

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**TUZLULUK, SÜLFAT VE KURŞUN İÇEREN KENTSEL ATIKSULARIN  
MEMBRAN BİYOREAKTÖRLERDE ARITIMINDA QUORUM QUENCHING  
MEKANİZMASININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Rabia ARDIÇ**

**Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Çevre Bilimleri, Mühendisliği ve Yönetimi Programı**

**TEMMUZ 2024**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**TUZLULUK, SÜLFAT VE KURŞUN İÇEREN KENTSEL ATIKSULARIN  
MEMBRAN BİYOREAKTÖRLERDE ARITIMINDA QUORUM QUENCHING  
MEKANİZMASININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Rabia ARDIÇ  
(501201726)**

**Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Çevre Bilimleri, Mühendisliği ve Yönetimi Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. İsmail KOYUNCU**

**TEMMUZ 2024**



**ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL**

**INVESTIGATION OF QUORUM QUENCHING MECHANISM IN  
TREATMENT OF MUNICIPAL WASTEWATER CONTAINING SALINITY,  
SULPHATE AND LEAD IN MEMBRANE BIOREACTORS**

**MSc THESIS**

**Rabia ARDIÇ  
(501201726)**

**Department of Environmental Engineering**

**Environmental Science Engineering and Management Programme**

**Thesis Advisor: Prof. Dr. İsmail KOYUNCU**

**JULY 2024**



İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501201726 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Rabia ARDIÇ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "TUZLULUK, SÜLFAT VE KURŞUN İÇEREN KENTSEL ATIKSULARIN MEMBRAN BİYOREAKTÖRLERDE ARITIMINDA QUORUM QUENCHING MEKANİZMASININ İNCELENMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :**      **Prof. Dr. İsmail KOYUNCU** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :**      **Prof. Dr. Halil HASAR** .....  
Fırat Üniversitesi

**Doç. Dr. Börte KÖSE MUTLU** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi: 24 Mayıs 2024**  
**Savunma Tarihi: 08 Temmuz 2024**





*Aileme ve Ahmet'e,*



## ÖNSÖZ

Tez çalışmam kapsamında Prof. Dr. Dinçer Topacık Ulusal Membran Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi'nin tüm imkanlarını kullanmama imkan sağlayan, tez danışmanım Sayın Prof. Dr. İsmail KOYUNCU'ya teşekkürü borç bilirim. Projesinde çalışmama olanak sağlayan, tez çalışmamın her aşamasında akıl danıştığım ve çalışma disiplinini örnek aldığım Sayın Doç. Dr. Börte Köse MUTLU'ya, tez çalışmamın büyük bir kısmında birlikte çalıştığım kıymetli meslektaşım Semanur SOYLU'ya çok teşekkür ederim. MEMTEK bünyesinde çalışan tüm hocalarım ve çalışma arkadaşlarıma bana ve çalışmalarıma sağladıkları katkılardan dolayı teşekkür ederim.

Tez çalışmam TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu) tarafından 121Y199 nolu proje kapsamında mali olarak desteklenmiştir. Maddi destekleri için TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 44246 proje numarası ile mali olarak desteklenmiştir. Maddi destekleri için İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederim.

Son olarak beni her konuda destekleyen, aldığım her kararda yanımda olan aileme ve Ahmet DEMİRBILEKLİ'ye sonsuz teşekkür ederim.

Mayıs 2024

Rabia Ardiç  
(Çevre Mühendisi)



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ .....	ix
İÇİNDEKİLER .....	xi
KISALTMALAR.....	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET .....	xix
SUMMARY .....	xxi
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı .....	1
1.2 Tezin Kapsamı.....	3
<b>2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....</b>	<b>5</b>
2.1 Membran Teknolojileri.....	5
2.2 Membranların Sınıflandırılması .....	6
2.2.1 Gözenek büyüklüğüne göre membranların sınıflandırılması .....	7
2.2.2 Por yapısı ve morfolojisine göre membranların sınıflandırılması.....	7
2.2.3 Kullanılan malzemeye göre membranların sınıflandırılması.....	8
2.2.4 Sistem konfigürasyonlarına göre membranların sınıflandırılması.....	9
2.3 Membran Prosesleri.....	10
2.3.1 Ters Osmoz .....	12
2.3.2 Ultrafiltrasyon .....	12
2.3.3 Mikrofiltrasyon .....	12
2.3.4 Nanofiltrasyon.....	12
2.4 Membran Biyoreaktör Sistemleri .....	12
2.4.1 Membran biyoreaktörlerde membran kirlenmesi.....	15
2.4.2 Membran kirliliğinin giderilmesi .....	18
2.5 Quorum Sensing .....	19
2.6 Quorum Quenching Mekanizması.....	21
2.6.1 Biyolojik kirlilik kontrolü için QQ mekanizması .....	24
2.6.1.1 Enzimatik QQ mekanizması .....	24
2.6.1.2 Bakteriyel QQ mekanizması .....	25
2.6.1.3 Fungal QQ mekanizması.....	27
2.6.1.4 Fotokatalitik QQ mekanizması .....	28
2.6.2 QQ medya tasarımları ve üretimi .....	28
<b>3. MATERYAL VE METOT .....</b>	<b>31</b>
3.1 Membran Biyoreaktör .....	31
3.1.1 MBR sisteminde kullanılan hollow fiber membran modülleri .....	35
3.1.2 Besleme atıksuyununun bileşenleri ve aktif çamur karakterizasyonu .....	37
3.2 QQ Boncukların ve Hollow Fiber Membran Modüllerinin MBR'lere Atılması .....	38
3.3 MBR İşletme Parametreleri.....	39

3.3.1 Askıda katı madde- uçucu askıda katı madde (AKM- UAKM).....	40
3.3.2 Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) .....	41
3.3.3 Toplam organik karbon- toplam azot (TOK- TN) .....	43
3.3.4 İletkenlik.....	44
3.3.5 Sülfat tayini .....	45
3.3.6 Kurşun tayini .....	46
3.3.7 Akı ve TMP profillerinin izlenmesi .....	46
3.3.8 Tür analizi/ metagenomik analiz .....	46
<b>4. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI .....</b>	<b>49</b>
4.1 QQ-MBR ve Kontrol-MBR İşletmesi Sonuçları .....	50
4.1.1 Faz I- tuzluluk .....	50
4.1.1.1 İşletme süresince tuzluluk değişimi .....	50
4.1.1.2 İşletme boyunca UAKM/AKM oranı değişimi .....	51
4.1.1.3 Organik madde giderim verimi .....	52
4.1.1.4 TMP profili değişimi .....	53
4.1.2 Faz II- sülfat .....	57
4.1.2.1 İşletme süresince sülfat değişimi.....	57
4.1.2.2 İşletme boyunca UAKM/AKM oranı değişimi .....	58
4.1.2.3 Organik madde giderim verimi .....	59
4.1.2.4 TMP profili değişimi .....	60
4.1.3 Faz III- kurşun.....	64
4.1.3.1 İşletme süresince kurşun değişimi.....	64
4.1.3.2 İşletme boyunca UAKM/AKM oranı değişimi .....	65
4.1.3.3 Organik madde giderim verimi .....	66
4.1.3.4 TMP profili değişimi .....	66
4.1.4 Faz 0- yalın.....	71
4.1.4.1 İşletme boyunca UAKM/AKM oranı değişimi .....	71
4.1.4.2 TMP profili değişimi .....	72
4.1.5 Faz II, III ve 0'ın KOİ giderim verimi açısından kıyaslanması .....	75
4.2 Kontrol-MBR ve QQ-MBR Mikrobiyal Komünite Analizi Sonuçları.....	76
4.2.1 Faz I- tuzluluk ile işletme tür analizi sonuçları .....	78
4.2.2 Faz II- sülfat ile işletme tür analizi sonuçları .....	80
4.2.3 Faz III- kurşun ile işletme tür analizi sonuçları .....	82
4.2.4 Faz 0- yalın işletme tür analizi sonuçları .....	85
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>89</b>
<b>REFERANSLAR.....</b>	<b>91</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>97</b>

## KISALTMALAR

<b>AHL</b>	: N-açıl homoserinlakton
<b>AI</b>	: Otoindükleyici
<b>AIP</b>	: Otoindüktör peptid
<b>AKM</b>	: Askıda katı madde
<b>CA</b>	: Selüloz asetat
<b>ÇO</b>	: Çözünmüş oksijen
<b>DAS</b>	: Demir amonyum sülfat
<b>DPD</b>	: Dihidroksi-2,3-pentandion
<b>EPS</b>	: Hücre dışı polimerik madde (Extracellular polymeric substances)
<b>HF</b>	: Hollowfiber
<b>HSL</b>	: Homoserin lakton halkası
<b>IC</b>	: İyon kromtgrafisi
<b>ICP-OES</b>	: İndüktif eşleşmiş argon plazma- optik emisyon spektrometresi
<b>iMBR</b>	: Harici membran biyoreaktör
<b>MBR</b>	: Membran biyoreaktör
<b>MF</b>	: Mikrofiltrasyon
<b>KOİ</b>	: Kimyasal oksijen ihtiyacı
<b>NF</b>	: Nanofiltrasyon
<b>QQ</b>	: Yeter sayı etkisini azaltma
<b>QS</b>	: Yeter sayı etkisi
<b>QSM</b>	: Yeter sayı etkisi algılama molekülleri
<b>PA</b>	: Poliamid
<b>PAN</b>	: Poliakrilonitril
<b>PEI</b>	: Polieterimid
<b>PES</b>	: Polietersülfon
<b>PPSU</b>	: Polifenilsülfon
<b>PS</b>	: Polisülfon
<b>PVDF</b>	: Poliviniliden florür
<b>ROS</b>	: Reaktif oksijen türleri
<b>SMP</b>	: Çözünebilir mikrobiyal ürün (Soluble microbial products)

<b>sMBR</b>	: Batık membran biyoreaktör
<b>TMP</b>	: Transmembran basıncı
<b>TN</b>	: Toplam azot
<b>TO</b>	: Ters osmoz
<b>TOC-VCPN</b>	: Toplam azot- toplam karbon analizörü
<b>TOK</b>	: Toplam organik karbon
<b>UAKM</b>	: Uçucu askıda katı madde
<b>UF</b>	: Ultrafiltrasyon



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 2.1: Membran biyoreaktörlerin avantaj ve dezavantajları .....	15
Çizelge 2.2: Aktif çamurdan izole edilen QQ mikroorganizmaları .....	25
Çizelge 3.1: MBR sistemi özellikleri.....	32
Çizelge 3.2: Membran modül özellikleri. ....	36
Çizelge 3.3: Sentetik atıksu besleme reçetesi. ....	37
Çizelge 3.4: MBR işletiminde ölçülen parametreler, ölçüm noktaları ve sıklıkları. .	40
Çizelge 3.5: PBS reçetesi.....	47
Çizelge 4.1: Sentetik atıksu karakterizasyonu. ....	49
Çizelge 4.2: MBR işletme koşulları.....	49
Çizelge 4.3: Tür analizi numune açıklamaları. ....	76



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1: Membranların gözenek boyutuna, yapısına, kullanılan malzemelere ve sistem konfigürasyonuna göre sınıflandırılması .....	6
Şekil 2.2: Por yapısı ve morfolojisine göre membranlar. ....	8
Şekil 2.3: Düz plaka (a) ve içi boş fiber (b) membran modülleri. ....	10
Şekil 2.4: Gözenek çaplarına göre membranlar. ....	11
Şekil 2.5: Atıksuyun yeniden kullanımı için tipik proses konfigürasyonu. ....	13
Şekil 2.6: Batık ve harici MBR sistemleri. ....	14
Şekil 2.7: Farklı kirlenme süreçlerini gösteren şematik diyagram - a) gözenek tıkanması, b) jel tabakası oluşumu, c) kek tabakası oluşumu. ....	15
Şekil 2.8: Giderilebilir, giderilemez ve geri dönüşü olmayan kirlenme. ....	17
Şekil 2.9: MBR'lerde kirlenme gelişiminin süreç modellemesi. ....	17
Şekil 2.10: Membran temizlik yöntemlerinin sınıflandırılması. ....	19
Şekil 2.11: QQ mekanizmaları. ....	22
Şekil 2.12: Biyolojik kirlilik kontrolü için QS sinyal yolları ve olası QQ stratejileri. ....	24
Şekil 2.13: AHL'lerin mikrobiyal QQ'su ve MBR'lerde AI-2 sinyal molekülleri. ....	27
Şekil 2.14: QQ MBR'ler için geliştirilmiş ve test edilmiş QQ ortamının türleri ve yapıları. ....	29
Şekil 3.1: MBR sistemi şematik gösterimi. ....	32
Şekil 3.2: Kontrol-MBR'ye ait besleme ve süzöntü pompaları. ....	33
Şekil 3.3: QQ-MBR ve Kontrol-MBR reaktörleri. ....	33
Şekil 3.4: TMP ölçer. ....	34
Şekil 3.5: Multiparametre ölçüm cihazı ve çözünmüş oksijen probu. ....	35
Şekil 3.6: pH metre ölçüm cihazı ve probu. ....	35
Şekil 3.7: Hollow fiber membran. ....	36
Şekil 3.8: Hollow fiber membran modülü. ....	37
Şekil 3.9: Kontrol ve QQ boncuklar. ....	39
Şekil 3.10: Kontrol/ QQ boncukların reaktörlere eklenmesi. ....	39
Şekil 3.11: TOK- TN ölçüm cihazı. ....	43
Şekil 3.12: TOK-TN cihazı için numune hazırlama. ....	44
Şekil 3.13: Multiparametre ölçüm cihazı ve iletkenlik ölçüm probu. ....	45
Şekil 3.14: İyon kromatografisi. ....	45
Şekil 3.15: İndüktif Eşleşmiş Argon Plazma-Optik Emisyon Spektrometresi. ....	46
Şekil 3.16: Tür analizi için tank içi alınan numuneler. ....	48
Şekil 4.1: Faz-I tuzluluk işletmesindeki tuzluluk konsantrasyonları. ....	51
Şekil 4.2: Faz I- tuzluluk UAKM/AKM oranı. ....	52
Şekil 4.3: Faz I- tuzluluk organik madde giderim verimi. ....	52
Şekil 4.4: Faz I-tuzluluk çalışmasında Kontrol-MBR ve QQ-MBR işletmelerinden elde edilen TMP profilleri. ....	54
Şekil 4.5: Faz I, kimyasal yıkama öncesi QQ-MBR (sol) ve Kontrol-MBR (sağ) membran modülleri. ....	55

<b>Şekil 4.6:</b> Faz I, kimyasal yıkama sonrası Kontrol-MBR ve QQ-MBR membran modülleri. ....	<b>55</b>
<b>Şekil 4.7:</b> Faz I çalışması QQ etkisi. ....	<b>57</b>
<b>Şekil 4.8:</b> Faz II-sülfat işletmesindeki sülfat konsantrasyonları. ....	<b>58</b>
<b>Şekil 4.9:</b> Faz II-sülfat UAKM/AKM oranı. ....	<b>59</b>
<b>Şekil 4.10:</b> Faz II- sülfat organik madde giderim verimi. ....	<b>60</b>
<b>Şekil 4.11:</b> Faz II-sülfat çalışmasında Kontrol-MBR ve QQ-MBR işletmelerinden elde edilen TMP profilleri. ....	<b>61</b>
<b>Şekil 4.12:</b> Faz II, işletme sonrasında QQ-MBR membran modülü. ....	<b>62</b>
<b>Şekil 4.13:</b> Faz II, işletme sonrasında Kontrol-MBR membran modülü. ....	<b>62</b>
<b>Şekil 4.14:</b> Faz II çalışması QQ etkisi. ....	<b>63</b>
<b>Şekil 4.15:</b> Faz III- kurşun işletmesindeki kurşun konsantrasyonları. ....	<b>64</b>
<b>Şekil 4.16:</b> Faz III- kurşun UAKM/AKM oranı. ....	<b>65</b>
<b>Şekil 4.17:</b> Faz III- kurşun organik madde giderim verimi. ....	<b>66</b>
<b>Şekil 4.18:</b> Faz III-kurşun çalışmasında Kontrol-MBR ve QQ-MBR işletmelerinden elde edilen TMP profilleri. ....	<b>67</b>
<b>Şekil 4.19:</b> Faz III, kimyasal yıkama öncesi Kontrol-MBR ve QQ-MBR membran modülleri. ....	<b>68</b>
<b>Şekil 4.20:</b> Faz III, kimyasal yıkama sonrası Kontrol-MBR ve QQ-MBR membran modülleri. ....	<b>69</b>
<b>Şekil 4.21:</b> Faz III çalışması QQ etkisi. ....	<b>70</b>
<b>Şekil 4.22:</b> Faz 0- yalın UAKM/AKM oranı. ....	<b>71</b>
<b>Şekil 4.23:</b> Faz 0- yalın çalışmasında Kontrol-MBR ve QQ-MBR işletmelerinden elde edilen TMP profilleri. ....	<b>72</b>
<b>Şekil 4.24:</b> Faz 0, kimyasal yıkama öncesi Kontrol-MBR (sol) ve QQ-MBR (sağ) membran modülleri. ....	<b>73</b>
<b>Şekil 4.25:</b> Faz 0, kimyasal yıkama sonrası Kontrol-MBR ve QQ-MBR membran modülleri. ....	<b>73</b>
<b>Şekil 4.26:</b> Faz 0 çalışması QQ etkisi. ....	<b>74</b>
<b>Şekil 4.27:</b> Faz II, Faz III ve Faz 0 çalışmaları KOİ giderim verimleri. ....	<b>75</b>
<b>Şekil 4.28:</b> Phylum taksanomik seviyesinde mikrobiyal değişim. ....	<b>77</b>
<b>Şekil 4.29:</b> Faz I çalışması aklimasyon aşaması, tank içi mikrobiyal komünite dağılımı. ....	<b>78</b>
<b>Şekil 4.30:</b> Faz I çalışması işletme başı, tank içi mikrobiyal komünite dağılımı. ....	<b>79</b>
<b>Şekil 4.31:</b> Faz I çalışması işletme sonu, tank içi mikrobiyal komünite dağılımı. ....	<b>80</b>
<b>Şekil 4.32:</b> Faz II çalışması aklimasyon aşaması, tank içi mikrobiyal komünite dağılımı. ....	<b>81</b>
<b>Şekil 4.33:</b> Faz II çalışması işletme başı, tank içi mikrobiyal komünite dağılımı. ....	<b>81</b>
<b>Şekil 4.34:</b> Faz II çalışması işletme sonu, tank içi mikrobiyal komünite dağılımı. ....	<b>82</b>
<b>Şekil 4.35:</b> Faz III çalışması aklimasyon aşaması, tank içi mikrobiyal komünite dağılımı. ....	<b>83</b>
<b>Şekil 4.36:</b> Faz III çalışması işletme başı, tank içi mikrobiyal komünite dağılımı. ....	<b>84</b>
<b>Şekil 4.37:</b> Faz III çalışması işletme sonu, tank içi mikrobiyal komünite dağılımı. ....	<b>85</b>
<b>Şekil 4.38:</b> Faz 0 çalışması aklimasyon aşaması, tank içi mikrobiyal komünite dağılımı. ....	<b>86</b>
<b>Şekil 4.39:</b> Faz 0 tank içi mikrobiyal komünite dağılımı. ....	<b>87</b>

# TUZZLULUK, SÜLFAT VE KURŞUN İÇEREN KENTSEL ATIKSULARIN MEMBRAN BİYOREAKTÖRLERDE ARITIMINDA QUORUM QUENCHING MEKANİZMASININ İNCELENMESİ

## ÖZET

Hızla artan dünya nüfusu ve gelişen sanayi, doğal kaynakların orantısız bir şekilde tüketilmesine yol açmakta ve bu durum, iklim değışikliği ve su kıtlığı gibi önemli çevresel sorunları beraberinde getirmektedir. Artan su kıtlığına sürdürülebilir çözümler arayışı kapsamında öne çıkan membran biyoreaktörler (MBR), atıksuların membran sistemleriyle arıtılarak sulama amaçlı geri kazanımını sağlamaktadır. MBR sistemleri, umut verici bir çözüm sunmalarına rağmen, tıkanmadan kaynaklanan sınırlamalara sahiptir. Bu tıkanmaların büyük çoğunluğu, membran yüzeyinde biyokütlenin tutunarak birikmesi sonucu oluşan biyokirlenmeden kaynaklanmaktadır.

Mikroorganizmaların buldukları ortamlarda birbirleriyle iletişim kurarak yeterli sayıya ulaştıklarında topluluk davranışları sergilemeleri bilim dünyasının keşfettiği bir gerçektir. Biyofilm oluşumu, mikroorganizmaların en temel topluluk davranışlarından biridir. Bu organizmalar, bir araya gelerek dış etkilere karşı korunma ve yaşam döngülerini sürdürebilme amacıyla "Quorum Sensing" (Yetersayı etkisi) mekanizmasını kullanırlar.

Ekolojik ortamlar içerisinde, iletişim sinyalleri üretebilen türler olduğu gibi, bu sinyalleri besin kaynağı olarak kullanabilen türler de mevcuttur. Bu türler, sinyal moleküllerini besin olarak kullanırken, bir araya gelmeye çalışan diğer türlerin iletişim süreçlerini de kesintiye uğratmaktadır. Bu bakterilerin mekanizmalarının, belirli amaçlar doğrultusunda kullanılması ise, yeni bir kavram olan "Quorum Quenching" (Yetersayı etkisini azaltma) olarak adlandırılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, endüstriyel atıksuların arıtımında kullanılan membran biyoreaktörlerde (MBR) Quorum Quenching (QQ) mekanizmasının entegrasyonunu ele alarak, bu yöntemin biyoreaktör sistemlerinin operasyonel verimliliğini ve dayanıklılığını artırma potansiyeli incelenmiştir. Geleneksel MBR sistemlerinde sıklıkla karşılaşılan ve sistem performansını olumsuz etkileyen biyofilm oluşumu ve biyotıkanma gibi sorunlara çözüm bulmak amaçlanmıştır.

Endüstriyel atıksu arıtımı, değışken kirlilik yükleri ve zorlu operasyonel koşullar nedeniyle MBR teknolojilerinde önemli zorluklar oluşturmaktadır. Bu tez, QQ mekanizmasını kullanarak, mikroorganizmalar arası iletişimi baskılayarak biyofilm formasyonunu önleyip, membran yüzeylerinde biyotıkanmayı azaltmayı hedeflemektedir. Bunu yaparken bir yandan ensütriyel atıksularda bulunan toksisite etkisi olan bazı kirletici parametrelerinin bakteriyel QQ mekanizmasına olan etkisi araştırılmıştır. Araştırma, QQ mekanizmasının MBR sistemlerine entegrasyonunun, biyokirlenme oranını düşürdüğünü ve atık su arıtım verimliliğini artırdığını göstermiştir.

Çalışma, laboratuvar ölçekli deneyler ve kontrol gruplarıyla karşılaştırmalı analizler kullanılarak yürütülmüştür. QQ entegre MBR sistemlerinin (QQ-MBR),

konvansiyonel MBR sistemlerine kıyasla daha düşük biyofilm oluşumu ve daha yüksek kirlilik giderim verimliliği sergilediği tespit edilmiştir. Ayrıca, QQ-MBR sistemlerinin, özellikle ağır metal ve organik kirleticilerin etkili olduğu atıksuların arıtımında da membran biyokirlenmesini azaltarak üstün performans gösterdiği belirlenmiştir.

Sonuç olarak, bu tez QQ mekanizmasının MBR sistemlerine entegrasyonunun, endüstriyel atıksu arıtımında önemli bir yenilik olarak değerlendirilebileceğini ve bu entegrasyonun sistemin genel sürdürülebilirliğine ve ekonomik verimliliğine katkıda bulunabileceğini önermektedir. Ayrıca, bulgular, biyotıkanma ve enerji tüketimi gibi operasyonel maliyetleri azaltma potansiyeline işaret etmekte, bu sayede atıksu arıtımının genel maliyetinin düşürülmesine yardımcı olabileceğini vurgulamaktadır.



# **INVESTIGATION OF QUORUM QUENCHING MECHANISM IN TREATMENT OF MUNICIPAL WASTEWATER CONTAINING SALINITY, SULPHATE AND LEAD IN MEMBRANE BIOREACTORS**

## **SUMMARY**

The rapidly increasing world population and developing industry lead to disproportionate consumption of natural resources, and this brings about important environmental problems such as climate change and water scarcity. Membrane bioreactors (MBR), which come to the fore within the scope of the search for sustainable solutions to increasing water scarcity, provide the recycling of wastewater for irrigation purposes by purifying it with membrane systems. Although MBR systems offer a promising solution, they have limitations due to fouling. The majority of these blockages are caused by biofouling caused by the adhesion and accumulation of biomass on the membrane surface.

It is a fact discovered by the scientific world that microorganisms communicate with each other in their environments and exhibit community behavior when they reach sufficient numbers. Biofilm formation is one of the most fundamental community behaviors of microorganisms. These organisms use the "Quorum Sensing" mechanism to come together and protect against external influences and continue their life cycle.

In ecological environments, there are species that can produce communication signals, as well as species that can use these signals as a food source. While these species use signal molecules as food, they also interrupt the communication processes of other species trying to come together. Using the mechanisms of these bacteria for specific purposes is called "Quorum Quenching" (reducing the quorum effect), which is a new concept.

In this thesis study, the potential of this method to increase the operational efficiency and durability of bioreactor systems was examined by considering the integration of the Quorum Quenching (QQ) mechanism in membrane bioreactors (MBR) used in the treatment of industrial wastewater. It is aimed to find solutions to problems such as biofilm formation and biofouling, which are frequently encountered in traditional MBR systems and negatively affect system performance.

Industrial wastewater treatment poses significant challenges to MBR technologies due to variable pollution loads and difficult operational conditions. This thesis aims to prevent biofilm formation and reduce biofouling on membrane surfaces by suppressing the communication between microorganisms by using the QQ mechanism. While doing this, the effect of some pollutant parameters with toxicity effects found in industrial wastewater on the bacterial QQ mechanism was investigated. Research has shown that integration of the QQ mechanism into MBR systems reduces the biofouling rate and increases wastewater treatment efficiency.

The study was conducted using semi pilot-scale experiments and comparative analysis with control groups. The experimental framework used in this study includes comparative analyzes between QQ-integrated MBR systems (QQ-MBR) and

conventional MBR setups. Performance evaluation focuses on several key parameters: biofouling rate, wastewater quality and operational stability under dynamic industrial conditions. In this study, sodium alginate beads immobilized with the QQ bacterium BH4 and empty sodium alginate beads were operated in two parallel and identical semi-pilot scale MBRs with pollutants simulating industrial wastewater: salt (Phase I), sulfate (Phase II), and lead (Phase III). Additionally, in the control phase, Phase 0, the system was operated without any additional pollutants. The AKM value of activated sludge in MBRs is stabilized in the range of 13,000-16,000 mg/L, and the UAKM value is stabilized in the range of 7,000-10,000. The pH inside the reactor is around 6.5 and the dissolved oxygen level is 6-9 mg/L. The operation was carried out by gradually increasing the flux of 15-20 LMH. Throughout the operations, the main control parameter, TMP (transmembrane pressure), indicating membrane fouling, was continuously monitored and recorded.

During operations with high salinity and lead, the TMP reduction amount was less compared to the operation with sulfate. TMP reduction rate in QQ-MBR operation with extreme salinity is 47%; It is 87% in operation with sulphate and 87% in QQ-MBR operation with lead. In the lean operation phase with no additional pollutants, a 91% TMP reduction rate was found. This indicates that salinity and lead have a minor negative effect on the QQ MBR system. The highest TMP reduction was observed in the Phase 0 operation, which is the control phase without additional pollutants. This suggests that while the QQ mechanism helps prevent biofilm formation on membranes in industrial wastewater treatment, the type of pollutant also impacts the extent of this contribution.

Throughout all operations, in MBRs samples were periodically taken and microbial species analysis was conducted to examine the effect of the added pollutants and QQ beads on the microbial species diversity within the tank. Initially, the dominant species in the reactors belonged to the class Proteobacteria. The greatest change in reactor microbial community occurred in Phase III with lead, whereas the minimum change in dominant species ratio was observed in Phase II with sulfate. By the end of the operation in Phase III, the dominant species in the tank resembled the initial distribution at the beginning of the operation.

Results from controlled trials show that QQ-MBR systems not only reduce biofilm thickness and microbial accumulation on membranes but also increase pollutant removal efficiency, especially under toxic shock conditions caused by variable industrial discharges. QQ integrated MBR systems (QQ-MBR) have been found to exhibit lower biofilm formation and higher contaminant removal efficiency compared to conventional MBR systems. In addition, it has been determined that QQ-MBR systems show superior performance by reducing membrane biofouling, especially in the treatment of wastewater where heavy metal and organic pollutants are effective.

In conclusion, this thesis proposes that the integration of the QQ mechanism into MBR systems can be considered an important innovation in industrial wastewater treatment and that this integration can contribute to the overall sustainability and economic efficiency of the system. Additionally, the findings point to the potential to reduce operational costs such as bioclogging and energy consumption, highlighting that it could help reduce the overall cost of wastewater treatment.

The findings underscore the potential of QQ mechanisms to significantly elevate the functional capabilities of MBRs, extending membrane life, reducing energy consumption, and lowering overall operational costs.

# 1. GİRİŞ

## 1.1 Tezin Amacı

Bu çalışmanın temel amacı, günümüzde en etkili atıksu arıtma yöntemlerinden biri olarak kabul edilen membran proseslerinin biyokirlenme sorununa yönelik yenilikçi ve etkili bir yöntem geliştirmektir. Bu yöntemin, pratik uygulamalarda tercih edilebilir ve verimli bir şekilde kullanılabilir olması hedeflenmektedir. Tez çalışmasında, endüstriyel atıksu arıtımı sırasında membran yüzeyinde oluşan biyofilm tabakasının oluşumunu engellemek ve endüstriyel kirlilik kaynaklı olası toksik şoklara karşı son yıllarda kefedilmiş ve kullanım yöntemleri henüz incelenmeye başlanmış Quorum Sensing (Yetersayı etkisi) ve Quorum Quenching (Yetersayı etkisini azaltma) mekanizmalarının etkisini belirlemek ve endüstriyel atıksu arıtımında kullanılan membran biyoreaktörlerde meydana gelen biyotıkanma üzerinde QQ etkisini ortaya koymak amaçlanmaktadır.

Son yıllarda, membran biyoreaktör teknolojisi, ileri düzey atıksu arıtımında en önemli ve yenilikçi teknolojilerden biri olarak öne çıkmıştır. Ancak, bu teknolojinin kullanımı tabii bazı zorluklarla karşı karşıyadır ve özellikle çevre mühendisliğinde birçok araştırma bu zorluklara çözümler geliştirmeye odaklanmıştır. Son dönemde yapılan çalışmalar, membran yüzeyinde zamanla biriken biyo-kek tabakasının, membranın geçirgenlik kaybında kritik bir rol oynadığını göstermiştir.

Membran biyolojik kirliliği üzerine yapılan çeşitli araştırmalar, hücre dışı polimerik maddeler (EPS'ler) ve çözünebilir mikrobiyal ürünlerin (SMP'ler) membran biyokirlenmesiyle doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. EPS ve SMP'lerin membran üzerindeki etkilerini azaltmak amacıyla, hidrolik bekletme süresi, çamur yaşı, organik yükleme hızı gibi işletme parametreleri veya membranın hidrofilitiklik, yüzey pürüzlülüğü, yüzey yükü gibi özelliklerinin değiştirilmesi gerekmektedir. Membranların kendileri de polielektrolitler, nanopartiküller ve antibiyotikler gibi çeşitli kimyasallar kullanılarak modifiye edilebilir.

Günümüzde, malzeme, mühendislik ve kimya bilimleri gibi farklı disiplinlerin çözümlerini birleştiren biyolojik kirlilik önleme çalışmalarının birçok örneği bulunmaktadır. Ancak, bu yöntemlerin biyolojik kirlenmeyi önleme konusundaki etkinliği sınırlıdır. Bu alandaki en büyük zorluklardan biri, biyofilm oluşumunun tamamen doğal bir süreç olmasıdır; dolayısıyla, doğal olmayan mühendislik ve/veya kimyasal çözümler, bu dinamik süreçlere uyum sağlama konusunda henüz yeterli başarıyı gösterememiştir.

Halihazırda evsel atıksu arıtıma çalışmalarında bile QQ-MBR kullanımını oldukça az iken endüstriyel atıksuların arıtımında QQ-MBR uygulaması çok daha sınırlıdır. Bu çalışmada, endüstriyel atıksu deşarjının da simüle edildiği ve çeşitli inorganik kirleticiler içeren karmaşık kentsel atıksuların arıtıldığı bir MBR sisteminde, meydana gelen olası toksik şoklara karşı bakteriyel QQ mekanizmasının etkinliğinin sürekliliği araştırılacaktır. Çalışma kapsamında, inorganik kirleticiler bazında farklı karakterizasyonlara sahip atıksuların MBR'ler ile arıtılmasında QQ bakterisi immobilize edilmiş boncuklar (QQ boncuklar) kullanılmaktadır.

Bu yenilikçi QQ-MBR yaklaşımının, endüstriyel atıksu arıtımı uygulamalarında membrandaki biyolojik kirliliği azaltmada etkili olması beklenmektedir. Membran biyolojik kirliliğinin önlenmesi, MBR'lerin verimli çalışması için temel bir gerekliliktir. Ayrıca bu çalışma, yeter sayı atkisini azaltma mekanizması uygulamalarının atıksu arıtma spektrumunu genişleterek yalnızca evsel atıksu arıtımında meydana gelen biyotıkanmayı değil endüstri kaynaklı atıksuların arıtımı esnasındaki biyolojik tıkmalar üzerinde de pozitif bir etkisi olduğunu önermektedir. Bu bağlamda, literatüre yeni bir bakış açısı kazandırarak, bu çalışmanın ilgili alandaki araştırmalara önemli bir katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

Özetle, bu çalışmanın amacı, endüstriyel atıksuların MBR ile arıtımı sırasında çeşitli inorganik kirleticiler nedeniyle MBR sisteminde meydana gelebilen toksik şoklara karşı QQ mekanizmasının etkinliğini belirlemektir. Yanı sıra, endüstriyel atıksu arıtımında mevcut düşük akı değerlerini artırmak, biyotıkanmayı önleyerek membran ömrünü uzatmak, enerji sarfiyatlarını düşürmek ve böylece atıksu arıtım maliyetlerini azaltmaya yönelik bir yaklaşım sunulmaktadır.

## 1.2 Tezin Kapsamı

Bu tez kapsamında konuyla ilgili olarak temel kavram ve terimlere genel bir bakış sağlayan, halihazırda kullanılan çeşitli quorum quenching uygulamalarını gözden geçiren kapsamlı bir literatür taraması sunulmaktadır. Literatür taraması, membran proseslerine, membran biyoreaktörlere, membran biyoreaktörlerin avantaj ve dezavantajlarına ve biyolojik kirlilik problemine bir giriş sunmaktadır. Sonrasında, yeter sayı etkisi (QS), yeter sayı etkisini azaltma (QQ) ve biyofilmin önlenmesi için mevcut QQ uygulamalarını içermektedir.

Literatür taramasının ardından bu araştırma kapsamında işletilen membran biyoreaktörün genel işeyişinin anlatımı, işletme süresince ve sonunda gerçekleştirilen deneylerin yapılışı anlatılmaktadır. Çalışma kapsamında kullanılan cihaz ve gerçekleştirilen analizler üçüncü bölümde verilmektedir.

Dördüncü bölümde gerçekleştirilen tüm MBR işletmelerinin deneysel verileri ve analizleri her bir işletme kendi içinde sınıflandırılarak Kontrol-MBR ve QQ-MBR karşılaştırmaları grafikler ile desteklenerek verilmiştir.

Son bölüm olan beşinci bölümde ise tez kapsamında yürütülen tüm çalışmaların değerlendirilmesi yapılmış ve genel çıkarımları içeren sonuçlara yer verilmiştir.



## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

### 2.1 Membran Teknolojileri

Son zamanlarda, nüfus artışının temiz su kaynaklarına olan talebi aşırı derecede arttırması muhtemeldir. Bu durum, evsel ve endüstriyel alanlarda ortaya çıkan atık suların alternatif bir su kaynağı olarak değerlendirilmesini gerektirebilir. Dolayısıyla, mevcut temiz su kaynaklarının stratejik yönetimi, atık su arıtımı, geri kazanımı ve yeniden kullanımını içerecek şekilde yeniden düşünölmelidir. Ancak, atık suların farklı yeniden kullanım faaliyetlerinin göz önüne alındığında, geleneksel arıtma teknolojilerinin yetersiz olduğu açıktır.

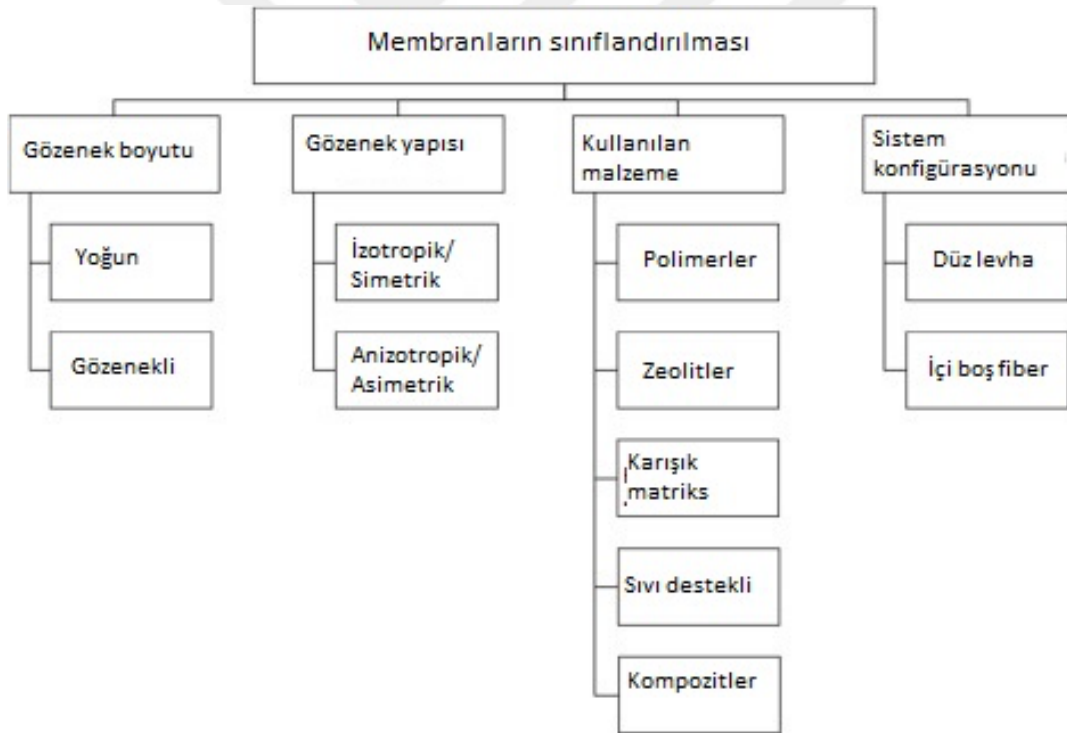
Günümüzde çeşitli atıksu arıtma teknikleri uygulanmakta olup, bu teknikler genellikle fiziksel, kimyasal ve biyolojik kategorilere ayrılmaktadır. Fiziksel arıtma, atıksudan döküntü, kıl gibi büyük katı maddelerin uzaklaştırılmasında tercih edilirken, kimyasal arıtma, ağır metaller veya fosfor gibi spesifik kirleticilerin giderilmesi için kullanılmaktadır. Fiziksel arıtma, genellikle birincil arıtma aşaması olarak uygulanmakta ve ikincil arıtma süreçlerinin gerçekleştiği biyolojik arıtma ünitelerine destek olmak ve onları korumak amacıyla işlev görmektedir. Biyolojik atıksu arıtımında, aktif çamur sistemleri ve döner biyolojik kontaktörler gibi geleneksel yöntemler ile modifiye edilmiş aktif çamur sistemleri ve membran biyoreaktörler (MBR) gibi yenilikçi yaklaşımlar kullanılmaktadır. Membran prosesleri, yüksek kaliteli su elde etme ve geri kazanma konusundaki avantajları nedeniyle su geri kazanım sektöründe önde gelen teknolojiler arasındadır.

Su ve atık su arıtımına uygulanan bir membran, basitçe bazı fiziksel veya kimyasal bileşenlerin diğerslerinden daha kolay geçmesine izin veren bir malzemedir. Bu nedenle, içinden geçen bileşenlere (daha sonra nüfuz edenlere) karşı, kendisi tarafından reddedilenlere (kalıntıyı oluşturanlara) göre daha geçirgen olduğundan, geçirgenlik seçicidir. Membran temel olarak iki farklı fazı ayırabilen seçici bir duvar olarak tanımlanabilir (Judd ve Judd, 2011).

Seçicilik derecesi membran gözenek boyutuna bağlıdır. Mikrofiltrasyon (MF) ile ilişkili en kaba membran, partikül maddeyi reddedebilir. Ters ozmoz (TO) ile ilişkili en seçici membran, sodyum ( $\text{Na}^+$ ) ve klorür ( $\text{Cl}^-$ ) gibi tek yüklü (yani tek değerlikli) iyonları reddedebilir. Bu iyonların hidrolik çapının 1 nm'den küçük olduğu göz önüne alındığında, TO membranındaki gözeneklerin çok küçük olması mantıklıdır. Aslında bunlar yalnızca en güçlü mikroskoplar kullanılarak görülebilir (Judd, 2006).

## 2.2 Membranların Sınıflandırılması

Membranların sınıflandırılması, aşağıda gösterildiği gibi gözenek boyutlarına, yapılarına, kullanılan malzemelere ve sistem konfigürasyonuna dayanmaktadır (Prabakaran ve Jon, 2023). Membranların temel olarak sınıflandırılması Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



**Şekil 2.1:** Membranların gözenek boyutuna, yapısına, kullanılan malzemelere ve sistem konfigürasyonuna göre sınıflandırılması (Prabakaran ve Jon, 2023)

Membran, belirli türlerin fiziksel/kimyasal özelliklerine göre geçirildiği veya filtrelendiği ince bir fiziksel arayüzdür.

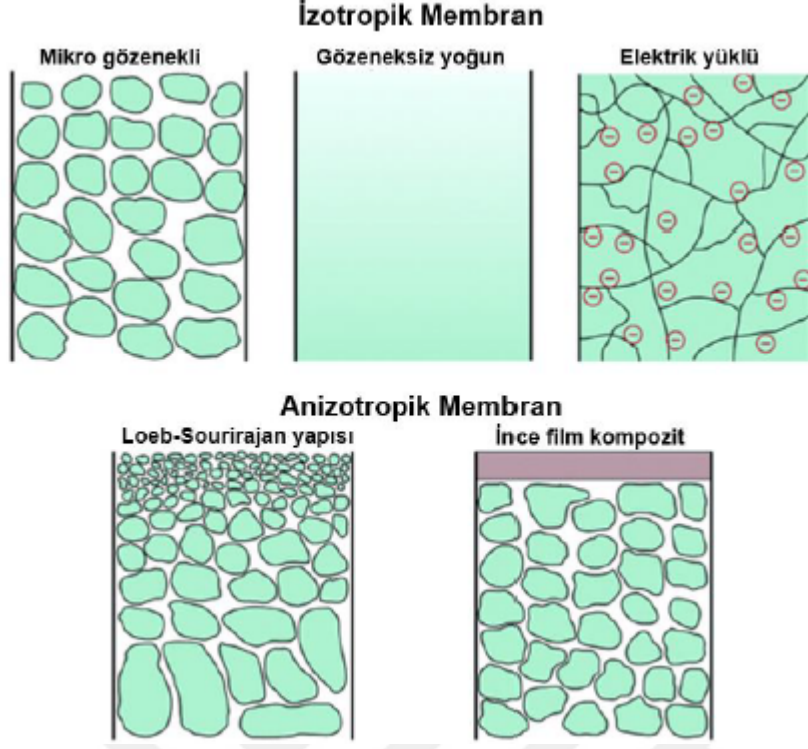
### **2.2.1 Gözenek büyüklüğüne göre membranların sınıflandırılması**

Gözenek boyutuna/çapına bağlı olarak membranlar yoğun ve gözenekli membranlar olarak sınıflandırılır. Membranlar tipik olarak gözenek yapılarına göre yoğun ve gözenekli kategorilere ayrılır. Yoğun membranlar 0,1 nm düzeyinde gözeneklere sahipken gözenekli membranlar 0,1 µm düzeyinde gözeneklere sahiptir. Yoğun membranlarda, su buharı polimer üzerine adsorbe edilir ve moleküler düzeyde polimer matrisi boyunca yayılır. Gözenekli membranlarda su buharı gözenek boşluğu içindeki hava/buhar karışımından yayılır. Bu ikisi arasında her iki mekanizmanın da önemli olduğu bir geçiş bölgesi vardır (Woods, 2014).

Mikrofiltrasyon (MF), ultrafiltrasyon (UF) membranlar gözenekli membranlar; nanofiltrasyon (NF) ve ters osmoz (TO) membranlar ise gözeneksiz (yoğun) membranlardır (Koyuncu, 2018a).

### **2.2.2 Por yapısı ve morfolojisine göre membranların sınıflandırılması**

Membranlar por yapısı/ morfolojisine göre, Şekil 2.2'de gösterildiği gibi izotropik veya simetrik membran ve anizotropik veya asimetrik membran olmak üzere iki türe ayrılabilir (A. Lee ve diğ., 2016). İzotropik mikro gözenekli membran, gözeneklerin rastgele dağıldığı (gözenek çapı 0,01-10 µm arasındadır) sert, birbirine bağlı gözenek ve boşluk yapısına sahiptir (Abdullah ve diğ., 2018). Ayırma işlemi, mikro gözenekli membranın gözenek boyutu dağılımından ve hidrodinamik koşullardan etkilenir. Mikro gözenekli membranlar, faz inversiyon, iz aşındırma, germe veya liç ve elektrospinleme kullanılarak hazırlanabilir (Lalia ve diğ., 2013). Faz inversiyon yöntemi izotropik mikro gözenekli membran oluşumu için en önemli yöntemdir. Elektrik yüklü membranlar, sabit pozitif veya negatif yüklü iyonları eşit olarak dağıtan yoğun/ mikro gözenekli yapılara sahip olan anyon değişim membranları veya katyon değişim membranları olarak adlandırılır (Baker, 2012). Membrandaki iyonların yükü ve konsantrasyonu, bu membranı kullanarak ayırma sürecini kontrol etmenin temel unsurlarıdır.



**Şekil 2.2:** Por yapısı ve morfolojisine göre membranlar (A. Lee ve diğ., 2016).

Anizotropik membranlar, tüm membran kesiti boyunca gözenekliliği ve gözenek boyutunu değiştiren katmanlı yapılardan oluşur (Baker, 2012). Anizotropik membranlar tipik olarak kalın bir mikro gözenekli katman üzerinde desteklenen çok ince bir yüzey katmanına sahiptir. İnce katman, ayırmayı gerçekleştirmek için seçici katman olarak kullanılır. Seçici tabakanın kalınlığı nedeniyle membran akıları genellikle çok yüksektir. Bütünleşik asimetric membranlar, kompozit membranlar ve destekli sıvı membranlar, anizotropik membranlar altında kategorize edilebilir. Loeb ve Sourirajan, tek bir polimer kullanarak faz inversiyon yöntemini kullanarak bütünleşik asimetric membranlar geliştirmişlerdir (Loeb ve Sourirajan, 1963). Ürettikleri membranlarda gözeneklilik ve gözenek boyutunun, membranın kesiti boyunca değiştiğini ve üst yüzeyde giderek gevşeyen tabaka üzerinde seçici ince bir tabaka oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Bu ince tabaka ve gözenekli alt tabaka, faz inversiyon metodu esnasında eş zamanlı olarak oluştuklarından birbirlerine bağlıdır.

### 2.2.3 Kullanılan malzemeye göre membranların sınıflandırılması

Membran proseslerinde, en önemli kısımlardan birisi de membran filtrenin kendisidir. Farklı yapı ve fonksiyonellikte, birçok farklı malzemeden membran üretimi gerçekleştirilmiştir. Membran üretim malzemeleri, sentetik ürünler, modifiye doğal

ürünler ve inorganikler olmak üzere üç ana sınıfta toplanmaktadır. Polimer ve elastomerler sentetik ürünler; selüloz bazlı malzemeler modifiye doğal ürünler; seramik ve metal malzemeler ise inorganik membran sınıfında sayılmaktadır. Bu malzemelerin membranlarda kullanımına göre de organik, inorganik ve kompozit membranlar sınıflandırılmaktadır. Membran ayırma proseslerinin verimli olabilmesi için kullanılan malzemenin kimyasal ve mekanik dayanımı yüksek, sıcaklık değişimleri karşısında stabil, yüksek seçicilik ve tutma oranına sahip, yüksek geçirgenliğe sahip ve tüm bunlara ek olarak maliyet açısından uygun bir malzeme olmalıdır (Koyuncu, 2018a).

Organik membranların üretiminde polimerik malzemeler kullanılan en yaygın malzemelerdir. Çok sayıda polimer malzeme mevcuttur; bu nedenle spesifik ayırma problemine uygun bir polimerin seçilmesi mümkündür. Örnekler arasında polisülfon (PS), polietersülfon (PES), poliakrilonitril (PAN), poliviniliden florür (PVDF), polifenilsülfon (PPSu), polieterimid (PEI), rejenere selüloz, selüloz asetat (CA) ve poliamid (PA) yer alır.

Genellikle iki sınıf inorganik membran vardır:

- Yoğun fazlı metal, metal alaşımları ve seramikler (perovskitler) ve
- Gözenekli seramik membranlar.

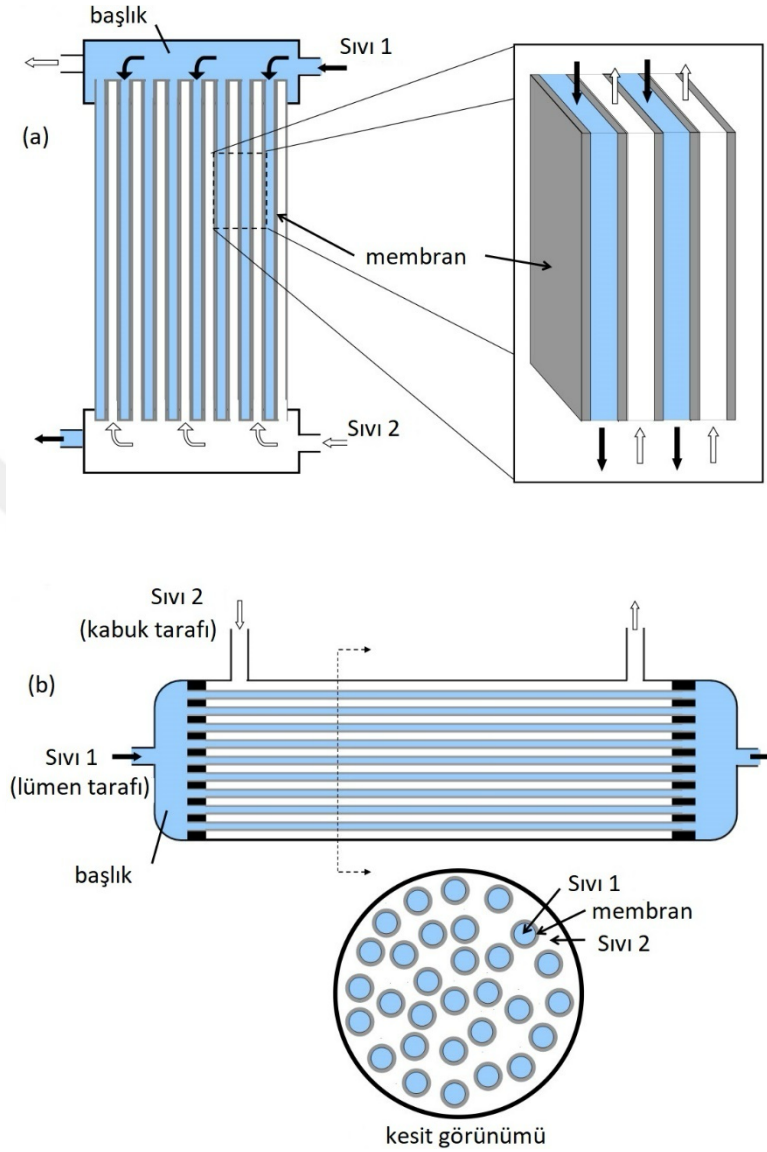
İnorganik membranlar, inorganik membran malzemelerinin genel sınıflandırmasında gösterildiği gibi seramik, cam ve zeolitik veya metalik malzemelerden yapılabilir (Saleh ve Gupta, 2016).

#### **2.2.4 Sistem konfigürasyonlarına göre membranların sınıflandırılması**

Membranlar yapılarına ve konfigürasyonlarına göre düz levhalar ve içi boş fiberler olmak üzere iki tipe ayrılabilir.

Düz tabaka membranlar, yaklaşık 100 µm kalınlığa sahip büyük tabakalardır. Aralarında ara parçalar olacak şekilde üst üste istiflenirler ve plakalı ve çerçeveli ısı eşanjörlerine benzer şekilde inşa edilirler. Membran tabakaları beslemeyi ayırır ve süzüntü ters akış düzeninde akar. Buna karşılık, içi boş fiberler yaklaşık 500 µm çapında tüplerdir ve tüpün duvarı yarı geçirgen membran malzemesidir. İçi boş fiberler kabuk-borulu ısı eşanjörleri gibi yapılmıştır. Besleme ve süzüntü akışları, çapraz akış düzeninde membran tüpler tarafından ayrılır. Sıvılardan biri tüplerin içinde (lümen

tarafı olarak da adlandırılır) akar, diğeri ise tüplerin etrafından (kabuk tarafı olarak da adlandırılır) akar. Şekil 2.3, düz levha ve içi boş fiberlerden yapılmış membran modüllerini göstermektedir (Prabakaran ve Jon, 2023).



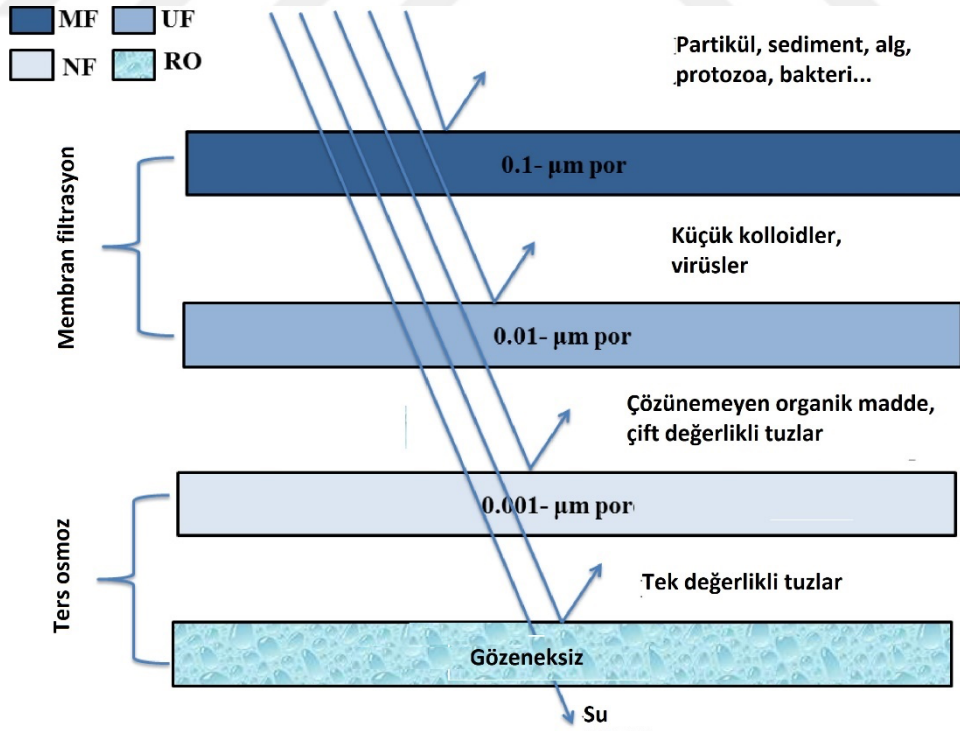
Şekil 2.3: Düz plaka (a) ve içi boş fiber (b) membran modülleri (Woods, 2014).

### 2.3 Membran Prosesleri

Membran bazlı teknolojiler operasyon türüne bağlıdır ve basınç, konsantrasyon, elektriksel potansiyel gradyanı ve sıcaklık gradyanına göre sınıflandırılır. Atık su arıtma alanında membran filtrasyonu, yarı geçirgen membranların kullanıldığı bir dizi farklı filtreleme tekniğidir. Bu durumda süreç, mikrofiltrasyon (MF), ultrafiltrasyon (UF), nanofiltrasyon (NF) ve ters ozmozda (TO) olduğu gibi hidrolik basınçla yürütülür. Bu proseslerin her biri deşarj edilen malzeme türü, çalışma basıncı ve

nominal gözenek boyutu ile tanımlanır. Atık suların ayrıştırılması ve saflaştırılması için ana proses veya son arıtma olarak uygulanabilirler (Howe ve diğ., 2012).

Şekil 2.4'te gösterildiği gibi, ters osmoz ve nanofiltrasyon suda çözünebilir organik maddeleri uzaklaştırabilir. Ayrıca, uygun çalışma basıncı koşullarında (NF için 70-150 psi ve TO için 150-1200 psi), su ve NaCl'den büyük tek değerlikli ve iki değerlikli iyonların etkili bir şekilde ayrılması sağlanabilir (Frenkel, 2015; Nataraj ve diğ., 2009). Ters osmoz, kirletici maddelerin %90-99'una kadar giderildiği, rengi çıkarabildiği ve atık akışının tuzunun giderilmesine önemli ölçüde yardımcı olduğu için, atık sulardan organik kirleticilerin giderilmesi için uygundur (Fonseca Couto ve diğ., 2018). Mikrofiltrasyon ve ultrafiltrasyon genellikle TO ön arıtması olarak önerilmektedir, uygun maliyetli bir seçenektir, ancak daha büyük gözenekleri nedeniyle çözünmüş organik maddeleri gideremezler. Mikrofiltrasyon, koloidal malzemeleri ve mikroorganizmalar ve inorganik parçacıklar gibi asılı parçacıkları tutarak atık suyun basit bir şekilde arıtılmasına olanak tanır. Ultrafiltrasyon yalnızca KOİ ve askıda katı maddelerin azaltılması için geçerlidir. Genel olarak bakteri, virüs, partikül ve protein gibi boyutları 10 nm'den büyük moleküllerin uzaklaştırılmasında etkilidir (Titchou ve diğ., 2021).



Şekil 2.4: Gözenek çaplarına göre membranlar (Titchou ve diğ., 2021).

### **2.3.1 Ters Osmoz**

Ters ozmoz, suyun tuzdan arındırılması ve saflaştırılmasında yaygın olarak kullanılan bir membran prosesidir. Tuzları, mineralleri ve diğer kirletici maddeleri bloke ederken su moleküllerinin geçmesine izin veren yarı geçirgen bir zar kullanır. TO, içme suyu için su arıtımı, atık su arıtımı ve endüstriyel prosesler dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda kullanılır.

### **2.3.2 Ultrafiltrasyon**

Ultrafiltrasyon, askıdaki katı maddeleri, kolloidleri, bakterileri ve makromolekülleri su ve diğer sıvılardan ayırmak için kullanılan diğer bir membran işlemidir. Ters ozmoza benzer prensipte çalışır ancak membrandaki gözenek boyutları daha büyük olup, belirli büyüklükteki parçacıkların ve moleküllerin geçmesine izin verir. UF, su ve atık su arıtımının yanı sıra yiyecek ve içecek endüstrisinde protein konsantrasyonu ve arıtılması amacıyla yaygın olarak kullanılır.

### **2.3.3 Mikrofiltrasyon**

Mikrofiltrasyon, ultrafiltrasyona göre daha büyük gözenek boyutlarıyla çalışan, askıda katı maddelerin, bakterilerin ve büyük parçacıkların ayrıştırılmasına olanak sağlayan bir membran işlemidir. Meyve sularının arıtılması, fermantasyon işlemlerinde bakteri ve mayaların geri kazanılması, ileri saflaştırma işlemleri için suyun ön arıtılması gibi çeşitli uygulamalarda kullanılır.

### **2.3.4 Nanofiltrasyon**

Nanofiltrasyon, ultrafiltrasyona göre daha küçük ancak ters ozmozdan daha büyük gözenek boyutlarıyla çalışan bir membran prosesidir. Sudan iki değerlikli iyonların, organik maddelerin ve bazı düşük molekül ağırlıklı bileşiklerin uzaklaştırılmasında etkilidir. NF yaygın olarak suyun yumuşatılması, doğal organik maddelerin uzaklaştırılması ve kısmi tuzdan arındırma için kullanılır.

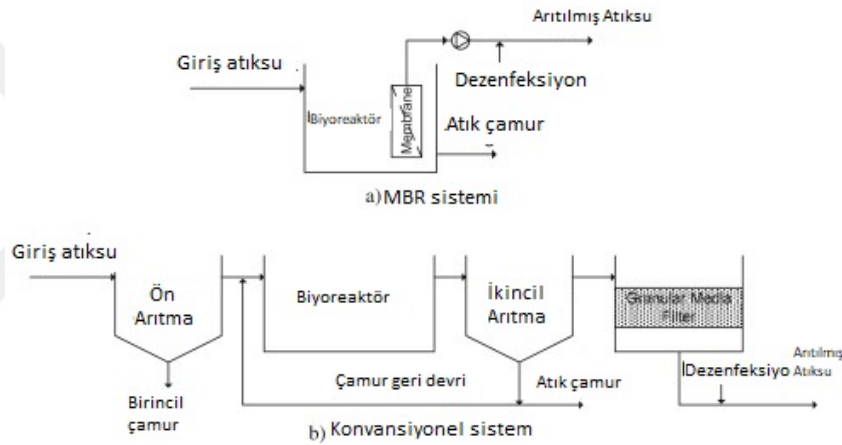
## **2.4 Membran Biyoreaktör Sistemleri**

Membran biyoreaktör (MBR), geleneksel aktif çamur sistemi ile membran filtrasyonunu birleştiren bir atık su arıtma teknolojisidir. MBR'ler, kompakt

tasarımları ve çıkış suyu kalitesinin yüksek olması sebebiyle atık su arıtımında/ yeniden kullanımında çok fazla ilgi görmektedir (Wang ve diğ., 2013).

MBR'lerde kullanılan membranların etkin gözenek boyutu 0,1 m'nin altında olabileceğinden, kaliteli bir çıkış suyu üretiminin yanı sıra reaktör içindeki biyokütleyi yoğunlaştırır; bu sayede tank boyutlarının küçülmesine olanak sağlayarak biyolojik arıtma prosesinin verimliliğini artırır. MBR'ler bu nedenle organik madde ve amonyak gibi çözülmüş bileşenler açısından daha yüksek saflıkta arıtılmış su üretme eğilimindedir; bunların her ikisi de biyolojik arıtmayla giderilir (Judd, 2006).

MBR prosesi, geleneksel biyolojik arıtma ve membran filtrasyon işlemlerinin sırayla uygulanmasından ziyade, bu iki yöntemin bir araya getirilmesidir (Judd, 2006). MBR sistemi ve konvansiyonel arıtma sistemi Şekil 2.5'te gösterilmektedir.

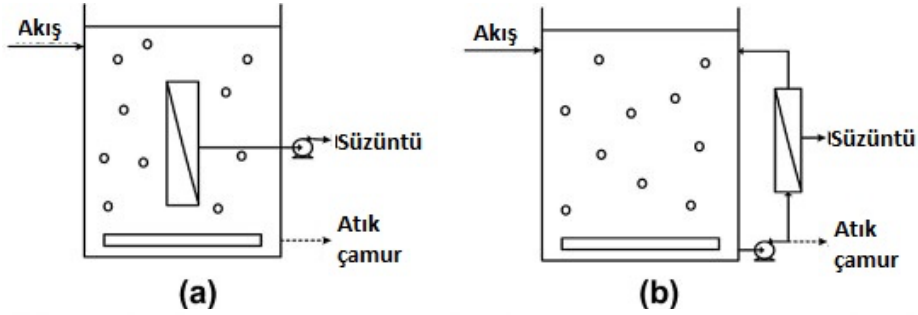


**Şekil 2.5:** Atıksuyun yeniden kullanımı için tipik proses konfigürasyonu (Bérubé, 2010).

MBR'ler, konvansiyonel bir aktif çamur prosesine benzer şekilde çalıştırılır, ancak ikincil arıtma ve üçüncül aşamalara ihtiyaç duyulmaz. MBR sistemleri genellikle batık ve harici sistemler olarak iki ana kategoriye ayrılır. Bu iki kategori, işletme koşulları ve tasarım süreçlerinde farklılıklar gösterir. Ayırma işlemi, harici MBR'lerde basınçlı filtrasyonla, batık MBR'lerde ise vakumla çalışan membranlar aracılığıyla yapılır (Radjenović ve diğ., 2008).

Şekil 2.5, MBR konfigürasyonunun temel şematik diyagramını göstermektedir. Şekil 2.6 (b), bir yan akışlı veya harici membran (iMBR) modülünü gösterirken, Şekil 2.6 (a), bir daldırılmış membran biyoreaktörünü veya batık membran biyoreaktörü (sMBR) modülünü göstermektedir. sMBR sistemi için besleme atık suyu doğrudan

biyokütle ile temas halindedir. Atık su ve biyokütle, membranlardan oluşan yeniden sirkülasyon döngüsü yoluyla pompalanır. Konsantre çamur, atık su boşaltılırken reaktöre geri dönüştürülür. Membranı ve biyoreaktörü ayırma fikri, membran bakımını kolaylaştırmaktır ancak yeniden sirkülasyon döngüsü kurulumu nedeniyle işletme maliyetini artıracaktır (Mutamim ve diğ., 2013)



Şekil 2.6: Batık ve harici MBR sistemleri (Mutamim ve diğ., 2013).

iMBR sistemi, sMBR sistemine göre devridaim döngüsü olmadığından ve iMBR'de membran çevresinde biyolojik bir süreç meydana geldiğinden daha az işletme maliyetine sahiptir. Hem iMBR hem de sMBR'nin çamur yaşını korumak için fazla çamuru dışarı pompalaması gerekir. Membran taşıma modu basınçla veya vakumla çalıştırılabilir. Radjenovic ve ark. sMBR'de basınç tahrikli filtrelemenin, dead-end çalışan iMBR için ise vakum tahrikli filtrelemenin kullanıldığını belirtmiştir (Radjenović ve diğ., 2008). Hava kabarcıkları her iki sisteme de temizlemenin yanı sıra havalandırma için de beslenir, özellikle daldırılmış sistem için membran yüzeyi boyunca çapraz akış etkisinde membran kirlenmesini azaltmak için kullanılmaktadır (Radjenović ve diğ., 2007).

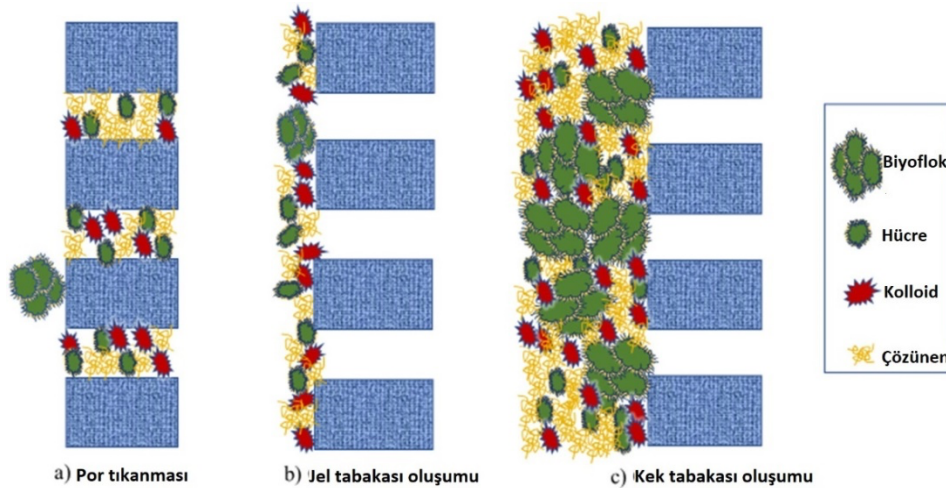
Geleneksel aktif çamur süreciyle kıyaslandığında, bir MBR sistemi, yüksek çıkış suyu kalitesi ve küçük alan gereksinimi gibi birçok avantaja sahiptir. Ancak, membran tıkanması, MBR sistemlerinin yaygın olarak kullanılmasının önündeki en büyük engeldir. Çizelge 2.1'de membran biyoreaktörlerin avantaj ve dezavantajları gösterilmektedir.

**Çizelge 2.1:** Membran biyoreaktörlerin avantaj ve dezavantajları (Kraemer ve diğ., 2012)

Avantaj	Dezavantaj
Küçük alan	Ekipman standardizasyon eksigi
Yüksek kaliteli atıksu ve rijit deşarj limitlerini karşılayabilme	Pik akıda düşük performans
Düşük maliyet	İşletme maliyeti yüksek
Yüksek düzeyde otomasyon	Mekanik olarak karmaşık

#### 2.4.1 Membran biyoreaktörlerde membran kirlenmesi

Membran kirlenmesi, MBR'lerin daha hızlı ticarileştirilmesini engelleyen önemli bir engeldir. Şekil 2.7'de gösterildiği gibi, MBR'lerdeki membran kirlenmesi, hem membran gözeneklerinin tıkanmasına hem de genellikle baskın kirlenme bileşeni olan membranlar üzerinde çamur keki birikmesine atfedilebilir (Meng ve diğ., 2009).



**Şekil 2.7:** Farklı kirlenme süreçlerini gösteren şematik diyagram - a) gözenek tıkanması, b) jel tabakası oluşumu, c) kek tabakası oluşumu (Sengar ve Vijayanandan, 2022).

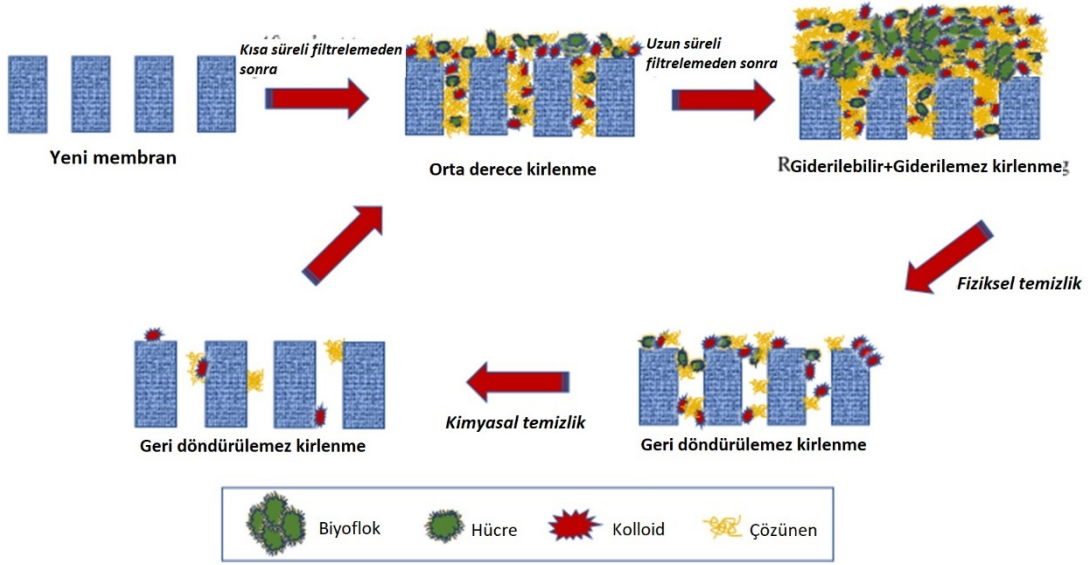
Membran kirlenmesi, çalışma moduna bağı olarak süzüntü akışında bir azalmaya veya trans membran basıncında (TMP) bir artışa neden olur. Zamanla, membran yüzeyindeki birikim kalınlaşır (kalınlaşmış birikim, kirlenme terminolojisinde genellikle kek tabakası olarak adlandırılır), bu da geçirgenlik akışında bir azalmaya, membran gözeneklerinin tıkanmasına ve hatta bazen membranın kırılmasına neden olur (Meng vd., 2017). Kirlenmenin gerçekleştiği farklı mekanizmalar vardır:

- i) membran gözeneklerinin kolloidler ve SMP'ler ile tıkanması, kirlenici yapışması ve jel tabakası oluşumu (Banti ve diğ., 2018)
- ii) kek tabakasının oluşumu ve konsolidasyonu (Jeison ve Vanlier, 2007)
- iii) reaktörün uzun vadeli işleyişindeki zamansal ve mekansal değişikliklere bağı olarak kirlenicilerin bileşimindeki değişiklik (Hwang ve diğ., 2008)
- iv) osmotik basınç etkisi (Zhang ve diğ., 2013)

Şekil 2.7, kirlenmeye dahil olan farklı mekanizmaları göstermektedir. Membran kirlenmesinin mekanizması zamana dayalı olarak detaylandırılmış ve kirlenme süreci üç aşamaya ayrılmıştır: gözenek tıkanması, jel tabakası oluşumu ve kek tabakası oluşumu.

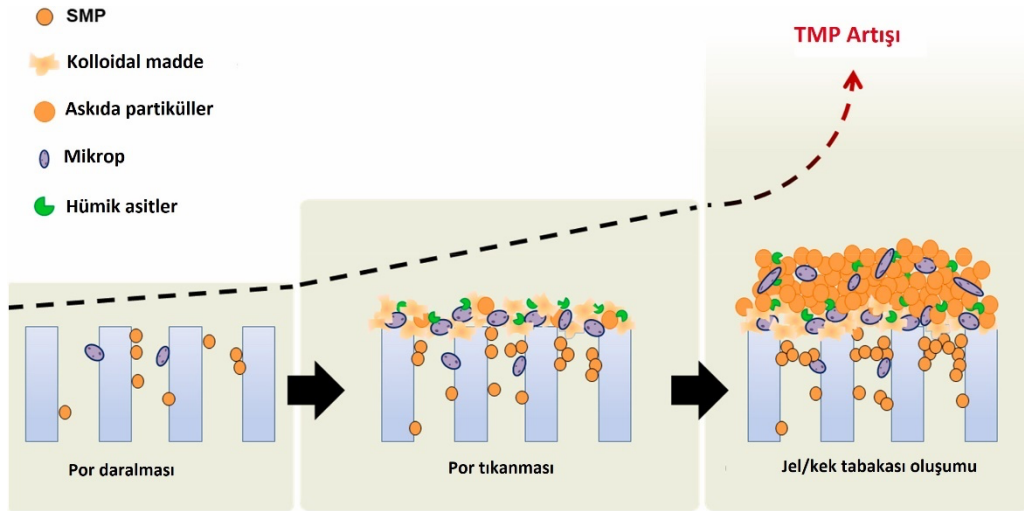
Bu mekanizmaların dışında, Şekil 2.8'de gösterildiği gibi kirlenme üç tipte sınıflandırılabilir (Meng ve diğ., 2009)

- i) giderilebilir kirlenme (genellikle kek tabakasından dolayı ve fiziksel yollarla giderilebilen),
- ii) giderilemez kirlenme (gözenek tıkanması nedeniyle ve kimyasal temizleme işlemleri gerektiren) ve
- iii) geri dönüşü olmayan kirlenme (herhangi bir temizleme işlemiyle giderilemeyen).



**Şekil 2.8:** Giderilebilir, giderilemez ve geri dönüşü olmayan kirlenme (Sengar ve Vijayanandan, 2022).

Şekil 2.9'de gösterildiği gibi, ilk aşama (geri döndürülemez) esas olarak orta büyüklükteki SMP'ye, çözünür EPS'ye ve küçük boyutlu kolloidlere atfedilmiştir; yanı sıra membran kirlenmesi ile TMP'de meydana gelen değişim ifade edilmiştir. İkinci aşamaya (geri döndürülemez) makromoleküler SMP, hücre kalıntıları ve kolloidal madde (kolloidal EPS) sebep olmaktadır. Jel/ kek tabakası oluşum aşamasına (kısmen veya geri dönüşümlü) ise esas olarak EPS, makro-moleküler SMP, metal iyonları ve mikrobiyal kolloidler neden olmaktadır (Yang ve diğ., 2024).



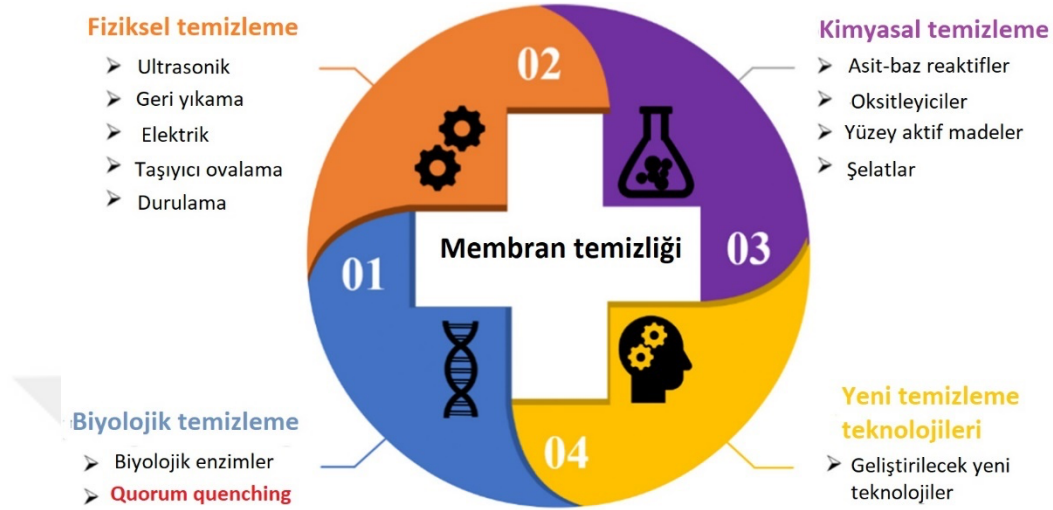
**Şekil 2.9:** MBR'lerde kirlenme gelişiminin süreç modellemesi (T. Wang ve diğ., 2022).

Sonuç olarak, membran kirlenmesi, mikroorganizmaların, kolloidlerin, çözünen maddelerin ve hücre artıklarının membranların içinde/üzerinde istenmeyen maddelerin birikmesi olarak tanımlanabilir. Aktif çamurun karmaşık doğası göz önüne alındığında, MBR'lerdeki kirlenme davranışının çoğu membran uygulamasından daha karmaşık olması şaşırtıcı değildir (Meng ve diğ., 2009).

#### **2.4.2 Membran kirliliğinin giderilmesi**

Membran malzemelerine, kirleticiliğine ve membran temizleme reaktiflerinin doğasına bağlı olarak, membran temizliği genellikle fiziksel, kimyasal ve biyolojik olarak sınıflandırılmaktadır (Şekil 2.10). Bunlar arasında fiziksel temizlik, membran yüzeyindeki geri dönüşümlü kirleticileri temizlemek için yıkama, ters yıkama, hat içi ultrasonik, havalandırma, salınım ve taşıyıcı sürtme gibi yöntemleri kullanan en basit yöntemdir. Fiziksel temizliğin verimliliği nispeten düşük olmasına rağmen, membran modülüne daha az zarar verir. Ancak fiziksel temizlik, geri dönüşümsüz kirlenmeyi tedavi edemez ve bu nedenle membran verimliliği (akı) sadece kimyasal temizlikle geri kazanılabilir. Kimyasal temizlik yönteminde, kimyasal reaktifler membran malzemelerine ve kirlenme türüne bağlı olarak seçilebilir. Kimyasal temizliğin verimliliği yüksek olmasına ve geri dönüşümsüz kirlenme için kullanılabilmesine rağmen, yüksek güçlü asitler ve bazlar membrana zarar verebilir. Genel olarak, inorganik kirleticilerin uzaklaştırılması için asit çözeltileri önerilirken, biyolojik kirlenme için alkali temizlemeler önerilmektedir. Kimyasal temizlik ayrıca bazı oksidanlar, yüzey aktif maddeler ve şelatlar içerir. Oksidanlar, biyolojik kirleticileri ve mikrobiyal kolonileri oksitleyerek organiklerin temizliğinde etkilidir. Rhamnolipidler, membran kirlenmesi için bir kimyasal temizlik reaktifi olarak kullanılmıştır. Biyolojik temizlik, biyolojik enzim ve bakteriyel QQ kullanarak membran yüzeyindeki kirleticileri temizlemeyi ifade eder. Enzim kullanımı, membran temizleme sürecinde ikincil ürünler üretmez ve membran modülüne zarar vermez; ancak maliyeti nispeten yüksektir ve bu, gerçek uygulamada bir engel teşkil etmektedir. Son zamanlarda, temizleme yöntemlerinin kombinasyonuna daha fazla dikkat çekilmektedir; örneğin, fiziksel ve kimyasal temizliğin kombinasyonu. Membran temizliğinde, kirleticilerin bileşimine ve özelliklerine göre uygun temizleme ajanının seçilmesi, temizleme verimliliğini maksimize edebilir.

Gelecekte, ilgili membran modülleri için etkili temizleme stratejilerinin geliştirilmesi ve bunların tam ölçekli ve pilot ölçekli fizibilitelelerinin doğrulanması beklenmektedir (Nabi ve diğ., 2023). Şekil 2.10'da çeşitli membran temizlik yöntemlerinin sınıflandırılması gösterilmektedir.



**Şekil 2.10:** Membran temizlik yöntemlerinin sınıflandırılması (Nabi ve diğ., 2023).

## 2.5 Quorum Sensing

Temel olarak mikrobiyal topluluk, mikrobiyal kompozisyonu ve bu mikrobiyal topluluğun çokluğunu ifade eder. Besin gereksinimleri, çevresel koşullar (sıcaklık, pH, nem ve oksijen talebi) ve mikrobiyal etkileşimler tek başına veya bunların kombinasyonları mikrobiyal topluluğu doğrudan veya dolaylı olarak etkiler. Doğal veya yapay ortamlardaki besin gereksinimleri ve çevresel koşullar gibi dışsal faktörlerin dinamik olarak mikrobiyal topluluk bileşimi üzerinde etkisi olduğu yapılan çalışmalarda rapor edilmiştir (Dubinkina ve diğ., 2019; Tian ve Wang, 2020).

QS (Quorum Sensing), çekirdek algılayıcı moleküller gibi sinyal moleküllerinin hücre dışı ortama salındığı ve artan popülasyon yoğunluğuyla birlikte biriktiği bir hücre iletişim olgusu olarak tanımlanır. Yanıt eşiğine ulaşıldığında, sinyaller reseptörlere bağlanır ve bir dizi kademeli reaksiyon yoluyla gen ekspresyonunu ve fizyolojik aktiviteleri düzenler (Fuqua ve diğ., 1994). QS örnekleri arasında biyofilm oluşumu, hücre dışı enzim salgılanması, antimikrobiyal madde sentezi, yeterlilik, virülans faktör ekspresyonu sayılabilir (Johansen ve Jespersen, 2017). QS bakterilerde, mantarlarda ve hatta alglerde her yerde bulunur. Bu arada, QS'in çeşitliliği oldukça fazladır ve temel olarak üç gruptan oluşur: Bakteriyel QS, mantar QS'si ve diğer QS. Bakteriyel

QS ile ilgili olarak, N-açıl homoserin laktonlar (AHL veya AI-1), otoindüktör peptid (AIP) ve otoindüktör-2 (AI-2) kritik bakteriyel sinyallerdir ve AI-dışında derin araştırmaya tabi tutulurlar (LaSarre ve Federle, 2013). Tipik olarak Gram-negatif bakteriler esas olarak AI-1 olarak da adlandırılan AHL'yi salgılar. AHL'nin kimyasal yapısı bir homoserin lakton halkası (HSL) ve hidrofobik asil yan zincirinden oluşur. AHL aracılı QS sistemleri, Liu ve diğerleri tarafından özetlenen LuxI/R, LasI/R, RhII/R, AfeI/R, BtaI/R, EsaI/R ve TofI/R dahil olmak üzere birçok sinyal reseptör homologuna sahiptir (Liu ve diğ., 2022). Gram-pozitif bakteriler, ABC taşıma sistemi ile hücre zarı yoluyla aktarılan AIP'yi üretir. Türler arası sinyal AI-2, hem gram pozitif bakterilerde hem de gram negatif bakterilerde luxS geni tarafından kodlanır (Y. Wang ve diğ., 2019). AI-3, enteropatojenik *Escherichia coli*'nin patogenezinde yer alan, daha önce bilinmeyen yapıya sahip bir metabolittir. Bu sistem bakteri/ konakçı krallıklar arası iletişimi sağlar. Mantar QS'i için aromatik alkoller esas olarak mayalar tarafından üretilen feniletanol, triptohol, tirosol ve farnesolden oluşur (Johansen ve Jespersen, 2017). Örneğin farnesol ve tirozol ilk olarak *Candida albicans*'ta tanımlanmış, feniletanol ve triptohol ise *Saccharomyces cerevisiae*'de bulunmuştur (Zeng ve diğ., 2023).

Mikroorganizmalar genellikle doğal veya yapay ekosistemlerde karmaşık bir mikrobiyal etkileşim ağı kurarlar (Yuan ve diğ., 2021). Mikrobiyal etkileşim modları temel olarak işbirliği ve rekabet ilişkilerini içerir ve mikrobiyal topluluğu doğrudan etkiler ve yönlendirir. QS, öncelikle çapraz beslenmeyi düzenleyerek ve antimikrobiyal maddeleri salgılayarak mikrobiyal etkileşim modlarını belirler (Zeng ve diğ, 2023).

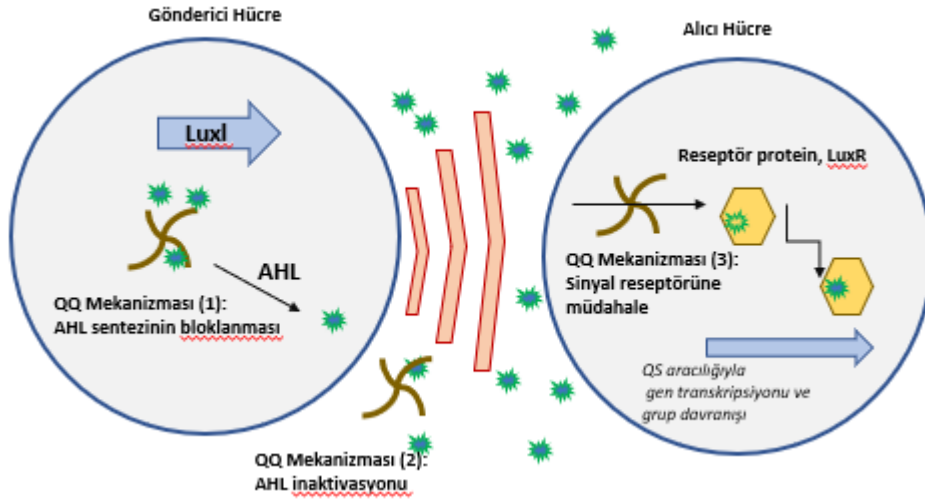
AHL, AI-2 ve AIP'yi içeren temsili çekirdek algılama molekülleri (QSM), hücre dışı ortama atılır. Eşik değerine ulaşıldığında karşılık gelen reseptörler bu sinyallere yanıt verir ve gen ifadesini düzenler. Biyofilm oluşumu, hücre dışı enzim üretimi, antimikrobiyal madde sentezi gibi fizyolojik davranışlar da buna bağlı olarak değişmektedir. Bu süreçler mikrobiyal etkileşim modunu, yani işbirliği ve rekabeti değiştirebilir. Yukarıdaki karmaşık mikrobiyal etkileşimler, mikrobiyal topluluğu belirler ve sonuçta madde ve enerji metabolizmalarına yol açar. Kısaltmalar: AHL: N-asil homoserin laktonlar; AIP: otoindüktör peptidi; AI-2: otoindüktör-2; EPS: hücre dışı polimetrik madde (Zeng ve diğ, 2023).

## 2.6 Quorum Quenching Mekanizması

Çevresel sistemlerde biyofilm oluşumunun aşırı seviyelere ulaşmasını azaltmak amacıyla hem sentetik hem de doğal ajanlar üzerine çeşitli araştırmalar yapılmıştır (Rabin ve diğ., 2015; Yadav ve diğ., 2017). Ancak bu alternatiflerin çoğu, tam ölçekli membran proseslerinde kullanılamayacak kadar yüksek maliyetlidir. Bu sebeple, araştırmacılar son zamanlarda bakteriyel biyofilm oluşumunu mikrobiyal iletişim yoluyla engellemeye yönelik yeni biyolojik yaklaşımlara odaklanmıştır (Grandclément ve diğ., 2016; Oh ve Lee, 2018). Quorum Sensing (QS) olarak bilinen mikrobiyal grup davranışları, sinyal molekülleri aracılığıyla indüklenerek kontrolsüz biyofilm büyümesini önemli ölçüde artırmaktadır. Bu sorunu çözmek amacıyla, sinyal moleküllerinin inaktivasyonunu hedefleyen ve Quorum Quenching (QQ) adı verilen yeni bir biyolojik kirlilik önleme stratejisi araştırılmaktadır (Choo ve diğ., 2020). Bakteriler arasındaki iletişimi kesmeyi amaçlayan QQ, son zamanlarda biyofilm kalınlığını kontrol altına almak için yenilikçi bir yöntem olarak geniş bir uygulama alanı bulmuştur (Ergön-Can ve diğ., 2017). QQ yaklaşımı ile sporülasyon, biyofilm oluşumu ve toksin üretimi gibi birçok virülans mekanizması engellenebilmektedir.

Quorum Quenching, QS olarak bilinen bakteriyel hücreler arası iletişimin inhibisyonuna yönelik bir mekanizmadır. Quorum Sensing (QS) olgusu, otoindükleyiciler adı verilen kimyasal sinyallerin belirli bir eşik konsantrasyonuna ulaşmasıyla birlikte, EPS üretimi, hareketlilik ve biyofilm oluşumu gibi çeşitli bakteriyel davranışları düzenleyen süreçleri başlatır. Quorum Sensing'in kesintisi ya da quorum quenching, üç ana yaklaşımla gerçekleştirilebilir (Şekil 2.11):

- i) otoindükleyicilerin üretiminin engellenmesi,
- ii) sinyal moleküllerine müdahale edilmesi ve
- iii) bu moleküllerin etkisiz hale getirilmesi (Turan ve Engin, 2018).



Şekil 2.11: QQ mekanizmaları.

QS kontrolünün, QQ enzimlerinin ve mikroorganizmaların eklenmesi yoluyla membran biyoreaktörlerinde membran kirlenmesini azalttığı bildirilmiştir (T. H. Kim ve diğ., 2018). N-açil homoserin lakton (AHL) laktonazlar, AHL oksidoredüktazlar, AHL asilazlar, dekarboksilaz, paraoksonaz ve deaminaz gibi çeşitli QQ enzimleri bulunmaktadır (Iorhemen ve diğ., 2017). Kirlenmeyi azaltmaya yönelik ilk enzimatik QQ çalışması, AHL'leri hidrolize edebilen ve böylece EPS konsantrasyonunu azaltarak membran kirlenmesini önleyen bir domuz böbrek asilazının eklenmesiyle gerçekleştirilmiştir (Yeon, Cheong, ve diğ., 2009). Ancak bu yöntemin kısa katalitik ömür, sürekli enzim kaybı ve geri kazanım zorluğu gibi dezavantajları vardır. Alternatif bir çalışma, QQ asilazın manyetik taşıyıcılar üzerinde immobilize edilmesini içermekte ve bu yöntem, membran tıkanıklığında daha istikrarlı bir azalma sağlamaktadır (Yeon, Lee, ve diğ., 2009). Ayrıca, aynı QQ enziminin membran yüzeyine entegre edilmesi durumunda biyofilm olgunlaşmasının engellendiği gözlemlenmiştir; sadece az miktarda EPS, mikrokoloni ve planktonik bakteri membran yüzeyinde kalmıştır (J.-H. Kim ve diğ., 2011). Benzer şekilde, asilazın sodyum aljinat kapsüllerine immobilize edilmesi, sadece membran kirlenmesini değil, aynı zamanda çamur özelliklerini de etkilemekte; çamur çökebilirliğini artırmakta, partikül boyutunu küçültmekte, zeta potansiyelini artırmakta ve EPS ile SMP'lerin özelliklerini ve fonksiyonlarını değiştirmektedir (Jiang ve diğ., 2013). Enzim kullanımı, yüksek maliyet ve düşük stabilite gibi çeşitli zorluklar doğurur. Bu nedenle, araştırmalar daha çok QQ bakterilerinin membran kirlenmesinin engellenmesinde kullanımına odaklanmıştır. E. coli ve Rhodococcus gibi QQ bakterilerinin mikrobiyal bir damar içinde kapsüllemesi, membran yüzeyine mikrobiyal bağlanmayı önemli

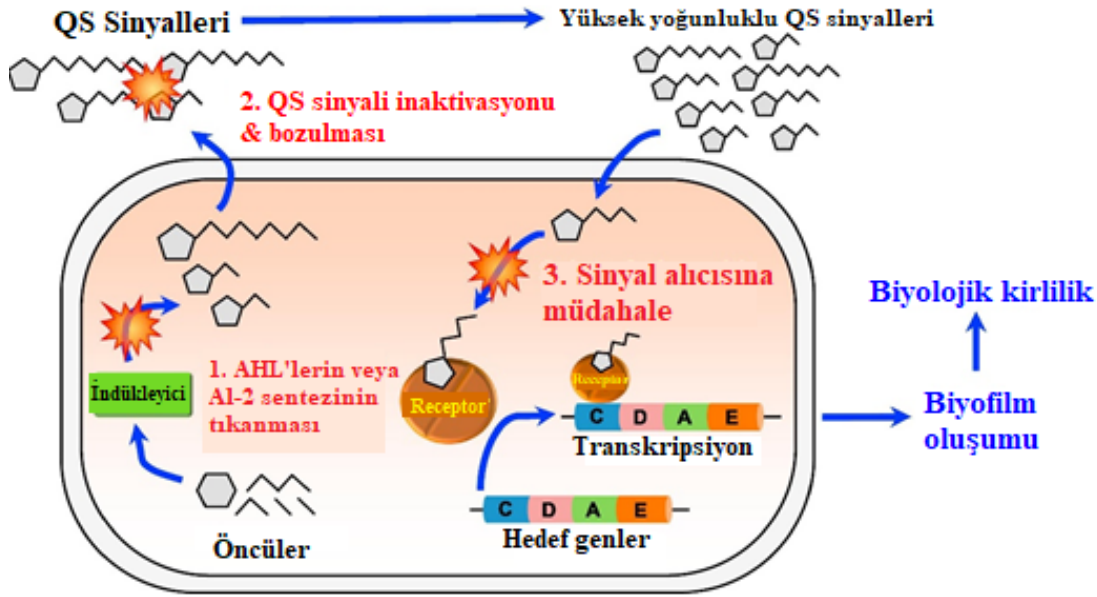
ölçüde azaltmaktadır (Oh ve diğ., 2012). Özellikle Rhodococcus'un serbest hareket eden aljinat boncukları içinde tutulması, hem biyolojik QQ etkileri hem de hücre boncuklarının fiziksel sürtünmesi sayesinde membran kirlenmesini azaltmaktadır. Bu yöntemin, gerçek atık su arıtma tesislerinde uygulanabilirliğinin yanı sıra, membran biyoreaktörlerinin kritik bir transmembran basıncına (TMP) ulaşmadan önceki çalışma süresini 10 kat artırdığı kanıtlanmıştır (S.-R. Kim ve diğ., 2013). Çalışma, 35 L etkin hacme sahip pilot ölçekli bir MBR'de test edilmiş olup, Rhodococcus sp. kullanımı daha uzun bir filtrasyon süresi (kontrol MBR'sinden yedi kat daha fazla), azalmış membran kirlenmesi, düşük AHL üretimi ve EPS konsantrasyonu, geliştirilmiş çamur susuzlaştırma ve uzun süreli TMP artışı ile sonuçlanmıştır (Maqbool ve diğ., 2015).

QQ ile ilgili benzer bir çalışmada, düşük havalandırma yoğunluğunda (0.03 m<sup>3</sup>/saat) enerji tüketiminin, daha yüksek havalandırma hızına (0.12 m<sup>3</sup>/saat) sahip bir koşula kıyasla yaklaşık %27 oranında azaldığı bildirilmiştir. Bu durum, mikrobiyal damarların membran kirlenmesinin azaltılması ve enerji tasarrufu sağlanmasında başarılı bir sinerjik etki gösterdiğini ortaya koymuştur (Weerasekara ve diğ., 2014). Başka bir çalışmada, mikrobiyal damarın QQ aktivitesinin, içindeki QQ bakterilerinin sürekli yenilenmesi nedeniyle yaklaşık 100 gün boyunca uzun vadeli etkinliğini koruduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, mikrobiyal damarların konumundan bağımsız olarak QQ mikrobiyal damarlarının kirlenmeyi hafiflettiği ve en yüksek QQ etkisinin membrana en yakın mesafede kaydedildiği belirtilmiştir (Jahangir ve diğ., 2012). QQ aracılı biyolojik kirlilik kontrolünün uzun vadeli etkisi, tipik mikrobiyal damar boyutundan daha büyük olan bakteri hücrelerinin boyutuyla ilgilidir. Böylece, QQ bakterileri mikrobiyal damarda tamamen tutulurken, besinler ve otoindükleyici moleküller mikrobiyal damar gözeneklerinden serbestçe geçebilmektedir (Cheong ve diğ., 2013)

Yakın tarihli bir çalışma, Rhodococcus sp. BH4 içeren QQ boncukları kullanan bir MBR'de biyofilm kalınlığının kontrolü hakkında yenilikçi bilgiler sunmuştur (Taşkan ve diğ., 2020). Elde edilen veriler, QQ stratejisinin bir MABR'de biyofilm kalınlığını kontrol etmede etkili olduğunu ve gelecekteki araştırmalar için öngörü sağladığını göstermiştir. QQ yoluyla biyofilm kalınlığının başarılı bir şekilde azaltılması veya kontrol edilmesi, pilot ölçekli veya büyük ölçekli MABR'lerde biyofilm yönetimi için yeni ve etkili bir strateji sunabilir. Bu nedenle, biyofilm kalınlığını kontrol etmek amacıyla daha etkin QQ aktivitesine sahip bakterilerin aranması başlamıştır.

## 2.6.1 Biyolojik kirlilik kontrolü için QQ mekanizması

Şekil 2.12, mikrobiyal iletişimi bozmak için uygulanabilecek olası QQ stratejilerini göstermektedir: (i) sinyal moleküllerinin sentezinin engellenmesi; (ii) sinyal moleküllerinin etkisiz hale getirilmesi veya bozunması ve (iii) sinyal reseptörlerine müdahale edilmesi. Ayrıca, bir sistemdeki QQ bakterilerinin aktivitesinin ve/veya büyümesinin teşvik edilmesi, QS fenomenini engelleyebilir.



Şekil 2.12: Biyolojik kirlilik kontrolü için QS sinyal yolları ve olası QQ stratejileri (Jiao ve diğ., 2020).

### 2.6.1.1 Enzimatik QQ mekanizması

QS sinyal moleküllerinin (örneğin AHL'ler) bozunması veya inaktivasyonu, QQ enzimleri tarafından gerçekleştirilebilir. AHL'lerin kimyasal yapısında, QQ enzimlerinin hedefleyebileceği birkaç bölünme bölgesi bulunur ve bu enzimler, lakton halkasının açılması ve AHL'lerin açıl yan zincirinin bölünmesi işlemlerini gerçekleştirebilir. Laktonaz, lakton halkasını açabilir, asılaz ise AHL'lerin açıl yan zincirini parçalayabilir (Lin ve diğ., 2003). Laktonaz tarafından açılan lakton halkası, asidik pH seviyelerinde (<2) kendiliğinden eski haline dönebilir (Yates ve diğ., 2002). Ek olarak, oksidoredüktaz, AHL'lerin açıl yan zincirinin indirgenmesini (O→OH) katalize edebilir. Literatürde çeşitli QQ enzimleri rapor edilmiştir, ancak AHL'lerin QQ enzimi üreten bakterilerin birincil hedefleri olup olmadığıyla ilgili fizyolojik işlevler belirsizliğini korumaktadır.

Literatürde çeşitli sinyal molekülleri tanımlanmış ve rapor edilmiştir. AHL'ler, Gram-negatif bakteriler tarafından kullanılan başlıca sinyal molekülleridir (Galloway ve diğ., 2011), peptit sinyalleri ise öncelikle Gram-pozitif bakteriler tarafından kullanılır. Hem Gram-negatif hem de Gram-pozitif bakteriler tarafından kullanılan geniş spektrumlu bir mikrobiyal feromon olan AI-2, türler arası bir sinyal molekülü veya 'mikrobiyal Esperanto' olarak kabul edilmektedir (Rickard ve diğ., 2006).

### 2.6.1.2 Bakteriyel QQ mekanizması

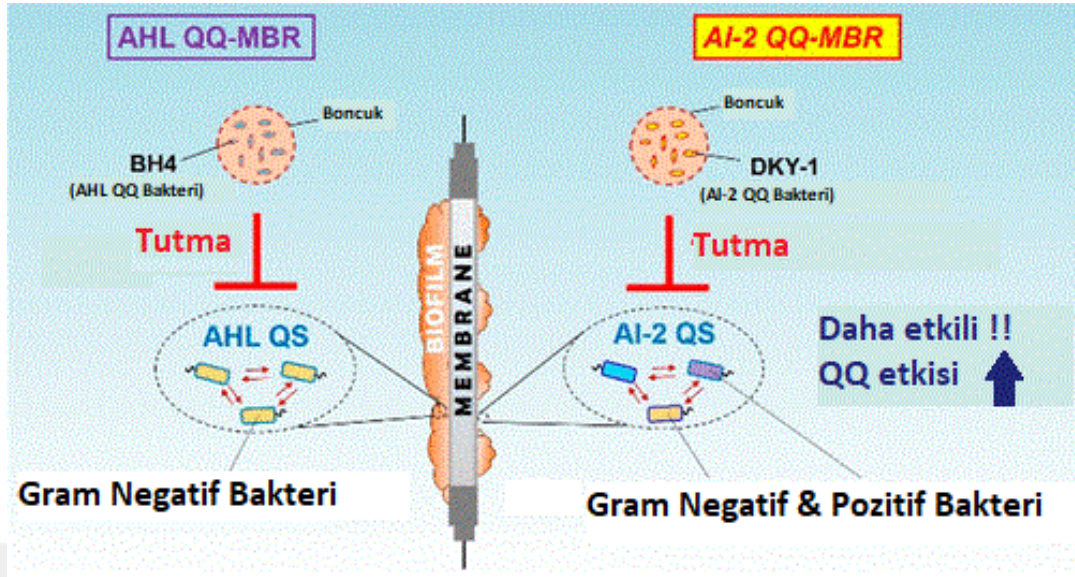
Enzimatik QQ'nun, biyolojik kirlenmeyi azaltmak amacıyla bakteriyel QS'ye müdahale etmede etkili olduğu bilinmektedir (Yeon, Cheong, ve diğ., 2009). Ancak, bu enzimlerin nispeten yüksek maliyeti ve düşük stabilitesi, enzimatik yaklaşımların başlıca sınırlamalarını oluşturmaktadır. Atık su arıtımında etkili QQ uygulaması için, AHL bozunduran QQ enzimleri üretebilen QQ bakterileri, aktif çamurdan başarıyla izole edilmiş ve MBR proseslerinde kullanılmıştır. Aktif çamurda şimdiye kadar tanımlanan QQ mikroorganizmalar Tablo 2.1'de özetlenmiştir. *Rhodococcus* sp. BH4 ve *Bacillus methylotrophicus* sp. WY izolatlarının, çeşitli AHL'leri parçalayabilen laktonaz ürettiği bulunmuştur (Şekil 2.13) (Oh ve diğ., 2012). Ayrıca, asilaz enzimleri üretebilen *Pseudomonas* sp. 1A1, Kore'deki Sihwa atık su arıtma tesisinin aktif çamurundan izole edilmiştir (Cheong ve diğ., 2013). QQ bakterilerinin aktivitesi, doğrudan eklenen QQ enzimlerinin aktivitesi kadar yüksek olmasa da, QQ bakterilerinin kullanımı, kullanım kolaylığı, daha uzun stabilite ve artırılmış ekonomik fizibilite gibi çeşitli avantajlar sunmaktadır.

**Çizelge 2.2:** Aktif çamurdan izole edilen QQ mikroorganizmaları (K. Lee, Yu, ve diğ., 2018).

Enzim veya aktif madde	Kaynak	Substrat
AHL QQ		
AHL laktonaz	<i>Rhodococcus</i> sp. BH4	C6, C7, C8, C10, 3OC6, 3OC8
AHL laktonaz	<i>Bacillus methylotrophicus</i> sp. WY	C8, C10, C12, C14, 3OC6, 3OC12
AHL laktonaz	<i>Bacillus</i> sp. T5	C8

**Çizelge 2.2 (devam):** Aktif çamurdan izole edilen QQ mikroorganizmaları (K. Lee, Yu, ve diğ., 2018).

Enzim veya aktif madde	Kaynak	Substrat
AHL laktonaz	<i>Enterococcus</i> sp. HEMM-1	C4, C6
AHL asilaz	<i>Delftia</i> sp. T6	C8
AHL asilaz	<i>Acinetobacter</i> sp. Ooi24	C10
Kültür süpernatantı	<i>Pseudomonas</i> sp. 1A1	C6, C8, C10, C12, 3OC12
Kültür süpernatantı	<i>Staphylococcus</i> sp. ML-1	3OC6
Kültür süpernatantı	<i>Micrococcus</i> sp. SY-1	C6
Kültür süpernatantı	<i>Pseudomonas</i> sp. SS-1	C6
Hücre lizati	<i>Afipia</i> sp. MS-1	3OC6
Hücre lizati	<i>Acinetobacter</i> sp. HMS-1	C6
Hücre lizati	<i>Streptococcus</i> sp. SL-2	3OC6
Bütün hücre	<i>Rhodococcus</i> sp. B5	C6
Bütün hücre	<i>Microbacterium</i> sp. HSY-2	C6
AI-2 QQ		
Kültür süpernatantı (hidrofilik, <400 Da)	<i>Acinetobacter</i> sp. DKY-1	AI-2 (DPD, 4,5-dihydroxy-2,3-pentandione)
Farnesol	<i>Candida albicans</i> Tup1/Tup1	Blockage of LuxS synthesis



**Şekil 2.13:** AHL'lerin mikrobiyal QQ'su ve MBR'lerde AI-2 sinyal molekülleri (K. Lee, Kim, ve diğ., 2018).

QQ MBR'lerle ilgili yapılan çalışmaların çoğu, Gram-negatif bakteriyel QS'ye müdahale etmek amacıyla AHL'lerin ayrışmasıyla sınırlı kalmıştır (Oh ve Lee, 2018). Ancak, AI-2'nin hem Gram-negatif hem de Gram-pozitif bakteriler (>70 tür) tarafından salgılanan evrensel bir QS sinyal molekülü olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, AI-2, atık su arıtımında kullanılan MBR sistemlerinde biyolojik kirliliği önlemek amacıyla QS sistemini bozmak için kullanılmıştır (K. Lee, Kim, ve diğ., 2018). Bir *Acinetobacter* sp. DKY-1 izolatının, MBR'lerin aktif çamurunda bulunan DPD'yi (dihidroksi-2,3-pentandion) inaktive ettiği bulunmuştur (Şekil 2.13). DKY-1, hidrofilik bir karaktere ve <400 Da moleküler ağırlığa sahip olan bir AI-2 QQ bileşiği salmıştır. DKY-1 tutucu ortamın (örneğin boncuklar) bir MBR'ye eklenmesi, karışık sıvıdaki DPD konsantrasyonunu önemli ölçüde azaltmış ve bu da membran biyolojik kirlenmesinde belirgin bir azalmaya yol açmıştır.

### 2.6.1.3 Fungal QQ mekanizması

Enzimatik ve bakteriyel QQ stratejileri, MBR'lerde etkili biyolojik kirlilik kontrolü sağlamak amacıyla aktif QQ bakterilerinden elde edilen enzimlerin (örneğin, asilaz ve laktonaz) doğrudan eklenmesi veya dolaylı olarak üretilmesine odaklanmıştır. MBR'lerdeki aktif çamur, bakteri, protozoa, metazoan, alg ve mantar gibi çeşitli mikroorganizmalardan oluşur, bu nedenle bakteri dışındaki mikroorganizmaların da

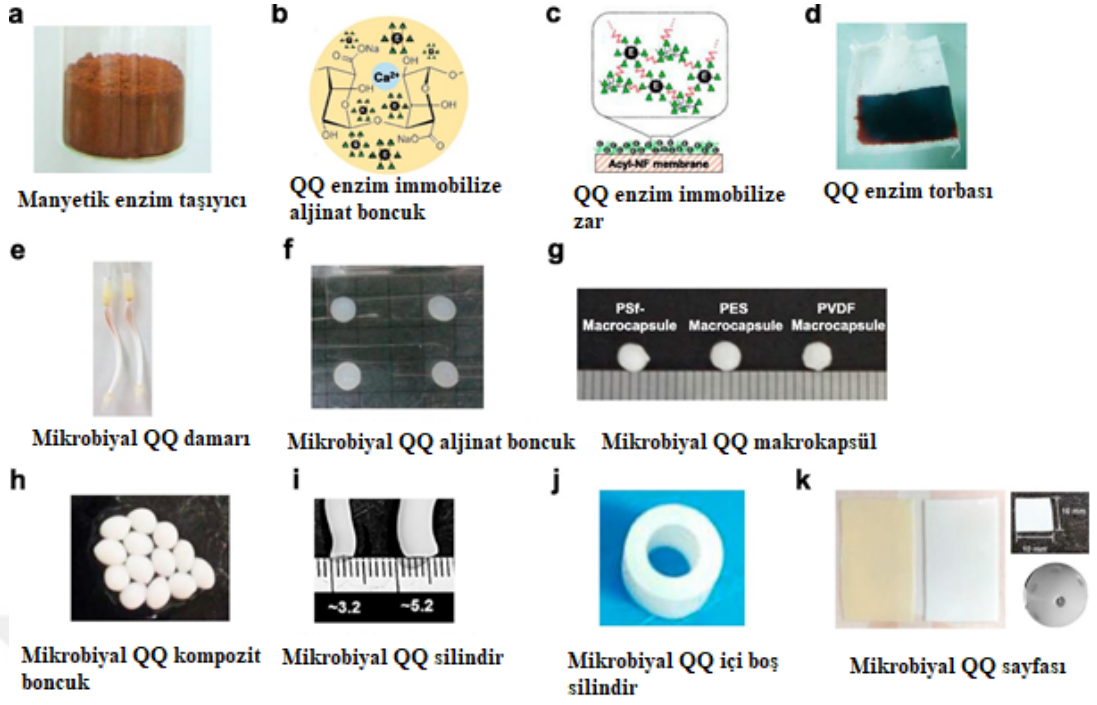
bakteriyel QS'yi etkileyebileceği mümkündür. Lee ve arkadaşlarının çalışmasında, *C. albicans* (bir mantar) tarafından salgılanan farnesolün, bakteriyel QS'ye karşı QQ aktivitesi gösterdiği ve düşük havalandırma yoğunluklarında bile bir MBR'de membran biyolojik kirlenmesini önemli ölçüde azalttığı gösterilmiştir (K. Lee ve diğ., 2016). Etkili biyolojik kirlilik kontrolü ve buna bağlı olarak mantardan bakteriye QQ yoluyla enerji tasarrufu sağlanması, bu yöntemin atık su arıtımı için büyük ölçekli MBR'lerde başarılı bir şekilde uygulanmasını mümkün kılacaktır.

#### **2.6.1.4 Fotokatalitik QQ mekanizması**

Başka bir QQ yaklaşımı, reaktif oksijen türleri (ROS) üreten fotokatalitik süreçleri kullanarak sinyal moleküllerini bozundurmaya içerir. Fotokataliz, hücre büyümesine belirgin bir sitotoksikite göstermese de, UV ışınları altında TiO<sub>2</sub> varlığında *Escherichia coli* K12'nin biyofilm oluşumunun önemli ölçüde geciktiği bildirilmiştir (Xiao ve diğ., 2016). Aynı çalışmada, *E. coli* tarafından salgılanan AI-2 sinyallerinin ROS (örneğin süperoksit ve hidroksil radikalleri) tarafından etkisiz hale getirildiği belirtilmiştir. Bu çalışma, fotokatalizin MBR'lerde biyolojik kirlilik kontrolü için alternatif bir QQ yöntemi olabileceğini göstermiştir, ancak büyük ölçekli MBR'lerde fotokatalitik QQ hakkında henüz bir çalışma mevcut değildir. UV radyasyonu için gereken ek enerji, bu yöntemin gerçek MBR'lerde uygulanmasını sınırlayan önemli bir faktördür. Bu yaklaşımın ekonomik fizibilitesi ve fotokatalizin MBR biyotıkanmasını azaltmadaki etkisinin belirlenmesi için daha fazla araştırma gerekmektedir.

#### **2.6.2 QQ medya tasarımları ve üretimi**

MBR'lere dozlanan serbest enzimlerin kaybını önlemek için QQ enzimlerinin (örneğin, laktonaz veya asilaz) ortam üzerine doğrudan fiksasyonu (kaplama veya gömme) gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.14). Yüklü polimerlerin ve enzimlerin katman katman biriktirilmesi yoluyla, domuz böbrek asilaz I, hazırlanan manyetik ortam üzerine immobilize edildi (Yeon, Lee, ve diğ., 2009). Anyonik polistiren sülfonat ve katyonik kitosan, ticari olarak satın alınabilen Orica manyetik iyon değişim reçinesi üzerinde biriktirildi. Glutaraldehit kullanılarak, asilaz tabaka üzerinde son çapraz bağlama yapıldı (Şekil 2.14 (a)). Böylece bir manyetik enzim taşıyıcı elde edilmiştir.



**Şekil 2.14:** QQ MBR'ler için geliştirilmiş ve test edilmiş QQ ortamının türleri ve yapıları (Jiao ve diğ., 2020).

Asılaz, Şekil 2.14 (b)'de gösterildiği gibi, aljinat polimerleri içinde kapsüllenmiştir. Aljinat polimerleri yüksek oranda biyoyumludur. İyon değişim reaksiyonları, asılaza ve sodyum aljinat karışımının katılaşmasını ve küresel aljinat taneciklerini oluşturmasını sağlar (Jiang ve diğ., 2013). Asılaza kaplanmış aljinat tanecikleri kullanılan bir MBR'de biyolojik kirliliğin azaldığı ve hem karışık likörde hem de membran üzerindeki kek tabakasında EPS ve çözünebilir mikrobiyal ürünleri azalttığı gözlemlenmiştir.



### 3. MATERYAL VE METOT

Tez çalışması kapsamında, çeşitli inorganik kirleticiler içeren zorlu karakterde kentsel atıksular arıtılarak endüstriyel atıksu deşarjının da söz konusu olduğu kentsel atıksu arıtımını gerçekleştiren bir MBR tesisinde yaşanabilecek toksik şoklar sırasında QQ mekanizmasının etkinliğinin devamlılığı incelenmiştir. QQ mekanizması, Rhodococcus sp. BH4 bakterisinin immobilize edildiği sodyum aljinat boncuklar ile gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, çalışmada üretim atıksuyu/ sızıntı suyu gibi suları temsilen yüksek tuzluluk ilavesi (%10-%25) içeren atıksu, tekstil endüstrisini temsil eden sülfat (25-250 mg/L) ilaveli atıksu ve çimento endüstrisini temsil eden kurşun metal ilaveli atıksu (0,1-1 ppm) ile kentsel atıksu simüle eden sentetik atıksu ile beslenen QQ-MBR'ler yarı-pilot ölçekte işletilmiştir. Bu üç işletme parametresinin yanı sıra endüstri kaynaklı kirleticilerin QQ-MBR işletimindeki başarısını hangi ölçüde etkilediğini belirlemek adına bu kirleticilerin olmadığı fakat tüm işletme koşullarının aynı olduğu bir 'Yalın QQ-MBR' işletimi gerçekleştirilmiştir.

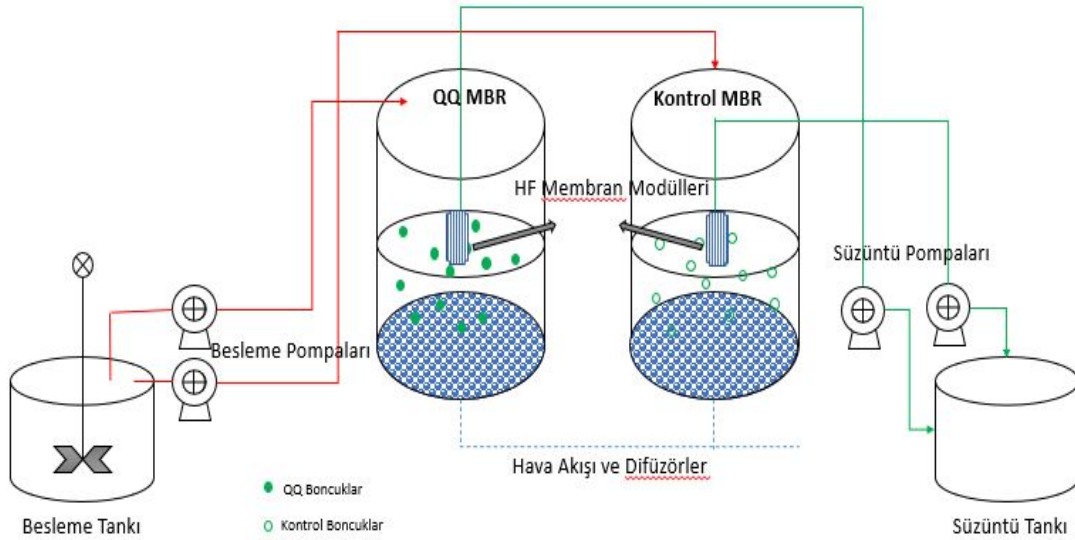
#### 3.1 Membran Biyoreaktör

İki paralel eşit reaktörün yan yana getirilmesi ile oluşturulmuş MBR sistemi (Kontrol-MBR, QQ-MBR) sırasıyla, yüksek tuzluluk, sülfat, kurşun ve herhangi bir ilave olmadan işletilmiştir. Bunun amacı, aynı koşullarda işletilen iki adet reaktörün birine QQ uygulaması yapılırken diğesine yapılmaması ve sonuçların karşılaştırılabilmesidir. Reaktörler, çeşitli endüstrileri temsil eden atıksu karakterlerinde sentetik atıksu ile beslenmiştir. Her iki reaktöre hollow fiber membran modülleri yerleştirilmiş ve süzüntü hatlarına TMP ölçerler (vakummetre) konulmuştur. Çekim (vakum) gücünün oluşturduğu basınç değerleri bilgisayara aktarılmıştır. Reaktörlerin besleme akımının sağlanması ve arıtılmış suyun modülden çekimi peristaltik pompalar yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Membran biyoreaktör sistemi ile ilgili bilgiler Çizelge 3.1'de verilmektedir.

**Çizelge 3.1:** MBR sistemi özellikleri.

Birim	Değer
Besleme tankı kapasitesi	80 L
Peristaltik pompa debisi	1-250 mg/L
Reaktör hacmi	40*2 L

Çalışmada kullanılan MBR sistemi temel olarak, 40'ar litrelik paralel iki tank, ikişer adet süzüntü ve besleme pompası, süzüntü tankı, besleme tankı ve TMP ölçerden oluşmaktadır. MBR sisteminin akım şeması Şekil 3.1'de gösterilmektedir.



**Şekil 3.1:** MBR sistemi şematik gösterimi.

Silindirik iki adet tank bulunan yarı pilot ölçek MBR sisteminde harici pH ve çözülmüş osijen propları vasıtası ile her gün üç kez giriş ve tank içinde ölçümler gerçekleştirilmiştir. Yine aynı ölçüm cihazları ile tank içi sıcaklık değerleri kontrol edilmiş, hava sıcaklığının düştüğü günlerde sanayi tipi bir ısıtıcı yardımı ile ortam sıcaklığı dengelenmiştir. Tanklardaki seviye kontrolü gün boyu gözlemlenmiş; besleme ve süzüntü pompaları aracılığıyla (Şekil 3.2) tank seviyeleri kontrol altında tutulmuştur. İşletme süresince reaktörler, tabanlarında bulunan disk difüzörler ile havalandırılmıştır. MBR sistemi ve işletme ortamı Şekil 3.3'te gösterilmiştir.

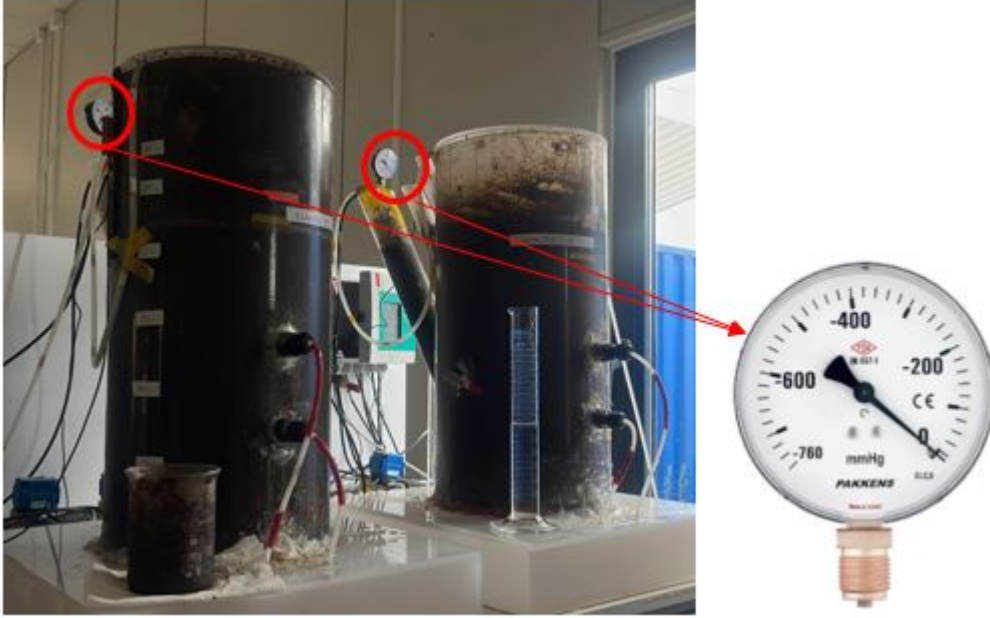


Şekil 3.2: Kontrol-MBR'ye ait besleme ve süzüntü pompaları.



Şekil 3.3: QQ-MBR ve Kontrol-MBR reaktörleri.

Membran tıkanmasını ve QQ mekanizmasının etkisini gözlemlemek için TMP ölçer ile membran basıncı manuel olarak okunup sürekli olarak kaydedilmiştir. Her iki reaktördeki süzüntü boruları üzerine yerleştirilmiş birer adet TMP ölçer Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



**Şekil 3.4:** TMP ölçer.

Reaktörlerdeki çamurun AKM oranını koruyabilmek, mikrobiyal komünitenin canlılığını sağlayabilmek için her gün üç kez olacak şekilde tank içi sıcaklık, pH ve çözünmüş oksijen ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler, harici cihaz ve problarla gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık ve çözünmüş oksijen Hach HQ40d marka ölçüm cihazı ve probu ile ölçülmüş olup Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



**Şekil 3.5:** Multiparametre ölçüm cihazı ve çözünmüş oksijen probu.

Reaktör içi pH ise yine aynı sıklıkta olacak şekilde Mettler Toledo Seven2Go cihazı ve pH probu ile ölçülmüştür. Şekil 3.6'da gösterilmektedir.



**Şekil 3.6:** pH metre ölçüm cihazı ve probu.

### **3.1.1 MBR sisteminde kullanılan hollow fiber membran modülleri**

MBR işletimi, reinforced ticari hollow fiber membranlar kullanılarak hazırlanan membran modülleri ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.7).



**Şekil 3.7:** Hollow fiber membran.

Hollow fiber membranlar, yüksek kimyasal direnç sağlayan PVDF polimeri ve destek tabakası olarak PET içerir. Bu nedenle, bu membranlar pH ve iletkenlik gibi kimyasal özelliklerin sorun teşkil ettiği atık sulara karşı dayanıklıdır. Ayrıca, bu membranlar yüksek mekanik dayanıklılık gösterir. Ortalama 0.04 µm gözenek çapına sahip olan hollow fiber membranlar, askıda katı maddeler, bakteriler ve diğer patojenleri %95-98 oranında arıtabilmektedir. Hollow fiber membran modülü özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

**Çizelge 3.2:** Membran modül özellikleri.

Ortalama gözenek çapı	0,04 µm
Fiber çapı	2,1 mm
Akış yönü	Dıştan içe
Modül membran alanı	0,075 m <sup>2</sup> *2

Çalışma prensibi dıştan içe olan, sistemde kullanılan bir modül için etkin boy uzunluğu ortalama 30 cm olan 20 adet HF (hollow fiber) membran kullanılmıştır. 20 adet fiber ikiye katlanarak uçlardan bir boru vasıtası ile birleştirilmiş ve yapıştırılmıştır. Yapıştırıcının kurumması için bir gün bekletilmiş ve araları yapıştırıcı ile dolu fiberlerden oluşan Şekil 3.8’de gösterilen modül elde edilmiştir. Modünün uç kısmına bir ara bağlantı yapıştırılmış ardından MBR sistemindeki boruya uygun pnömatik bağlantıdır.



**Şekil 3.8:** Hollow fiber membran modülü.

Modül yapımı tamamlandıktan sonra su içerisinde hava testi yapılarak kaçak olup olmadığı test edilmiştir. Modüller MBR'ye takılana kadar toz almayacak şekilde bekletilmiştir.

### 3.1.2 Besleme atıksuyunun bileşenleri ve aktif çamur karakterizasyonu

Çalışmada, İstanbul'da bulunan bir ileri biyolojik atıksu arıtma tesisinden alınan kentsel atıksu aşı çamuru olarak kullanılmıştır. Çamur işletme koşulları eşit olan iki reaktöre eşit hacimlerde koyulmuştur. Çamurun aklımasyonu için evsel nitelikli sentetik besleme atıksuyu kullanılmıştır. Aklımasyon aşaması, tuzluluk, sülfat, kurşun ve yalın işletme fazları için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Sentetik atıksu besleme reçetesi Çizelge 3.3'te verilmiştir.

**Çizelge 3.3:** Sentetik atıksu besleme reçetesi.

Kimyasal	Birim	Konsantrasyon (mg/L)
Glikoz	mg/L	400
Baktopepton	mg/L	115
Amonyun Sülfat	mg/L	104,8
Mono Potasyum Fosfat	mg/L	21,75
Magnezyum Sülfat	mg/L	15,63
Demir (III) Klorür	mg/L	0,075

**Çizelge 3.3 (devam):** Sentetik atıksu besleme reçetesi.

Kimyasal	Birim	Konsantrasyon (mg/L)
Kalsiyum Klorür	mg/L	2,45
Mangan (II) Sülfat	mg/L	1,8
Sodyum Bikarbonat	mg/L	255,5
Tuz*	‰	10
Sülfat (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )**	mg/L	25-250
Kurşun***	ppm	0,1-1

\*Yalnızca Faz I'de ilave edilecek; \*\*Yalnızca Faz II'de ilave edilecek; \*\*\*Yalnızca Faz III'te ilave edilecektir.

Çalışmanın aklımasyon ve işletme aşamalarında Çizelge 3.3'te belirtilen sabit bir sentetik besleme atıksuyu reçetesi kullanılmıştır. Kurşun ile işletmenin gerçekleşeceği Faz III işletmesinde tuz ve sülfat hariç tüm kimyasallar; sülfat ile işletmenin yapılacağı Faz II'de tuz ve kurşun hariç tabloda konsantrasyonları verilen tüm kimyasallar ve son olarak tuz ile işletmenin gerçekleştiği Faz I'de ise sülfat ve kurşun hariç bütün kimyasallar belirtilen oranlarda sentetik besleme atıksu reçetesini oluşturmaktadır.

### 3.2 QQ Boncukların ve Hollow Fiber Membran Modüllerinin MBR'lere Atılması

MBR işletmesi öncesi hazırlanmış olan (Şekil 3.9) , *Rhodococcus sp.* BH4 bakteri immobilize edilmiş aljinat boncukları (QQ boncuk) ve bakterisiz aljinat boncuklar (Kontrol boncuk) QQ-MBR reaktörüne ve Kontrol-MBR reaktörüne eklenmiştir. Boncuklar işletimi gerçekleştirilen dört faz için de ayrı ayrı hazırlanmış ve her fazda çamurun aklımasyonunun akabinde reaktörlere eklenmiştir. Boncukların reaktörlere eklenme anı Şekil 3.10'da gösterilmektedir. Hemen ardından hazırlanmış olan membran modülleri sistemdeki borulara bağlanarak süzüntü alınmaya başlanmış ve TMP değerleri ve sıcaklık, pH gibi kontrol parametreleri kaydedilmeye başlanmıştır.



Şekil 3.9: Kontrol ve QQ boncuklar.



Şekil 3.10: Kontrol/ QQ boncukların reaktörlere eklenmesi.

### 3.3 MBR İşletme Parametreleri

MBR işletimi kapsamında, işletimi gerçekleştirilen dört fazda, giriş atıksuyunda, Kontrol ve QQ MBR tanklarının içerisinde ve reaktörlerin çıkış suyunda çeşitli analizler belirli aralıklarla gerçekleştirilmiştir. Bu analizler; KOİ, AKM, UAKM, TN, TOK, SMP-EPS, ÇO, pH, bulanıklık, sıcaklık olarak sıralanabilir. Bu analizler ve

ölçüm sıklıkları Çizelge 3.4'te gösterilmiştir. İşletme sonunda reaktör içi tür değişimlerini görmek için tür analizi gerçekleştirilmiştir.

**Çizelge 3.4:** MBR işletiminde ölçülen parametreler, ölçüm noktaları ve sıklıkları.

Parametre	Ölçüm Metodu	Besleme Atıksuyu	Sistem Çamuru	Çıkış Suyu
AKM	APHA, 2017	3/hafta	5/hafta	3/hafta
UAKM	APHA, 2017	3/hafta	5/hafta	3/hafta
KOİ	APHA, 2017	3/hafta	-	3/hafta
Bulanıklık	Bulanıklık ölçer	5/hafta	-	5/hafta
pH	pH metre	Sürekli	Sürekli	-
Sıcaklık	Prob	Sürekli	Sürekli	-
Çözülmüş Oksijen	Prob	Sürekli	Sürekli	-
TN	TOC-VCPN cihazı	5/hafta	-	5/hafta
TOK	TOC-VCPN cihazı	5/hafta	-	5/hafta

### 3.3.1 Askıda katı madde- uçucu askıda katı madde (AKM- UAKM)

Reaktörlerdeki AKM ve UAKM konsantrasyonları günlük olarak ölçülmüştür. Bu amaçla gravimetrik ölçüm yöntemi kullanılmıştır.

Kullanılan araç ve gereçler

- Etüv
- Desikatör
- Kül fırını
- Mezür
- Alüminyum kap
- Pens

- Süzme seti
- Analitik terazi
- Cam elyaf filtreler

#### Deneyin yapılışı

Filtrasyon düzeneği kurulur. Filtre kağıdı, 103-105°C’de etüvde en az 1 saat kurutulur, böylelikle nemi alınan filtre kağıtları ardından desikatöre alınır. Minimum on beş dakika sonra desikatörden alınır, sabit tartımı alınır ve filtre düzeneğine yerleştirilir. Bu esnada filtre düzeneğindeki vakum hattı yardımıyla filtreden saf su geçirilir. İyi çalkalanmış numuneden belli hacimde alınarak vakum uygulanarak süzme işlemi gerçekleştirilir. Filtreleme esnasında vakum hunisisnin cidarları da saf su ile yıkanır; kalıntı kalmamasına dikkat edilir. Bir cımbız yardımıyla süzme setinin üzerinden alınan filtre kağıdı alüminyum bir kaba konur. En az bir saat 103-105°C’de etüvde bekletilir. Sonrasında desikatörde soğutulup tartım yapılır.

Filtre ve üzerindeki kalıntı, daha sonra 30 dakika süreyle kül fırında 500-550°C’de yakılır. Desikatörde soğutulur ve tartılır.

#### Hesaplama

$$AKM \text{ (mg/L)} = (A-B) \times 1000 / (\text{Örnek hacmi (ml)})$$

$$UAKM \text{ (mg/L)} = (A-C) \times 1000 / (\text{Örnek hacmi (ml)})$$

$$A = \text{filtre + kalıntı ağırlığı (mg)} \quad A = \text{filtre + kalıntı ağırlığı (mg)}$$

$$B = \text{filtre darası (mg)} \quad C = \text{filtre darası + inorganik kalıntı ağırlığı (mg)}$$

### **3.3.2 Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ)**

Periyodik olarak besleme atıksuyu ve çıkış süzüntü suyundan alınan numunelere periyodik olarak KOİ analizi yapılmıştır. Standart metotlara göre yapılan bu analiz ile KOİ giderim verimleri işletimi gerçekleştirilen her bir fazda iki reaktör için gerçekleştirilmiştir.

#### Kullanılan kimyasallar:

*Standart potasyum dikromat çözeltisi:* 33.3 gram civa sülfat (HgSO<sub>4</sub>), 500 ml distile su içinde çözülür ve üzerine 167 ml derişik sülfürik asit eklenir. Çözelti soğuduktan

sonra, önceden 2 saat boyunca 103 °C’de kurutulmuş 4.903 gram potasyum dikromat eklenir ve çözelti distile su ile 1 litreye tamamlanır.

*Gümüşlü sülfürik asit reaktifi:* 5.5 gram gümüş sülfat (Ag<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), 1 kg sülfürik asit içine eklenir ve gümüş sülfatın tamamen çözülmesi için 1-2 gün bekletilir.

Ferroun indikatör çözeltisi: 0.695 gram FeSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O, suda çözülür ve 1.485 gram 1,10 fenantrolin monohidrat eklenir, çözelti tamamen çözülene kadar karıştırılır ve distile su ile 100 ml’ye tamamlanır.

*Standart demir amonyum sülfat çözeltisi (DAS) (0.025 N):* 98 gram (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>Fe(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>6H<sub>2</sub>O, distile suda çözülür. Üzerine yavaş yavaş 20 ml derişik sülfürik asit eklenir, karışım soğutulur ve distile su ile 1000 ml’ye tamamlanır. Bu çözelti her kullanıldığında, standart dikromat çözeltisine göre ayarlanmalı ve normalitesi bulunmalıdır. Standardizasyon işlemi şu şekilde yapılır:

*Standardizasyon:* 10 ml standart K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> çözeltisi, 4 mol/L sülfürik asit çözeltisi ile 100 ml’ye seyreltilir ve DAS ile titre edilir. Bu titrasyon sonucunda standart DAS’ın normalitesi aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$\text{Standart DAS'ın normalitesi} = (V_1 \times N_1) / V_2 = (10 \times 0.24) / V_2$$

V<sub>1</sub> = Dikromat hacmi (ml)

V<sub>2</sub> = DAS sarfiyatı (ml)

N<sub>1</sub> = Standart potasyum dikromat çözeltisinin normalitesi (0.24 N)

Kullanılan araç-gereçler

- Cam KOİ tüpü
- KOİ tüpleri için kapak
- Otomatik pipet
- Termoreaktör

### Deneyin yapılışı

KOİ analizi için numunler, besleme atıksuyundan ve çıkış atıksuyundan alınmıştır. Alınan numuneler iyice karıştırıldıktan sonra 2,5 mL’si bir pipet yardımı ile KOİ tüpüne aktarılır. Besleme atıksuyu KOİ değeri oldukça yüksek olduğundan beş kat seyreltilerek deney gerçekleştirilmiştir. Şahit numunesi olarak da aynı şartlarda sadece saf su kullanılarak hazırlanmış en az iki tekrarlı numunler hazırlanmıştır. Tüplerdeki

numunelerin üzerine sırasıyla 1.5 ml standart dikromat çözeltisi ve 3.5 ml gümüşlü sülfürik asit reaktifi konmuş ve kapakları kapatılmıştır. Tüpler 2 saat boyunca 150°C Hach marka DRB 200 model termoreaktöre konulmuştur.

Bu süre sonunda numunelerin oda sıcaklığına gelmesi beklenmiştir. Oda sıcaklığına gelen numuneler sırayla erlenlere alınır; üzerine bir iki damla Ferroin indikatörü damlatılır. Ardından Demir Amonyum Sülfat (DAS) ilave edilerek kiremit kırmızısı renk alana kadar titrasyon yapılır. Titrasyon esnasında sarf edilen DAS miktarıyla gerekli hesaplamalar yapılarak KOİ değeri belirlenmiş olur. Hesaplama aşağıdaki formüle göre yapılmıştır.

$$KOİ \text{ (mg/L)} = \frac{(A-B) \times N \times 8 \times 1000}{V_{\text{numune}}}$$

A: şahidin demir amonyum sülfat (DAS) sarfiyatı (mL)

B: numunenin demir amonyum sülfat (DAS) sarfiyatı (mL)

N: demir amonyum sülfat (DAS) çözeltisinin normalitesi

### 3.3.3 Toplam organik karbon- toplam azot (TOK- TN)

Toplam azot ve toplam organik karbon analizleri Shimadzu TOC-VCPN (Toplam Azot-Toplam Organik Karbon Analizörü) cihazında gerçekleştirilmiştir. Cihaza ait görüntü Şekil 3.11’de mevcuttur.



Şekil 3.11: TOK- TN ölçüm cihazı.

Giriş sentetik atıksu ve çıkış (süzüntü) atıksu numuneleri belirli aralıklarla alınıp reaktörlerdeki TOK giderim oranı bulunmuştur. Bu maksatla alınan numunler homojen olacak şekilde çalakanlandıktan sonra cam TOK viallerine koyulmuştur. Önce çıkış numuneleri ardından giriş atıksu numuneleri analiz edilecek şekilde sıralanıp numaralandırılarak cihaza yerleştirilir. Numune hazırlanması Şekil 3.12’de gösterilmiştir. Ölçüm sonuçları bilgisayara kaydedilir.



Şekil 3.12: TOK-TN cihazı için numune hazırlama.

### 3.3.4 İletkenlik

Faz I olarak adlandırılan aşırı tuzluluk ile işletim aşamasında tuzluluk Hach HQ40d cihazı ve iletkenlik probuyla ölçülmüştür. Cihaz ve prob Şekil 3.13’de gösterilmektedir.



**Şekil 3.13:** Multiparametre ölçüm cihazı ve iletkenlik ölçüm probu.

### 3.3.5 Sülfat tayini

Faz II olarak adlandırılan sülfat ile işletim aşamasında sülfat tayini Dionex ICS 300 IC (İyon Kromatografisi) cihazında gerçekleştirilmiştir. İyon kromatografi cihaz görüntüsü Şekil 3.14’te bulunmaktadır.



**Şekil 3.14:** İyon kromatografisi.

### 3.3.6 Kurşun tayini

Faz III olarak nitelendirilen kurşun metal tuzu ile işletim aşamasında kurşun tayini ICP-OES (İndüktif Eşleşmiş Argon Plazma-Optik Emisyon Spektrometresi) cihazında gerçekleştirilmiştir. Cihaza ait görüntü Şekil 3.15'te yer almaktadır.



Şekil 3.15: İndüktif Eşleşmiş Argon Plazma-Optik Emisyon Spektrometresi.

### 3.3.7 Akı ve TMP profillerinin izlenmesi

Yarı pilot ölçekli QQ-MBR ve Kontrol-MBR'ler sabit akı ve değişen basınç ile işletilmiştir. Faz I (tuzluluk) , Faz II (sülfat), Faz III (kurşun) ve Faz 0 (yalın) işletmelerinin her biri 21 gün boyunca akı kontrolü yapılarak değişen TMP değerleri kaydedilmiştir.

### 3.3.8 Tür analizi/ metagenomik analiz

İnorganik kirleticilerin aktif çamura etkilerini görmek ve QQ mekanizmasının MBR tankları içerisindeki mikrobiyal komünite üzerindeki etkisini görmek için işletme boyunca belli aralıklarla aktif çamurdan alınan numuneler ile mikrobiyal çeşitlilik üzerine moleküler analizler yaptırılmıştır.

Tüm işletmeler süresince (Faz I, Faz II, Faz III) QQ bakterisi olan BH4 ve ana işletme parametresi olan tuz, sülfat ve kurşunun QQ-MBR ve Kontrol-MBR tankları içerisindeki mikrobiyal komünite üzerine etkileri incelenmiştir. Bu amaçla aralıklarla tank içerisinden 50 ml'lik falkonlara çamur numunesi alınmış PBS ile yıkama yapılarak bir ön işlem uygulanmış ve -20 °C'de stoklanmıştır. İşletmeler

tamamlandığında çamurlar analiz için Güney Kore'ye gönderilmiştir. Hazırlanan numunelere ait görseller Şekil 3.16'da gösterilmiştir.

#### Tür Analizi İçin Numune Hazırlama Prosedürü

- Analizde kullanılacak numune için ilk önce PBS hazırlanmalıdır.
- PBS Çizelge 3.5'te verilen konsantrasyonlarda tuz hazırlanarak hazırlanır.

**Çizelge 3.5:** PBS reçetesi.

Tuz	Konsantrasyon (mmol/L)	Konsantrasyon (g/L)
NaCl	137	8.01
KCl	2.7	0.20
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> . 2H <sub>2</sub> O	10	1.78
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	2	0.27
pH	7.4	7.4

- 50 ml'lik falkona 50 ml çamur numunesi alınır.
- 9000 RPM'de 15 dk santrifüj yapılır, üst su fazı atılır, 50 ml PBS eklenir.
- Tekrar 9000 RPM'de 15 dk çöktürme yapılır, üst faz atılır.
- Kalan kısmın üzerine 15 ml olacak şekilde PBS eklenir (numune+PBS miktarı 15 ml).
- Vorteks ile tam çözüldükten sonra hazırlanan bu çözelti başka bir 15 ml'lik falkona alınır.
- Hazırlanan numune -20 °C'de saklanır.



**Şekil 3.16:** Tür analizi için tank içi alınan numuneler.

#### 4. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI

Aşı çamuru reaktörlere koyulduktan sonra, çamur evsel nitelikli atıksuyu temsil eden sentetik bir atıksu ile beslenmeye başlanmıştır. Sentetik atıksuyun karakterizasyonu Çizelge 4.1’de verilmiştir.

**Çizelge 4.1:** Sentetik atıksu karakterizasyonu.

		Faz 0*	Faz I*	Faz II*	Faz III*
Parametre	Birim				
Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ)	mg/L	450-600	450-600	450-600	450-600
Toplam Azot (TN)	mg/L	30-60	30-60	30-60	30-60
pH		6,5-7,5	6,5-7,5	6,5-7,5	6,5-7,5
Bulanıklık	NTU	100-150	100-150	100-150	100-150
Tuz (NaCl)	%	-	6-10	-	-
Sülfat (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	-	-	25-250	-
Kurşun (Pb)	ppm	-	-	-	0,1-1

Tüm işletme fazları için membran biyorekatörlerin işletme koşulları ortalama olarak Çizelge 4.2’de verilmiştir.

**Çizelge 4.2:** MBR işletme koşulları.

Parametre	Birim	Değer
Askıda Katı Madde (AKM)	mg/L	13.000-16.000
Uçucu Askıda Katı Madde (UAKM)	mg/L	7.000-10.000

**Çizelge 4.2 (devam):** MBR işletme koşulları.

Parametre	Birim	Değer
UAKM/AKM	-	0,70-0,77
pH	-	6,5
Çözünmüş oksijen	mg/L	6-9
Sıcaklık	°C	20 ±1
Ak <sub>1</sub>	LMH	15-20

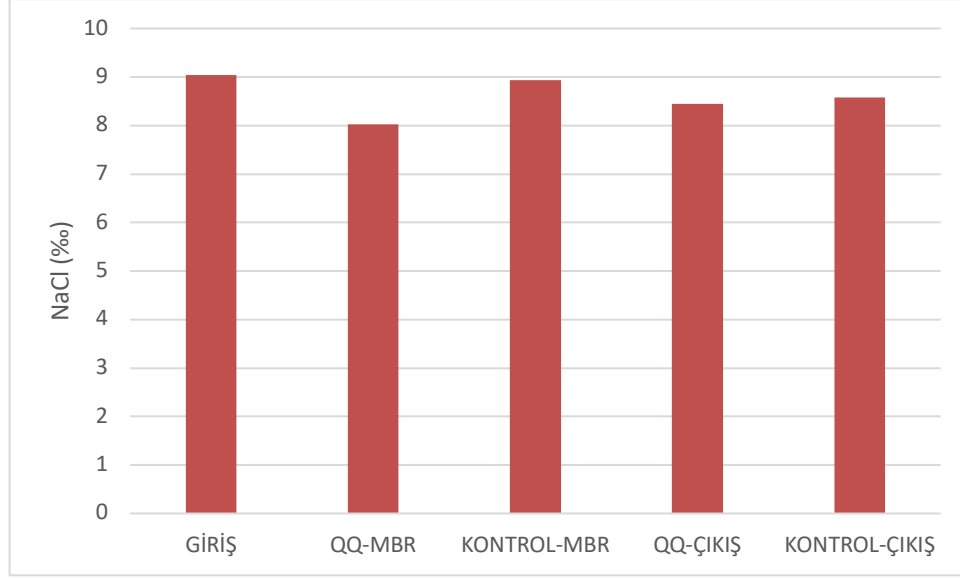
## 4.1 QQ-MBR ve Kontrol-MBR İşletmesi Sonuçları

### 4.1.1 Faz I- tuzluluk

İstanbul, Paşaköy İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi'nden alınan aşı çamuru, eşit hacimde olacak şekilde reaktörlere koyulmuştur. Her biri 0,075 m<sup>2</sup> alana sahip membran modülleri çamurun aklımasyon aşamasından (10 gün) sonra reaktörlere atılmıştır. Eş zamanlı olarak, üretilen QQ ve kontrol boncuklar tanklara koyulmuş; işletmeye başlanmıştır. Süzüntü alınmaya başladıktan yaklaşık 10 gün sonra NaCl tuzu %10 tuz konsantrasyonu olacak şekilde besleme atıksuyu hazırlanmış ve tanklara F/M oranı hesabınca besleme yapılmaya başlanmıştır. İşletme sonuna kadar kademeli artırılarak tuz ilavesi yapılmış; nihai olarak besleme atıksuyuna %6-10 aralığında tuz ilavesi yapılmıştır. Aklımasyon dönemi ve tuz ile QQ-MBR işletimi esnasında belirlenen temel analizler ve kontrol parametreleri belirli sıklıklarda gerçekleştirilmiş olup aşırı tuzlu atıksuların MBR ile arıtımında QQ mekanizmasına etkisi değerlendirilmiştir.

#### 4.1.1.1 İşletme süresince tuzluluk değişimi

Çalışmada, petrol ve doğalgaz üretim tesisleri atıksuları, sızıntı suları gibi yüksek tuzluluğa sahip endüstriyel atıksuları temsilen besleme atıksuyuna % 6-10 NaCl tuzu kademeli olarak ilave edilerek çalışma yürütülmüştür.

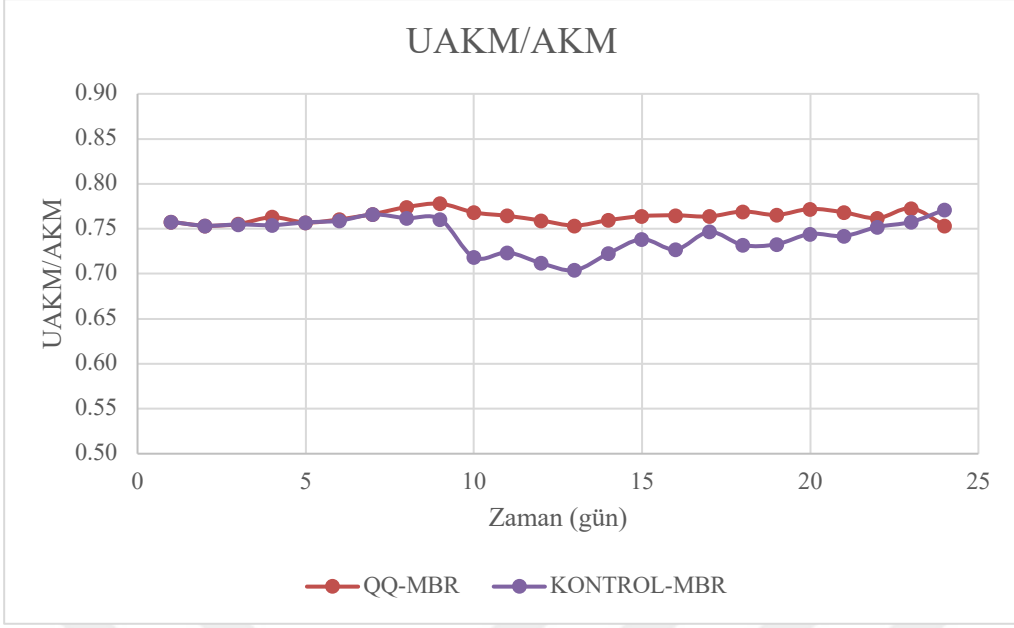


**Şekil 4.1:** Faz-I tuzluluk işletmesindeki tuzluluk konsantrasyonları.

MBR işletmesi süresince besleme atıksuyu, kontrol ve QQ membran biyoreaktör içi ve süzüntü sularından belirli aralıklarla numuneler alınmış ve iletkenlik probu aracılığıyla tuzluluk konsantrasyonlarına bakılmıştır. Ölçüm sonuçları Şekil 4.1’de verilmiştir. Ölçüm sonuçlarına göre işletme süresince, besleme atıksuyunda ortalama ‰ 9 tuzluluk görülmüştür. Kontrol reaktörünün içerisindeki tuzluluk ölçüm sonuçları ortalaması ‰ 8,93 iken QQ reaktöründe ‰ 8,02 olarak bulunmuştur. Çıkış atıksularında ise sırasıyla ‰ 8,57 ve ‰ 8,44 değerlerinde tuzluluk ölçülmüştür.

#### 4.1.1.2 İşletme boyunca UAKM/AKM oranı değişimi

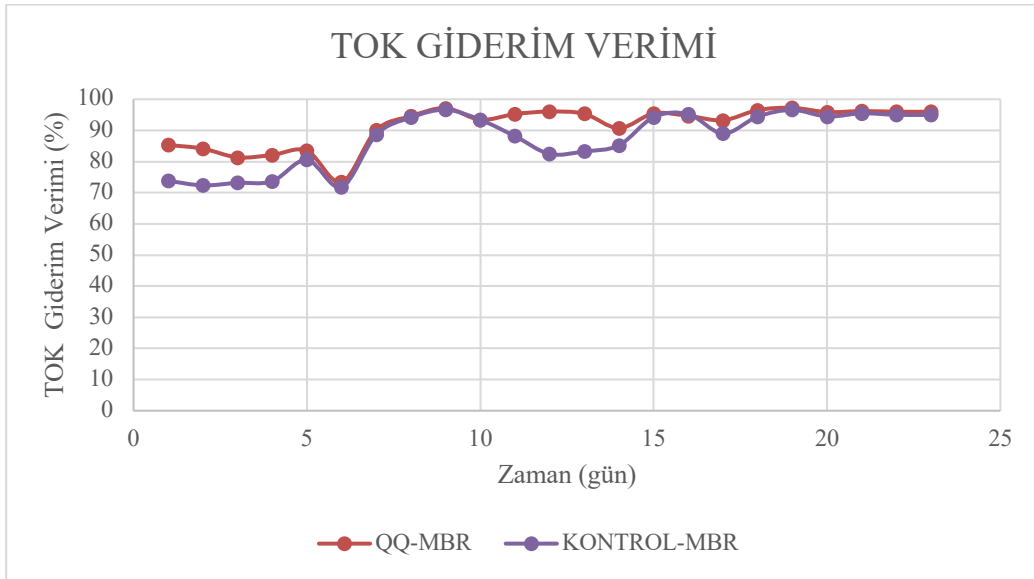
AKM, askıda çoğalan proseslerde bu karışım sıvısında ölçülen katı madde konsantrasyonunu veren atıksu arıtma tesisinin kontrolü için kullanılan bir parametredir. Özellikle aerobik MBR sistemlerinde önemli bir işletme parametresidir. Yüksek çamur içeriği başka bir deyişle yüksek AKM konsantrasyonu, reaktör hacmini azaltmaya imkan sağladığı için MBR teknolojisinin üstünlüklerinden kabul edilmektedir. Konvansiyonel aktif çamurda 2000-4000 mg/L AKM konsantrasyonu varken MBR sistemlerinde bu oran 12000-17000 mg/L değerine kadar ulaşabilmektedir.



**Şekil 4.2:** Faz I- tuzluluk UAKM/AKM oranı.

Çalışmanın birinci fazı olan tuzluluk fazında AKM konsantrasyonu 15000-17000 mg/L bandında tutulmuş olup UAKM ise ortalama 12000 mg/L civarındadır. Bu konsantrasyonlar bize MBR sistemlerinde işletme kontrol parametrelerinden olan UAKM/AKM oranını 0,7-0,8'i sağladığımızı göstermektedir (Koyuncu, 2018b). Şekil 4.2'de görüleceği üzere QQ-MBR'de UAKM/AKM oranı ortalama olarak 0,76 iken Kontrol-MBR'de bu oran ortalama 0,74 civarındadır.

#### 4.1.1.3 Organik madde giderim verimi

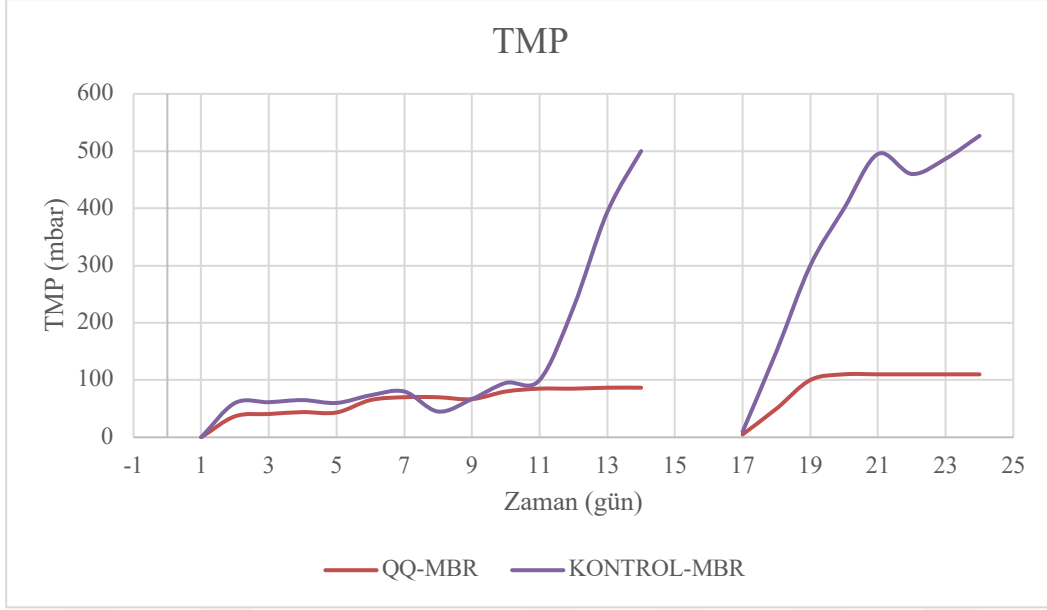


**Şekil 4.3:** Faz I- tuzluluk organik madde giderim verimi.

Faz I çalışması süresince organik madde giderim verimi Şekil 4.3’de Kontrol-MBR ve QQ-MBR için kıyaslanmıştır. Aşırı tuzluluk ile QQ-MBR işletiminde toplam organik karbon giderim verimi %70’in üzerindedir. QQ-MBR ve Kontrol-MBR’de giderim verimi birbirine paraleldir. QQ-MBR’de verim bir kez, işletmenin altıncı günü %73’e düşmüş olup ortalama %91 giderim verimine sahiptir. Kontrol-MBR ise işletmenin ilk altı gününde %70-75 bandında seyrederken ortalama %87 giderim verimine sahiptir. Her iki reaktöre tek tanktan homojen bir sentetik atıksu beslenildiği düşünülecek olursa QQ bakterilerin organik madde giderim verimine herhangi bir negatif etkisi olmadığı söylenebilir. Bunun yanı sıra aşırı tuzluluğun, TOK giderim veriminde olumsuz bir etkisi olmamıştır.

#### **4.1.1.4 TMP profili değişimi**

MBR’lerde membranların işletim sırasında tıkanması, kentsel ve endüstriyel atıksu arıtım uygulamalarında karşılaşılan en büyük sorunlardan biridir. Membranlar tıkanığında, membranların geçirgenliği sınırlanır. Diğer bir deyişle, birim transmembran basıncına karşılık membrandan geçen akış, birim membran alanı başına arıtılmış temiz su üretimini azaltır. Membran kirlenmesi, diğer bir deyişle membran tıkanmasına neden olan birçok şey vardır. Membran özellikleri, işletme koşulları ve besleme suyu özellikleri bunlardan bazılarıdır. Trans membran basıncı (TMP), çalışmanın odak noktası olan membranlarda biyotıkanma sorununu çözmek için kullanılan QQ mekanizmasının doğru bir şekilde çalışıp çalışmadığını gösteren ana parametredir.



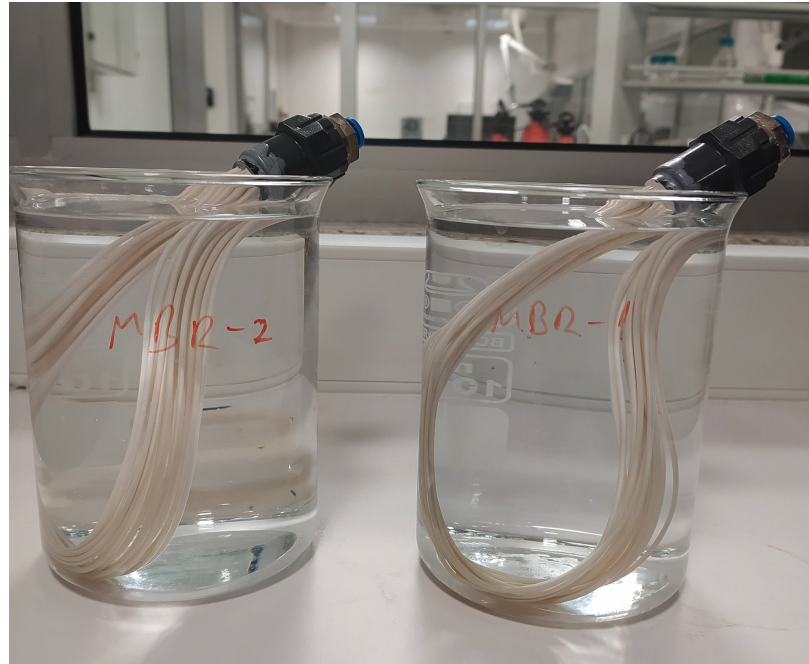
**Şekil 4.4:** Faz I-tuzluluk çalışmasında Kontrol-MBR ve QQ-MBR işletmelerinden elde edilen TMP profilleri.

Yaklaşık 3 hafta boyunca kademeli tuzluluk artışı ile işletilen QQ-MBR ve Kontrol-MBR’lerde sırasıyla QQ bakterisi olan BH4 immobilize edilmiş sodyum aljinat boncuk ve bakterisiz/ boş boncuk ile çalışılmıştır. Sonuçlar karşılaştırmalı olarak 4.4’te verilmiştir. Kontrol-MBR’de 9. günün ardından hızlıca tıkanan membran modülü, QQ-MBR’de 15 gün boyunca tıkanmadan çalışmaya devam edebilmiştir. Bu süreçte besleme suyu vasıtasıyla verilen NaCl ilavesi sonucunda reaktörde oluşan ve petrol ve doğalgaz üretim atıksuyuna denk bir tuzluluğa denk bir tuzluluk ortamında çalışılmıştır.

İşletme 15- 20 LMH akı ile yürütülmüş olup gerçek ölçekli MBR’lerdeki akı değeri sağlanmıştır (Koyuncu, 2018b). 14. günün sonunda artan membran basıncı sebebiyle Kontrol-MBR’de istenen akı değeri sağlanamadığı için her iki membran modülü de kimyasal yıkamaya tabi tutulmuştur. Şekil 4.5’te kimyasal yıkama öcesi membran modülleri görülmektedir. Kontrol-MBR’deki membran modülü üzerindeki biyofilm oluşumu açıkça görülmektedir. Kimyasal yıkama sonrası membran modülleri Şekil 4.6’da yer almaktadır.



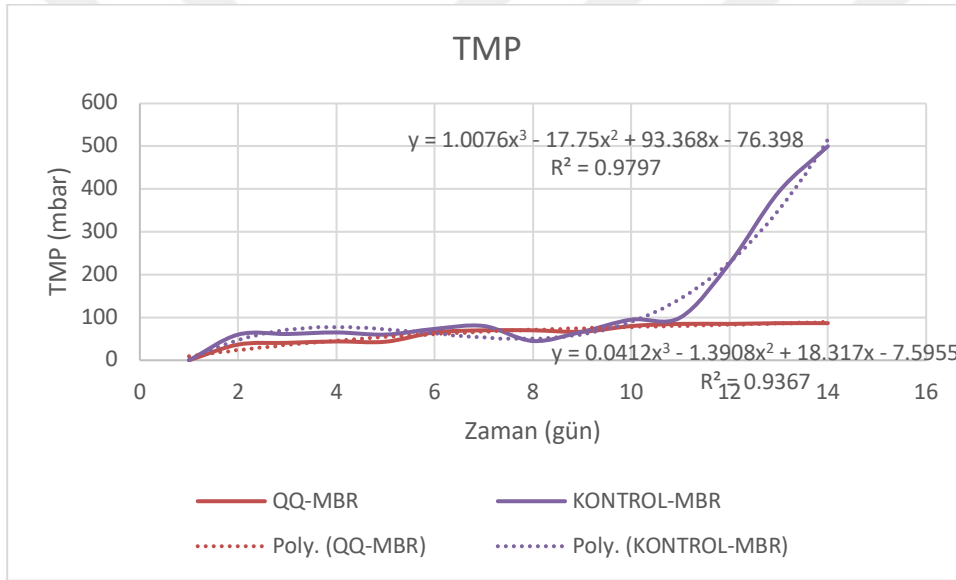
**Şekil 4.5:** Faz I, kimyasal yıkama öncesi QQ-MBR (sol) ve Kontrol-MBR (sağ) membran modülleri.



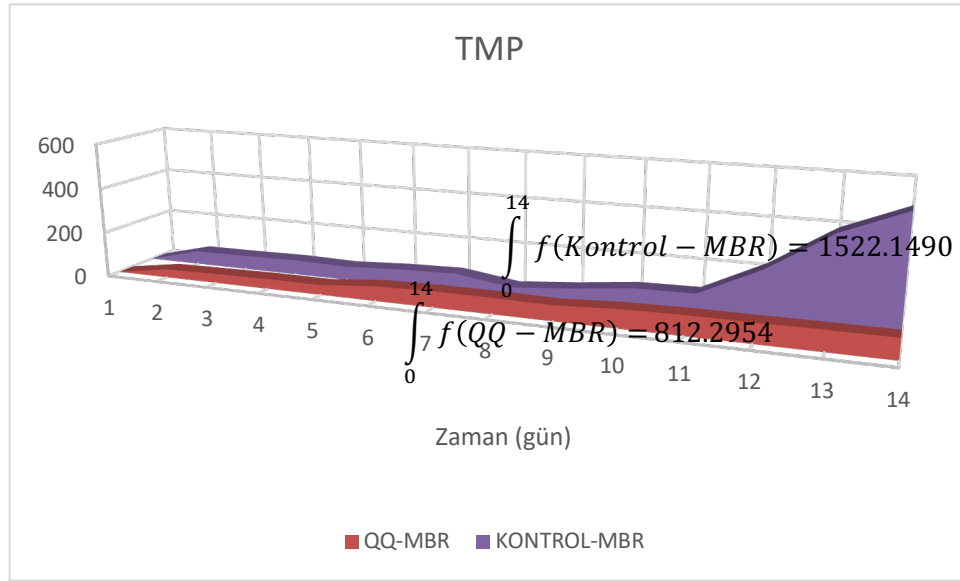
**Şekil 4.6:** Faz I, kimyasal yıkama sonrası Kontrol-MBR ve QQ-MBR membran modülleri.

Yaklaşık iki günlük bir kimyasal yıkama süresi sonrası membran modülleri ait oldukları tanklara tekrar atılmıştır. İşletmeye devam edilmiştir. Yıkama sonrası QQ-MBR tankındaki membran modülü 3. gün eski TMP değerine ulaşırken Kontrol-MBR modülü ilk günden hızla TMP değeri yükselmeye başlamıştır. Kimyasal yıkama sonrasında QQ etkisi devam etmiş olup Kontrol-MBR modülü kısa bir süre sonra istenen akı değerine ulaşamamıştır ve tıkanmaya bağlı TMP artışı nedeniyle işletme periyodu tamamlanmıştır.

Bakteriyolojik QQ boncuk kullanımı sırasında elde edilen quorum quenching aktivitesinin belirlenmesi için Kontrol-MBR ve QQ-MBR TMP grafiklerinin altında kalan alanlar hesaplanmış ve aralarındaki fark değerlendirilmiştir. Şekil 4.7'de grafiklerin altında kalan alanların hesaplanması (a) ve hesap sonuçları (b) verilmektedir.



(a) Faz I çalışması TMP grafiği denklemleri



(b) TMP grafiklerinin altında kalan alanlar

**Şekil 4.7:** Faz I çalışması QQ etkisi.

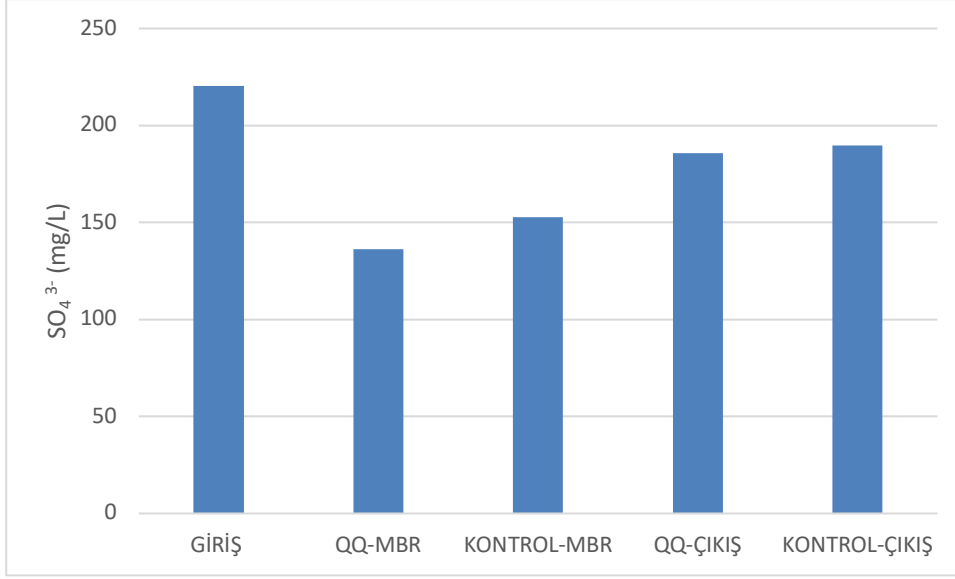
Faz I çalışması sonucunda TMP değerleri %47 azaltılabilmektedir. Faz I çalışması neticesinde elde edilen sonuç başarılı bir QQ boncuk uygulaması gerçekleştirilebildiğini göstermektedir.

#### 4.1.2 Faz II- sülfat

Çalışma kapsamında, aşı çamuru özelliklerinin aynı olması amacıyla aktif çamur, Faz I'de alınan ileri biyolojik arıtma tesisinde alınmış, eşit hacimlerde reaktörlere eklenmiştir. Her biri 0,075 m<sup>2</sup> alana sahip membran modülleri çamurun aklimasyon aşamasından (10 gün) sonra reaktörlere atılmıştır. Eş zamanlı olarak, üretilen QQ ve kontrol boncuklar tanklara koyulmuş; işletmeye başlanmıştır. Aklimasyon dönemi ve sülfat ile QQ-MBR işletimi esnasında belirlenen temel analizler ve kontrol parametreleri belirli sıklıklarda gerçekleştirilmiş olup aşırı tuzlu atıksuların MBR ile arıtımında QQ mekanizmasına etkisi değerlendirilmiştir.

##### 4.1.2.1 İşletme süresince sülfat değişimi

Sülfat bakımından zengin olan tekstil endüstrisi atıksularının arıtımında özellikle metalsülfür çökeleklerinin membran kirliliğinde önemli bir rol oynadığı bilinmektedir (Yurtsever vd., 2016). Bu bağlamda, çalışmanın ikinci fazı olan sülfat ile QQ-MBR işletimi için besleme atıksuyuna 25-250 mg/L aralığında kademeli olarak sülfat eklenmiştir.

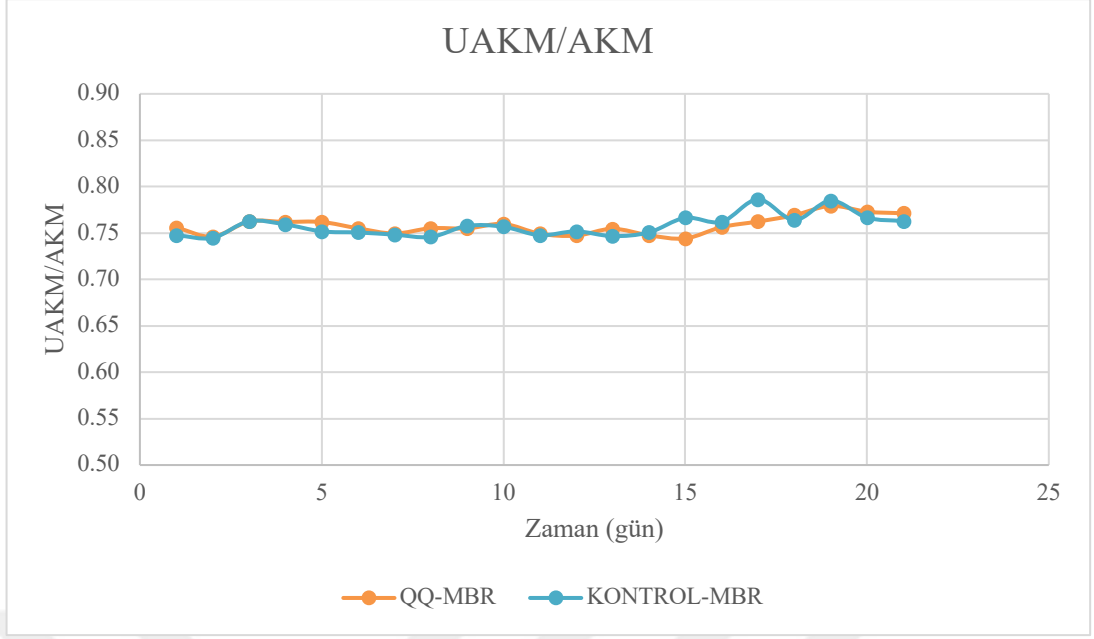


**Şekil 4.8:** Faz II-sülfat işletmesindeki sülfat konsantrasyonları.

Besleme atıksuyundan (giriş), QQ-MBR ve Kontrol-MBR tanklarından, reaktör süzöntülerinden işletme boyunca aralıklarla numuneler alınarak IC cihazı vasıtasıyla sülfat tayini yapılmıştır. Analiz sonuçları Şekil 4.8 karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre giriş atıksuyunda ortalama 220 mg/L sülfat bulunmaktadır. Bu değer, tekstil endüstrisi atıksu karakterindeki sülfat miktarına denktir. QQ-MBR reaktöründe 136 mg/L sülfat bulunurken, çıkış suyunda ortalama 185 mg/L sülfata rastlanmıştır. Kontrol-MBR reaktöründe ortalama 152 mg/L sülfat, kontrol reaktörünün süzöntüsünde ise ortalama 190 mg/L sülfat iyonu bulunmaktadır.

#### 4.1.2.2 İşletme boyunca UAKM/AKM oranı değişimi

MBR işletimi kontrol parametrelerinden olan AKM ve UAKM sülfat ile QQ-MBR işletim süresi boyunca aralıklarla tanklardan alınan numunelere gravimetrik analiz yapılarak ölçülmüştür. Ölçüm neticesinde UAKM/AKM oranı bulunmuş ve Şekil 4.9'daki grafik oluşturulmuştur.

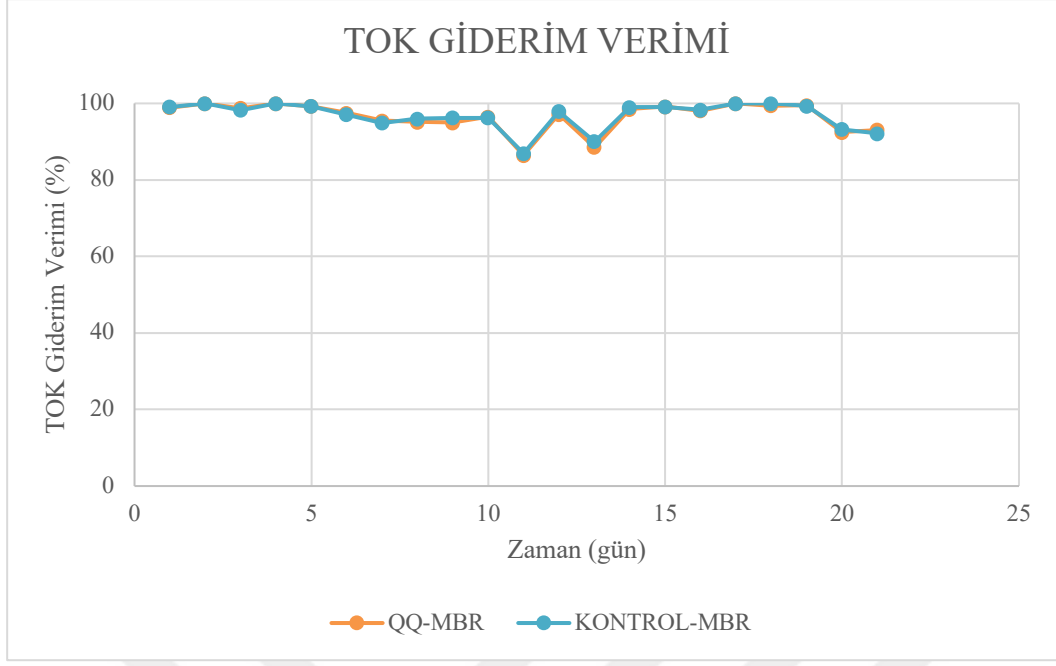


**Şekil 4.9:** Faz II-sülfat UAKM/AKM oranı.

İşletme süresince QQ-MBR ve Kontrol-MBR AKM miktarı 12000-15000 mg/L aralığında ölçülmüştür. Yine her iki reaktörün UAKM miktarı ise 9000-11000 mg/L aralığında olup MBR işletim kontrol şartı olan 0,7-0,8 UAKM/AKM değerini sağlamıştır. Her iki reaktörün de UAKM/AKM oranı 0,75'tir.

#### 4.1.2.3 Organik madde giderim verimi

Faz II olarak adlandırılan sülfat ile MBR işletmesi boyunca, reaktörlerden aralıklarla alınan numuneler vasıtasıyla Kontrol-MBR ve QQ-MBR'ler arasındaki TOK giderim verimi belirlenmiştir (Şekil 4.10). Her iki reaktörün de organik madde giderim veriminin %95'in üzerinde olduğu görülmektedir.

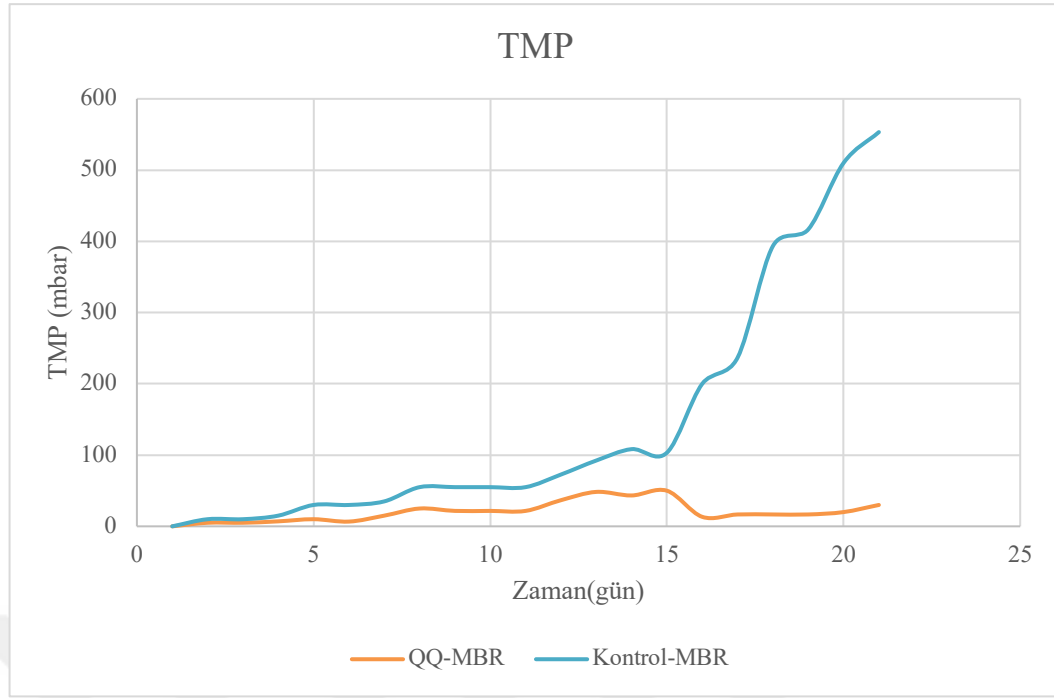


**Şekil 4.10:** Faz II- sülfat organik madde giderim verimi.

QQ-MBR'nin organik karbon giderim verimi %96,61, Kontrol-MBR'nin giderim verimi %96,81 olup sülfat ilavesinin toplam organik karbon giderimi açısından negatif bir etkisi olmadığı görülmektedir.

#### 4.1.2.4 TMP profili değişimi

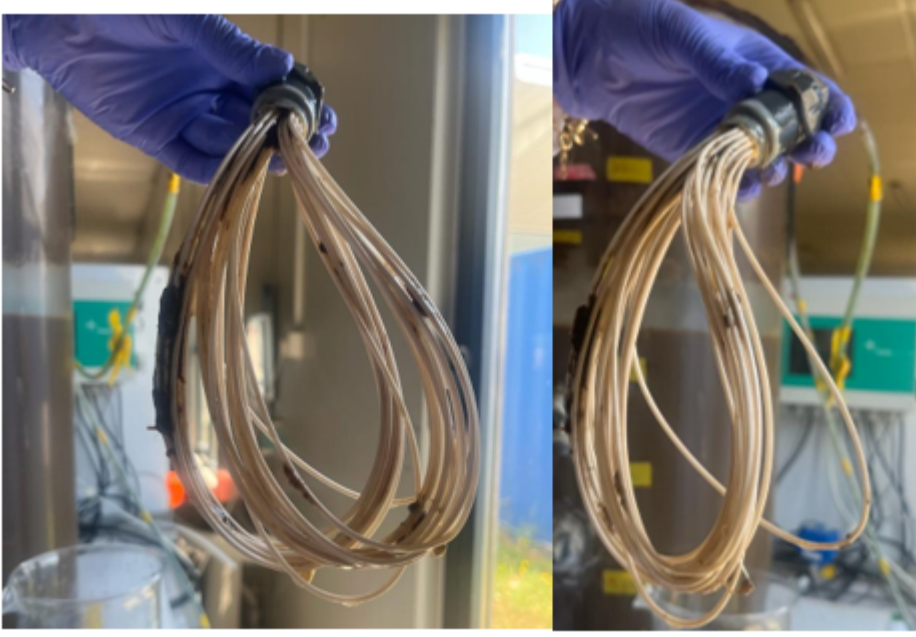
Üç hafta boyunca kademeli sülfat artışı ile QQ-MBR işletiminde her gün TMP verileri kaydedilmiştir. Bu değerler ile Faz II'ye ait Kontrol ve QQ MBR'lerin TMP profili çizilmiştir (Şekil 4.11).



**Şekil 4.11:** Faz II-sülfat çalışmasında Kontrol-MBR ve QQ-MBR işletmelerinden elde edilen TMP profilleri.

İşletmenin 15. gününden itibaren Kontrol-MBR modülünde hızla tıkanmasına bağlı olarak TMP değerinde devam eden bir artış görülmektedir. Fakat bu artış çalışmanın I. Fazında olduğu kadar hızlı değildir. Tuzluluk fazında (Faz I) 9. gün membran tıkanmaya başlamış olup 14. Günde 500 mbar seviyelerine çıkarken sülfat fazında (Faz II) işletmenin 14. gününde kontrol membran modülü 110 mbar seviyesindedir. Tıkanmayı net bir şekilde görebilmek adına bir süre daha işletmeye devam edilmiştir. Bu nedenle de bu fazda, planlanan işletme süresi boyunca (bütün fazlarda aynı) modüller kimyasal yıkamaya tabi tutulmamıştır. Nihayetinde işletmenin 19. gününde Kontrol-MBR'deki modülde tıkanmanın etkisi ile TMP değeri 450 mbar'ın üzerine çıkmıştır. Takip eden günlerde ise kontrol tankının akısı istenilen seviyeye çıkamadığı için işletme tamamlanmıştır. QQ-MBR'deki membran modülünde ise işletme süresince TMP değeri ortalama 20-30 mbar seviyelerinde kaydedilmiştir. Tekstil endüstrisini simüle etmek için besleme atıksuyuna sülfat eklenmesi ile QQ-MBR işletiminde, sülfatın QQ mekanizmasına olumsuz yönde etki etmediği söylenebilir.

Faz II işletmesinin sonunda reaktörlerden membran modülleri çıkarılmış, ardından tıkanmaya sebep olan biyofilm/ kirlilik mekanizmalarını anlamak için fotoğraflanmıştır. İşletme sonrası QQ-MBR'deki membran modülü Şekil 4.12'de, Kontrol-MBR'deki membran modülü ise şekil 4.13'te gösterilmektedir.

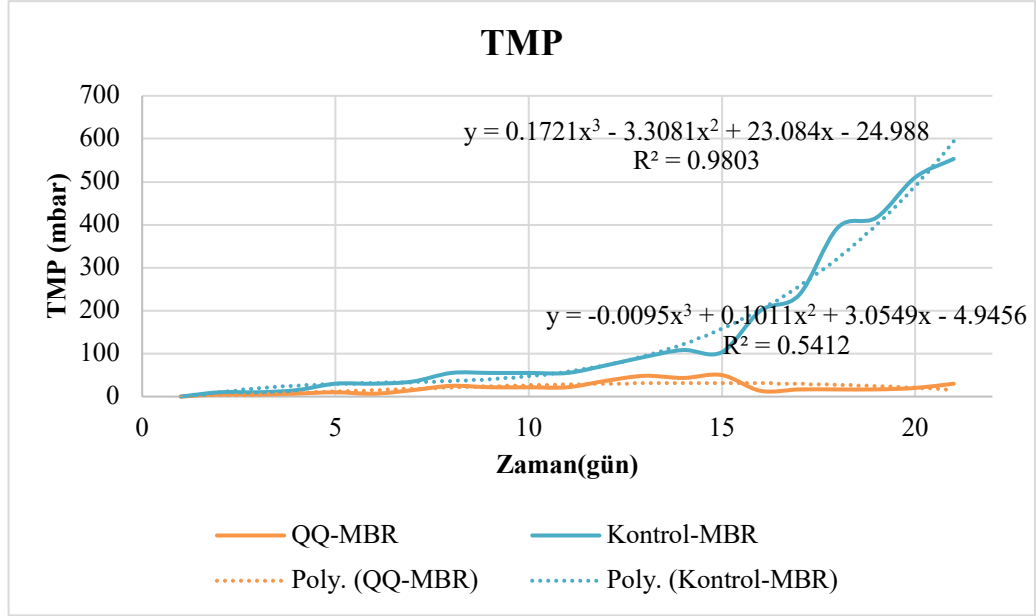


**Şekil 4.12:** Faz II, işletme sonrasında QQ-MBR membran modülü.

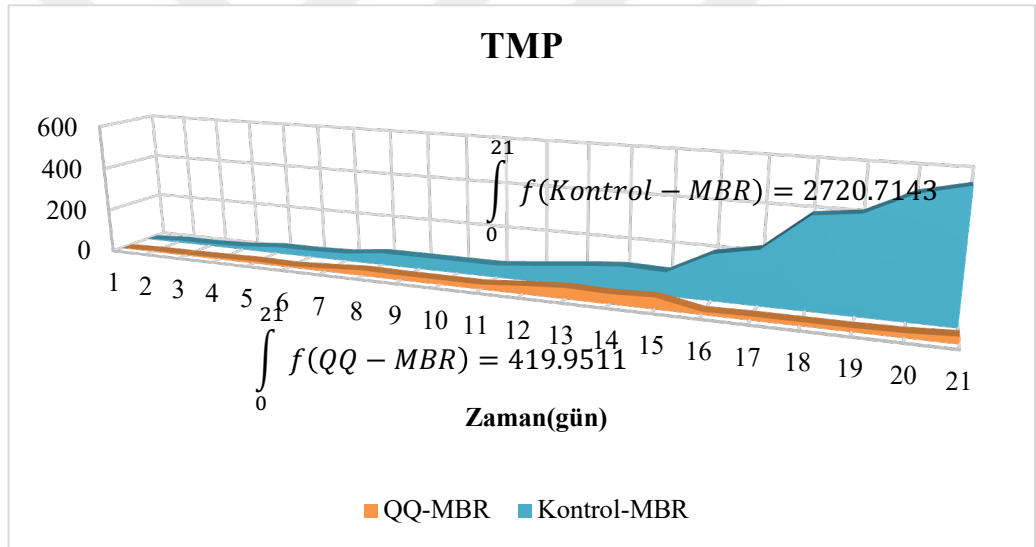


**Şekil 4.13:** Faz II, işletme sonrasında Kontrol-MBR membran modülü.

QQ boncuk ile kirlilik parametresi olarak sülfat ilave edilen MBR işletimi sırasında elde edilen quorum quenching aktivitesinin belirlenmesi için Kontrol-MBR ve QQ-MBR TMP grafiklerinin altında kalan alanlar hesaplanmış ve aralarındaki fark değerlendirilmiştir. Şekil 4.14'te grafiklerin altında kalan alanların hesaplanması (a) ve hesap sonuçları (b) verilmektedir.



(a) Faz II çalışması TMP grafiği denklemleri



(b) TMP grafiklerinin altında kalan alanlar

**Şekil 4.14:** Faz II çalışması QQ etkisi.

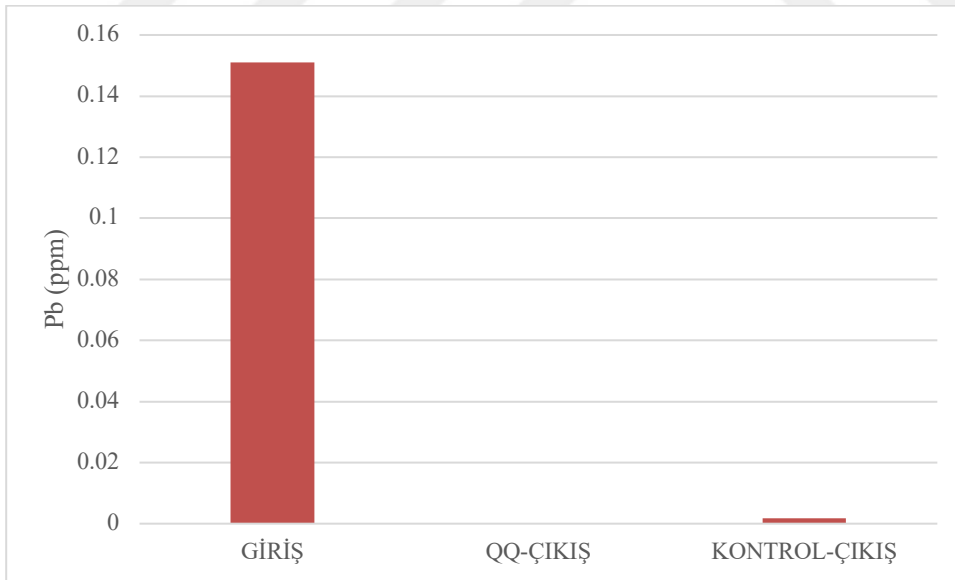
Faz II çalışması sonucunda TMP değerleri %85 civarında azaltılabildiği görülmüştür. Faz II çalışması neticesinde elde edilen sonuç başarılı bir QQ boncuk uygulaması gerçekleştirilebildiğini göstermektedir. Öyle ki Faz I (tuzluluk) çalışmasındaki TMP azaltım oranının bir buçuk katından daha fazla bir TMP azaltım oranı söz konusudur.

### 4.1.3 Faz III- kurşun

Önceki işletme fazları ile aynı ileri biyolojik atıksu arıtma tesisinden alınan aşu çamuru, eşit hacimde olacak şekilde reaktörlere koyulmuştur. Hazırlanan yeni membran modülleri, çamurun aklımasyon aşamasından (10 gün) sonra reaktörlere atılmıştır. Eş zamanlı olarak, üretilen QQ ve kontrol boncuklar tanklara koyulmuş; işletmeye başlanmıştır. Aklımasyon dönemi ve kurşun ile QQ-MBR işletimi esnasında belirlenen temel analizler ve kontrol parametreleri belirli sıklıklarda gerçekleştirilmiş olup çimento endüstrisini temsil eden kurşunun QQ mekanizmasına etkisi değerlendirilmiştir.

#### 4.1.3.1 İşletme süresince kurşun değişimi

Süzüntü alınmaya başladıktan yaklaşık on gün sonra  $Pb(NO_3)_2$  tuzu 0,1 ppm kurşun olacak şekilde besleme atıksuyuna eklenmiştir. İşletme sonuna kadar kademeli artırılarak kurşun ilavesi yapılmış; nihai olarak besleme atıksuyuna 0,1-1 ppm aralığında kurşun ilavesi yapılmıştır. Sisteme beslenen sentetik atıksuyun ve işletme neticesinde tanklardan ayrı ayrı toplanan çıkış atıksularının sahip olduğu Pb konsantrasyonları ICP cihazı ile ölçülmüş olup sonuçlar Şekil 4.15'te yer almaktadır.



Şekil 4.15: Faz III- kurşun işletmesindeki kurşun konsantrasyonları.

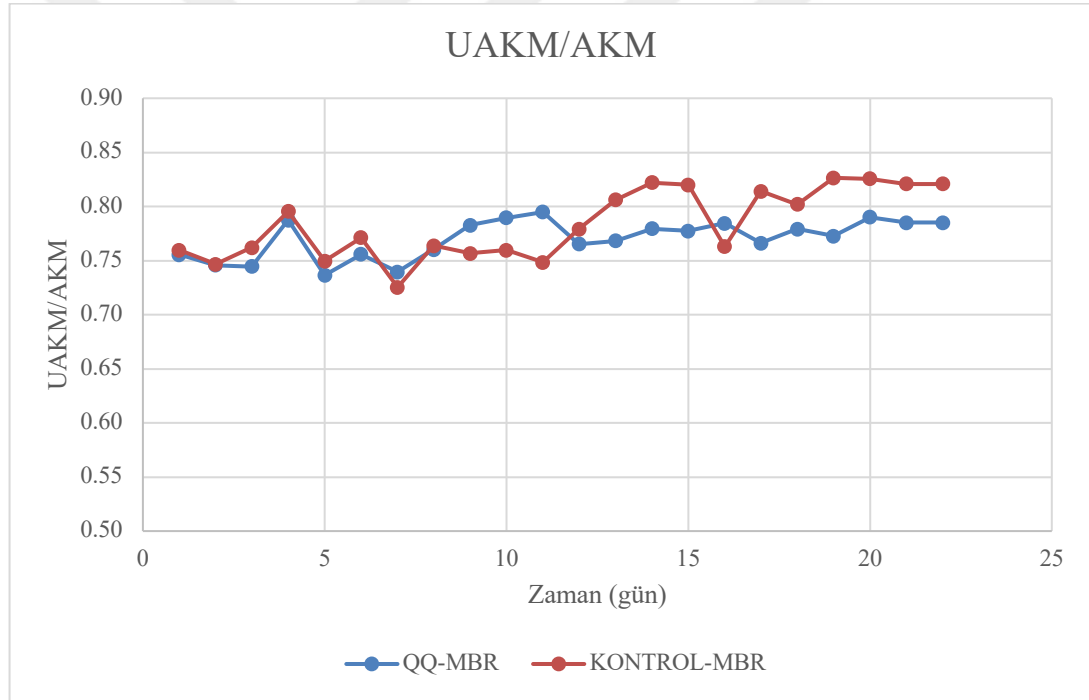
Kurşun ile MBR işletim fazında tanklara eklenen kurşun konsantrasyonu işletme süresince ortalama 0,151 ppm olup istenen kurşun konsantrasyonu (0,1-1 ppm) aralığındadır. Çıkış atıksularına bakıldığında ise QQ-MBR çıkış atıksuyunda kurşun

tespit edilemezken Kontrol-MBR çıkış atıksuyunda eser miktarda (işletme süresince ortalama 0,017 ppm) kurşun konsantrasyonu tespit edilmiştir.

#### 4.1.3.2 İşletme boyunca UAKM/AKM oranı değişimi

Askıda katı madde parametresinin reaktör işletimi süresince izlenmenin sebebi kontrol ve QQ reaktörünün birbiri ile TMP değerleri doğrultusunda kıyaslanması durumunda ikisinin de benzer niteliklerde aktif çamur kütesine sahip olduklarının kanıtlanması olarak söylenebilir. Bu sebeple diğer iki fazda olduğu gibi işletme süresince reaktörlerdeki AKM değerleri gün aşırı standart metotlara uygun olarak ölçülmüştür.

Sistemde aklımasyon dönemi ve Pb ile işletimi boyunca MBR tanklarında ölçülen AKM ve UAKM konsantrasyonları ölçülmüş olup UAKM/AKM oranları Şekil 4.16’da görülmektedir.

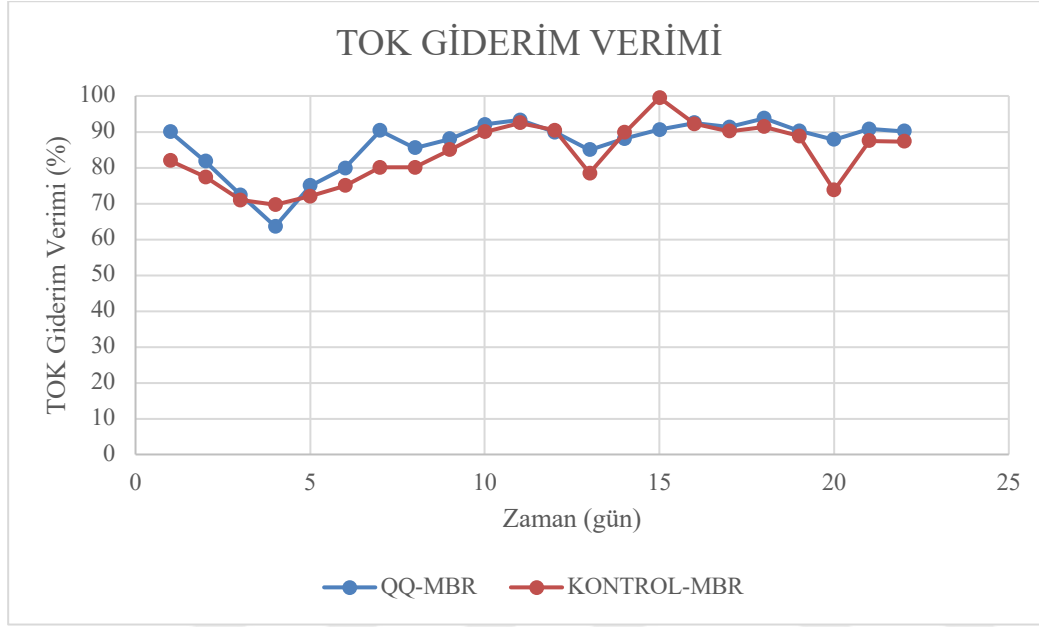


Şekil 4.16: Faz III- kurşun UAKM/AKM oranı.

Her iki reaktörde de AKM değeri 10000-12000 mg/L civarında olup işletme boyunca bu değer aralığında değişmektedir. Aklımasyon ve işletme süresince QQ-MBR’de UAKM/AKM oranı ortalama 0,77 olup Kontrol-MBR’de ise bu değer ortalama 0,78’dir. Kurşun ilaveli besleme atıksuyu ile sistemin işletilmesi UAKM/AKM oranında bir değişikliğe sebep olmamıştır.

### 4.1.3.3 Organik madde giderim verimi

Kurşun tuzu ile MBR işletiminde periyodik olarak alınan besleme atıksuyu ve çıkış süzüntü numunelerine TOC-VCPN cihazı ile toplam organik karbon ölçümü yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre Faz III'e ait organik madde giderim verimi Şekil 4.17'de verilmiştir.



Şekil 4.17: Faz III- kurşun organik madde giderim verimi.

Yaklaşık üç haftalık işletme süresince hem QQ-MBR'de hem de Kontrol-MBR'de %80 üzerinde bir ortalama organik karbon giderim verimi kaydedilmiştir. İşletimi tamamlanan diğer iki faz ile kıyaslandığında grafikte daha fazla dalgalanma olduğu görülmektedir.

### 4.1.3.4 TMP profili değişimi

Faz III, Kontrol-MBR ve QQ-MBR işletiminde, aklımasyon dönemi sonunda süzüntü alınmaya başlanmış ve işletme süresi boyunca akı değerleri 15-20 LMH aralığında sabit tutulmuştur. TMP değerleri sürekli kaydedilmiştir. İşletme boyunca TMP değişimi Şekil 4.18'de gösterilmiştir.



**Şekil 4.18:** Faz III-kurşun çalışmasında Kontrol-MBR ve QQ-MBR işletmelerinden elde edilen TMP profilleri.

Yaklaşık üç hafta boyunca kademeli olarak kurşun artışı ile Kontrol ve QQ-MBR işletimi gerçekleştirilmiştir. Grafikten de görüleceği üzere 7. günün sonunda, QQ bakterisi (BH4) olmayan, Kontrol-MBR'deki membran modüllerinde hızla tıkanma gözlemlenmiştir. 14. günün sonunda Kontrol-MBR'deki modüllerin fazla tıkanması sebebiyle süzüntü akışı istenen değere çıkamamıştır. Ardından, membran modülleri zarar görmesin diye kimyasal yıkamaya tabi tutulmuştur. Kimyasal yıkama prosedürü Faz I'de gerçekleştirilen işlemle aynıdır. Gözle görülen biyofilm/ kek tabakası oluşumunu gözlemlemek ve reaktörler arasındaki QQ mekanizması etkisini kıyaslayabilmek adına yıkama öncesi ve sonrası membran modülleri fotoğraflanmıştır. Kimyasal yıkama öncesi Kontrol-MBR membran modülü (a) ve QQ-MBR membran modülü (b) Şekil 4.19'da gösterilmektedir.



(a) Kontrol-MBR membran modülü



(b) QQ-MBR membran modülü

**Şekil 4.19:** Faz III, kimyasal yıkama öncesi Kontrol-MBR ve QQ-MBR membran modülleri.

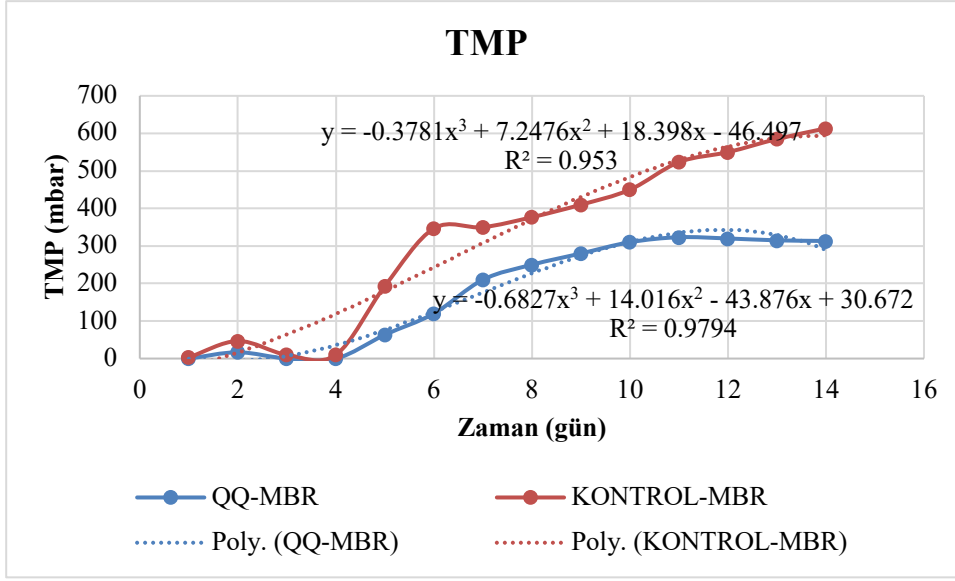
Kimyasal yıkama sonrası Kontrol-MBR ve QQ-MBR membran modülleri Şekil 4.20'de gösterilmiştir.



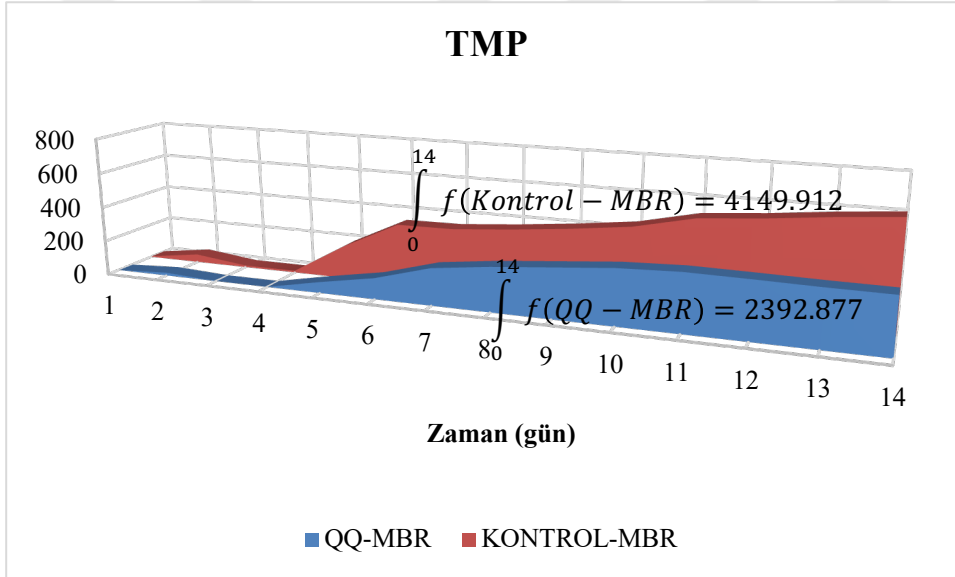
**Şekil 4.20:** Faz III, kimyasal yıkama sonrası Kontrol-MBR ve QQ-MBR membran modülleri.

Kimyasal yıkama sonrası kurşun ile işletmeye devam edilmiş; ikinci gün Kontrol-MBR membran modülü hızla tıkanmıştır. İşletme sonuna kadar QQ-MBR'nin modüllerinin TMP değerinin Kontrol-MBR modülü TMP değerinden daha az olduğu gözlemlenmiştir. Her ne kadar QQ aktivitesini görüyor olsak da önceki iki işletme fazı ile kıyaslandığı vakit QQ-MBR membran modüllerinde de bir miktar tıkanma ve bunun neticesinde işletmenin 10. gününden itibaren kaydedilen 300-350 civarındaki TMP değerleri kurşunun QQ bakterisine olan inhibisyon etkisinden söz etmemize sebep olabilir.

Kurşun tuzu ilave edilerek işletilen Kontrol ve QQ membran biyoreaktörler işletme süresince quorum quenching mekanizmasının etkinliğinin belirlenmesi için her iki reaktörün TMP grafiklerinin altında kalan alanlar hesaplanmış, ardından aralarındaki fark saptanmıştır. Şekil 4.21'de grafiklerin altında kalan alanların hesaplanması (a) ve hesap sonuçları (b) verilmektedir.



(a) Faz III çalışması TMP grafiği denklemleri



(b) TMP grafiklerinin altında kalan alanlar

**Şekil 4.21:** Faz III çalışması QQ etkisi.

Faz III çalışması sonucunda elde edilen TMP değerlerinden reaktörlerin zamana bağlı TMP profilleri oluşturulmuştur. TMP grafiklerinin altındaki alanlar ve aralarındaki yüzdesel fark integraller yardımı ile hesaplanmıştır. Yaklaşık olarak %45'lik TMP azaltımı ile hedeflere ulaşılabildiği söylenebilir.

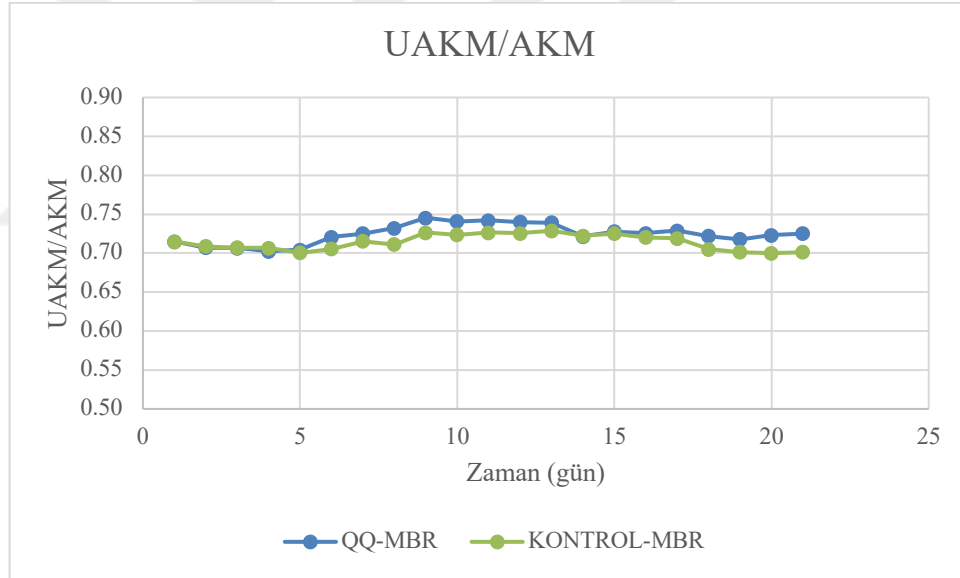
#### 4.1.4 Faz 0- yalın

Çalışmanın ana hedefi, sülfat, tuz gibi endüstri kaynaklı kirleticilerin QQ-MBR başarısını ne ölçüde etkilediğini belirlemek olduğundan bu kirleticilerin bulunmadığı fakat diğer tüm koşulların aynı olduğu bir “Yalın” işletme gerçekleştirilmiştir.

Diğer üç işletme (Faz I, II, III) MBR işletmesi ile birebir aynı koşullar sağlanmış olup bu fazda yalnızca giriş besleme atıksuyu karakterine ilave bir kirletici ekleme yapılmadan çalışma gerçekleştirilmiştir. Böylece, endsütriyel kirliliğin QQ mekanizmasına olan etkisi belirlenebilmiştir.

##### 4.1.4.1 İşletme boyunca UAKM/AKM oranı değişimi

Faz 0 olarak nitelendirilen yalın MBR işletimi boyunca AKM ve UAKM analizi periyodik olarak yapılmıştır. Çamurun stabilize olduğunun bir göstergesi olan UAKM/AKM oranı Şekil 4.22’de gösterilmiştir.

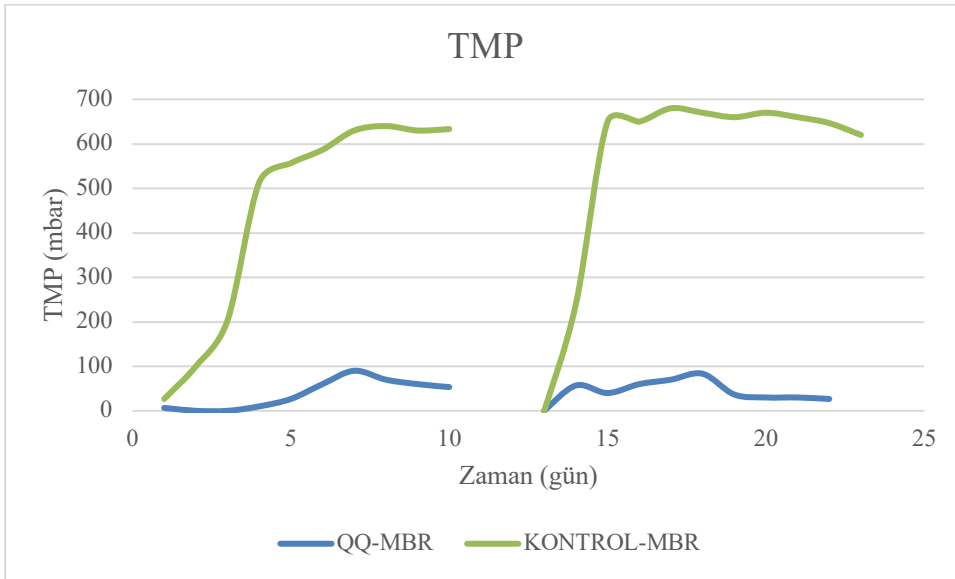


Şekil 4.22: Faz 0- yalın UAKM/AKM oranı.

Yalın faz işletimi boyunca Kontrol-MBR ve QQ-MBR tanklarındaki UAKM/AKM oranı birbirine paralel olup ortalama 0,72’dir. İlave kirletici parametresinin bulunduğu diğer üç MBR işletmesi ile kıyaslandığında UAKM/AKM oranında büyük farklılıklar olmadığı göze çarpmaktadır. Buradan, sülfat, kurşun gibi ilave bir kirletici olmaksızın işletilen Kontrol ve QQ MBR’lerdeki çamurun kalitesine quorum quenching bakterilerinin herhangi bir yan etkisi olmadığı sonucuna varılabilir.

#### 4.1.4.2 TMP profili değişimi

Sentetik atıksu besleme reğetesine ilave bir kimyasal olmadan on gün boyunca Kontrol ve QQ-MBR işletimi geręekleřtirilmiř. Yalın İşletme Fazı (Faz-0) olarak nitelendirilen bu işletimde Kontrol-MBR'deki membran modülü ikinci günden itibaren hızla tıkanıp TMP değerinde gözle görülür bir artış geręekleřirken QQ-MBR'deki membran modülünde ise 10. günün sonunda bile TMP değeri 100' geğmemiştir. Bu işletme fazına ait TMP profili Şekil 4.23'te yer almaktadır.



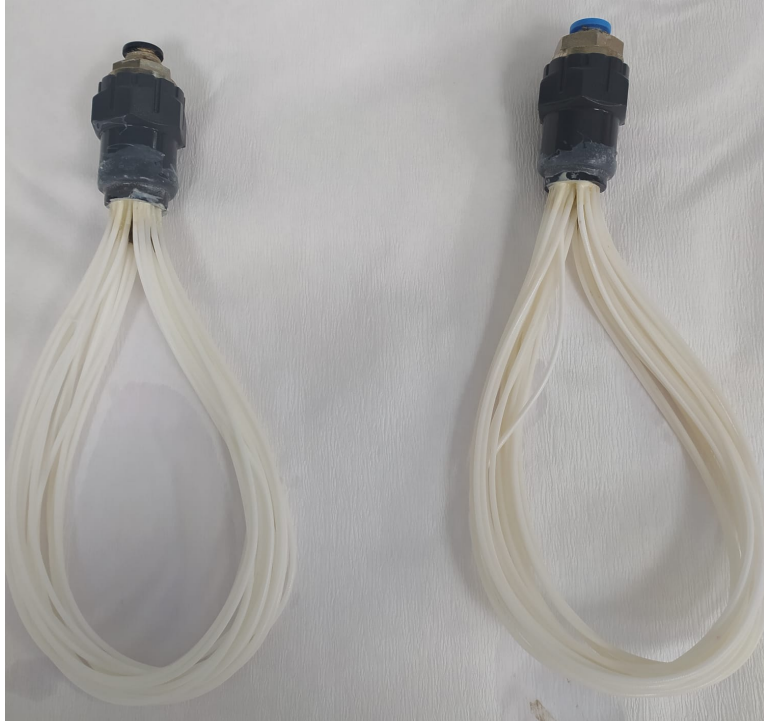
**Şekil 4.23:** Faz 0- yalın çalışmasında Kontrol-MBR ve QQ-MBR işletmelerinden elde edilen TMP profilleri.

10. Günden sonra Kontrol-MBR'den istenen akı değerine ulaşılamadığından membran modüllerinin zarar görmemesi adına modüller kimyasal yıkamaya tabi tutulmuştur. Kimyasal yıkama süresi ve yöntemi diğer fazlarda olduğu gibidir. Kimyasal yıkama ncesi Kontrol ve QQ MBR membran modülü Şekil 4.24'te gösterilmiştir.



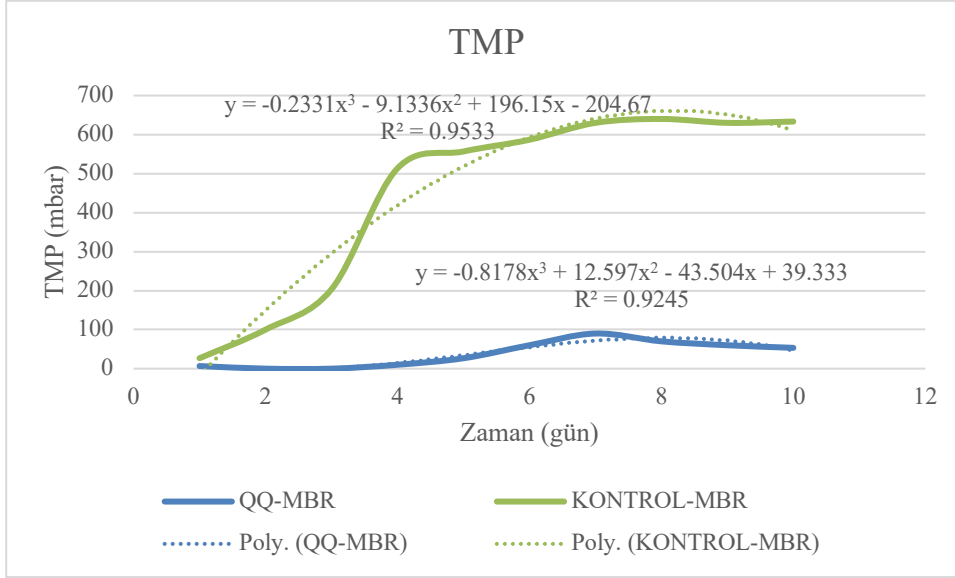
**Şekil 4.24:** Faz 0, kimyasal yıkama öncesi Kontrol-MBR (sol) ve QQ-MBR (sağ) membran modülleri.

Kimyasal yıkama sonrası membran modülleri (Şekil 4.25) tekrar reaktörlere atılmış ve süzüntü alınmaya devam edilmiştir.

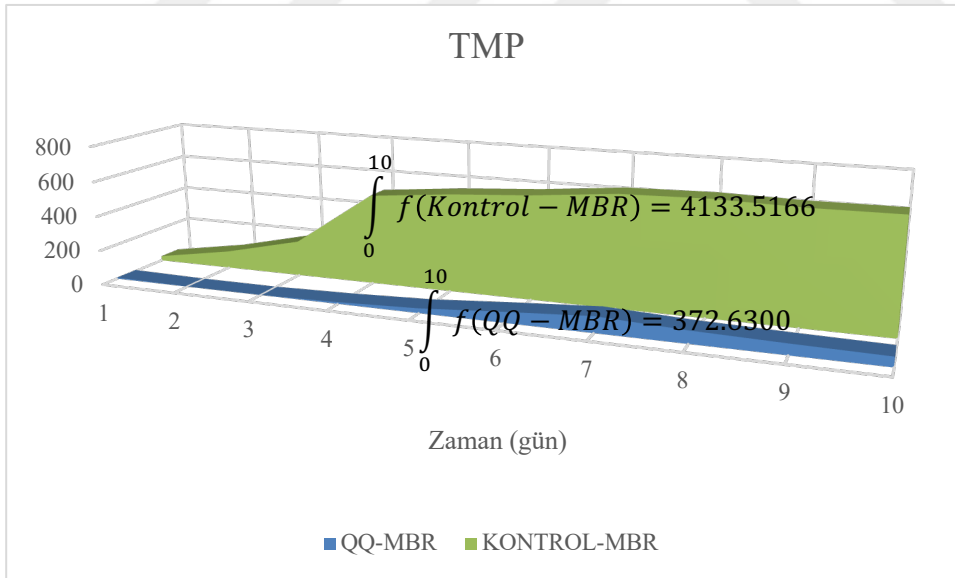


**Şekil 4.25:** Faz 0, kimyasal yıkama sonrası Kontrol-MBR ve QQ-MBR membran modülleri.

Faz 0 çalışması sonucunda elde edilen TMP değerlerinden reaktörlerin zamana bağlı TMP profilleri oluşturulmuş olup TMP grafiklerinin altında kalan alanlar ve aralarındaki yüzdesel fark integraller yardımı ile hesaplanmıştır. İşletme neticesinde TMP değişimi Şekil 4.26’da verilmektedir.



(a) Faz 0 çalışması TMP grafiği denklemleri



(b) TMP grafiklerinin altında kalan alanlar

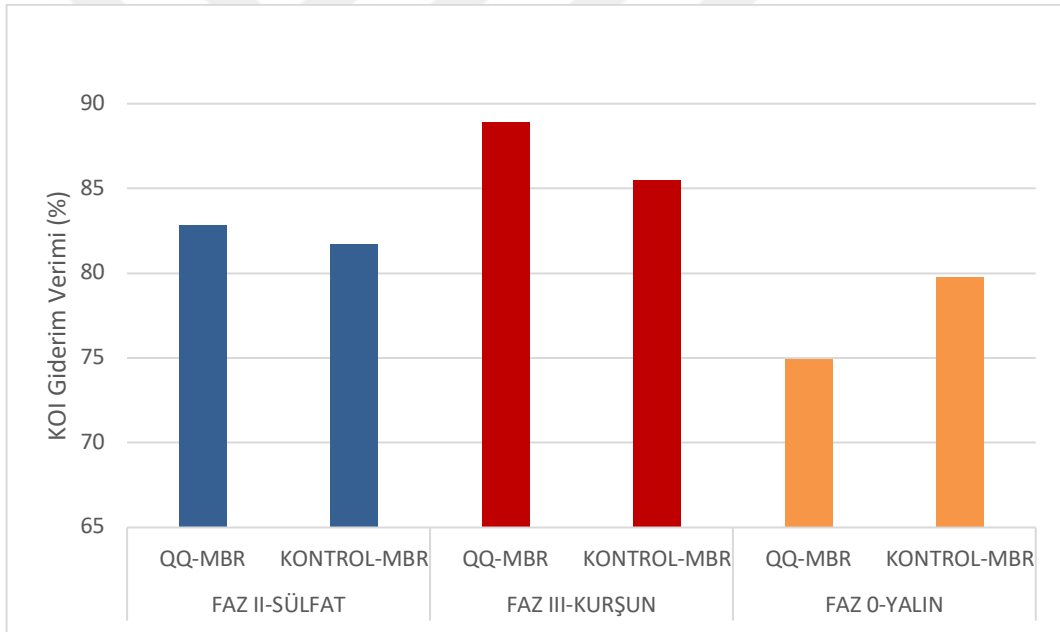
**Şekil 4.26:** Faz 0 çalışması QQ etkisi.

Yalın işletmede TMP azaltım etkisi %91 olarak elde edilmiştir.

Sonuç olarak, özellikle kurşun ve tuzluluğun QQ MBR potansiyelinde önemli bir etkisi gözlenirken, sülfatın QQ mekanizması üzerindeki etkisi diğer işletmelerdeki durum ile kıyaslandığında daha minör kalmıştır.

#### 4.1.5 Faz II, III ve 0'ın KOİ giderim verimi açısından kıyaslanması

Her iki reaktörün ve aynı zamanda tüm işletme fazlarının aynı koşullarda işletildiğini gösterebilmek için çeşitli parametreler bazında ek deneyler yapılmıştır. Bu deneyler, membran biyoreaktörlerde kullanılan membranların tıkanmasını önlemeye yönelik mekanizma ve yöntemlerin membranların giderim verimliliği ve filtrasyon performansına olumsuz bir etkisi olmadığını gösterme amacını taşımaktadır. Bu çerçevede, reaktörlerin yaklaşık üçer haftalık işletimleri sırasındaki kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) giderim verimleri ölçülmüş ve ortalama değerleri Şekil 4.27'deki grafikte gösterilmiştir.



**Şekil 4.27:** Faz II, Faz III ve Faz 0 çalışmaları KOİ giderim verimleri.

Sülfat ile QQ-MBR işletiminde hem QQ reaktörü hem de kontrol reaktörü %82 civarında KOİ giderim verimine sahiptir. Kurşun ile işletimde ise QQ reaktörünün KOİ giderim verimi %89 iken kontrol reaktörün giderim verimi %85 civarındadır. Her iki işletmede de her iki reaktörde KOİ giderim verimlerinde işletme parametresi olan sülfat ve kurşunun negatif bir etkisi olmamıştır. Yanı sıra QQ mekanizmasının da giderim verimi üzerinde olumsuz etkisi söz konusu değildir.

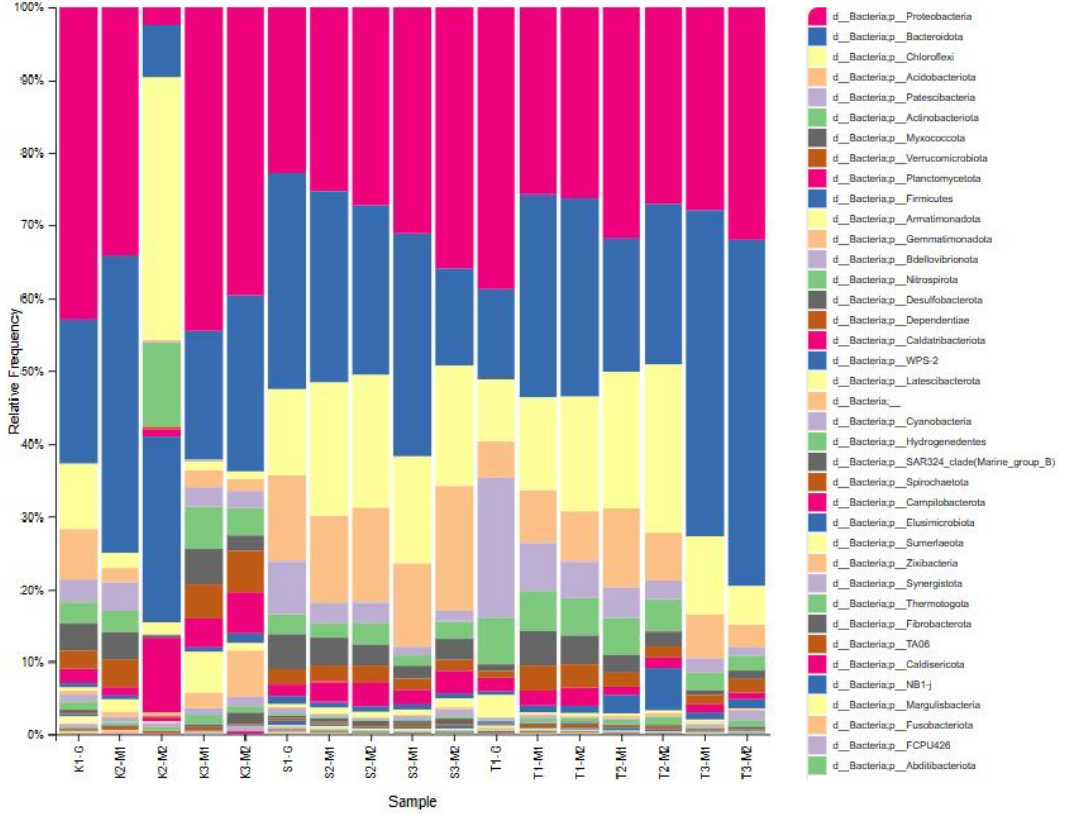
## 4.2 Kontrol-MBR ve QQ-MBR Mikrobiyal Komünite Analizi Sonuçları

Metagenomik analiz için membran reaktörlerden, her bir işletme fazı için işletmeye başlanmadan önce işletmeye başlandıktan sonra ve işletmenin son günü olacak şekilde tank içi çamur numuneleri alınıp metagenomik numune saklama koşullarına uygun olacak şekilde numuneler falkonlarda -20 °C’de tutulmuştur. Soğuk zincir bozulmadan numuneler Kore’ye analize gönderilmiştir. Hazırlanan numuneler ve kodları Çizelge 4.3’te yer almaktadır.

**Çizelge 4.3:** Tür analizi numune açıklamaları.

Numune Kodu	Faz	Açıklama
T1_GİRİŞ	Tuzluluk/ Yalın	Ham çamur
T1_MBR-1	Yalın	Çamur+QQ Boncuk
T1_MBR-2	Yalın	Çamur+Kontrol Boncuk
T2_MBR-1	Tuzluluk	Çamur+QQ Boncuk+Tuz
T2_MBR-2	Tuzluluk	Çamur+Kontrol Boncuk+Tuz
T3_MBR-1	Tuzluluk	Çamur+QQ Boncuk+Tuz
T3_MBR-2	Tuzluluk	Çamur+Kontrol Boncuk+Tuz
S1_GİRİŞ	Sülfat	Ham çamur
S2_MBR-1	Sülfat	Çamur+QQ Boncuk+Sülfat
S2_MBR-2	Sülfat	Çamur+Kontrol Boncuk+Sülfat
S3_MBR-1	Sülfat	Çamur+QQ Boncuk+Sülfat
S3_MBR-2	Sülfat	Çamur+Kontrol Boncuk+Sülfat
K1_GİRİŞ	Kurşun	Ham çamur
K2_MBR-1	Kurşun	Çamur+QQ Boncuk+Kurşun
K2_MBR-2	Kurşun	Çamur+Kontrol Boncuk+Kurşun
K3_MBR-1	Kurşun	Çamur+QQ Boncuk+Kurşun
K3_MBR-2	Kurşun	Çamur+Kontrol Boncuk+Kurşun

Çalışma kapsamında faz işletmeleri tamamlandıktan sonra yapılan tür (metagenomik) analizi neticesinde QQ-MBR ve Kontrol-MBR reaktörleri içerisindeki bakteriyolojik değişimlerin taksanomik seviyedeki değişimlerini gösteren bar grafik Şekil 4.28’de verilmiştir.



**Şekil 4.28:** Phylum taksanomik seviyesinde mikrobiyal değişim.

Grafikte ifade edilen T1 kodlu sample'lar kontrol işletmesi olan bare/ aklımasyon fazını, T2 ve T3 sample'ları Faz I-Tuzuluk işletimini, S kodlu sample'lar Faz II-Sülfat işletmesini ve K kodlu sample'lar ise Faz III- Kurşun işletmesini ifade etmektedir.

Tüm işletme fazlarına ait örneklerin mikrobiyal topluluk kompozisyonunu tanımlayan filum dağılımı, bu kısımda özetlenmiştir; her iki MBR (QQ ve Kontrol) de yüksek çeşitlilik gösterirken, her filumun oranları çok farklıdır. MBR'lerde tespit edilen en baskın filumlardan ikisi, tüm mikrobiyal toplulukların %50'sinden fazlasını oluşturan Proteobakteriler ve Bacteroidota'dır. Literatür çalışmaları, ayrıca Proteobakteriler ve Bacteroidetes'in aktif çamur ve biyofilmdeki ana filum grubu olduğunu ve bunların

nitrit bakterileri vb. gibi önemli fonksiyonel bakteri çeşitlerini içerdiklerini bildirmiştir.

Gao ve ark., bir  $\gamma$ -proteobakteri sınıfının EPS salgılayabildiğini ve diğer bakterilerle karşılaştırıldığında membran yüzeyine daha kolay bağlanabildiğini, bunun da MBR'lerde membranın biyolojik kirlenmesine yol açabileceğini öne sürdü (Gao ve diğ., 2013). İşletimi yapılan her iki MBR'de de tüm fazlarda Asidobakteriota, Firmicutes ve Kloroflexi gibi başka bakteri azınlıkları da mevcuttur. Ek olarak, AHL bazlı QS ile ilgili genlere sahip mikroorganizmaların çoğunluğunun Proteobakterilere veya Bacteroidetes'e ait olduğu bulunmuştur, bu da her iki MBR'de de yaygın QS mekanizmalarının mevcut olabileceğini göstermektedir (Case ve diğ., 2008).

#### 4.2.1 Faz I- tuzluluk ile işletme tür analizi sonuçları

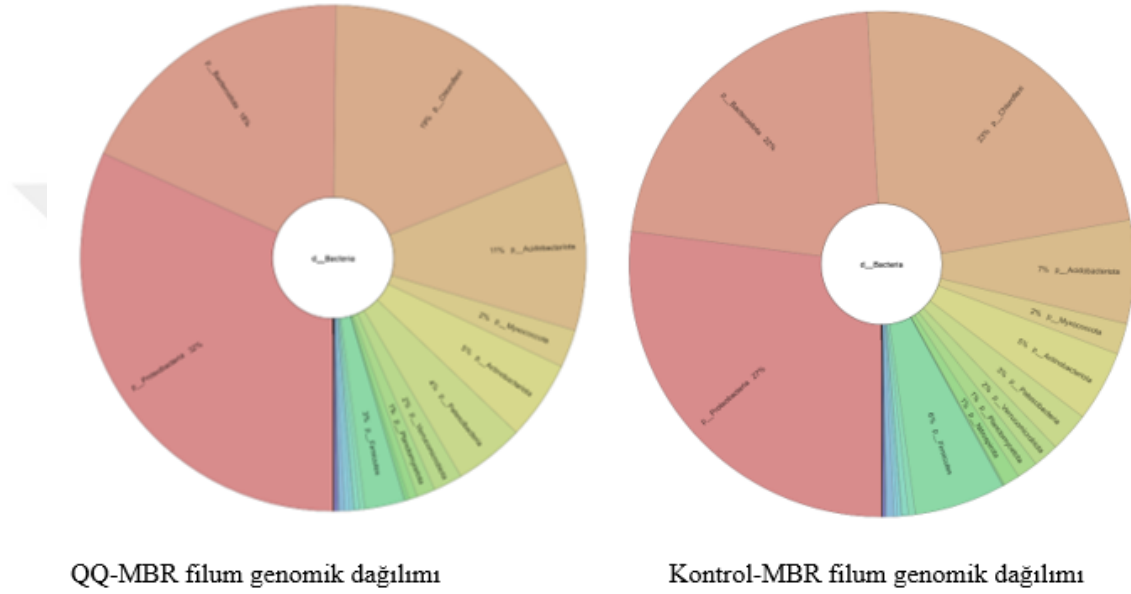
% 10-25 tuzluluk ile işletmeye başlamadan önce, yani aklimasyon aşamasında aktif çamur numunesinden örnek alınarak tür analizi için -20 °C'de numune donduruldu. Metagenomik analizi yapıldı. Analiz sonucunun filum genomik dağılımı Şekil 4.29'da özetlenmiştir.



Şekil 4.29: Faz I çalışması aklimasyon aşaması, tank işi mikrobiyal komünite dağılımı.

Aktif çamurda, % 39 Protobakteriler ardından %19 oran ile Patessibakteriler baskın tür olarak karşımıza çıkmaktadır.

Aklımasyon aşamasının tamamlanmasının ardından kademeli tuzluluk artışı ile işletmeye başlanmış olup işletme başlangıcında reaktörlerde gerçekleşen ilk değişimleri gözlemlemek amacıyla MBR'lerden numune alınmış ve tür analizi için gerekli koşullarda saklanmıştır. Tür analizi tamamlanan QQ-MBR ve Kontrol-MBR numunelerinin filum genomik dağılımı Şekil 4.30'da gösterilmektedir.



Şekil 4.30: Faz I çalışması işletme başı, tank içi mikrobiyal komünite dağılımı.

Bakterili ve bakterisiz (boş) boncuklar MBR tanklarına atılıp besleme çözeltilisine tuz ilave edildikten sonra her iki reaktörde de aklımasyon aşamasında baskın sınıflardan olan Patessibakterilerde gözle görülür bir azalma meydana gelmiş olup tank içerisindeki dağılımı %19'dan QQ-MBR'de %4, Kontrol-MBR'de ise %3'e düşmüştür. Protobakterilerin oranı her iki reaktörde de bir miktar düşmüş olup Kloroflexi sınıfına ait bakterilerde QQ-MBR'de %10'luk bir artış ve Kontrol-MBR'de %14'lük bir artış meydana gelmiştir.

Tuzluluk ile işletmenin sonuna gelindiğinde ise aynı şekilde her iki reaktörden numuneler alınmış ve işletme süresince reaktörler içerisinde meydana gelen tür değişimleri incelenmiştir. Şekil 4.31'de filum dağılımı işletme sonu reaktör içi tür dağılımlarını göstermektedir.



QQ-MBR filum genomik dağılımı



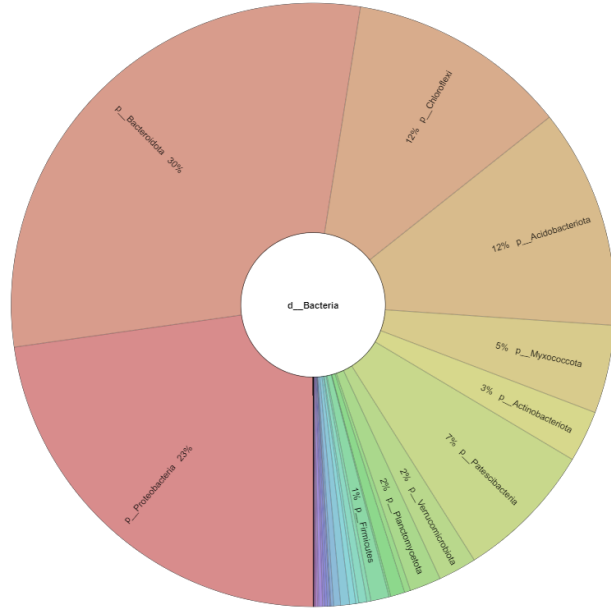
Kontrol-MBR filum genomik dağılımı

**Şekil 4.31:** Faz I çalışması işletme sonu, tank içi mikrobiyal komünite dağılımı.

İşletme sonunda her iki reaktörde de baskın bakteri sınıfı en başta olduğu gibi Protobakterilerdir. Bacteroidotalar her iki reaktörde de ciddi oranda artarak reaktör içerisinde % 45 ve % 48 ile en baskın sınıf olmuşlardır. QQ-MBR’de Kloroflexi sınıfına ait bakteriler işletme başlangıcına göre % 7 azalarak %11 dağılıma sahip olurken Kontrol-MBR’de %5 civarına gelmiştir. Aklımasyon aşamasındaki ham çamur ile kıyas yapıldığında her iki reaktörde de Patessibakteri sınıfı ciddi oranda azalmıştır. Tuzluluğun bu bakteri sınıfına ait bakterilerin gelişimi üzerinde negatif bir etkisi olduğu söylenebilir.

#### 4.2.2 Faz II- sülfat ile işletme tür analizi sonuçları

25-250 mg/l kademeli sülfat ilavesi ile gerçekleştirilen bu işletmede aklımasyon aşamasında ham çamur numunesi alınmış ve metagenomik analiz için uygun koşullarda saklanmıştır. Tür analizi yapılan ham çamurun filum genomik dağılımı Şekil 4.32’de ifade edilmiştir.



**Şekil 4.32:** Faz II çalışması aklımasyon aşaması, tank içi mikrobiyal komünite dağılımı

Aklımasyon döneminde her iki reaktör içerisindeki aktif çamurda baskın tür Bacteroidota sınıfına ait bakteriler olup %30 dağılım oranına sahiptir. Bunu takiben % 23 bulunma yoğunluğuna sahip Protobakteri sınıfı gelmektedir. Asidobakteriota ve Kloroflexiler % 12 oranla bir diğer baskın türdür.

Sülfat ve QQ boncuklar ile işletmeye başlandığı vakit, tank içi ilk değişimleri gözlemlemek adına QQ-MBR ve Kontrol-MBR reaktörlerinden numune alınmış ve tür analizi yapılmıştır. Analiz sonuçları filum bazında Şekil 4.33'te yer almaktadır.



QQ-MBR filum genomik dağılımı

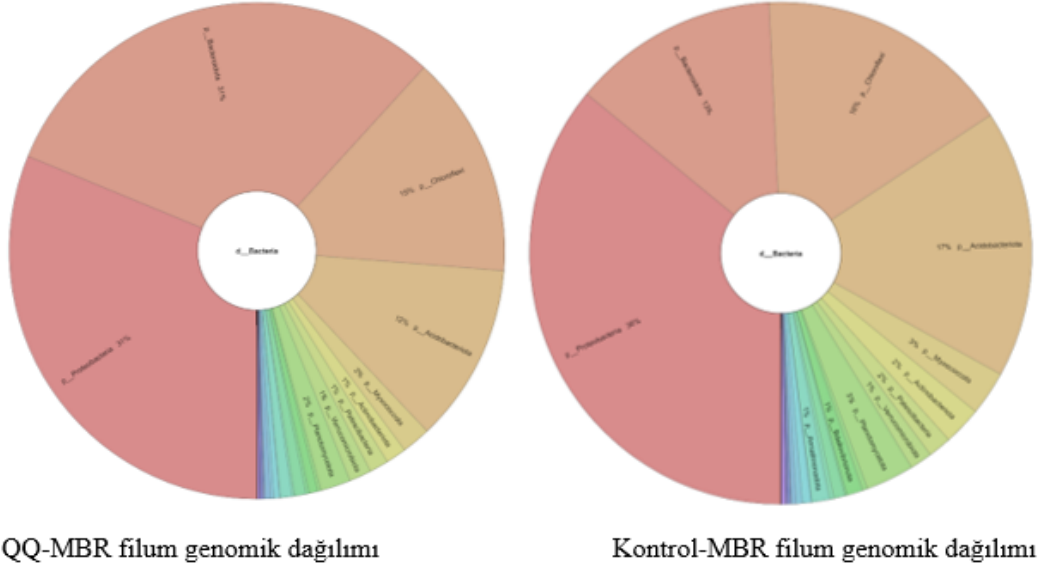


Kontrol-MBR filum genomik dağılımı

**Şekil 4.33:** Faz II çalışması işletme başı, tank içi mikrobiyal komünite dağılımı.

İşletmenin ilk günlerinde tanklar içerisindeki baskın türler çok fazla değişmediği görülmektedir. Bacteroidota sınıfına ait bakterilerin oranında bir QQ-MBR’de %4 Kontrol-MBR’de ise %7 azalma meydana gelmiştir.

İşletmenin sonuna doğru her iki reaktörden de alınan numunelerin tür analizi yapılmış ve filum genomik sınıflandırması Şekil 4.34’teki gibi ortaya çıkmıştır.



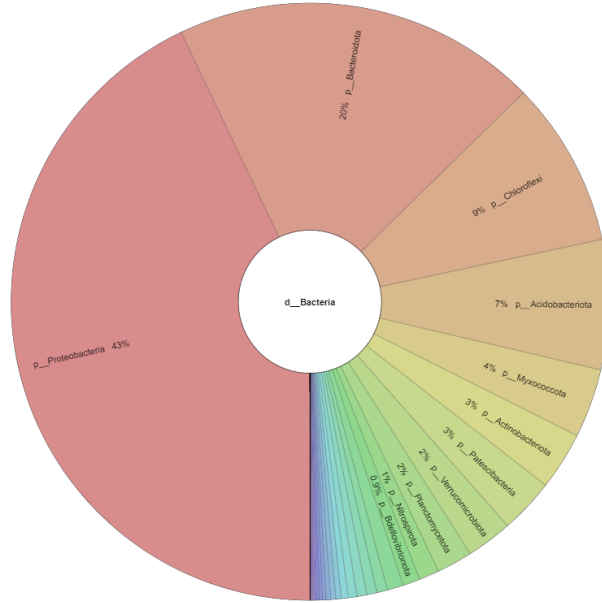
**Şekil 4.34:** Faz II çalışması işletme sonu, tank içi mikrobiyal komünite dağılımı.

QQ-MBR’de Bacteroidota ve Protobakteri sınıfına ait bakteriler %31 oranla reaktör içerisindeki en baskın bakteri sınıflarıdır. Reaktör içerisinde gelişen en yaygın ikinci sınıf ise %15 orana sahip olan Kloroflexilerdir. Kontrol-MBR’de ise aklımasyon aşamasına kıyasla %13, işletme başlangıcına kıyasla %9 artış gösteren Protobakteri sınıfına ait bakteriler en baskın bakteriler olarak tank içerisinde gelişmişlerdir. İşletme süresince Kontrol-MBR’deki Asidobakteriota sınıfına ait bakteriler %4 artarak %17 mertebelerine gelmiştir. Yanı sıra, reaktörlere sülfat ilavesi her iki reaktördeki Patessibakteri sınıfını inhibe ederek, reaktörlerdeki bulunma oranlarını %1-2 seviyelerine düşürmüştür.

#### 4.2.3 Faz III- kurşun ile işletme tüz analizi sonuçları

0,1-1 ppm kademeli kurşun ilavesi ile işleme başlamadan hemen önce, aklımasyon aşamasında membran biyoreaktörlerden ayrı ayrı aktif çamur numunesi alınıp tür analizi saklama koşullarına uygun olarak saklanmış, akabinde tür analizi yapılmıştır.

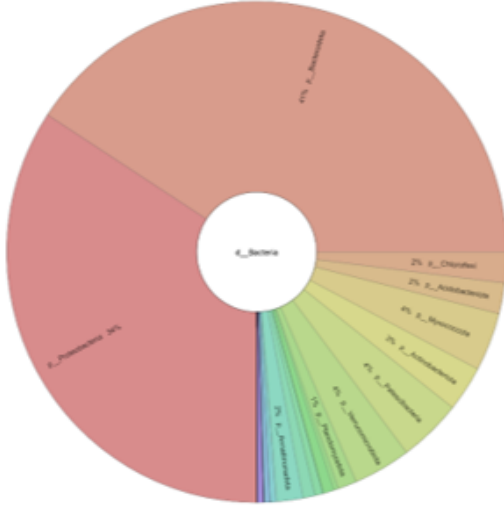
Aklımasyon aşaması aktif çamuruna ait filum genomik dağılımı Şekil 4.35'te gösterilmektedir.



**Şekil 4.35:** Faz III çalışması aklımasyon aşaması, tank içi mikrobiyal komünite dağılımı.

Aktif çamurda diğer fazlarda olduğu gibi baskın sınıf Protobakteri sınıfı olup reaktörlerde bulunma oranı % 43'tür. Reaktörler içerisindeki en yaygın ikinci tür Bacteroidotalardır. %9 bulunma oranı ile Kloroflexi sınıfına ait bakteriler ise reaktörler içindeki en yaygın üçüncü sınıf olarak karşımıza çıkmaktadır.

Aklımasyon aşamasının hemen ardından kurşun ile işletmeye geçilmiş olup BH4 bakterili boncuk olan QQ boncuk ve bakterisiz kontrol boncuk ile MBR'ler işletilmiştir. İşletmenin ilk günlerinde her iki reaktörden de ayrı ayrı numuneler alınmış ve tür analizleri yapılmıştır. Analiz sonucu reaktörlerde meydana gelen tür değişimleri Şekil 4.36'daki grafiklerde görülmektedir.



QQ-MBR filum genomik dağılımı



Kontrol-MBR filum genomik dağılımı

**Şekil 4.36:** Faz III çalışması işletme başı, tank içi mikrobiyal komünite dağılımı.

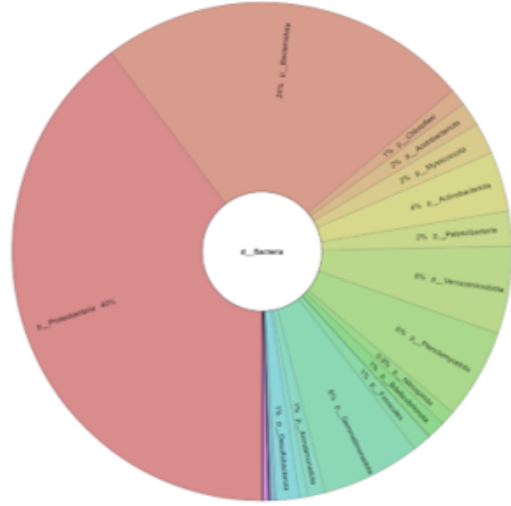
Reaktörlere besleme çözeltisi ile kademeli olarak kurşun ilave edildiği işletmenin ilk günlerinde QQ-MBR’de Protobakteri sınıfına ait bakterilerde %9’luk bir azalma meydana gelmiştir. Aksine, aynı reaktörde Bacteroidota sınıfı bakterilerde %21’lik bir artış söz konusudur. Aklimasyon fazında sırasıyla, %9 ve %7 oranlarında reaktör içerisinde bulunan Kloroflexi ve Asidobakteriota sınıfı bakterilerde söz etmeye değer bir azalma meydana gelmiştir.

Bakterisiz boncuk ile işletilen aynı koşullara sahip Kontrol-MBR’de ise tür yoğunluklarında ciddi bir değişim meydana geldiği söylenebilir. Kurşun ile işletmenin ilk günlerinde Kontrol-MBR içinde en yaygın bakteriler %36 oranla Kloroflexi sınıfına aittir. Haricen, bu aşamada QQ-MBR’de %0,5 oranında bulunan Firmicutes sınıfına ait bakteriler, Kontrol-MBR’de %26 oranında baskın bir tür olarak gözlemlenmektedir. Yine Kontrol-MBR’de Aktinobakteriota sınıfına ait bakteriler %12 oranla reaktör içindeki baskın türlerden birisi olmuştur.

İşletmenin son günlerinde alınan numuneler ile gerçekleştirilen tür analizi sonuçları filum bazında genomik olarak analiz yapılmış ve grafiklendirilmiştir (Şekil 4.37).



QQ-MBR filum genomik dağılımı



Kontrol-MBR filum genomik dağılımı

**Şekil 4.37:** Faz III çalışması işletme sonu, tank içi mikrobiyal komünite dağılımı.

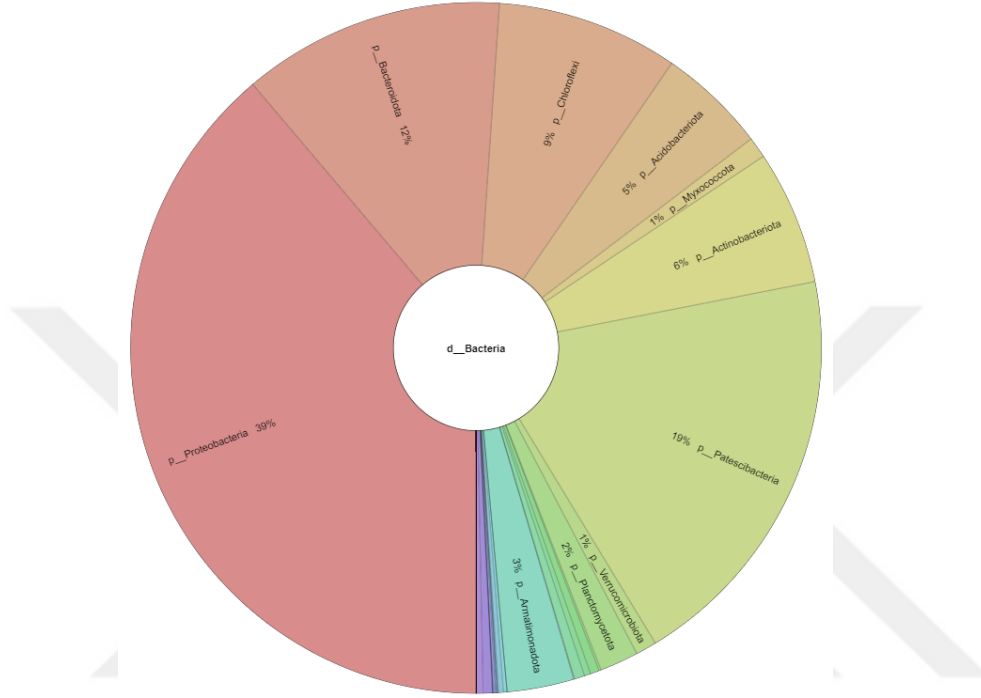
Kurşun ile işletmenin sonunda ise reaktör QQ reaktör içerisinde baskın bakteri sınıfı Protobakterilerdir. Benzer şekilde Kontrol reaktörü içerisinde de aynı sınıfa ait bakteriler gelişimine devam etmiştir. Ham aktif çamurdaki bu baskın sınıfa kurşun ilavesinin herhangi bir inhibe edici özelliği olmadığı yorumu yapılabilir. Hem QQ-MBR’de hem de Kontrol-MBR’de ikinci baskın bakteri sınıfı Bacteroidotaya aittir. İşletmenin ilk günlerine ait tür analizi sonucuna kıyasla Kontrol-MBR’deki gelişen farklı türlerin bu aşamada minimize oldukları söylenebilir.

Bu işletme fazının sonundaki tür analizi sonuçları ile diğer işletme fazı sonu tür analizleri kıyaslandığında burada baskın olan bakteri sınıfı haricindeki bakteri sınıflarının, örneğin Planctomycetota, Gemmatimonadota, Verrucomicrobiota bakteri sınıflarının kendi içlerinde, reaktör içerisinde bulunma yüzdelerinde homojen bir dağılım olup genel bakteri sınıflarının yaklaşık %40’ını oluşturmaktadırlar.

#### 4.2.4 Faz 0- yalın işletme tür analizi sonuçları

Aktif çamurun aklımasyon aşamasından hemen sonra, BH4 immobilize edilmiş QQ boncuk ve bakterisiz boş boncuk ile işletilen ve belirlenmiş standart besleme çözeltilisine herhangi bir ilave olmadan ‘Yalın’ işletme gerçekleştirilmiştir. Bu yalın fazdaki reaktör içi tür değişimleri ile diğer işletme fazlarındaki tür değişimleri açık bir şekilde birbiri ile kıyaslanabilir.

İlk olarak QQ ve kontrol boncuklar reaktörler içerisine eklenmeden hemen önce aktif çamurdaki türleri belirleyebilmek adına ham aktif çamur numunesi alınmış ve metagenomik analiz için gerekli olan sıcaklıkta saklanmıştır. Ardından soğuk zincir korunarak numunelere tür analizi yapılmıştır. Analiz sonucu aklımasyon aşamasındaki tür dağılımı Şekil 4.38’de gösterilmiştir.



**Şekil 4.38:** Faz 0 çalışması aklımasyon aşaması, tank içi mikrobiyal komünite dağılımı.

İleri biyolojik atıksu arıtma sisteminden alınan ve membran biyoreaktörlerde bir süre aklımasyona tabi tutulan aktif çamurda baskın bakteri sınıfı %39 oranla Protobakterilerdir. Reaktör içerisinde % 19 oranında Patessibakteri sınıfına ait bakteriler, %12 Bacteroidota sınıfı ve %9 Kloroflexi sınıf bakteriler gelişmiştir.

Bakterili boncukların olduğu QQ-MBR ve boş boncukların bulunduğu Kontrol-MBR’den ayrı ayrı numuneler alınmış ve reaktörler içindeki bakteri türlerindeki değişimler analiz edilmiştir. Yalın faza ait filum genomik sınıflandırma Şekil 4.39’da verilmiştir.



QQ-MBR filum genomik dağılımı



Kontrol-MBR filum genomik dağılımı

**Şekil 4.39:** Faz 0 tank içi mikrobiyal komünite dağılımı.

Bakterili ve bakterisiz aljinat boncuklar reaktörlere atıldıktan sonra her iki reaktör içerisinde baskın sınıf olan Protobakteri sınıfında %13'lük bir azalma meydana gelerek %26 mertebesine gelmiştir. Her iki reaktörde de Bacteroidota sınıfı bakterilerde iki kattan daha fazla bir artış meydana gelerek %27-28 bulunma oranına gelmiştir. Sodyum aljinat boncukların ham çamur içerisinde baskın sınıf olan Patessibakteri sınıfına ait bakterileri etkilediği çıkarımında bulunulabilir.



## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışmada, endüstriyel atıksuların arıtımında quorum quenching (QQ) mekanizmasının potansiyeli ve membran biyoreaktörlerde (MBR) bu mekanizmanın biyolojik kirlenme üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir.

Bu kapsamda QQ bakterisi olan BH4 immobilize edilen sodyum aljinat boncuklar ve bakterisiz/boş sodyum aljinat boncuklar paralel ve eşit olan iki adet yarı pilot ölçekli MBR tankında endüstriyel atıksuları simüle eden tuz (Faz I), sülfat (Faz II) ve kurşun (Faz III) kirleticileri ile işletilmiştir. Yanı sıra kontrol fazı olan Faz 0'da ilave bir kirletici madde olmadan işletme gerçekleştirilmiştir. İşletmeler süresince ana kontrol parametresi membranlardaki tıkanmaya işaret eden TMP sürekli olarak kontrol edilip kaydedilmiştir.

Aşırı tuzluluk ve kurşun ile olan işletmelerde TMP azaltım miktarı sülfat ile işleme göre daha az olmuştur. Bu da tuzluluk ve kurşunun QQ MBR üzerinde minör de olsa negatif bir etkisi olduğunu göstermektedir. En fazla TMP azaltım miktarı olan işletme Faz 0 olarak nitelendirilen yalın işletme fazıdır. Bu bağlamda endüstriyel atıksu arıtımında QQ mekanizması membranlar üzerinde biyofilm oluşmamasına katkı sağladığı fakat kirletici türünün sağlanan bu katkının büyüklüğü üzerinde de etkili olduğu sonucuna varılmaktadır.

Tüm işletmeler süresince, ilave edilen kirleticinin ve QQ boncukların tank içi mikrobiyal tür çeşitliliğine olan etkisini incelemek için, çeşitli periyotlarda tank içi numuneler alınıp mikrobiyal tür analizi yapılmıştır. Reaktörlerde baskın tür başlangıçta protobakteri sınıfına ait türler olup en fazla tank içi komünite değişikliği olan işletme Faz III-kurşun işletmesi iken Faz II-sülfat ile işletmede tank içi baskın tür oranı değişikliği minimum olmuştur. Faz III'te de işletme sonunda tank içi baskın tür işletme başındaki dağılıma benzer hale gelmiştir.

Araştırma sonuçları, QQ mekanizmasının, özellikle zorlu endüstriyel atıksu karakterizasyonları ve toksik şok durumlarında, membranın işlevselliğini koruyarak MBR sistemlerinin tıkanmasını geciktirerek performansını önemli ölçüde artırabileceğini göstermektedir.

QQ uygulamasının, membran yüzeyindeki biyofilm oluşumunu engellemesi ve membran gözeneklerinin tıkanmasını minimize etmesi, arıtma sisteminin genel verimliliğine önemli katkılarda bulunmuştur. Bu bulgular, endüstriyel atıksu arıtım tekniklerinin geliştirilmesi ve çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılmasında önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir.

Bu çalışmanın ortaya koyduğu bulgulara dayanarak, endüstriyel atıksuların arıtımında QQ mekanizmasının etkinliğini artırmak ve MBR sistemlerinin sürdürülebilirliğini iyileştirmek için QQ mekanizmasının endüstriyel atıksu arıtımında daha geniş bir uygulama alanına sahip olması ve çeşitli atıksu matrisleri üzerindeki etkilerinin daha fazla araştırılması gerekmektedir. Bu, QQ mekanizmasının çeşitli kirleticilere ve değişken yük koşullarına karşı etkinliğini daha iyi anlamak için elzemdir.

## REFERANSLAR

- Abdullah, N., Rahman, M. A., Dzarfan Othman, M. H., Jaafar, J., & Ismail, A. F.** (2018). Membranes and Membrane Processes. İçinde *Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes* (ss. 45-70). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813549-5.00002-5>
- Baker, R. W. Richard W.** (2012). *Membrane technology and applications*. John Wiley & Sons.
- Banti, D. C., Samaras, P., Tsiptsias, C., Zouboulis, A., & Mitrakas, M.** (2018). Mechanism of SMP aggregation within the pores of hydrophilic and hydrophobic MBR membranes and aggregates detachment. *Separation and Purification Technology*, 202, 119-129. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.03.045>
- Bérubé, P.** (2010). Chapter 9 *Membrane Bioreactors: Theory and Applications to Wastewater Reuse* (ss. 255-292). [https://doi.org/10.1016/S1871-2711\(09\)00209-8](https://doi.org/10.1016/S1871-2711(09)00209-8)
- Case, R. J., Labbate, M., & Kjelleberg, S.** (2008). AHL-driven quorum-sensing circuits: their frequency and function among the Proteobacteria. *The ISME Journal*, 2(4), 345-349. <https://doi.org/10.1038/ismej.2008.13>
- Cheong, W.-S., Lee, C.-H., Moon, Y.-H., Oh, H.-S., Kim, S.-R., Lee, S. H., Lee, C.-H., & Lee, J.-K.** (2013). Isolation and Identification of Indigenous Quorum Quenching Bacteria, *Pseudomonas* sp. 1A1, for Biofouling Control in MBR. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(31), 10554-10560. <https://doi.org/10.1021/ie303146f>
- Choo, K.-H., Park, P.-K., & Oh, H.-S.** (2020). Quorum sensing and quorum quenching in membrane bioreactors. İçinde *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering* (ss. 245-274). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819809-4.00012-7>
- Dubinkina, V., Fridman, Y., Pandey, P. P., & Maslov, S.** (2019). Multistability and regime shifts in microbial communities explained by competition for essential nutrients. *eLife*, 8. <https://doi.org/10.7554/eLife.49720>
- Ergön-Can, T., Köse-Mutlu, B., Koyuncu, İ., & Lee, C.-H.** (2017). Biofouling control based on bacterial quorum quenching with a new application: Rotary microbial carrier frame. *Journal of Membrane Science*, 525, 116-124. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.10.036>
- Fonseca Couto, C., Lange, L. C., & Santos Amaral, M. C.** (2018). A critical review on membrane separation processes applied to remove pharmaceutically active compounds from water and wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 26, 156-175. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.10.010>
- Frenkel, V. S.** (2015). Planning and design of membrane systems for water treatment. İçinde *Advances in Membrane Technologies for Water Treatment* (ss. 329-347). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-121-4.00010-1>
- Fuqua, W. C., Winans, S. C., & Greenberg, E. P.** (1994). Quorum sensing in bacteria: the LuxR-LuxI family of cell density-responsive transcriptional regulators. *Journal of Bacteriology*, 176(2), 269-275. <https://doi.org/10.1128/jb.176.2.269-275.1994>

- Galloway, W. R. J. D., Hodgkinson, J. T., Bowden, S. D., Welch, M., & Spring, D. R.** (2011). Quorum Sensing in Gram-Negative Bacteria: Small-Molecule Modulation of AHL and AI-2 Quorum Sensing Pathways. *Chemical Reviews*, *111*(1), 28-67. <https://doi.org/10.1021/cr100109t>
- Gao, D.-W., Wen, Z.-D., Li, B., & Liang, H.** (2013). Membrane fouling related to microbial community and extracellular polymeric substances at different temperatures. *Bioresource Technology*, *143*, 172-177. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.05.127>
- Grandclément, C., Tannières, M., Moréra, S., Dessaux, Y., & Faure, D.** (2016). Quorum quenching: role in nature and applied developments. *FEMS Microbiology Reviews*, *40*(1), 86-116. <https://doi.org/10.1093/femsre/fuv038>
- Howe, K. J., Hand, D. W., Crittenden, J. C., Trussell, R. R., & Tchobanoglous, G.** (2012). *Principles of Water Treatment*. John Wiley & Sons.
- Hwang, B.-K., Lee, W.-N., Yeon, K.-M., Park, P.-K., Lee, C.-H., Chang, in-S., Drews, A., & Kraume, M.** (2008). Correlating TMP Increases with Microbial Characteristics in the Bio-Cake on the Membrane Surface in a Membrane Bioreactor. *Environmental Science & Technology*, *42*(11), 3963-3968. <https://doi.org/10.1021/es7029784>
- Iorhemen, O. T., Hamza, R. A., & Tay, J. H.** (2017). Membrane fouling control in membrane bioreactors (MBRs) using granular materials. *Bioresource Technology*, *240*, 9-24. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.005>
- Jahangir, D., Oh, H.-S., Kim, S.-R., Park, P.-K., Lee, C.-H., & Lee, J.-K.** (2012). Specific location of encapsulated quorum quenching bacteria for biofouling control in an external submerged membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science*, *411-412*, 130-136. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2012.04.022>
- Jeison, D., & Vanlier, J.** (2007). Cake formation and consolidation: Main factors governing the applicable flux in anaerobic submerged membrane bioreactors (AnSMBR) treating acidified wastewaters. *Separation and Purification Technology*, *56*(1), 71-78. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.01.022>
- Jiang, W., Xia, S., Liang, J., Zhang, Z., & Hermanowicz, S. W.** (2013). Effect of quorum quenching on the reactor performance, biofouling and biomass characteristics in membrane bioreactors. *Water Research*, *47*(1), 187-196. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.09.050>
- Jiao, X., Xie, K., & Qiu, L.** (2020). Membrane bioreactors for wastewater treatment: A review of microbial quorum sensing and quenching to control membrane biofouling based on engineering quorum quenching bacteria. *E3S Web of Conferences*, *194*, 04026. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019404026>
- Johansen, P., & Jespersen, L.** (2017). Impact of quorum sensing on the quality of fermented foods. *Current Opinion in Food Science*, *13*, 16-25. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2017.01.001>
- Judd, S. (2006). Fundamentals. İçinde *The MBR Book* (ss. 21-121). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-185617481-7/50004-0>
- Judd, S., & Judd, C.** (2011). *The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment*. [https://books.google.com.tr/books?hl=tr&lr=&id=SYI2FAAM04kC&oi=fnd&pg=PP1&ots=HtQhKfmcbP&sig=IKEkoE\\_UU08IROG-78bCaKtqxCo&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.tr/books?hl=tr&lr=&id=SYI2FAAM04kC&oi=fnd&pg=PP1&ots=HtQhKfmcbP&sig=IKEkoE_UU08IROG-78bCaKtqxCo&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)
- Kim, J.-H., Choi, D.-C., Yeon, K.-M., Kim, S.-R., & Lee, C.-H.** (2011). Enzyme-Immobilized Nanofiltration Membrane To Mitigate Biofouling Based on Quorum

- Quenching. *Environmental Science & Technology*, 45(4), 1601-1607. <https://doi.org/10.1021/es103483j>
- Kim, S.-R., Oh, H.-S., Jo, S.-J., Yeon, K.-M., Lee, C.-H., Lim, D.-J., Lee, C.-H., & Lee, J.-K.** (2013). Biofouling Control with Bead-Entrapped Quorum Quenching Bacteria in Membrane Bioreactors: Physical and Biological Effects. *Environmental Science & Technology*, 47(2), 836-842. <https://doi.org/10.1021/es303995s>
- Kim, T. H., Lee, I., Yeon, K.-M., & Kim, J.** (2018). Biocatalytic membrane with acylase stabilized on intact carbon nanotubes for effective antifouling via quorum quenching. *Journal of Membrane Science*, 554, 357-365. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.03.020>
- Koyuncu, İ.** (2018a). *Su/Atıksu Arıtılması ve Geri Kazanılmasında Membran Teknolojileri ve Uygulamaları Cilt 1: Membran Teknolojileri ve Su Arıtma*.
- Koyuncu, İ.** (Ed.). (2018b). *Su/Atıksu Arıtılması ve Geri Kazanılmasında Membran Teknolojileri ve Uygulamaları Cilt 2: Evsel ve Endüstriyel Atıksuların Arıtılması ve Geri Kazanılmasında Membran Teknolojileri*. Türkiye Çevre Koruma Vakfı.
- Kraemer, J. T., Menniti, A. L., Erdal, Z. K., Constantine, T. A., Johnson, B. R., Daigger, G. T., & Crawford, G. V.** (2012). A practitioner's perspective on the application and research needs of membrane bioreactors for municipal wastewater treatment. *Bioresource Technology*, 122, 2-10. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.05.014>
- Lalia, B. S., Kochkodan, V., Hashaikheh, R., & Hilal, N.** (2013). A review on membrane fabrication: Structure, properties and performance relationship. *Desalination*, 326, 77-95. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.06.016>
- LaSarre, B., & Federle, M. J.** (2013). Exploiting Quorum Sensing To Confuse Bacterial Pathogens. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 77(1), 73-111. <https://doi.org/10.1128/MMBR.00046-12>
- Lee, A., Elam, J. W., & Darling, S. B.** (2016). Membrane materials for water purification: design, development, and application. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2(1), 17-42. <https://doi.org/10.1039/C5EW00159E>
- Lee, K., Kim, Y.-W., Lee, S., Lee, S. H., Nahm, C. H., Kwon, H., Park, P.-K., Choo, K.-H., Koyuncu, I., Drews, A., Lee, C.-H., & Lee, J.-K.** (2018). Stopping Autoinducer-2 Chatter by Means of an Indigenous Bacterium (*Acinetobacter* sp. DKY-1): A New Antibiofouling Strategy in a Membrane Bioreactor for Wastewater Treatment. *Environmental Science & Technology*, 52(11), 6237-6245. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05824>
- Lee, K., Lee, S., Lee, S. H., Kim, S.-R., Oh, H.-S., Park, P.-K., Choo, K.-H., Kim, Y.-W., Lee, J.-K., & Lee, C.-H.** (2016). Fungal Quorum Quenching: A Paradigm Shift for Energy Savings in Membrane Bioreactor (MBR) for Wastewater Treatment. *Environmental Science & Technology*, 50(20), 10914-10922. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b00313>
- Lee, K., Yu, H., Zhang, X., & Choo, K.-H.** (2018). Quorum sensing and quenching in membrane bioreactors: Opportunities and challenges for biofouling control. *Bioresource Technology*, 270, 656-668. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.019>
- Lin, Y., Xu, J., Hu, J., Wang, L., Ong, S. L., Leadbetter, J. R., & Zhang, L.** (2003). Acyl-homoserine lactone acylase from *Ralstonia* strain XJ12B represents a novel and potent class of quorum-quenching enzymes. *Molecular Microbiology*, 47(3), 849-860. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2958.2003.03351.x>

- Liu, L., Zeng, X., Zheng, J., Zou, Y., Qiu, S., & Dai, Y.** (2022). AHL-mediated quorum sensing to regulate bacterial substance and energy metabolism: A review. *Microbiological Research*, 262, 127102. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2022.127102>
- Loeb, S., & Sourirajan, S.** (1963). *Sea Water Demineralization by Means of an Osmotic Membrane* (ss. 117-132). <https://doi.org/10.1021/ba-1963-0038.ch009>
- Maqbool, T., Khan, S. J., Waheed, H., Lee, C.-H., Hashmi, I., & Iqbal, H.** (2015). Membrane biofouling retardation and improved sludge characteristics using quorum quenching bacteria in submerged membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science*, 483, 75-83. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.02.011>
- Meng, F., Chae, S.-R., Drews, A., Kraume, M., Shin, H.-S., & Yang, F.** (2009). Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): Membrane fouling and membrane material. *Water Research*, 43(6), 1489-1512. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.12.044>
- Meng, F., Zhang, S., Oh, Y., Zhou, Z., Shin, H.-S., & Chae, S.-R.** (2017). Fouling in membrane bioreactors: An updated review. *Water Research*, 114, 151-180. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.02.006>
- Mutamim, N. S. A., Noor, Z. Z., Hassan, M. A. A., Yuniarto, A., & Olsson, G.** (2013). Membrane bioreactor: Applications and limitations in treating high strength industrial wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 225, 109-119. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.02.131>
- Nabi, M., Liang, H., Zhou, Q., Cao, J., & Gao, D.** (2023). In-situ membrane fouling control and performance improvement by adding materials in anaerobic membrane bioreactor: A review. *Science of The Total Environment*, 865, 161262. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161262>
- Nataraj, S. K., Hosamani, K. M., & Aminabhavi, T. M.** (2009). Nanofiltration and reverse osmosis thin film composite membrane module for the removal of dye and salts from the simulated mixtures. *Desalination*, 249(1), 12-17. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.06.008>
- Oh, H.-S., & Lee, C.-H.** (2018). Origin and evolution of quorum quenching technology for biofouling control in MBRs for wastewater treatment. *Journal of Membrane Science*, 554, 331-345. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.03.019>
- Oh, H.-S., Yeon, K.-M., Yang, C.-S., Kim, S.-R., Lee, C.-H., Park, S. Y., Han, J. Y., & Lee, J.-K.** (2012). Control of Membrane Biofouling in MBR for Wastewater Treatment by Quorum Quenching Bacteria Encapsulated in Microporous Membrane. *Environmental Science & Technology*, 46(9), 4877-4884. <https://doi.org/10.1021/es204312u>
- Prabakaran, V., & Jon, C. K.** (2023). Classification, fabrication, and characterization of membrane materials. İçinde *Membrane Dehumidification and Cooling* (ss. 43-81). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95529-4.00005-8>
- Rabin, N., Zheng, Y., Opoku-Temeng, C., Du, Y., Bonsu, E., & Sintim, H. O.** (2015). Agents that Inhibit Bacterial Biofilm Formation. *Future Medicinal Chemistry*, 7(5), 647-671. <https://doi.org/10.4155/fmc.15.7>
- Radjenović, J., Matošić, M., Mijatović, I., Petrović, M., & Barceló, D.** (2007). Membrane Bioreactor (MBR) as an Advanced Wastewater Treatment Technology. İçinde *Emerging Contaminants from Industrial and Municipal Waste* (ss. 37-101). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/698\\_5\\_093](https://doi.org/10.1007/698_5_093)

- Radjenović, J., Matošić, M., Mijatović, I., Petrović, M., & Barceló, D.** (2008). *Membrane Bioreactor (MBR) as an Advanced Wastewater Treatment Technology* (ss. 37-101). [https://doi.org/10.1007/978-3-540-79210-9\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-540-79210-9_2)
- Rickard, A. H., Palmer, R. J., Blehert, D. S., Campagna, S. R., Semmelhack, M. F., Eglund, P. G., Bassler, B. L., & Kolenbrander, P. E.** (2006). Autoinducer 2: a concentration-dependent signal for mutualistic bacterial biofilm growth. *Molecular Microbiology*, *60*(6), 1446-1456. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2958.2006.05202.x>
- Saleh, T. A., & Gupta, V. K.** (2016). Membrane Classification and Membrane Operations. İçinde *Nanomaterial and Polymer Membranes* (ss. 55-82). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804703-3.00003-6>
- Sengar, A., & Vijayanandan, A.** (2022). Effects of pharmaceuticals on membrane bioreactor: Review on membrane fouling mechanisms and fouling control strategies. *Science of The Total Environment*, *808*, 152132. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152132>
- Taşkan, B., Hasar, H., & Lee, C.** (2020). Effective biofilm control in a membrane biofilm reactor using a quenching bacterium (*Rhodococcus* sp. BH4). *Biotechnology and Bioengineering*, *117*(4), 1012-1023. <https://doi.org/10.1002/bit.27259>
- Tian, L., & Wang, L.** (2020). A meta-analysis of microbial community structures and associated metabolic potential of municipal wastewater treatment plants in global scope. *Environmental Pollution*, *263*, 114598. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114598>
- Titchou, F. E., Zazou, H., Afanga, H., El Gaayda, J., Ait Akbour, R., Nidheesh, P. V., & Hamdani, M.** (2021). Removal of organic pollutants from wastewater by advanced oxidation processes and its combination with membrane processes. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, *169*, 108631. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108631>
- Turan, N. B., & Engin, G. Ö.** (2018). *Quorum Quenching* (ss. 117-149). <https://doi.org/10.1016/bs.coac.2018.02.003>
- Wang, T., Jin, Z., Yang, Y., Ma, J., Aghbashlo, M., Zhang, H., Sun, S., Tabatabaei, M., & Pan, J.** (2022). In-depth insights into the temporal-based fouling mechanism and its exploration in anaerobic membrane bioreactors: A review. *Journal of Cleaner Production*, *375*, 134110. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134110>
- Wang, Y., Liu, B., Grenier, D., & Yi, L.** (2019). Regulatory Mechanisms of the LuxS/AI-2 System and Bacterial Resistance. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, *63*(10). <https://doi.org/10.1128/AAC.01186-19>
- Wang, Y., Zhong, C., Huang, D., Wang, Y., & Zhu, J.** (2013). The membrane fouling characteristics of MBRs with different aerobic granular sludges at high flux. *Bioresource Technology*, *136*, 488-495. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.03.066>
- Weerasekara, N. A., Choo, K.-H., & Lee, C.-H.** (2014). Hybridization of physical cleaning and quorum quenching to minimize membrane biofouling and energy consumption in a membrane bioreactor. *Water Research*, *67*, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.08.049>
- Woods, J.** (2014). Membrane processes for heating, ventilation, and air conditioning. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *33*, 290-304. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.092>

- Xiao, X., Zhu, W.-W., Liu, Q.-Y., Yuan, H., Li, W.-W., Wu, L.-J., Li, Q., & Yu, H.-Q.** (2016). Impairment of Biofilm Formation by TiO<sub>2</sub> Photocatalysis through Quorum Quenching. *Environmental Science & Technology*, *50*(21), 11895-11902. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b03134>
- Yadav, N., Dubey, A., Shukla, S., Saini, C. P., Gupta, G., Priyadarshini, R., & Lochab, B.** (2017). Graphene Oxide-Coated Surface: Inhibition of Bacterial Biofilm Formation due to Specific Surface–Interface Interactions. *ACS Omega*, *2*(7), 3070-3082. <https://doi.org/10.1021/acsomega.7b00371>
- Yang, Y., Guo, W., Ngo, H. H., Zhang, X., Liang, S., Deng, L., Cheng, D., & Zhang, H.** (2024). Biofloculants in anaerobic membrane bioreactors: A review on membrane fouling mitigation strategies. *Chemical Engineering Journal*, *486*, 150260. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.150260>
- Yates, E. A., Philipp, B., Buckley, C., Atkinson, S., Chhabra, S. R., Sockett, R. E., Goldner, M., Dessaux, Y., Cámara, M., Smith, H., & Williams, P.** (2002). *N*-Acylhomoserine Lactones Undergo Lactonolysis in a pH-, Temperature-, and Acyl Chain Length-Dependent Manner during Growth of *Yersinia pseudotuberculosis* and *Pseudomonas aeruginosa*. *Infection and Immunity*, *70*(10), 5635-5646. <https://doi.org/10.1128/IAI.70.10.5635-5646.2002>
- Yeon, K.-M., Cheong, W.-S., Oh, H.-S., Lee, W.-N., Hwang, B.-K., Lee, C.-H., Beyenal, H., & Lewandowski, Z.** (2009). Quorum Sensing: A New Biofouling Control Paradigm in a Membrane Bioreactor for Advanced Wastewater Treatment. *Environmental Science & Technology*, *43*(2), 380-385. <https://doi.org/10.1021/es8019275>
- Yeon, K.-M., Lee, C.-H., & Kim, J.** (2009). Magnetic Enzyme Carrier for Effective Biofouling Control in the Membrane Bioreactor Based on Enzymatic Quorum Quenching. *Environmental Science & Technology*, *43*(19), 7403-7409. <https://doi.org/10.1021/es901323k>
- Yuan, M. M., Guo, X., Wu, L., Zhang, Y., Xiao, N., Ning, D., Shi, Z., Zhou, X., Wu, L., Yang, Y., Tiedje, J. M., & Zhou, J.** (2021). Climate warming enhances microbial network complexity and stability. *Nature Climate Change*, *11*(4), 343-348. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-00989-9>
- Yurtsever, A., Çınar, Ö., & Sahinkaya, E.** (2016). Treatment of textile wastewater using sequential sulfate-reducing anaerobic and sulfide-oxidizing aerobic membrane bioreactors. *Journal of Membrane Science*, *511*, 228-237. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.03.044>
- Zeng, X., Zou, Y., Zheng, J., Qiu, S., Liu, L., & Wei, C.** (2023). Quorum sensing-mediated microbial interactions: Mechanisms, applications, challenges and perspectives. *Microbiological Research*, *273*, 127414. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127414>
- Zhang, M., Peng, W., Chen, J., He, Y., Ding, L., Wang, A., Lin, H., Hong, H., Zhang, Y., & Yu, H.** (2013). A new insight into membrane fouling mechanism in submerged membrane bioreactor: Osmotic pressure during cake layer filtration. *Water Research*, *47*(8), 2777-2786. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.02.041>

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Rabia ARDIÇ

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2018, İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : 2024, İstanbul Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği, Çevre Bilimleri, Mühendisliği ve Yönetimi