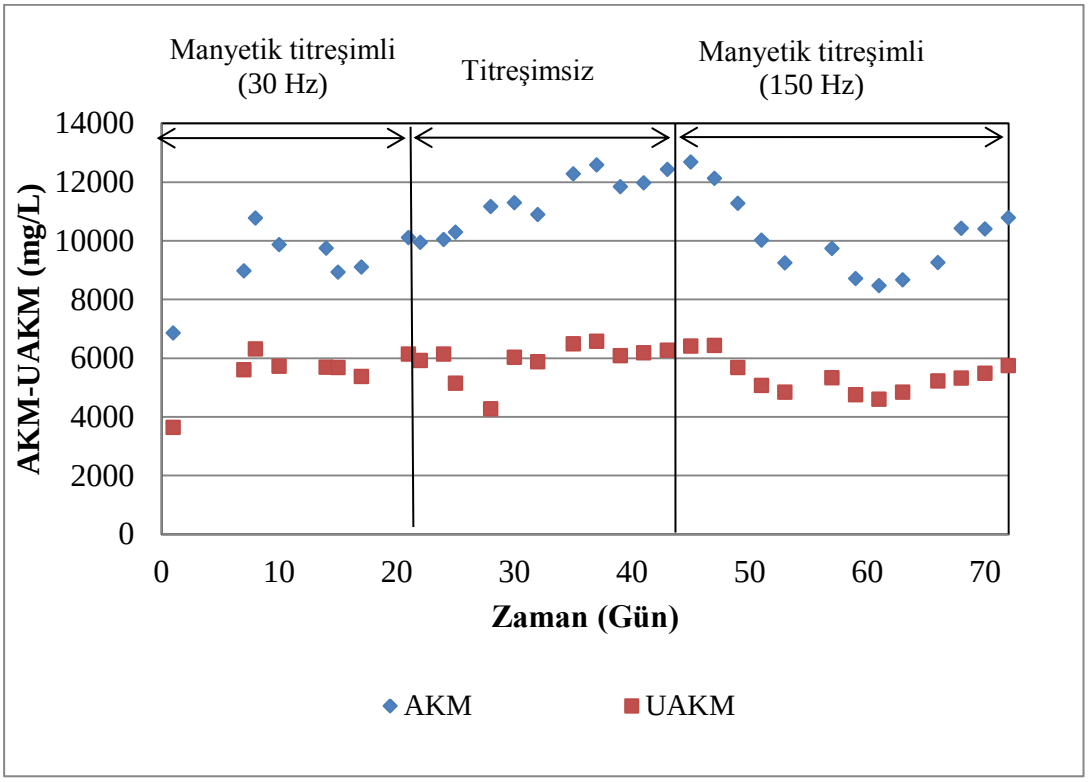


Şekil 4.7 : Manyetik titreşimli (30 Hz - 150 Hz) ve titreşimsiz modüllerde gerçekleştirilen EDS analizi spektrumu.

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.

4.4 Arıtma Performansı

Çalışma süresince reaktör içindeki AKM ve UAKM konsantrasyonları belirli aralıklarla ölçülmüştür. Şekil 4.8'de, tüm aşamalar boyunca reaktör içinde ölçülen AKM değerleri verilmektedir.



Şekil 4.8 : Reaktördeki AKM-UAKM konsantrasyonlarının değişimi.

Manyetik titreşimli ve titreşimsiz modül ile işletilen MBR içindeki çamurun ortalama AKM, UAKM konsantrasyonları ve UAKM/AKM oranları Çizelge 4.3'te verilmektedir.

Çizelge 4.2 : MBR içindeki çamurun AKM ve UAKM konsantrasyonları.

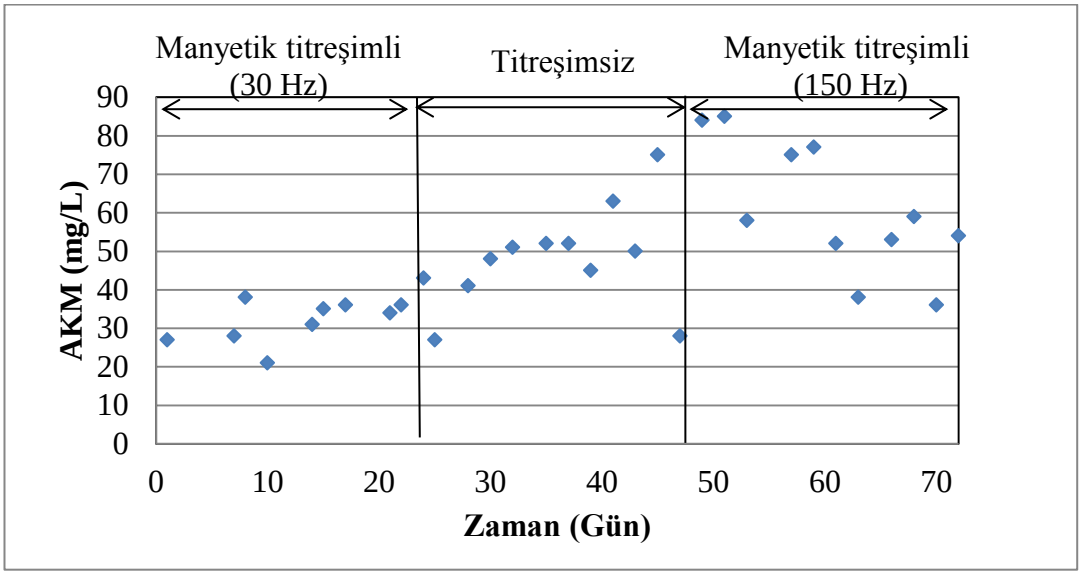
Numune	Manyetik Titreşimli (30 Hz)	Titreşimsiz	Manyetik Titreşimli (150 Hz)
AKM	9760 ± 1254	11775 ± 768	9724 ± 933
UAKM	5822 ± 862	5974 ± 690	5167 ± 382
UAKM/AKM	59 ± 2,35	50,3± 4,4	53,2 ± 2

Her üç aşamada AKM ve UAKM konsantrasyonları ve oranları arasında ciddi seviyede bir fark gözlenmemiş olup, bu durum elde edilen sonuçları 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.

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 4.9'da verilmektedir.



Şekil 4.9 : Süzüntüdeki AKM konsantrasyonunun değişimi.

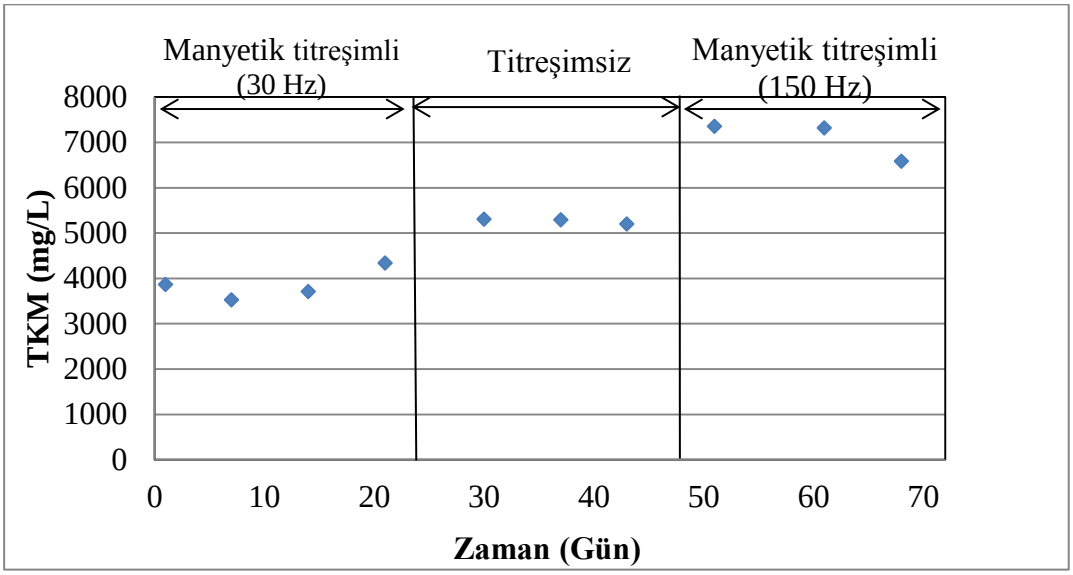
Süzüntüdeki AKM konsantrasyonu ortalama olarak 48±17 mg/L olarak ölçülmüştür. Tüm işletme süresi boyunca süzüntü akımlarında ölçülen AKM konsantrasyonları ve hesaplanan giderim verimleri Çizelge 4.4'te verilmektedir.

Çizelge 4.3 : Manyetik titreşimli ve titreşimsiz membran modüllerinde süzüntü akımlarında AKM değerleri ve giderim verimleri.

Modül	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

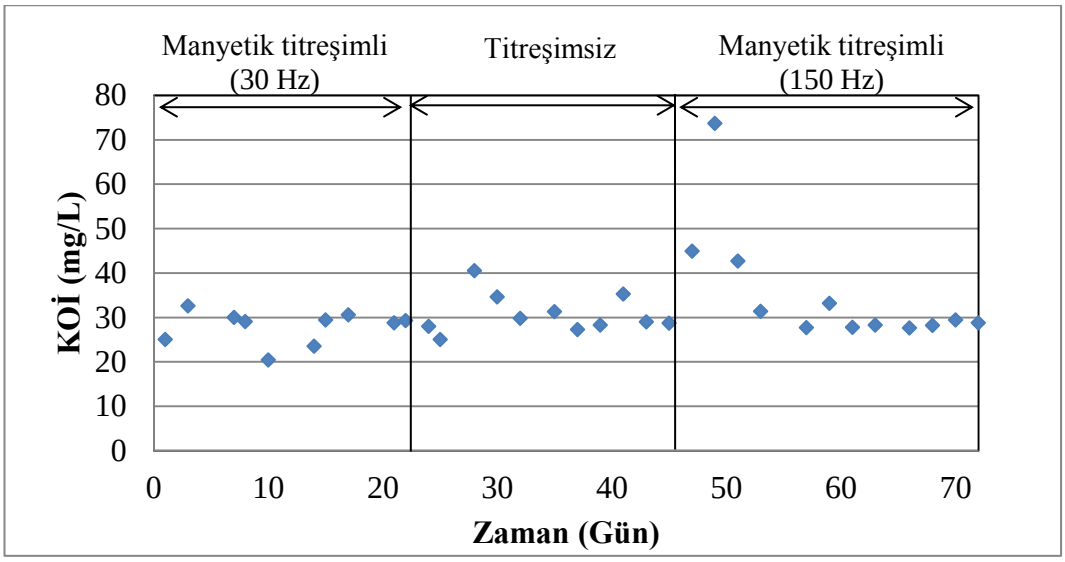
AKM giderim verimleri sırasıyla %88, %85 ve %80 değerindedir. 150 Hz frekansında işletilen modülde AKM giderim veriminde diğer modüllere göre %5-8 aralığında düşüş gözlemlenmiştir. Bu durum bu aşamada gözlenen düşük TMP değeri ve buna bağlı olarak elde edilen düşük kek ve por direnci ile ilişkilendirilebilir.

Reaktörün işletimi boyunca belirli aralıklarla, süzüntü akımında TKM ölçülmüştür. Şekil 4.10'da süzüntü akımında gerçekleştirilen TKM deneylerinin sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 4.10 : 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 4.11'de tüm işletim süresince elde edilen süzüntü KOİ konsantrasyonları gösterilmektedir.



Şekil 4.11 : Reaktörün işletildiği süreç boyunca süzüntüde KOİ konsantrasyonları.

KOİ konsantrasyonu, süzüntü akımında ortalama 32±9 mg/L olarak ölçülmüştür. Çizelge 4.5'te manyetik ve titreşimsiz modüllerin süzüntü akımlarında elde edilen KOİ konsantrasyonları ve giderim verimleri verilmiştir.

Çizelge 4.4 : Manyetik titreşimli ve titreşimsiz membran modüllerinin süzüntü akımlarında ölçülen KOİ konsantrasyonları ve giderim verimleri.

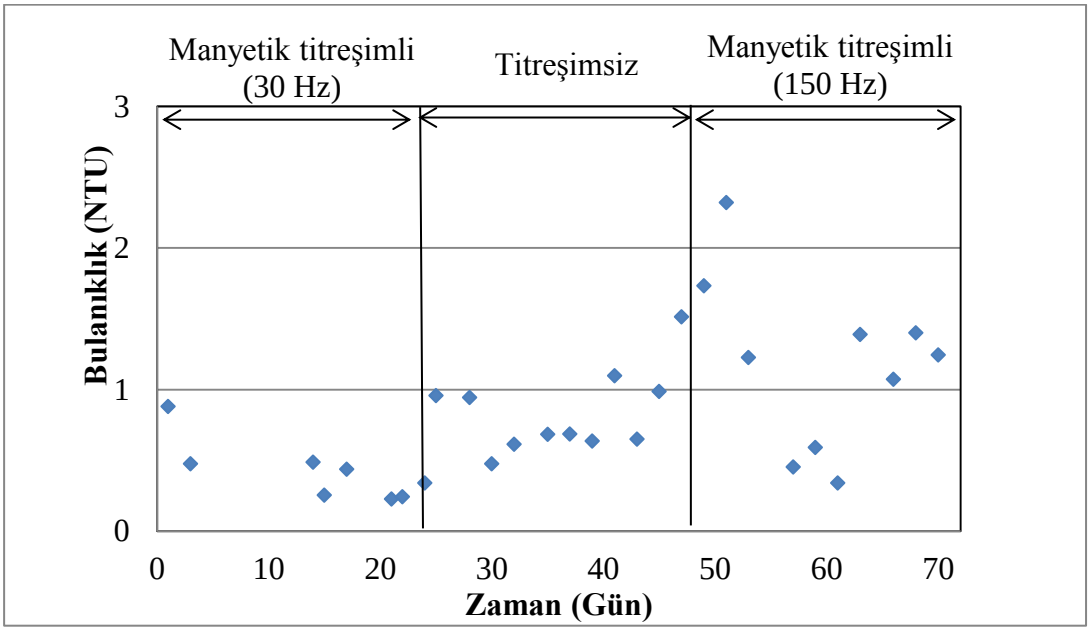
Modül	Manyetik Titreşimli Modül (30 Hz)	Titreşimsiz Modül	Manyetik Titreşimli Modül (150 Hz)
KOİ (mg/L)	28±3	32±6	34±13
Giderim verimi (%)	94±1	93±2	90±5

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 4.6'da verilmektedir.

Çizelge 4.5 : Süzüntü akımında ortalama NO_3-N, NO_2-N, NH_4-N, TKN ve TP konsantrasyonları.

Parametre	Birim	Manyetik Titreşimli (30 Hz) (Ort.+Std.Sapma)	Titreşimsiz (Ort.+Std.Sapma)	Manyetik Titreşimli (150 Hz) (Ort.+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 4.12'de süzüntü akımında ölçülen bulanıklık değerleri gösterilmektedir.



Şekil 4.12 : Süzüntü akımında ölçülen bulanıklık değerleri.

Çizelge 4.7'de manyetik titreşimli (30 Hz), titreşimsiz ve manyetik titreşimli (150 Hz) modüllerin süzüntü akımlarında ölçülen bulanıklık değerlerinin ortalaması verilmiştir.

Çizelge 4.6 : Süzüntü akımlarında ölçülen bulanıklık değerleri.

Modül	**Manyetik Titreşimli Modül (30 Hz) (Ort.+Std.Sapma)**	**Titreşimsiz Modül (Ort.+Std.Sapma)**	**Manyetik Titreşimli Modül (150 Hz) (Ort.+Std.Sapma)**
Bulanıklık (NTU)	0,41±0,19	0,84±0,29	1,18±0,6

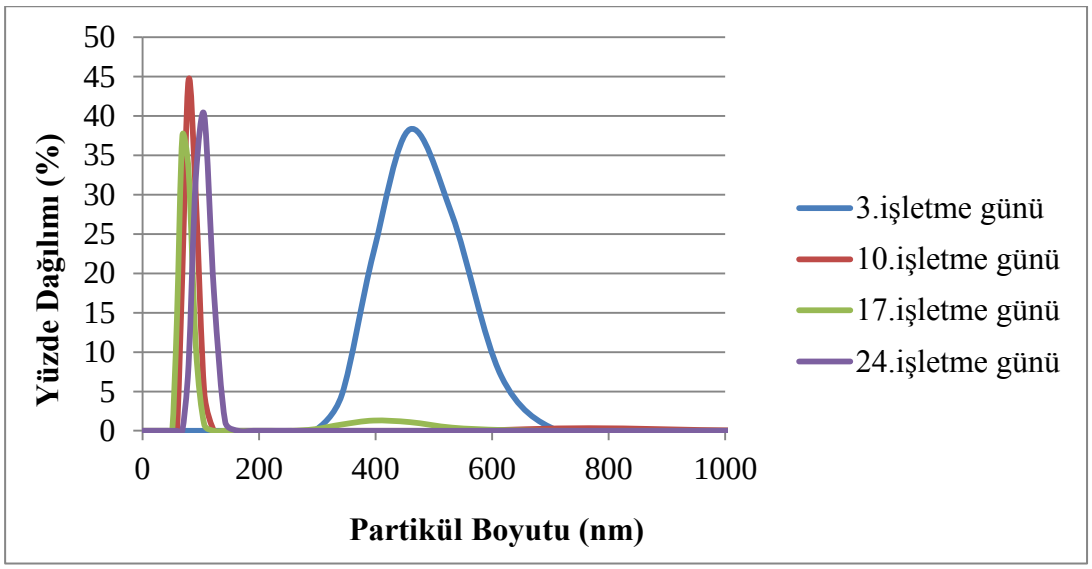
Tüm çalışma boyunca bulanıklık giderim verimi >%99 olarak elde edilmiştir.

İşletme periyodu boyunca belirli aralıklarla çamur besleme ve süzüntü akımlarından alınan numunelerde partikül boyut dağılımı (PSD) ölçülmüş ve sonuçlar Çizelge 4.8'de verilmiştir.

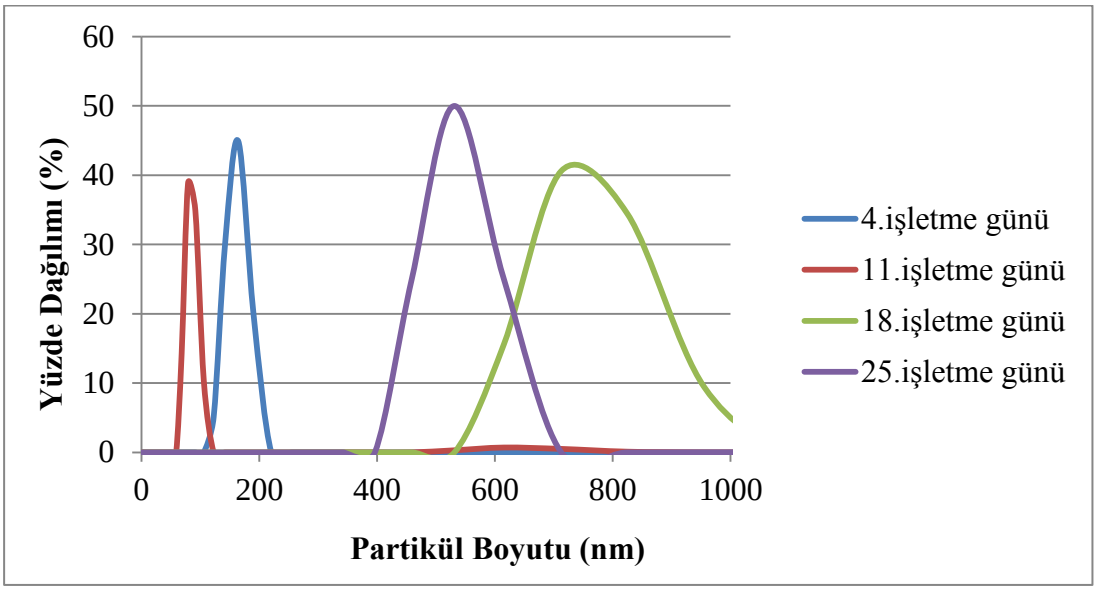
Çizelge 4.7 : Tüm işletme periyodu boyunca çamur, besleme ve süzüntü akımlarında yapılan PSD analizlerinin sonuçları.

Modül Tipi		**Çamur**	**Besleme**	**Süzüntü**
	Gün	**d(0,5) (µm)**	**Ortalama (nm)**	**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

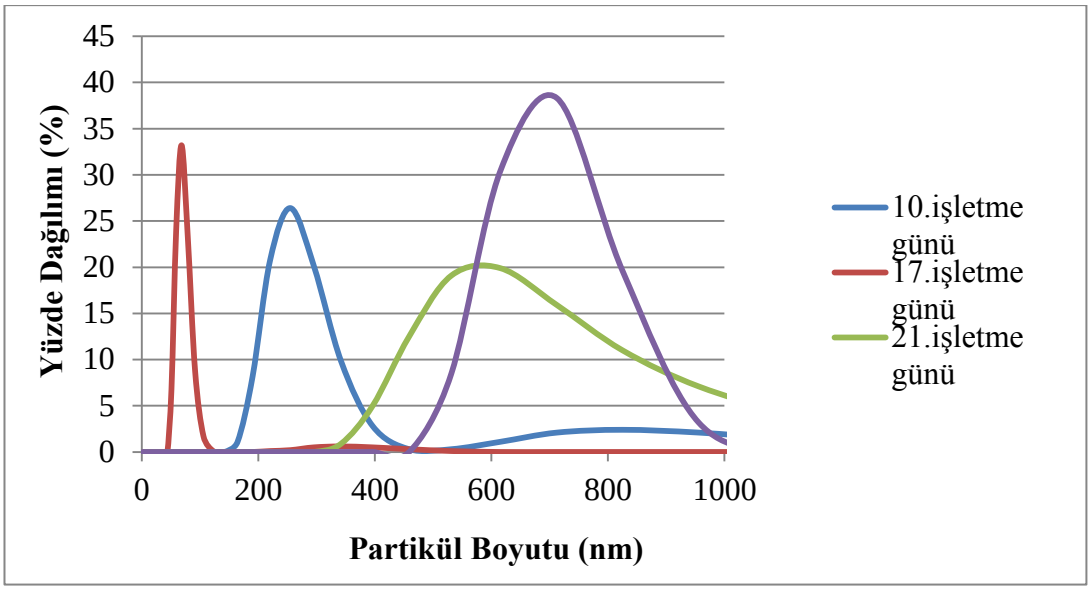
Manyetik (30 - 150 Hz) ve titreşimsiz modüllerin besleme numunesinde PSD sonuçları sırasıyla Şekil 4.13-4.15'te verilmiştir. Ham atıksuyun partikül boyutu ortalama olarak sırasıyla; titreşimli modülün işletim (30 Hz) döneminde 3938±2026 nm, titreşimsiz modülün işletim döneminde 1822±864 nm, titreşimli modülün işletim (150 Hz) döneminde 1357±1114 nm olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.13 : Manyetik titreşimli (30 Hz) modülün besleme akımında ölçülen PSD sonuçları.

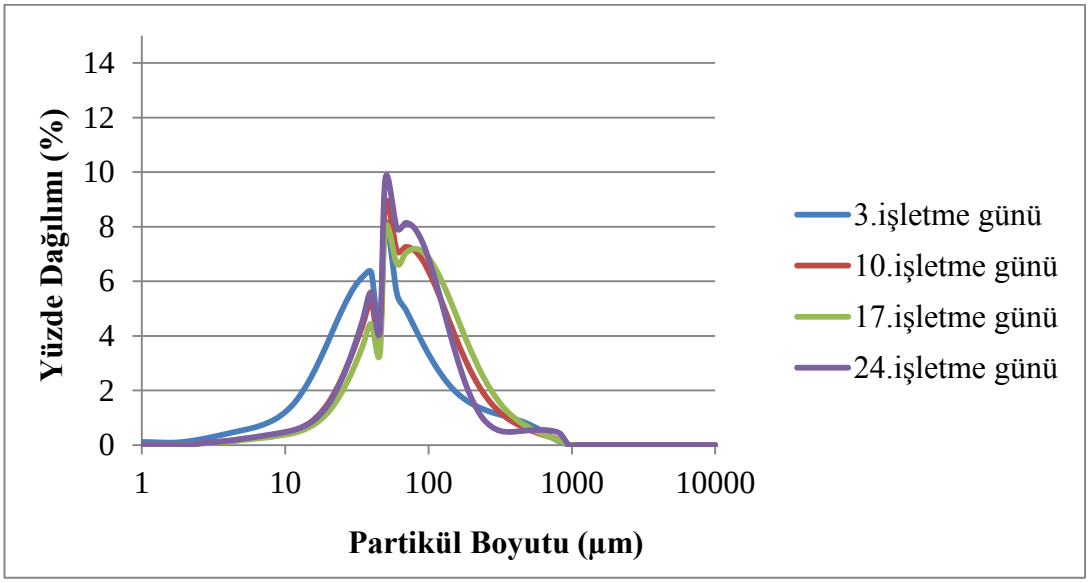


Şekil 4.14 : Titreşimsiz modülün besleme akımında ölçülen PSD sonuçları.

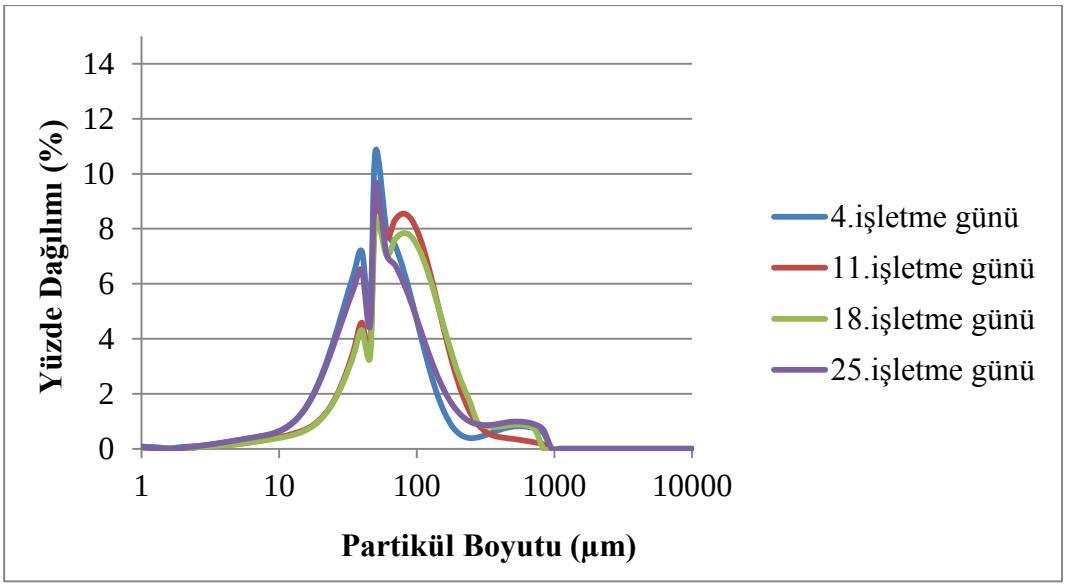


Şekil 4.15 : Manyetik titreşimli (150 Hz) modülün besleme akımında ölçülen PSD sonuçları.

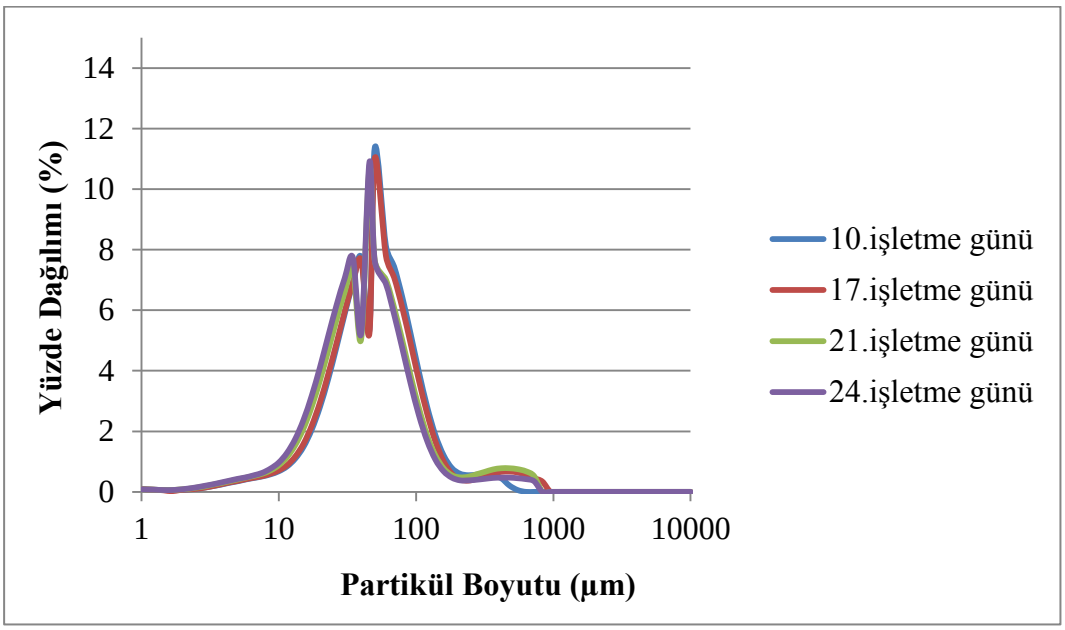
Manyetik (30 - 150 Hz) ve titreşimsiz modüllerin çamur numunesinde PSD sonuçları sırasıyla Şekil 4.16-4.18'de verilmiştir. Deney süresince partikül boyutu dağılımı incelendiğinde manyetik titreşimli modülün (30 Hz) çamur numunesinde d(0,5) değeri 70±16 µm, titreşimsiz modülün çamur numunesinde 71±15 µm ve manyetik titreşimli (150 Hz) modülün çamur numunesinde d(0,5) değeri 52±1,4 µm olduğu görülmektedir.



Şekil 4.16 : Manyetik titreşimli (30 Hz) modülün işletildiği süreçte çamurda ölçülen PSD sonuçları.

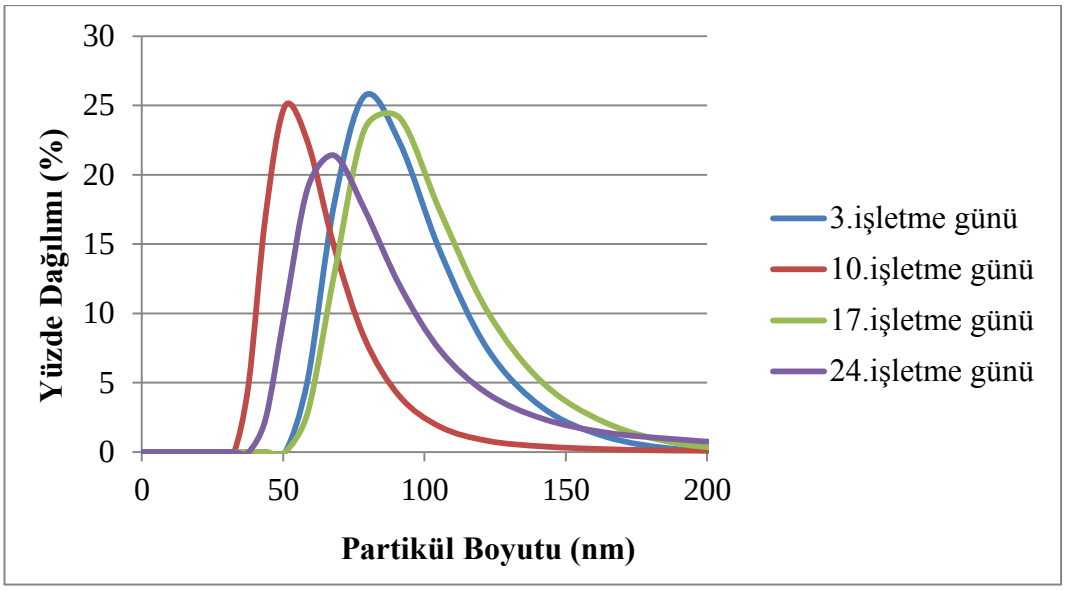


Şekil 4.17 : Titreşimsiz modülün işletildiği süreçte çamurda ölçülen PSD sonuçları.

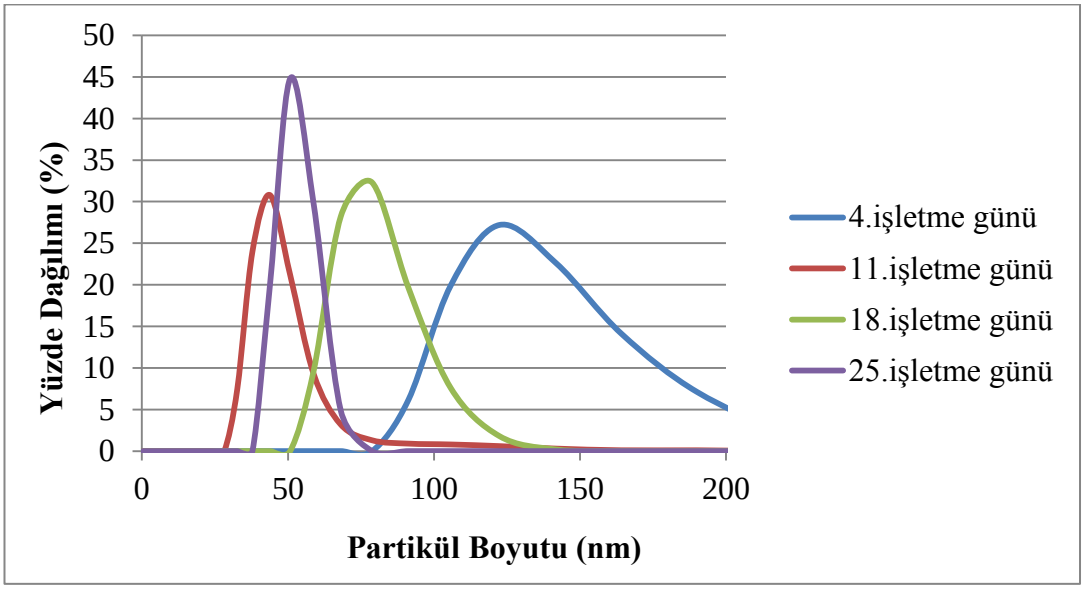


Şekil 4.18 : Manyetik titreşimli (150 Hz) modülün işletildiği süreçte çamurda ölçülen PSD sonuçları.

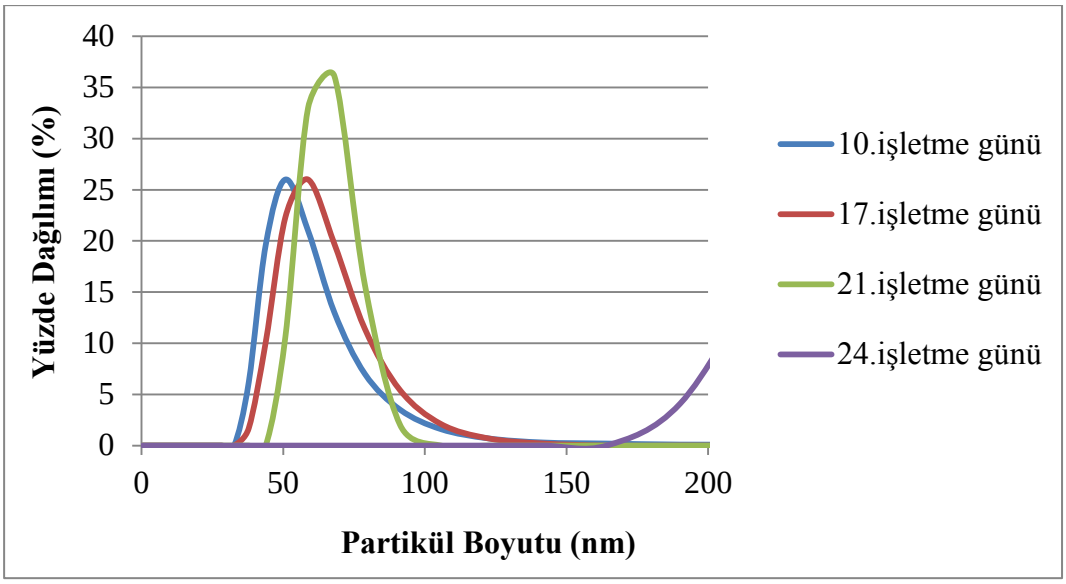
Manyetik (30 - 150 Hz) ve titreşimsiz modüllerin süzüntü numunesinde PSD sonuçları sırasıyla Şekil 4.19-4.21'de verilmektedir. Deney süresince partikül boyutu dağılımı incelendiğinde manyetik titreşimli (30 Hz) modülün süzüntü numunesinde ortalama 430±283 nm, titreşimsiz modülün süzüntü numunesinde ortalama 464±396 nm ve manyetik titreşimli (150 Hz) modülün süzüntü numunesinde ortalama 1047±574 nm olduğu görülmektedir.



Şekil 4.19 : Manyetik titreşimli (30 Hz) modülün süzüntü akımında ölçülen PSD sonuçları.



Şekil 4.20 : Titreşimsiz modülün süzüntü akımında ölçülen PSD sonuçları.



Şekil 4.21 : Manyetik titreşimli (150 Hz) modülün süzüntü akımında ölçülen PSD sonuçları.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Manyetik titreşim uygulaması ile işletilen ve ham evsel atıksu ile beslenen pilot ölçekli MBR sisteminde ilk olarak 30 Hz frekans denenmiş, son olarak ise 150 Hz frekans değeri denenmiştir. Aynı sistem frekansın tıkanma kontrolü üzerine etkisinin anlaşılabilmesi için titreşimsiz olarak da işletilmiştir. Bu üç çalışma sonucunda 150 Hz'de işletilen MBR sisteminde TMP artışının diğer sistemlere göre daha yavaş gerçekleştiği, en az tıkanma hızının bu çalışmada olduğu görülmüştür. Ayrıca ancak kimyasal yıkama ile giderilebilen por tıkanmasına bağlı membran direnç yüzdesinin 150 Hz'te işletilen manyetik titreşimli sistemde en düşük oranda olduğu görülmüştür. Bu sonuç da TMP artış hızının diğer sistemlere göre neden daha yavaş olduğunun bir göstergesi niteliği taşımaktadır. Çalışma sonucunda uzun dönemli çalışmalarda MBR sistemine manyetik titreşimli sistemlerin dahil edilmesi ile tıkanma potansiyelinin düşürülebileceği sonucuna varılmıştır.

Çalışmada asıl amaç manyetik titreşimin filtrasyon performansı üzerine etkilerini incelemek olsa da ek olarak arıtma performansı üzerine etkileri de incelenmiştir. Manyetik titreşimli ve titreşimsiz olarak işletilen MBR sistemleri, çeşitli parametreler açısından haftalık olarak izlenmiştir. Arıtma performansı açısından bu üç sistem birbirine çok yakın sonuçlar vermiştir. 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. Ancak 150 Hz frekans değerinde manyetik titreşimle işletilen sistemin bulanıklık ve AKM konsantrasyonunda diğer sistemlere göre bir artış gözlemlenmiştir. Kek tabakası TMP değerini arttırıcı yönde etki yapmasına rağmen kirletici maddelerin tutulumunu daha etkin bir şekilde gerçekleştirip arıtma verimini arttırdığı için belirli bir düzeye kadar istenen bir mekanizmadır. Frekans değerinin artmasıyla por tıkanması azaldığı gibi kek oluşum hızının da azaldığı, kek tabakasının optimum düzeye henüz ulaşamadığı için arıtma performansının diğer sistemlere göre azaldığı düşünülmektedir.

Sonuç olarak, gerçekleştirilen pilot ölçekli çalışmada MBR sisteminde manyetik titreşim uygulamasının tıkanmayı geciktirici yönde etki yaptığı ortaya konmuştur. Bu sonuca dayanarak manyetik titreşimin daha farklı frekans ve membran çeşitleriyle denenmesi birer öneri olarak sunulabilir. Bir diğer öneri olarak, yapılacak çalışmalarda manyetik titreşim uygulamasının maliyet üzerilerine etkileri araştırılabilir. Membran teknolojisinin gelişmesinin önündeki en büyük engel olan tıkanma, yenilikçi titreşim uygulamaları ile azaltılabilecektir. Bu sistemlerin büyük ölçekli atıksu arıtma tesislerine entegre edilmesiyle membran teknolojisinin hem ülkemizde hem de dünyada kullanımının artacağı öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

Agtas, M., Ersahin, M.E., Ozgun, H., Koyuncu, I. (2016). Impact of module design on the performance of membrane bioreactors treating municipal wastewater. *Separation Science and Technology*, **51(5)**, 836-844.

APHA (2005). Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association, Washington, USA.

Arabi, S., Nakhla, G., (2009). Impact of magnesium on membrane fouling in membrane bioreactors. *Separation and Purification Technology*, **67**, 319-325.

Arnal, J.M., García-Fayos, B., Sancho, M. (t.y.). Membrane Cleaning. Instituto de Seguridad Industrial, Universitat Politècnica de València, Spain.

AWWA (2005). Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. The The American Water Works Association, Colorado, USA.

Bartlett, M., Bird, M.R., Howell, J.A. (1995). An experimental study for the development of a qualitative membrane cleaning model. *J. Mem. Sci*., **105**, 147–157.

Beier, S.P. 2008. Dynamic microfiltration critical flux and macromolecular transmission (Ph.D. Thesis). Technical University of Denmark.

Bilad, M.R., Mezohegyi, G., Declerck, P., Vankelecom, I.F.J. (2012). Novel magnetically induced membrane vibration (MMV) for fouling control in membrane bioreactors. *Water Research*, **46**, 63-72.

Bird, M.R., Bartlett, M., (2002). Measuring and modeling flux recovery during the chemical cleaning of MF membranes for the processing of whey protein concentrate. *Journal of Food Engineering*, **53 (2)**, 143-152.

Cho, B.D., Fane, A.G. (2002). Fouling Transients in Nominally Sub-critical Flux Operation of a Membrane Bioreactor. *Journal of Membrane Science*, **209**, 391-403.

Drews, A. (2010). Membrane fouling in membrane bioreactors-characterisation, contradictions, cause and cures. *Journal of Membrane Science*, **363**, 1-28.

Eren, B. (2006). Boyalı tekstil endüstrisi atıksuyu arıtımında kullanılan nanofiltrasyon membran proses veriminin yapay sinir ağları (YSA) ile analizi (yüksek lisans tezi). Sakarya Üniversitesi, Türkiye.

Field, R.W., Wu, D., Howell, J.A., Gupta, B.B. (1995). Critical flux concept for microfiltration fouling. *Journal of Membrane Science*, **100**, 259-272.

Gander, M., Jefferson, B., & Judd, S. (2000). Aerobic MBRs for domestic wastewater treatment: A review with cost considerations. *Separation and Purification Technology*, **18(2)**, 119-130.

Geilvoet, S.P., (2010). The delft filtration characterisation method-assessing membrane bioreactor activated sludge filterability (Ph.D. Thesis). Delft, Netherlands.

Germain, E., Stephenson, T., Pearce, P. (2005). Biomass characteristics and membrane aeretion: Toward a better understanding of membrane fouling in submerged membrane bioreactors (MBRs). *Biotechnology and Bioengineering*, **Volume 90, Issue 3**, 316–322.

GIA, Global Industrial Analysts Inc. (2013). Global membrane bioreactors market to reach US$888 million by 2017. http://www.prweb.com/releases/membrane_bioreactors/MBR/prweb8973361.htm, Accessed 16.11.16.

Guo, W., Ngo, H.H., Li, J. (2012). "A mini-review on membrane fouling", *Bioresource Technology*, **122**, 27-34.

Guo, W.S., Vigneswaran, S., Ngo, H.H., Van Nguyen, T.B., Ben Aim, R. (2006). Influence of bioreaction on a long-term operation of a submerged membrane adsorption hybrid system. *Desalination*, **191(1–3)**, 92–99.

Gürel, L., Büyükgüngör, H. (2011). Atıksu arıtımında membran biyoreaktörler. *İTÜ Dergisi.* Cilt:21. Sayı:1.

Jefferson, B., Laine, A.L., Judd, S. J., Stephenson, T. (2000). Membrane bioreactors and their role in wastewater reuse. *Water Science and Technology*, 41, 197–204.

Jiang, T. (2007). Characterization and modelling of soluble microbial products in membrane bioreactors (Ph. D. Thesis). Ghent University, Belgium.

Judd, S. (2010) The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment, pp. 67-68, Elsevier, Oxford, UK.

Judd, S. (2011). The MBR book: Principles and applications of membrane bioreactors for water and wastewater treatment. Cranfield University, *Elsevier*, Oxford, UK..

Judd, S.J. (2001). A Review of Fouling of Membrane Bioreactors in Sewage Treatment, School of Water Sciences, Cranfield University, UK.

Judd, S.J. (2006). The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment. *Elsevier,* Oxford, UK.

Kaushik, N. (2008). Membrane Separation Processes, *PHI Learning; 1 edition*.

Kitiş, M., Köseoğlu, H., Gül, N., Ekinci, F.Y. (2003). Atıksu Arıtımı Ve Geri Kazanımında Membran Bioreaktörler, *V. Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi*.

Kola, A., Ye, Y., Ho, A., Le-Clech, P., Chen, V. (2012). Application of low frequency transverse vibration on fouling limitation in submerged hollow fibre membranes. *Journal of Membrane Science*, **409**, 54-65.

Kola, A., Ye, Y., Le-Clech, P., Chen, V. (2014).Transverse vibration as novel membrane fouling mitigation strategy in anaerobic membrane bioreactor applications. *Journal of Membrane Science*, **455**, 320–329.

Koyuncu, İ., Şengür, R., Türken, T., Güçlü, S., Paşaoğlu, M.E. (2015). Advances in water treatment by microfiltration, ultrafiltration,and nanofiltration. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

Le Clech, P., Chen, V., Fane, T.A.G. (2006). Review fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment. *Journal of Membrane Science,* **284**, 17–53.

Le Clech, P., Jefferson B. and Judd S.J. (2003a). Impact of aeration, solids concentration and membrane characteristics on the hydraulic performance of a membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science*, **218**, 117-129.

Lesjean, B., & Huisjeslow, E. H. 2008. Survey of the European MBR market: Trends and perspectives. *Desalination*, **231,** 71-81.

Li, Q., Elimelech, M., 2004. Organic fouling and chemical cleaning of nanofiltration membranes: measurements and mechanisms. *Environmental Science and Technology*, **38 (17),** 4683–4693.

Li, T., Law, A.W.K., Cetin, M., A.K., Fane, A.G. 2013. Fouling control of submerged hollow fibre membranes by vibrations. *Journal of Membrane Science*, **427**, 230-239.

Li, T., Law, A.W.K., Jiang, Y., Harijanto, A.K., Fane, A.G. 2016. Fouling control of submerged hollow fibre membrane bioreactor with transverse vibration. *Journal of Membrane Science*, **505**, 216-224.

Lim, A.L., Bai, R. (2003). Membrane fouling and cleaning in microfiltration of activated sludge wastewater. *Journal of Membrane Science*, **216**, 279-290.

Low S.C. , Cheong K.T., Lim H.L., 2009. A vibration membrane bioreactor. *Desalination and Water Treatment*. 5:1-3, 42-47, DOI: 10.5004/dwt.2009.563

Low S.C. , Juan , H.H., Siong, L.K. 2005. A combined VSEP and membrane bioreactor system, *Desalination*, **183**, 353-362.

Malamis, S., Katsou, E., Chazilias, D., Loizidou, M. (2009b). Investigation of Cr(III) removal from wastewater with the use of MBR combined with low-cost additives. *Journal of Membrane Science*, **333**, 12-19.

Marrot, B., Martinez, A.B., Moulin, P., N. Roche, N. 2004. Industrial wastewater treatment in a membrane bioreactor: a review. *Environmental Progress*, 23, 59-68.

Membrane Fouling Considerations. (2001). Hydranautics high performance membrane products technical paper.

Membrane Technology and Engineering for Water Purification, 2014. Application, System Design and Operation, 2nd Edition, Revised by Singh, R., Elsevier, Oxford, UK.

Merz, C., Scheumann, R., El Hamouri, B., Kraume, M. 2007. Membrane bioreactor technology for the treatment of greywater from a sports and leisure club. *Desalination*, **215**, 37-43.

Metcalf & Eddy, 2003. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse, Fourth Edition, Revised by Tchobanoglous, G., Burton, F. L., Stensel, H. D., McGraw- *Hill Companies Inc.. New York, USA.*

Munz, G., Gori, R., Mori, G., Lubello, C. (2007). Powdered activated carbon and membrane bioreactors (MBRPAC) for tannery wastewater treatment: long term effect on biological and filtration process performances. *Desalination*, **207 (1–3)**, 349–360.

Ngo, H.H., Guo, W. (2009). Membrane fouling control and enhanced phosphorus removal in an aerated submerged membrane bioreactor using modified green bioflocculant. *Bioresource Technology*, **100**, 4289-4291.

Nurra, C., Clavero, E., Salvadó, J. Torras, C. (2014). Vibrating membrane filtration as improved technology for microalgae dewatering. *Bioresource Technology*, **157**, 247–253.

Remy, M., Van der Marel, P., Zwijnenburg, A., Rulkens, W., Temmink, H. (2009). Low dose powdered activated carbon addition at high sludge retention times to reduce fouling in membrane bioreactors. *Water Research*, **43**, 345-350.

Sagbo, O., Sun, Y., Hao, A., Gu, P., (2008). Effect of PAC addition on MBR process for drinking water treatment. *Separation and Purification Technology*, **58**, 320–327.

Schafer, A.I., Andritsos, N., Karabelas, A.J., Hoek, E.M.V., Schneider, R., Nystrom, M. (2004). Fouling in nanofiltration. in: A.J. Schafer, A.G. Fane, T.D. Waite (Eds.), *Nanofiltration, Elsevier, Oxford, UK*. 169–240.

Shimizu, Y., Okuno, Y., Uryu, K., Ohtsubo, S., & Watanabe, A. (1996). Filtration characteristics of hollow fiber microfiltration membranes used in MBR for domestic wastewater treatment. *Water Research*, **30(10)**, 2385-2392.

Stephenson, T., Judd, S., Jefferson, B., Brindle, K. (2000). Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment (2nd ed.), *IWA*.

Tomaszewska, M., Orecki, A., Karakulski, K. (2005). Treatment of bilge water using a combination of ultrafiltration and reverse osmosis. *Desalination*, **185,** 203–212.

Türken, T. (2013). Gümüş Nanopartiküller İle Kompozit İnce Boşluklu Fiber (Hollow Fıber) Membran Üretimi, Karakterizasyonu ve Uygulaması (yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

Wu, J., Chen, F., Huang, X., Geng, W., Wen, X. (2006). Using inorganic coagulants to control membrane fouling in a submerged membrane bioreactor. *Desalination*, **197**, 124-136.

Yamamoto, K., Hissa, M., Mahmood, T., & Matsuo, T., (1989). Direct solid liquid separation using hollow fibre membrane in an activated sludge aeration tank. *Water Science & Technology*, **21,** 43-54.

Yiğit, N.Ö., (2007). Membran biyoreaktörü ile (MBR) evsel atıksu arıtımı (doktora tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye.

Yoon, S.H., Collins, J.H., Musale, D., Sundararajan, S., Tsai, S.P., Hallsby, G.A., Kong, J.F., Koppes, J., Cachia, P. (2005). Effects of flux enhancing polymer on the characteristics of sludge in membrane bioreactor process. *Water Science and Technology*, **51**, 151-157.

Zhang, J., Chua, H.C., Zhou, J., Fane A.G. (2006). Factors affecting the membrane performance in submerged MBR. *Journal of Membrane Science,* **284**, 54-66.

Url-1:<http://www.beilsteinjournals.org/bjoc/single/articleFullText.htm?publicI>, erişim tarihi: 16.11.2016

Url-2:<http://www.porexfiltration.com/espanol/downloads/korea-wafer-backgrinding/>, erişim tarihi: 20.11.2016

Url-3:<http://www.sswm.info/print/2858?tid=1801> , erişim tarihi: 12.11.2016

Url-4:<http://oilindo.com/new-logic-develops-vsep-for-chemical-processing-separations/>, erişim tarihi: 17.11.2016

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Nilüfer TİROL

Doğum Tarihi ve Yeri : 28.03.1992 Konak / İZMİR

E-posta : tirol@itu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü

DENEYİM:

- TÜBİTAK 113Y341 Kodlu "Membran Biyoreaktör (MBR)'lerde Tıkanma Kontrolü için Yenilikçi Membran Modülü Geliştirilmesi"

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Tirol N., Kaya R., Özgün H., Erşahin M.E., Arıkan O.A., Yiğit N.Ö., Kitiş M., Koyuncu İ., 2016. Application of Pilot-Scale Magnetically Induced MBR Vibration System for Treatment of Municipal Wastewater. *Workshop - MBR for The Next Generation*, May 10, 2016 MEMTEK İstanbul, Turkey.