T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

BİRA ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ ANAEROBİK OSMOTİK MEMBRAN BİYOREAKTÖRDE ARITIMI

Ahmet Murat BACAKSIZ

DANIŞMAN
Doç. Dr. Yasemin KAYA

II. DANIŞMAN
Prof. Dr. Coşkun AYDINER

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Mühendisliği Programı

İSTANBUL-2019

Bu çalışma 05.07.2019 Tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Çevre Mühendisliği Programı Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

TEZ JÜRİSİ

Doç. Dr. Yasemin KAYA
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. Gülsüm YILMAZ
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Doç. Dr. Yalçın Aşkın ÖKTEM
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. Mehmet ÇAKMAKÇI
Yıldız Teknik Üniversitesi
İnşaat Fakültesi

Doç. Dr. Elif İNCE
Gebze Teknik Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa'nın abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin 24085 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Yükseköğretim hayatım boyunca benden bilgisini, emeğini ve özverisini esirgemeyen, kıymetli tavsiyeleri ve desteği ile bu çalışmanın yapılmasına olanak sağlayan kıymetli hocam ve tez danışmanım Doç. Dr. Yasemin KAYA'ya sonsuz teşekkür ederim. Doktora çalışmam süresince bilgisi, tecrübesi ve değerli tavsiyeleri ile beni hep destekleyen GTÜ'den kıymetli hocam ve II. Tez danışmanım Prof. Dr. Coşkun AYDINER'e sonsuz teşekkür ederim. Yükseköğretim hayatım boyunca değerli vakitlerinden öğün vererek her türlü karşılaştığım problemde bilgi ve tecrübeleri ile benden yardımlarını hiç esirgemeyen Prof. Dr. Gülsüm YILMAZ, Doç. Dr. Z. Beril ÖZÇELEP ve Doç. Dr. İlda VERGİLİ'ye teşekkürü bir borç bilirim.

İstanbul Üniversitesi'ne başladığım ilk günden bu zamana kadar mesai arkadaşım, yoldaşım ve kadim dostum, Gökhan BALCIOĞLU'na bu zorlu yolculukta bana verdiği desteği, hoş sohbeti ve yardımları için sonsuz teşekkür ederim. Bugüne kadar üzerimde çok büyük emekleri olan babama, ablalarıma, eniştelerime ve rahmetli anneme yükseköğretim hayatım boyunca bana gösterdikleri sabırları, verdikleri emekleri, duaları ve destekleri için sonsuz teşekkür ederim.

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin **24085** numaralı projesi ile desteklenmiştir.

Temmuz 2019 Ahmet Murat BACAKSIZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ ..... **iv**
İÇİNDEKİLER ..... **v**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xi**
TABLO LİSTESİ ..... **xvi**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xx**
ÖZET ..... **xxiii**
SUMMARY ..... **xxv**
1. GİRİŞ **1**
2. GENEL KISIMLAR **7**
2.1. BİRA ENDÜSTRİSİ VE BİRA ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ ARITIMI 7
2.1.1. Bira Endüstrisi Tanımı ve Üretim Prosesleri 7
2.1.2. Bira Endüstrisi Atıksularının Özellikleri 8
2.1.3. Bira Endüstrisi Atıksularının Arıtımı 9
2.2. İLERİ OSMOZ PROSESLERİ 14
2.2.1. İO Membranlarının Çalışma Prensibi 15
2.2.2. İO Membranının Kirlenmesi ve Temizliği 17
2.2.3. İO Prosesinde Çekme Çözeltisi Seçimi ve Önemi 20
2.2.4. Çekme Çözeltilerinin Anaerobik Ortama Etkileri 21
2.2.5. Çekme Çözeltilerinin Geri Kazanım Amaçlı Kullanımı 30
2.3. ANAEROBİK OSMOTİK MEMBRAN BİYOREAKTÖRLER 32
2.3.1. AnOMBR Sistemi ile Yapılan Arıtılabilirlik Çalışmaları 34
2.4. ATIKSULARIN GERİ KAZANIMI VE YENİDEN KULLANIMI 40
2.4.1. Kentsel Kullanım 42
2.4.2. Endüstriyel Kullanım 42
2.4.3. Yeraltı Suyu Beslemede Kullanım 43
2.4.4. Tarımsal Sulamada Kullanım 43
2.4.5. Yasal Yükümlülükler 45
2.5. MEMBRAN KONSANTRE AKIMLARININ BERTERAFI 47
2.6. ÇİM ALANLARIN BAKIMI VE ÇİM YETİŞTİRME KOŞULLARI 49
2.6.1. Çim Alanların Bakımı ve Sulama 49

2.6.2. Çim Alanlarda İhtiyaç Duyulan Besin Maddeleri ve Gübreleme 50
3. MALZEME VE YÖNTEM.....53
3.1. ATIKSU VE ÇAMUR KARAKTERİZASYONU.....53
3.1.1. Bira Endüstrisi Atıksuyunun Karakterizasyonu.....53
3.1.2. Aşı Çamuru Karakterizasyonu.....53
3.2. İO MEMBRANI VE MEMBRAN MODÜLÜNÜN ÖZELLİKLERİ.....54
3.3. TEZ ÇALIŞMASININ AŞAMALARI.....55
3.4. ÇALIŞMADA KULLANILAN KİMYASALLAR.....60
3.5. KESİKLİ İO DENEY DÜZENEKLERİ.....61
3.5.1. Harici İO Deney Düzeneği ve Çalışma Prensibi.....61
3.5.2. Dahili İO Deney Düzeneği ve Çalışma Prensibi.....61
3.6. ANOMBR SİSTEMİ.....63
3.6.1. AnOMBR Sisteminin Kurulumu.....63
3.6.2. İO Membranı J_w ve J_s Hesabı.....65
3.6.3. İO Membranının Temizleme Yöntemi.....65
3.7. İLERİ ARITMA ÇALIŞMALARI.....66
3.7.1. Deney Düzeneği.....66
3.7.2. İleri Arıtma Çalışmalarında Kullanılan Membranların Karakteristiği.....67
3.7.3. Çapraz Akışlı Sistemlerde Kullanılan Hesaplamalar.....67
3.8. SIVI GÜBRE UYGULAMASI VE ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ.....68
3.8.1. Sıvı Gübre Uygulaması Düzeneği.....68
3.8.2. Toprak Karakterizasyonu.....70
3.8.3. Çim Tohumu Karakterizasyonu.....70
3.8.4. Sıvı Gübre Uygulamasında Kullanılan Gübre Numuneleri.....71
3.8.5. Sıvı Gübre Uygulaması Düzeneğinin İşletimi.....71
3.8.5. Sıvı Gübre Uygulamasına Ait Deneysel Ölçüm Yöntemleri.....71
3.8.5.1. Çim sayısı ve kaplama yüzdesi (adet/cm^2).....71
3.8.5.2. Çim ve kök boy uzunlukları (cm).....71
3.8.5.3. Bitki su tutma kapasitesi oranı, kuru ve yaş madde ağırlığı (%).....72
3.8.5.4. Çim renginin ölçülmesi.....72
3.8.5.5. Çim kardeş filiz ve kök saçağı sayısı.....72
3.9. İSTATİKSEL ANALİZ YÖNTEMİ.....73
3.9.1. Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP).....73
3.9.1.1. AHP'nin çalışmaya uyarlanması.....75

3.9.1.2. ÇÇ ön eleme çalışması değerlendirme kriterleri 75
3.9.1.3. Kesikli İO performans çalışmaları ve BMP testi değerlendirme kriterleri 76
3.9.1.4. Sıvı Gübre uygulaması değerlendirme kriterleri 81
3.10. DENEYSEL YÖNTEMLER 83
3.10.1. pH 83
3.10.2. İletkenlik 83
3.10.3. Toplam Sertlik 83
3.10.4. Alkalinite 83
3.10.5. Klorür 83
3.10.6. Askıda Katı Madde (AKM) 83
3.10.7. Uçucu Askıda Katı Madde (UAKM) 83
3.10.8. Sülfat 83
3.10.9. Nitrat Azotu (NO_3-N) 84
3.10.10. Fekal Koliform 84
3.10.11. Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) 84
3.10.12. Sodyum Adsorpsion Oranı (SAR) 84
3.10.13. Spektral Absorpsiyon Katsayısı (SAK_{254}) 85
3.10.14. Renklilik Sayısı (RES) Ölçümü 85
3.10.15. Toplam Kjheldal Azotu (TKN) 86
3.10.16. Toplam Fosfor (TP) 86
3.10.17. Biyolojik Oksijen İhtiyacı ($BOİ_5$) 86
3.10.18. Ağır Metal Analizleri 86
3.10.19. Amonyak Azotu (NH_4^+–N) Analizi 86
3.10.20. Ortofosfat Analizi 86
3.10.21. Toplam Katı Madde (TKM) 87
3.10.22. Toplam Uçucu Katı Madde (TUKM) 87
3.10.23. Hücre Dışı Polimerik Maddelerin Ekstraksiyonu 87
3.10.24. Protein Analizi 87
3.10.25. Karbonhidrat Analizi 88
3.10.26. Göreceli Hidrofobisite 88
3.10.27. Viskozite 89
3.10.28. Osmotik Basınç Tayini 89
3.10.29. BMP (Biyolojik Metan Potansiyeli) Analizi 89
3.10.30. Bakteriyel ve Arkeal İnceleme Analizi 90

3.10.30.1. DNA izolasyonu 90
3.10.30.2. Yeni nesil dizileme (NGS) 90
3.11. MEMBRAN OTOPSİ ANALİZLERİ 91
3.11.1. Membran Üzerindeki Kek Tabakasında EPS Analizi 91
3.11.2. Temas Açısı Analizi 92
3.11.3. Taramalı Elektron Mikroskopu Analizi (SEM) 92
3.11.4. Fourier Infrared Spektroskopisi (FT–IR) 93
3.11.5. Elektrokinetik Analiz Deneyi 93
3.11.6. Konfokal Mikroskop Görüntüleme 93
3.11.7. Optikprofilometre ile Yüzey Pürüzlülüğü Tayini 94
3.12. DENEYSEL ÇALIŞMA PLANI VE AŞAMALARI 95
4. BULGULAR 96
4.1. ÇALIŞMADA KULLANILACAK ÇEKME ÇÖZELTİLERİN SEÇİMİ 96
4.1.1. ÇÇ'lerin Maliyetlerinin Kıyaslanması 96
4.1.2. ÇÇ'lerin AHP Analizi ile Ön Eleme Sonuçları 97
4.2. KESİKLİ İO TESTİ VE BMP ÇALIŞMASI SONUÇLARI 99
4.2.1. Seçilen ÇÇ'lerin Karakteristik Değerleri 99
4.2.1.1. ÇÇ'lerin farklı konsantrasyondaki iletkenlik ve TÇM değerleri 99
4.2.1.2. ÇÇ'lerin farklı konsantrasyondaki osmotik basınç değerleri 100
4.2.2. Kesikli İO Performans Testi Sonuçları 102
4.2.2.1. Sabit osmotik basınç (30 bar) altında İO performansı 102
4.2.2.2. Farklı sıcaklıklarda İO performansı 105
4.2.2.3. Farklı ÇÇ konsantrasyonlarında İO performansı 106
4.2.3. BMP Testi Sonuçları 108
4.2.3.1. Farklı alkalinite değerlerinde yapılan BMP deneyleri 108
4.2.3.2. Farklı ÇÇ konsantrasyonlarında yapılan BMP deneyleri 111
4.2.4. Kesikli İO Çalışmalarının AHP Analizi ile Değerlendirilmesi 112
4.2.4.1. Dahili ve harici İO uygulamalarının değerlendirilmesi 112
4.2.4.2. AnOMBR uzun süreli işletimine uygun ÇÇ türünün belirlenmesi 113
4.3. ANOMBR'DE UZUN SÜRELİ ARITABİLİRLİK ÇALIŞMALARI 115
4.3.1. AnOMBR–ÇÇ: HCOONa ile İşletimine Ait Deney Sonuçları 115
4.3.1.1. AKM ve UAKM değişimleri 115
4.3.1.2. KOİ değişimi 116
4.3.1.3. Metan ve iletkenlik değişimleri 117

4.3.1.4. TP ve TKN değişimleri 118
4.3.1.5. J_w ve J_s değişimleri 119
4.3.1.6. EPS ve SMP değişimleri 120
4.3.1.7. Zeta Potansiyeli ve Boyut Dağılımı Değişimleri 121
4.3.2. AnOMBR–ÇÇ: $CaCl_2$ ile İşletimine Ait Deney Sonuçları 122
4.3.2.1. AKM ve UAKM değişimleri 122
4.3.2.2. KOİ değişimi 123
4.3.2.3. Metan ve iletkenlik değişimleri 124
4.3.2.4. TP ve TKN değişimleri 125
4.3.2.5. J_w ve J_s değişimleri 126
4.3.2.6. EPS ve SMP değişimleri 127
4.3.2.7. Zeta potansiyeli ve boyut dağılımı değişimi 128
4.3.3. AnOMBR'nin Düşük İletkenlik Değerinde İşletimi 129
4.3.3.1. AKM ve UAKM değişimleri 129
4.3.3.2. KOİ değişimi 130
4.3.3.3. Metan ve iletkenlik değişimleri 131
4.3.3.4. TP ve TKN değişimleri 132
4.3.3.5. J_w ve J_s değişimleri 133
4.3.3.6. EPS ve SMP değişimleri 134
4.4. İLERİ ARITMA ÇALIŞMALARI 135
4.4.1. NF Çalışması Sonuçları 137
4.4.2. TO Çalışması Sonuçları 141
4.4.3. NF ve TO Çalışması Sonuçlarının Değerlendirmesi 143
4.4.4. UF Çalışması Sonuçları 145
4.4.4.1. AnOMBR Üst Fazının Reaktöre Geri Devrettirilmesi Sonuçları 146
4.4.4.2. UF Süzüntüsünün Kanal Deşarj Standartlarına Göre Değerlendirilmesi 148
4.4.4.3. UF Konsantresinin AnOMBR Sistemine Geri Devrettirilmesi 149
4.4.4.4. UF Konsantresinin Farklı İletkenlik Değerlerinde İşletilen AnOMBR'ye Geri Devrettirilmesi 150
4.4.4.5. UF Konsantresinin Çamur Susuzlaştırma Ünitelerinde Bertarafı 152
4.5. SIVI GÜBRE UYGULAMASI SONUÇLARI 153
4.5.1. Görsel İnceleme Sonuçları 154
4.5.2. Toprak Su Tutma Kapsitesi Sonuçları 158
4.5.3. Çim ve Kök Boy Uzunlukları 159

4.5.4. Çimlerin Kuru ve Yaş Ağırlıkları 162
4.5.5. Çimlerin Yüzey Kaplama Yüzdesi 163
4.5.6. Çim Örneklerinin Renk Değişimi 164
4.5.7. Çim Örneklerinin Filiz ve Saçak Miktarları 165
4.5.8. Sıvı Gübre Uygulaması Sonuçlarının AHP Analizi ile Değerlendirilmesi 166
4.5.8.1. AnOMBR SÇÇ çıkışlarının kıyaslanması 166
4.5.8.2. Denemede kullanılan tüm sıvı gübrelerin kıyaslanması 167
4.6. MEMBRAN OTOPSİ ANALİZİ SONUÇLARI 169
4.6.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM-EDS) Analizi 169
4.6.2. Optikprofilometre ile Yüzey Pürüzlülüğü Tayini 173
4.6.3. Konfokal Mikroskop Görüntüleme 175
4.6.4. Fourier Infrared Spektroskopisi (FT–IR) Analizi 177
4.6.5. Zeta Potansiyeli Analizi 179
4.6.6. Temas Açısı Analizi 180
4.6.7. Membran Yüzeyinden Ekstrakte Edilen Çamurda EPS Analizi 180
4.7. ANOMBR'DE ARKEAL VE BAKTERİAL İNCELEME ANALİZİ SONUÇLARI 181
4.7.1. AnOMBR Sistemleri Bakteriyel Komünite Sonuçları 181
4.7.2. AnOMBR Sistemleri Arkeal Komünite Sonuçları 185
5. TARTIŞMA VE SONUÇ 189
KAYNAKLAR 203
EKLER 221
ÖZGEÇMİŞ 223

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Bira üretimi prosesi aşamaları şematik gösterimi (Simate ve diğ., 2011).....8

Şekil 2.2: İO prosesi (ÇÇ: NaCl) (Cath ve diğ., 2006).....15

Şekil 2.3: İO için (a) ICP ve (b) ECP konsantrasyon polarizasyonu (McCutcheon ve diğ., 2006a).....18

Şekil 2.4: İO prosesinde osmotik geri yıkama mekanizması (Tan ve diğ., 2008).....19

Şekil 2.5: İnorganik bileşenli ÇÇ'lerin seçimi (Achilli ve diğ., 2010).....20

Şekil 2.6: Literatürde yaygın kullanılan ÇÇ'lerin RSFS değerleri.....25

Şekil 2.7: İO/TO hibrit sistemi. 31

Şekil 2.8: NH_3/CO_2 İO hibrit sistemi. 32

Şekil 3.1: İO modülü ve kestamit tabakalar. 55

Şekil 3.2: Tez çalışmasının aşamaları–kısım (1). 56

Şekil 3.3: Tez çalışmasının aşamaları–kısım (2). 59

Şekil 3.4: Harici kesikli İO çalışması düzeneği şematik gösterimi. 61

Şekil 3.5: Dahili kesikli İO çalışması düzeneği şematik gösterimi. 62

Şekil 3.6: AnMBR reaktör iletkenlik probu girişi (a), İO–dahili membran modülü (b), membran modülü ve iletkenlik probu reaktör içi yerleşimi (c).....64

Şekil 3.7: AnOMBR sisteminin şematik gösterimi (a), görsel gösterimi (b). 64

Şekil 3.8: Çapraz akışlı membran sisteminin şematik gösterimi.....66

Şekil 3.9: Sıvı gübre uygulaması düzeneği. 69

Şekil 3.10: Sıvı gübre uygulamasına ait şematik gösterimi.....70

Şekil 3.11: Çim örnekleri a) etüv yerleşimi b) numune görüntüsü c) numune kapları. 72

Şekil 3.12: Sıvı gübre uygulaması numune örnekleri.....73

Şekil 3.13: Çalışmada kullanılan standart protein (a) ve karbonhidrat (b) grafiği. 88

Şekil 3.14: BMP testi deney düzeneği (a), 250 ml fermantasyon şişesi (b). 90

Şekil 3.15: İO membranlarının yüzeyinden alınan çamur numuneleri. 92

Şekil 3.16: Taramalı elektron mikroskobu ve Au-Pd kaplama cihazı. 93

Şekil 3.17: Konfokal mikroskop analiz düzeneği. 94

Şekil 3.18: Optikprofilometre cihazı ve İO membran örnekleri. 94

Şekil 4.1: Çekme çözeltilerinin maliyetleri. 97

Şekil 4.2: ÇÇ'lerin ön eleme AHP skorları. 98

Şekil 4.3: ÇÇ'lerin farklı molar konsantrasyondaki iletkenlik (mS/cm) değerleri. 99

Şekil 4.4: ÇÇ'lerin farklı konsantrasyondaki TÇM (mg/L) değerleri. 100

Şekil 4.5: ÇÇ'lerin farklı molar konsantrasyondaki osmotik basınç değerleri. 101

Şekil 4.6: ÇÇ'lerin sabit osmotik basınçta (30 bar) İO performansları (S: saf su, h: harici, d: dahili). 102

Şekil 4.7: ÇÇ'lerin sabit osmotik basınçta (30 bar) İO performansları (B: bira atıksuyu, h: harici, d: dahili). 104

Şekil 4.8: ÇÇ'lerin farklı sıcaklıklardaki İO performansları. 105

Şekil 4.9: ÇÇ'lerin farklı konsantrasyonda J_w değişimleri. 106

Şekil 4.10: ÇÇ'lerin farklı konsantrasyonda J_s ve RSFS değişimleri. 107

Şekil 4.11: 1260 mg$CaCO_3$/L alkalinite değerinde elde edilen CH_4 miktarları. 108

Şekil 4.12: 2500 mg$CaCO_3$/L alkalinite değerinde elde edilen CH_4 miktarları. 109

Şekil 4.13: 4000 mg$CaCO_3$/L alkalinite değerinde elde edilen CH_4 miktarları. 110

Şekil 4.14: ÇÇ'lerin farklı konsantrasyonlarında üretilen CH_4 miktarları. 111

Şekil 4.15: 30 bar osmotik basınçta dahili ve harici sistemlerin AHP skorları. 112

Şekil 4.16: Tüm dahili sistem test sonuçları skoru ile toplam AHP skorlarının kıyaslanması. 113

Şekil 4.17: Tüm ÇÇ türlerinin AHP skorunun değerlendirilmesi. 114

Şekil 4.18: AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) sisteminde AKM ve UAKM değişimleri. 115

Şekil 4.19: AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) sisteminde KOİ değişimi. 116

Şekil 4.20: AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) sisteminde iletkenlik ve CH_4 değişimleri. 117

Şekil 4.21: AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) sisteminde TKN değişimi. 118

Şekil 4.22: AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) sisteminde TP değişimi. 119

Şekil 4.23: AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) sisteminde J_w ve J_s değişimleri. 120

Şekil 4.24: AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) sisteminde EPS ve SMP değişimleri. 121

Şekil 4.25: AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) sisteminde AKM ve UAKM değişimleri. 122

Şekil 4.26: AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) sisteminde KOİ değişimi. 123

Şekil 4.27: AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) sisteminde iletkenlik ve CH_4 değişimleri.....124

Şekil 4.28: AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) sisteminde TKN değişimi. 125

Şekil 4.29: AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) sisteminde TP değişimi. 126

Şekil 4.30: AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) sisteminde J_w ve J_s değişimleri.....127

Şekil 4.31: AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) sisteminde EPS ve SMP değişimleri.....128

Şekil 4.32: AnOMBR (ÇÇ: HCOONa–20 mS/cm) sisteminde AKM ve UAKM değişimleri. 129

Şekil 4.33: AnOMBR (ÇÇ: HCOONa – 20 mS/cm) sisteminde KOİ değişimi.....130

Şekil 4.34: AnOMBR (ÇÇ: HCOONa–20 mS/cm) sisteminde iletkenlik ve CH_4 değişimleri. 131

Şekil 4.35: AnOMBR (ÇÇ: HCOONa–20 mS/cm) sisteminde TKN değişimi.....132

Şekil 4.36: AnOMBR (ÇÇ: HCOONa–20 mS/cm) sisteminde TP değişimi. 133

Şekil 4.37: AnOMBR (ÇÇ: HCOONa–20 mS/cm) sisteminde J_w ve J_s değişimleri.....134

Şekil 4.38: AnOMBR (ÇÇ: HCOONa–20 mS/cm) sisteminde EPS ve SMP değişimleri. 135

Şekil 4.39: Üst fazlarının reaktörde geri devrettirilmesi durumunda iletkenlik ve KOİ konsantrasyonu değişimi. 147

Şekil 4.40: UF konsantresinin reaktörde geri devrettirilmesi durumunda iletkenlik ve KOİ konsantrasyonu değişimleri. 149

Şekil 4.41: AnOMBR + UF, 10 mS/cm ve 20 mS/cm'te - iletkenlik değişimi. 151

Şekil 4.42: Çim tohumlarının filizlenmesinin 6. günü, çim filizlerinin dağılımı. 155

Şekil 4.43: Çim tohumlarının filizlenmesinin 15. günü, çim filizlerinin dağılımı. 156

Şekil 4.44: Çim tohumlarının filizlenmesinin 30. günü, çim filizlerinin dağılımı. 157

Şekil 4.45: Çim numunelerinin su tutma kapasiteleri.....158
Şekil 4.46: Çimlerin ve köklerin boy uzunlukları (1–12).....160
Şekil 4.47: Çimlerin ve köklerin boy uzunlukları (13–24).....161
Şekil 4.48: Çim örneklerinin saçak ve filiz sayıları. 166
Şekil 4.49: SÇÇ çıkışlarının sıvı gübre olarak kullanımının kıyaslanması. 167
Şekil 4.50: Tüm gübre çeşitlerinin AHP skorları. 168
Şekil 4.51: Temiz ve kirli İO membranlarının görüntüleri.....169
Şekil 4.52: Temiz İO membranının yüzey görüntüleri.....170
Şekil 4.53: Temiz İO membranının kesit görüntüleri.....170
Şekil 4.54: Kirli İO membranının yüzey görüntüleri (ÇÇ: HCOONa). 171
Şekil 4.55: Kirli İO membranının kesit görüntüleri (ÇÇ: HCOONa). 171
Şekil 4.56: Kirli İO membranının yüzey görüntüleri (ÇÇ: $CaCl_2$).....172
Şekil 4.57: Kirli İO membranının kesit görüntüleri (ÇÇ: $CaCl_2$).....172
Şekil 4.58: Temiz İO membranının optikprofilometre görüntüleri. 174
Şekil 4.59: Kirli İO membranının optikprofilometre görüntüleri (ÇÇ: HCOONa).....174
Şekil 4.60: Kirli İO membranının optikprofilometre görüntüleri (ÇÇ: $CaCl_2$). 175
Şekil 4.61: a) Temiz İO membranının yüzeyi b) kirli yüzey c) birleşik yüzey d) yatay kesit Görüntüsü.....175
Şekil 4.62: a) Kirli İO membranının yüzeyi b) kirli yüzey c) birleşik yüzey d) yatay kesit görüntüsü (ÇÇ: HCOONa).....176
Şekil 4.63: a) Kirli İO membranının yüzeyi b) kirli yüzey c) birleşik yüzey d) yatay kesit görüntüsü (ÇÇ: $CaCl_2$). 176
Şekil 4.64: Temiz ve kirli İO membranlarının FT–IR spektrumları. 177
Şekil 4.65: Membranlarının pH 7'deki yüzey yükü değerleri. 179
Şekil 4.66: İO membranlarının temas açısı ölçümlerinin gösterimi.....180
Şekil 4.67: Aşı çamuru numunesinin bakteriyel komünite profili. 182
Şekil 4.68: AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) sisteminin bakteriyel komünite profili. 182
Şekil 4.69: AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) sisteminin bakteriyel komünite profili.....183

Şekil 4.70: Aşı çamuru numunesinin arkeal komünite profili. 185
Şekil 4.71: AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) sisteminin arkeal komünite profili. 186
Şekil 4.72: AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) sisteminin arkeal komünite profili. 186

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Tipik bira endüstrisi atıksuyunun karakteristik değerleri (Akunna ve diğ., 2015). 9

Tablo 2.2: Literatürde bira atıksuyu ile yapılan çalışmalara ait atıksu karakterizasyonları. 9

Tablo 2.3: İO membranlarında temizleme yöntemleri. 19

Tablo 2.4: Literatürde yaygın kullanılan organik ve inorganik ÇÇ'ler (Ansari ve diğ., 2015). 21

Tablo 2.5: Literatürde yaygın olarak kullanılan çekme çözeltisi türleri. 22

Tablo 2.6: Literatürde ÇÇ'lerin İO performansı ve CH_4 potansiyellerini araştıran çalışmalar. 27

Tablo 2.7: Literatürde İO proseslerinde geri kazanım amaçlı kullanılan ÇÇ türleri. 30

Tablo 2.8: Literatürde ÇÇ'nin geri kazanımı amacıyla kullanılan kimyasal gübre çeşitleri. 31

Tablo 2.9: AnOMBR ve OMBR sistemlerinin avantaj ve dezavantajları. 34

Tablo 2.10: Literatürde yer alan AnOMBR çalışmaları. 35

Tablo 2.11: Geri kazanılmış suyun kullanıldığı alanlar ve olası etkileri (EPA, 1992). 41

Tablo 2.12: Sulamada geri kullanılacak arıtılmış atıksuların sınıflandırılması (AAT–TUT–2010). 45

Tablo 2.13: Sulama suyunun kimyasal kalitesinin değerlendirilmesi (AAT–TUT–2010). 46

Tablo 2.14: Sulama sularında izin verilebilen maksimum ağır metal ve toksik elementlerin konsantrasyonları (AAT–TUT–2010). 46

Tablo 2.15: Deniz suyu tuzsuzlaştırılması sonucu oluşan konsantre akımlar için alıcı ortam standartları. 48

Tablo 2.16: Yüzeysel suların, yeraltı sularının ve atıksuların arıtılması sonucu oluşan konsantre akımlar için alıcı ortam standartları. 49

Tablo 2.17: Çim alanlarında kullanılan gübre içerikleri ve yararları (Özşafak ve diğ., 2011). 51

Tablo 3.1: Çalışmada kullanılan bira atıksuyunun karakterizasyonu. 53
Tablo 3.2: Anaerobik aşı çamuru karakterizasyonu. 54
Tablo 3.3: İO membranın teknik özellikleri. 54
Tablo 3.4: Çalışmada kullanılan ÇÇ kimyasalları. 60
Tablo 3.5: Analizlerde kullanılan kimyasal maddeler ve test kitleri. 60
Tablo 3.6: Çapraz akışlı çalışmalarda kullanılan membranların teknik özellikleri. 67
Tablo 3.7: Sıvı gübre uygulamasından kullanılan toprağın teknik özellikleri. 70
Tablo 3.8: Çim tohumunun teknik özellikleri. 70
Tablo 3.9: Sıvı gübre uygulamasından kullanılan ticari gübrelerin teknik özellikleri. 71
Tablo 3.10: Saaty yöntemine göre AHP ölçeği (Saaty, 2008)..... 73
Tablo 3.11: Saaty yöntemine göre matris hesabı (Saaty, 2008). 74
Tablo 3.12: Saaty yöntemine göre normalizasyon (Saaty, 2008). 74
Tablo 3.13: ÇÇ ön eleme çalışması parametrelerinin AHP'ye göre önem seviyeleri. 75
Tablo 3.14: ÇÇ ön eleme çalışması parametreleri ağırlık katsayıları korelasyonu. 76
Tablo 3.15: ÇÇ ön eleme çalışması parametreleri normalize edilmiş katsayıları. 76
Tablo 3.16: ÇÇ ön eleme çalışması parametreleri öz vektörleri. 76
Tablo 3.17: Kesikli performans testi parametrelerinin AHP'ye göre önem seviyeleri. 77
Tablo 3.18: Dahili İO sistemi çalışmaları ağırlık katsayıları korelasyonu. 78
Tablo 3.19: Dahili İO sistemi çalışmaları normalize edilmiş katsayıları. 78
Tablo 3.20: Dahili İO sistemi çalışmaları parametrelerin öz vektörleri. 78
Tablo 3.21: Harici İO sistemi çalışmaları ağırlık katsayıları korelasyonu. 79
Tablo 3.22: Harici İO sistemi çalışmaları normalize edilmiş katsayıları. 79
Tablo 3.23: Harici İO sistemi çalışmaları parametrelerin öz vektörleri. 79
Tablo 3.24: BMP testi CH_4 üretimlerinin ağırlık katsayıları korelasyonu. 79
Tablo 3.25: BMP testi CH_4 üretimlerinin normalize edilmiş katsayıları. 79
Tablo 3.26: BMP testi CH_4 üretimlerinin öz vektörleri. 79
Tablo 3.27: ÇÇ maliyeti ve iletkenlik değerlerinin ağırlık katsayıları korelasyonu. 80

Tablo 3.28: ÇÇ maliyeti ve iletkenlik değerlerinin normalize edilmiş katsayıları. 80

Tablo 3.29: ÇÇ maliyeti ve iletkenlik değerlerinin öz vektörleri. 80

Tablo 3.30: Genel değerlendirme kriterleri ağırlık katsayıları korelasyonu. 81

Tablo 3.31: Genel değerlendirme kriterleri normalize edilmiş katsayıları. 81

Tablo 3.32: Genel değerlendirme kriterleri öz vektörleri. 81

Tablo 3.33: Sıvı gübre uygulaması parametrelerinin AHP'ye göre önem seviyeleri. 81

Tablo 3.34: Sıvı gübre uygulaması ağırlık katsayıları korelasyonu. 82

Tablo 3.35: Sıvı gübre uygulaması normalize edilmiş katsayıları. 82

Tablo 3.36: Sıvı gübre uygulaması öz vektörleri. 82

Tablo 3.37: AnOMBR'de arıtılabilirlik, ileri arıtma çalışmaları ve İO membranında yapılan analizler. 95

Tablo 4.1: ÇÇ'lerin 30 bar osmotik basınçtaki molar konsantrasyonları. 101

Tablo 4.2: AnOMBR(ÇÇ: HCOONa)'da zeta potansiyeli ve boyut dağılımı değişimi. 121

Tablo 4.3: AnOMBR(ÇÇ: $CaCl_2$)'de zeta potansiyeli ve boyut dağılımı değişimi. 128

Tablo 4.4: AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) sisteminde SÇÇ ve üst faz çıkışı karakterizasyonu. 136

Tablo 4.5: AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) sisteminde SÇÇ ve üst faz çıkışı karakterizasyonu. 136

Tablo 4.6: NF çalışması (1) deney sonuçları. 137

Tablo 4.7: NF çalışması (2) deney sonuçları. 138

Tablo 4.8: TO çalışması (1) deney sonuçları. 141

Tablo 4.9: TO çalışması (2) deney sonuçları. 142

Tablo 4.10: SÇÇ çıkışları, NF süzüntüsü ve TO süzüntüsünün su kalite değerlendirmesi. 143

Tablo 4.11: UF çalışması (1) deney sonuçları. 145

Tablo 4.12: UF çalışması (2) deney sonuçları. 146

Tablo 4.13: UF çalışması süzüntü karakteristik değerleri ve İSKİ kanala deşarj standartları. 148

Tablo 4.14: UF çalışması konsantresinin ön çökeltim çamuru olarak değerlendirilmesi. 153

Tablo 4.15: Sıvı gübre numuneleri ve sulama miktarları. 154

Tablo 4.16: Çim örneklerinin kök ve çim boyu uzunlukları. 159

Tablo 4.17: Çimlerin yaş ve kuru kök ağırlıkları. 163

Tablo 4.18: Çim örneklerinin çim alanı kaplama yüzdeleri. 164

Tablo 4.19: Çim örneklerinin renk değerleri. 165

Tablo 4.20: EDS analizinden elde edilen elementlerin ağırlık yüzdeleri. 173

Tablo 4.21: İO membranlarının yüzey pürüzlülüğü sonuçları. 173

Tablo 4.22: Temiz ve kirli İO membranlarının FT–IR spektrumlarına ait fonksiyonel gruplar.....178

Tablo 4.23: İO membranlarının temas açısı sonuçları.....180

Tablo 4.24: Membran yüzeyindeki çamura ait EPS değerleri.....180

Tablo 4.25: Bakteriyel komünite şube karşılaştırması (ÇÇ: HCOONa). 184

Tablo 4.26: Bakteriyel komünite şube karşılaştırması (ÇÇ: $CaCl_2$).....185

Tablo 4.27: Arkeal komünite takım karşılaştırması (ÇÇ: HCOONa). 187

Tablo 4.28: Arkeal komünite takım karşılaştırması (ÇÇ:$CaCl_2$).....188

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
A	: Etkin Membran Alanı (cm^2)
C_b	: Besleme Çözeltisindeki Kirletici Madde Konsantrasyonu (mg/L)
C_s	: Süzüntü Numunesindeki Kirletici Madde Konsantrasyonu (mg/L)
d	: Küvet Kalınlığı (mm)
dV/dt	: Süzüntü Akış Hızı (m/s^2)
E_λ	: Ekstinksiyon
f	: Birim Dönüştürme Faktörü
J_0	: Başlangıç Su Akısı ($L/m^2 \cdot saat$)
J_w	: Akı ($L/m^2 \cdot saat$)
J_s	: Ters Tuz Akısı ($g/m^2 \cdot saat$)
r%	: Çekme Çözeltisi Seyrelme Oranı
R_a	: Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü Değeri (µm)
R_{rms}	: Membran Yüzeyindeki Ortalama Pürüzlülüğün Standart Sapması (µm)
T	: Sıcaklık (^oC)
UV	: Ultraviyole
υ	: Çapraz Akış Hızı (m/s)
ΔC	: Zaman Karşı Toplam Çözünmüş Madde Konsantrasyonu Değişimi
V_0	: ÇÇ Tankı Giriş Hacmi (L)
V_f	: Başlangıçtaki Besleme Hacmi (L)
V_r	: Filtrasyon Sırasındaki Konsentrat Hacmi (L)
V_t	: ÇÇ Tankı 't' Anı Hacmi (L)
X	: Her Birim Için Hesaplanan Öz Vektör Katsayısı

Kısaltmalar	Açıklama
AAT–TUT	**:** Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği
ATR	**:** Anaerobik Temas Reaktörü
AHP	**:** Analitik Hiyerarşi Prosesi
AKM	**:** Askıda Katı Madde (mg/L)
AnAKR	**:** Anaerobik Ardışık Kesikli Reaktör

AnMBR : Anaerobik Membran Biyoreaktör

AnOMBR : Anaerobik Osmotik Membran Biyoreaktör

BMP : Biyolojik Metan Potansiyeli

BOİ : Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı (mg/L)

CA : Selülöz Asetat

CLSM : Konfokal Lazer Taramalı Mikroskop

CTA : Selülöz Triasetat

ÇÇ : Çekme Çözeltisi

ÇY : Çamur Yaşı (gün)

DA : Doğru Akım

DDA : Dalgalı Darbe Akımı

DECP : Seyrelmiş Dış Konsantrasyon Polarizasyonu

ECP : Dış Konsantrasyon Polarizasyonu

EDS : Enerji Dağılım Spektrumu

EPS : Hücre Dışı Polimerik Madde

F/M : Substrat/Biyokütle (Food/Microorganism, $kgBOİ_5/kgUAKM \cdot gün$)

FDFO : Gübre Sürücü Kuvvetli İleri Osmoz Sistemi

FT–IR : Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi

HBS : Hidrolik Bekletme Süresi (saat)

HF : Hollow Fiber

HRM : Yüksek Çözünürlüklü Erime Analizi

ICP : İç Konsantrasyon Polarizasyonu

İO : İleri Osmoz

KOİ : Kimyasal Oksijen İhtiyacı (mg/L)

MBR : Aerobik Membran Biyoreaktör

MD : Membran Distilasyonu

MF : Mikrofiltrasyon

MEC : Mikrobiyal Elektroliz Hücresi

MRC : Mikrobiyal Geri Kazanım Hücresi

NF : Nanofiltrasyon

NGS : Yeni Nesil Dizileme

OD : Optik Yoğunluk

OYH : Organik Yükleme Hızı ($kgKOİ/m^3 \cdot gün$)

OMBR : Osmotik Membran Biyoreaktör

PA **:** Polyamid

PAO : Basınç Destekli Osmotik Proses

PRO **:** Basınç Geciktirmeli Osmotik Proses

PLC **:** Programlanabilir Lojik Kontrol Ünitesi

PTFE **:** Poli Tetrafloro Etilen Membranı

PVDF **:** Poliviniliden Florür

RES **:** Renklilik Sayısı (m^{-1})

RSF **:** Ters Tuz Difüzyonu

RSFS **:** Ters Tuz Akımı Seçiciliği (L/g)

rRNA **:** Ribo Nükleik Asit

SAK **:** Spektral Absorpsiyon Katsayısı (m^{-1})

SAR **:** Sodyum Adsorpsiyon Oranı

SÇÇ **:** Seyreltik Çekme Çözeltisi

SEM **:** Taramalı Elektron Mikroskobu

SKKY **:** Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği

SMP **:** Çözünebilir Mikrobiyal Ürün

SRB **:** Sülfat İndirgeyen Bakteri

TÇM **:** Toplam Çözünmüş Madde (mg/L)

TFC **:** İnce Film Kompozit

TKM **:** Toplam Katı Madde (g/L)

TKN **:** Toplam Kjeldahl Azotu (mg/L)

TN **:** Toplam Azot (mg/L)

TO **:** Ters Osmoz

TOK : Toplam Organik Karbon

TP **:** Toplam Fosfor (mg/L)

TUKM **:** Toplam Uçucu Katı Madde (g/L)

UAKM **:** Uçucu Askıda Katı Madde (g/L)

UASB **:** Anaerobik Yukarı Akışlı Çamur Yataklı Reaktör

UF **:** Ultrafiltrasyon

UYA **:** Uçucu Yağ Asiti (mg/L)

VRF **:** Hacim Azalma Faktörü

ZTY **:** Zayıflatılmış Toplam Yansıtma

ÖZET

DOKTORA TEZİ

BİRA ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ ANAEROBİK OSMOTİK MEMBRAN BİYOREAKTÖRDE ARITIMI

Ahmet Murat BACAKSIZ

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Yasemin KAYA

II. Danışman : Prof. Dr. Coşkun AYDINER

Bu tez çalışmasında anaerobik osmotik membran biyoreaktör (AnOMBR) sistemi için uygun çekme çözeltisi (ÇÇ) türleri belirlenerek, seçilen ÇÇ türleri ile bir bira fabrikasından temin edilen bira endüstrisi atıksuyunun AnOMBR sisteminde arıtılabilirliği araştırılmıştır. AnOMBR'nin uzun süreli işletiminden elde edilen seyreltik çekme çözeltisi (SSÇ) çıkışlarının ve üst fazın ileri arıtma kademelerinde (ultrafiltrasyon (UF), nanofiltrasyon (NF), ters osmoz (TO)) arıtılabilirliği incelenmiştir. Ayrıca, SÇÇ çıkışlarının sıvı gübre olarak çim yetiştirmede kullanılması araştırılmıştır. Temiz ve kirli ileri osmoz (İO) membranlarında gerçekleştirilen otopsi çalışmaları ile membran kirlenmesi detaylı incelenmiştir. AnOMBR'de kullanılan aşı çamuru ve reaktörlerden işletim süreci sonunda alınan çamur numunelerinde bakteri ve arke türlerinin değişimi belirlenmiştir.

AnOMBR sistemine uygun ÇÇ türlerinin belirlenmesi amacıyla literatürde yaygın olarak kullanılan ÇÇ türleri araştırılmış ve 29 adet ÇÇ seçilmiştir. Bu ÇÇ türlerinin kimyasal maliyetleri, İO performansları, osmotik basınç ve maksimum çözünürlük değerleri ile Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) analizi yapılmıştır. AHP sonuçlarına göre en uygun ÇÇ türleri olarak, Kalsiyum klorür ($CaCl_2$), Magnezyum klorür ($MgCl_2$), Mono–amonyum fosfat ($NH_4H_2PO_4$), Sodyum format (HCOONa), Sodyum klorür (NaCl), Sodyum Asetat (CH_3COONa) ve Sodyum nitrat ($NaNO_3$) seçilmiştir. Seçilen 7 farklı ÇÇ türü ve Deniz Suyu ile kesikli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Dahili ve harici kesikli çalışmalardan elde edilen J_w ve J_s değerleri,

Biyolojik Metan Potansiyeli (BMP) testinden elde edilen metan (CH_4) miktarları ve piyasa araştırması ile belirlenen ÇÇ maliyeti verileri ile ikinci bir AHP analizi yapılmıştır. Toplam AHP skoru sonuçlarına göre seçilen HCOONa ve $CaCl_2$ ÇÇ türleri ile uzun süreli AnOMBR çalışması yürütülmüştür. Çalışmada kullanılan AnOMBR 5 L hacimde olup, pH: 7, Sıcaklık: 35°C ve sonsuz çamur yaşında işletilmiştir. ÇÇ olarak HCOONa kullanıldığında, kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) giderim veriminin %48–90 aralığında değiştiği ve CH_4 miktarının ortalama 0.35 LCH_4/gKOİ olduğu belirlenmiştir. ÇÇ olarak $CaCl_2$ kullanıldığında ise KOİ giderim verimi %31–54 aralığında bulunmuş ve CH_4 miktarı ortalama 0.25 LCH_4/gKOİ olarak belirlenmiştir. Bakteriyel ve arkeal incelemede HCOONa ile işletilen AnOMBR sisteminde arkeal türlerin daha aktif olduğu belirlenmiştir. Her iki ÇÇ ile yürütülen çalışmalarda da artan tuz konsantrasyonun çamur partikül boyutunda azalmaya ve zeta potansiyelinde artışa neden olduğu görülmüştür. Membran otopsi analizlerinde, AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) sisteminde biriken Na^+ iyonlarının çamur flok yapısının dağılmasına neden olduğu ve dağılan flok yapılarının membran yüzeyini tamamen kaplayan biyofilm tabakası oluşumunu desteklediği belirlenmiştir. AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) sisteminde ise İO membranının daha çok sarmal yapısının üst kısımlarında kirlilik biriktiği gözlenmiştir. AnOMBR sistemi (ÇÇ: HCOONa) düşük iletkenlik üst sınır değerinde (20 mS/cm) işletildiğinde anaerobik aktivitenin ve İO performansının iyileştirildiği belirlenmiştir. Ayrıca düşük iletkenlik üst sınır değerinde reaktör üst faz çıkışlarının AnOMBR sistemine geri devrettirilmesinin mümkün olduğu belirlenmiştir. İleri arıtma çalışmalarında SÇÇ çıkışlarının 5 ve 11 kat seyreltilerek tarımsal sulamada kullanılabileceği belirlenmiştir. ÇÇ: HCOONa'ya ait SÇÇ'nin NF membranından geçirilmesi ile tarımsal sulamaya uygun su elde edilememiştir. ÇÇ: $CaCl_2$'ye ait NF süzüntüsünün ise A Sınıf–III. Kalitede olduğu görülmüştür. SÇÇ'nin TO membranından geçirilmesi ile ÇÇ: HCOONa'ya ait TO süzüntüsüsünden A Sınıf–III. Kalitede ve ÇÇ: $CaCl_2$'ye ait TO süzüntüsünden A Sınıf–II. Kalitede su elde edilmiştir. Bununla birlikte TO konsantresinin stok ÇÇ olarak kullanılabileceği belirlenmiştir. Reaktör üst faz çıkışlarının UF membranından geçirilmesi ile kanal deşarj standartlarında süzüntü suyu elde edilmiştir. Ancak UF konsantresinin AnOMBR sistemine geri devrinin sistemin düşük iletkenlik üst sınır değerinde çalıştırıldığında mümkün olacağı belirlenmiştir. Sıvı gübre uygulamasında yapılan AHP analizi ile $CaCl_2$ içerikli SÇÇ çıkışlarının en iyi sıvı gübre türü olduğu belirlenmiştir. Bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlara göre, AnOMBR'nin bira endüstrisi gibi yüksek su tüketimine sahip endüstriyel atıksuların arıtımında yenilikçi bir teknoloji olarak kullanılabileceği ortaya konulmuştur. AnOMBR sisteminden elde edilen SÇÇ çıkışlarının sıvı gübre olarak kullanımı ile faydalı bir son ürüne dönüşümü mümkün olmuştur. AnOMBR sistemi SÇÇ çıkışlarının NF ve TO membranlarında arıtılması ile tarımsal sulamaya uygun kalitede su elde edilmiştir. AnOMBR sisteminin daha düşük reaktör içi iletkenlik üst sınır değerinde (20 mS/cm) işletildiğinde, sistemde yüksek anaerobik performans ve arıtma verimliliği sağlanacağı belirlenmiştir.

Temmuz 2019, 251 sayfa.

Anahtar kelimeler: Anaerobik osmotik membran biyoreaktör, bira atıksuyu, AHP analizi, membran kirlenmesi, ileri arıtma, sıvı gübre

SUMMARY

Ph.D. THESIS

TREATMENT OF BREWERY INDUSTRY WASTEWATER BY ANAEROBIC OSMOTIC MEMBRANE BIOREACTOR

Ahmet Murat BACAKSIZ

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

Department of Environmental Engineering

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Yasemin KAYA

Co-Supervisor : Prof. Dr. Coşkun AYDINER

In this thesis, treatment of beer industry wastewater in the anaerobic osmotic membrane bioreactor (AnOMBR) system was investigated with selected suitable drawing solution (DS) types. The treatibility of diluted draw solutes (DDSs) and supernatants which are obtained from long–term operation of AnOMBR were investigated with advanced treatment methods (ultrafiltration (UF), nanofiltration (NF) and reverse osmosis (TO)). Besides, the use of DDSs as liquid fertilizer for growing grass was investigated. Membrane fouling was examined in detail by membrane autopsy analyzes on clean and fouled forward osmosis (FO) membranes. The change of bacterial and archaeological species were determined in the sludge samples which were taken from AnOMBRs at the end of operational process.

In order to determine the suitable DS types for the AnOMBR system, frequently used DS types in literature was investigated and 29 DSs were selected. Chemical costs, FO performances, osmotic pressure and maximum solubility values of those DSs were determined. Calcium chloride ($CaCl_2$), Magnesium chloride ($MgCl_2$), Mono–ammonium phosphate ($NH_4H_2PO_4$), Sodium formate (HCOONa), Sodium chloride (NaCl), Sodium acetate (CH_3COONa) and Sodium nitrate ($NaNO_3$) were selected as most suitable DS types with analytical hierarchy process (AHP). Batch experiments carried out with selected 7 different type of DS and sea

water. A second AHP analysis was performed with J_w and J_s values obtained from internal and external experiments, methane (CH_4) amounts obtained from Biological Methane Potential (BMP) test and DS cost which is determined by market research. According to total AHP score, HCOONa and $CaCl_2$ were used in a long–term AnOMBR studies. AnOMBR used in the study was operated with 5 L volume, pH: 7, temperature: 35 ℃ and infinite sludge age. Chemical oxygen demand (COD) removal efficiency was varied between 48–90% and average CH_4 amount was achieved as 0.35 LCH_4/gCOD while HCOONa was used as DS. When $CaCl_2$ was used as DS, COD removal efficiency was found between 31−54% and average CH_4 amount was determined as 0.25 LCH_4/gCOD. More active archeal species was determined in the AnOMBR system which was operated with HCOONa according to bacterial and archaeological examination. The studies which were carried out with both DSs showed that high salt concentration caused a decreasing of sludge particle size and increasing zeta potential. Membrane autopsy analysis revealed that Na^+ ions deposited in the AnOMBR (DS: HCOONa) system caused the dispertion of the sludge floc structure and supported the formation of biofilm layer on the membrane surface. In the AnOMBR (DS: $CaCl_2$) system, it was observed that the contamination was effective at the upper part of FO membrane's spiral structure. It was determined that anaerobic activity and FO performance were improved when the AnOMBR system (DS: HCOONa) was operated at low conductivity upper limit (20 mS/cm). Besides, it has been determined that it is possible to recycle the reactor supernatant outputs to the AnOMBR system at low conductivity upper limit. In advanced treatment studies, it was determined that DDS can be used in agricultural irrigation by diluting the outputs 5 and 11 times. Agricultural irrigation water was not achieved by DS: HCOONa's using NF membrane. However, NF permeate of DS: $CaCl_2$ was found as A Class–III. Quality. In addition, A Class–III. and A Class–II. water quality were achivied with RO permeate of DS: HCOONa and DS: $CaCl_2$, respecively. On the other hand, it was determined that RO concentrate can be used as DS stock. The channel discharge standards was obtained when reactor supernatant was treated with UF membrane. However, it has been determined that the recycle of UF concentrate to AnOMBR system could be possible when system is operated at the low conductivity upper limit. DDS containing $CaCl_2$ were determined the as best liquid fertilizer type by AHP analysis of liquid fertilizer application. According to the results obtained from this thesis study, AnOMBR can be used as an innovative technology in brewey industry which has high water consumption. The use of the DDS obtained from the AnOMBR system as a liquid fertilizer has made it possible to convert them to a useful end product. When DDS were treated with NF and TO membranes, suitable water quality for agricultural irrigation was obtained. High anaerobic performance and treatment efficiencies were achieved when AnOMBR system was operated at lower reactor conductivity limit (20 mS/cm).

July 2019, 251 pages.

Keywords: Anaerobic osmotic membrane bioreactor, brewery wastewater, AHP analyze, membrane fouling, advanced treatment, liquid fertilizer

1. GİRİŞ

Bira; dünyada çay, gazlı içecekler, süt ve kahveden sonra en çok tüketilen içecektir. Yılda 1.34 milyar hektolitreyi aşan üretimi ile bira endüstrisi, içecek endüstrisi içerisinde önemli bir yer tutmaktadır. Üretim esnasında farklı kimyasal ve biyokimyasal reaksiyonlar ve katı−sıvı ayırma prosesleri kullanılmaktadır. Bira endüstrisi, biranın kendi üretimi de dahil olmak üzere ısıtma, soğutma, temizleme ve sanitasyon gibi yüksek su tüketimine neden olan ve farklı karakteristikte atıksu üreten proseslere sahiptir (Simate ve diğ., 2011). Bira endüstrisinde spesifik su tüketimi üretilen 1 L bira için 4–11 L'dir. Tüketilen atıksuyun 2/3 ünü üretim, 1/3 ünü temizleme işlemleri oluşturmaktadır. Bira endüstrisinde su ve atıksu yönetimi oldukça önemli bir konudur. Endüstri, sıkı deşarj standartları, yüksek maliyetli su eldesi ve atıksu arıtımı nedeniyle çok iyi atık yönetimi yapmak zorundadır. Yüksek organik madde içeriğine sahip bira endüstrisi atıksularının arıtımında anaerobik ve aerobik arıtma sistemleri yaygın kullanılmaktadır. Bu arıtma sistemlerinin ileri arıtma yöntemleri ile hibrit kullanıldığı alternatif arıtma prosesleri de bulunmaktadır. Bira endüstrisi atıksularının fiziksel arıtımında; eleme, parçalama/öğütme, dengeleme, sedimantasyon, flotasyon ve filtrasyon yöntemleri kullanılmaktadır. Kimyasal arıtma amaçlı olarak; koagülasyon−flokülasyon, adsorpsiyon ve oksidasyon yöntemleri uygulanmaktadır. Biyolojik arıtma prosesleri olarak; aktif çamur sistemi, havalandırmalı lagünler, damlatmalı filtreler, döner biyodiskler, stabilizasyon havuzları ve anaerobik arıtma kullanılmaktadır (Simate ve diğ., 2015).

Günümüzde anaerobik arıtma ile endüstriyel atıksuların arıtımı, düşük alan ihtiyacı ve enerji sarfiyatı, düşük çamur üretimi ve yüksek biyogaz eldesi sebebiyle tercih edilmektedir (Kang ve diğ., 2002; Fuchs ve diğ., 2003). Artan enerji geri kazanımı talebi ve su kaynaklarının azalması, bira endüstrisi gibi yüksek su tüketimine sahip endüstrilerin atıksularının proses suyu ve/veya faydalı nihai son ürüne dönüştürülmesi gibi yeni araştırma alanlarını ortaya çıkarmıştır (Fuchs ve diğ., 2003).

Membran ayırma mekanizmalarının anaerobik proseslere entegre edilmesi ile oluşturulan Anaerobik Membran Biyoreaktör (AnMBR)'ler, süzüntü kalitesinin arttırılması, atık biyokütle üretiminin azaltılması ve metan (CH_4) miktarının arttırılması gibi hususlarda bir çok avantaja sahiptir (Huang ve diğ., 2011). Ancak, bu sistemlerde küçük moleküler ağırlığa sahip

maddelerin ve kirletici iz elementlerin süzüntüye karışmaları, AnMBR çıkış suyunun yeniden kullanılması/geri kazanımı (proses suyu, tarımsal sulama suyu, soğutma suyu vb.) açısından büyük bir engel teşkil etmektedir. Bunun yanı sıra filtrasyon süresince kullanılan yüksek basınçlı pompalarının yüksek enerji ihtiyacı da bir diğer dezavantaj olarak görülmektedir. Bu sebeple daha düşük enerji ihtiyacı olan alternatif teknolojilerin geliştirilmesi fikri öne çıkmaktadır. Günümüzde membran teknolojisinde elde edilen ilerlemeler sayesinde, Deniz Suyunun tuzsuzlaştırması ve su geri kazanımı gibi hususlarda geleneksel membran proseslerine alternatif oluşturacak ileri osmoz (İO) membran prosesleri geliştirilmiştir.

İO prosesinde sürücü kuvvet, çözeltilerin osmotik basınç farklılıklarından faydalanarak elde edilmekte ve yarı–geçirgen membran içerisinden suyun süzüntüye geçişini sağlamaktadır (Cath ve diğ., 2006). İO membranı düşük kirlenme eğilimi göstermekte ve yüksek kirletici madde giderimi sağlayabilmektedir (Achilli ve diğ., 2009). AnMBR prosesinin yüksek kalitede süzüntü suyu eldesi, yüksek CH_4 dönüşüm oranı gibi avantajlarının, İO membranının enerji sarfiyatının düşürülmesi ve sürücü kuvvet olarak osmotik basıncın kullanılması gibi avantajları ile birleştirildiği sistemler Anaerobik Osmotik Membran Biyoreaktör (AnOMBR)'ler olarak isimlendirilmektedir. Bu sistemler, yüksek enerji ve su tüketimine sahip endüstriler için alternatif ve yenilikçi bir arıtma olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu proses ile evsel ve endüstriyel atıksuların arıtımı konusunda sınırlı sayıda çalışmaya rastlanmıştır.

Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde, kesikli denemeler ile çekme çözeltilerinin (ÇÇ) İO prosesindeki performansı ve anaerobik ortama etkisinin araştırıldığı 5 farklı çalışmaya rastlanılmıştır (Ansari ve diğ., 2015; Kim ve diğ., 2016; Chekli ve diğ., 2017; Kim ve diğ., 2017; Li ve diğ., 2017). Bu çalışmalarda, harici kesikli İO prosesinde ÇÇ olarak farklı özelliklerdeki organik ve inorganik kimyasalların kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu çalışmalarda ayrıca ÇÇ türünün anerobik ortama olan etkileri Biyolojik Metan Potansiyeli (BMP) testi ile incelenmiştir. Literatürde, AnOMBR sistemi ile atıksuların arıtılabilirliği konusunda da 12 adet (Chen ve diğ., 2014; Gu ve diğ., 2015; Hou ve diğ., 2017; Hu ve diğ., 2017; Li ve diğ., 2017; Wang ve diğ., 2017a; Wang ve diğ., 2017b; Wu ve diğ., 2017; Zhang ve diğ., 2017; Wang ve diğ., 2018; Wang ve diğ., 2019; Chang ve diğ., baskıda) çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların büyük bir kısmında İO membranında ortaya çıkan akı kayıplarını ve reaktör içerisinde biriken tuz konsantrasyonunu azaltmak amaçlı alınan önlemlerin araştırıldığı görülmüştür. Bu çalışmaların büyük bir kısmı sentetik atıksu

kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda AnOMBR'de kullanılacak ÇÇ türünün seçimi konusunda herhangi bir ön eleme yapılmadığı dikkati çekmektedir. Ayrıca, AnOMBR'lerde İO membranının harici/dahili olarak sisteme entegre edilmesi ile ilgili de detaylı bir teknolojik seçim yapılmadığı görülmüştür. Bununla birlikte AnOMBR sisteminden elde edilen seyreltik çekme çözeltisinin (SÇÇ) ve üst faz çıkışlarının sıfır atık prensibine uygun şekilde ileri arıtma prosesleri ile arıtımı ve geri kazanımını sağlayan bir sistem konfigürasyonuna rastlanılmamıştır. AnOMBR sisteminden elde edilen SÇÇ'nin sıvı gübre olarak kullanımının uygulamalı olarak araştırıldığı bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır.

Bu doktora tez çalışmasında, literatürde yer alan AnOMBR çalışmalarında görülen eksikliklerinin giderilmesi amacıyla bira atıksuyunun AnOMBR sisteminde arıtılabilirliği araştırılmış ve literatüre katkıda bulunulması amaçlanmıştır. Bu kapsamda; harici ve dahili İO modülünün kullanıldığı kesikli deneyler ile uygun ÇÇ türünün belirlenmesi, belirlenen ÇÇ türleri ile uzun süreli arıtılabilirlik deneylerinin yürütülmesi, membran kirlenme mekanizmalarının araştırılması ve ileri arıtma deneyleri ile geri kazanım çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Bu amaç ve hedeflere yönelik olarak doktora tezi aşağıda belirtilen başlıklar çerçevesinde yürütülmüştür;

ÇÇ seçimi ön eleme çalışmaları;

- ✓ Öncelikle AnOMBR sisteminde kullanılacak ÇÇ türlerinin belirlenmesi amacıyla literatürde yaygın olarak kullanılan ÇÇ türleri araştırılmış ve 29 adet ÇÇ seçilmiştir.
- ✓ Literatürden alınan bilgiler doğrultusunda, bu ÇÇ türlerinin kimyasal maliyetleri, İO performansları, osmotik basınç ve maksimum çözünürlük değerleri belirlenmiştir.
- ✓ Analitik hiyerarşi prosesi (AHP) kullanılarak bu ÇÇ türleri karşılaştırılmış ve en uygun ÇÇ türleri olarak Kalsiyum klorür ($CaCl_2$), Magnezyum klorür ($MgCl_2$), Mono–amonyum fosfat ($NH_4H_2PO_4$), Sodyum format (HCOONa), Sodyum klorür (NaCl), Sodyum Asetat (CH_3COONa) ve Sodyum nitrat ($NaNO_3$) olarak belirlenmiştir.

Seçilen ÇÇ türleri ile karakteristik ölçümler, kesikli çalışmalar ve BMP testleri;

- ✓ ÇÇ'lerin artan konsantrasyon değerlerinde osmotik basınç ve iletkenlik değerleri ölçülmüştür.

- ✓ Harici ve dahili kesikli sistemlerde besleme çözeltisi olarak saf su (sadece 30 bar osmotik basınç altında yürütülen çalışmalarda) ve bira atıksuyu (tüm kesikli çalışmalarda) kullanılmıştır.
- ✓ Harici kesikli çalışmalarda $NaNO_3$, $NH_4H_2PO_4$, NaCl, CH_3COONa, HCOONa, $MgCl_2$, $CaCl_2$ ve Deniz Suyu, 30 bar sabit osmotik basınç altında ve 25°C'de test edilerek, İO performansları (su akısı (J_w) ve ters tuz akısı (J_s)) izlenmiştir.
- ✓ Dahili kesikli sistemlerde $NaNO_3$, $NH_4H_2PO_4$, NaCl, CH_3COONa, HCOONa, $MgCl_2$, $CaCl_2$ ve Deniz Suyu; 30 bar sabit basınçta, farklı sıcaklıklarda (25°C ve 35°C) ve farklı konsantrasyonlarda (0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1 ve 2 M) test edilerek, İO performansları (su akısı (J_w) ve ters tuz akısı (J_s)) izlenmiştir.
- ✓ ÇÇ türleri ile 3 farklı alkalinite konsantrasyonunda (1260, 2500 ve 4000 mg$CaCO_3$/L) ve farklı ÇÇ konsantrasyonlarında (0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1 ve 2 M) BMP testi gerçekleştirilmiştir.
- ✓ Kesikli çalışmalardan elde edilen J_w ve J_s değerleri, BMP testinden elde edilen CH_4 miktarı ve piyasa araştırması ile belirlenen ÇÇ maliyeti verileri ile ikinci bir AHP analizi yapılmıştır. Bu kapsamda yapılan çalışmalar 3 ana temelde incelenmiştir: (i) Sabit osmotik basınçta (30 bar) dahili ve harici İO proseslerinin karşılaştırılması, (ii) tüm dahili kesikli İO çalışmaları ve BMP testi sonuçlarının değerlendirilmesi, (iii) ÇÇ türlerinin yukarıda verilen tüm deneylerdeki toplam AHP skorlarının değerlendirilmesi.
- ✓ AHP analizi sonrasında AnOMBR için en uygun organik ÇÇ türü olarak HCOONa ve inorganik ÇÇ türü olarak $CaCl_2$ belirlenmiştir. ÇÇ'ler Deniz Suyu ile eş değer osmotik basınç (30 bar) değerinde (HCOONa: 0.72 M ve $CaCl_2$: 0.45 M) hazırlanmıştır.

AnOMBR'de uzun süreli çalışmalar;

- ✓ AnOMBR sistemi ilk olarak organik ÇÇ (HCOONa) kullanılarak toplam 5 döngüde 70 gün süresince işletilmiştir.
- ✓ AnOMBR'nin uzun süreli işletiminin ikinci adımında inorganik ÇÇ ($CaCl_2$) ile yapılan çalışmalar, 5 döngüden oluşmuş ve sistem 57 gün işletilmiştir.
- ✓ AnOMBR sisteminin uzun süreli işletiminde her döngüde reaktörde iletkenlik değeri 30 mS/cm ulaştığında İO modu durdurulmuş ve sistem çökmeye bırakılmıştır. Çökme işleminden sonra reaktördeki üst faz alınıp tekrar işletime geçilmiştir. AnOMBR sistemi, ilk ***3 döngüde*** sistemde herhangi bir değişiklik yapılmadan işletilmiştir. ***4.***

döngüde, İO membranın performansını arttırmak amacıyla yeni İO membranı takılmıştır. ***5. döngüde****,* sistem içerisinde düşen UAKM konsantrasyonunu başlangıç değerine getirmek amacıyla reaktöre çamur ilavesi yapılmıştır.

- ✓ AnOMBR sistemi son olarak HCOONa ile 20 mS/cm iletkenlik üst sınır değerinde toplam 3 döngüde 40 gün süresince (her döngü sonunda sistem çöktürülmüş ve üst faz alınmıştır) işletilmiştir.
- ✓ AnOMBR sistemlerinde CH_4 miktarı, Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) değişimi, iletkenlik değişimi, pH değişimi, J_w ve J_s günlük olarak takip edilmiştir. Sistemlerden belirli aralıklar ile alınan numunelerde ise toplam kjeldahl azotu (TKN), NH_4^+–N, toplam fosfor (TP), orto–fosfor (orto–P), askıda katı madde (AKM), uçucu askıda katı madde (UAKM), toplam katı madde (TKM), toplam uçucu katı madde (TUKM), hücre dışı polimerik madde (EPS) ve çözünebilir mikrobiyal ürün (SMP) değişimleri izlenmiştir.

İleri Arıtma Çalışmaları;

AnOMBR uzun süreli işletiminden elde edilen kompozit SÇÇ ve üst faz ile ***ileri arıtma çalışmaları*** gerçekleştirilmiştir. Kompozit SÇÇ numuneleri ile TO ve NF, kompozit üst faz numuneleri ile UF deneyleri yapılmıştır:

- ✓ NF ve TO süzüntülerinin tarımsal sulama amaçlı kullanımı, NF ve TO konsantrelerinin ÇÇ olarak geri kazanımı,
- ✓ Reaktörden alınan kompozit üst faz çıkışlarının AnOMBR sistemine geri devrettirilmesi,
- ✓ UF süzüntüsünden kanala deşarj standartlarına uygun çıkış suyu eldesi, UF konsantresinin AnOMBR sistemine geri devrettirilmesi, farklı iletkenlik üst sınır değerine sahip UF konsantresinin AnOMBR sistemine geri devrettirilmesi ve UF konsantresinin susuzlaştırma ünitelerinde bertarafı araştırılmıştır.

Membran Otopsi Çalışmaları;

- ✓ Temiz ve kirli İO membranlarında otopsi çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, temiz ve kirli İO membranlarında, membran yüzeyi ve porlarındaki kirlenmeyi incelemek ve membran yüzeyindeki oluşan inorganik kirleticilerin tespit edilmesi amacıyla *Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM–EDS)*, membranların yüzey

pürüzlülüğünü belirlemek için *Optik Profilometre*, membran yüzeyinde oluşan biyofilmin kalınlığı ve canlı hücre aktivitesini belirlemek için *Konfokal Lazer Taramalı Mikroskop (CLSM) Görüntüleme,* membran yüzeyindeki kimyasal bağları incelemek amacıyla *Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FT–IR)*, membranların yüzey yüklerini belirlemek amacıyla *Zeta Potansiyeli* ve membranların hidrofobik/hidrofilik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla *Temas Açısı* ölçümleri yapılmıştır.

- ✓ Kirli membranların yüzeylerinden ekstrakte edilen kek çamurunda *EPS* analizi yapılmış ve membran kirlenmesine etkisi incelenmiştir.

Mikrobiyal Tür İnceleme Çalışmaları;

- ✓ AnOMBR'lerde kullanılan aşı çamuru ve reaktörlerden işletim süreci sonunda alınan çamur numunelerinde bakteri türlerinin ve değişiminin belirlenmesi amacıyla *Yeni Nesil Dizileme (NGS)* analizi gerçekleştirilmiştir.

Sıvı Gübre Çalışması;

- ✓ Her iki AnOMBR'nin uzun süreli işletiminden elde edilen ***SÇÇ'lerin sıvı gübre olarak kullanımı*** araştırılmıştır. Bu kapsamda kurulan düzenekte sıvı gübrenin çim yetiştiriciliği üzerindeki olumlu ve/veya olumsuz etkileri incelenmiştir. Bu uygulama, farklı pH değerlerinde çeşme suyu, SÇÇ çıkışları (5 ve 11 kat seyreltilmiş), ticari gübreler (azot, fosfor ve potasyum içerikli) ve SÇÇ'lerine iz element eklenerek hazırlanan karışımlar ile gerçekleştirilmiştir.
- ✓ Çim uygulamasında çim kök ve filiz uzunlukları, çim rengi, filiz ve saçak sayısı, kaplama yüzdesi, toprak ve bitki su tutma kapasitesi, kuru ve yaş ağırlıkları sonuçları AHP analizi ile değerlendirilmiştir.

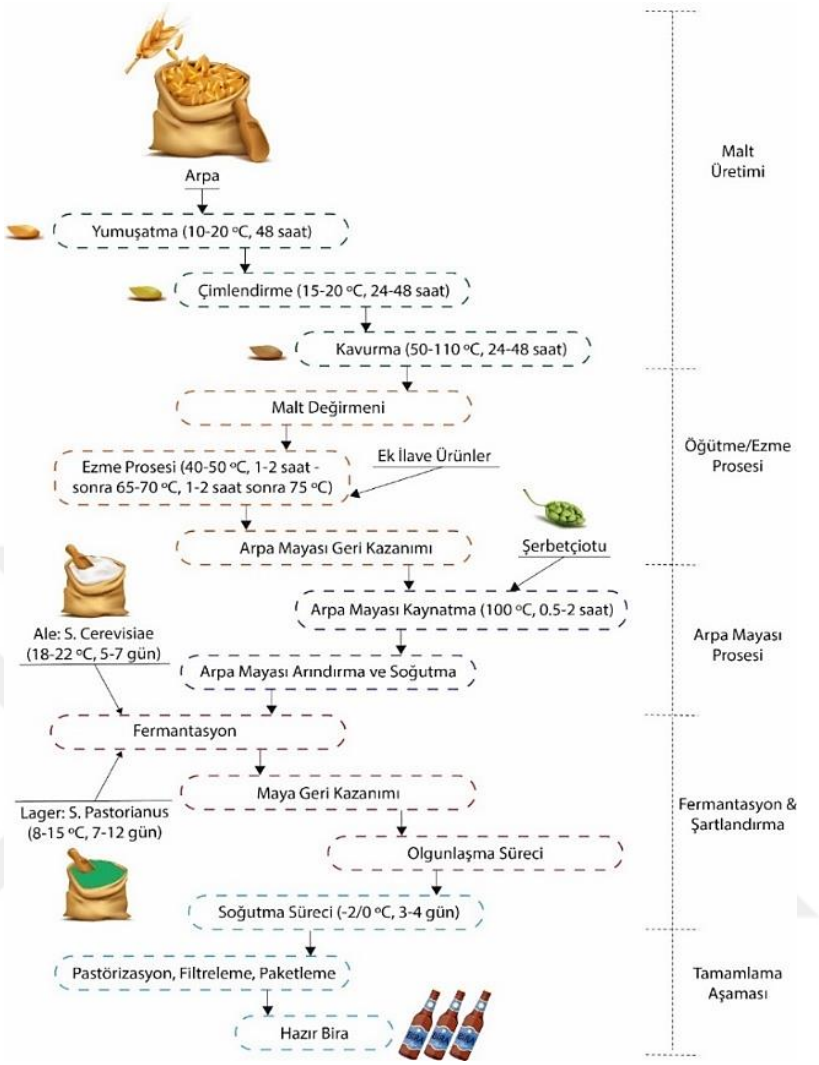
2. GENEL KISIMLAR

2.1. BİRA ENDÜSTRİSİ VE BİRA ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ ARITIMI

2.1.1. Bira Endüstrisi Tanımı ve Üretim Prosesleri

Bira, arpadan elde edilen maltın çeşitli yöntemlerle su ile mayşelenmesi ve kendisini aromatize eden şerbetçiotu ilavesi ile kaynatılması sonucu elde edilen şıranın maya ile fermantasyonundan oluşan, alkol ve karbondioksit (CO_2) içeren bir içecektir. Bira, dünyada çay, gazlı içecekler, süt ve kahveden sonra en çok tüketilen içecektir. 1 L bira, 30 g karbondioksit, 1 g aminoasit, 1 g mineral maddeleri ve 10 mg B vitamini içermektedir. 1 L biranın enerji miktarı ise 450 kcal'dir. Bira üretiminde kullanılan en önemli hammaddeler arpa, şerbetçiotu, su ve mayadır. Üretim esnasında farklı kimyasal ve biyokimyasal reaksiyonlar ve katı–sıvı ayırma prosesleri kullanılmaktadır.

Şekil 2.1'de gösterildiği gibi biranın üretim süreci, arpadan malta dönüşüm, öğütme, mayşeleme, süzme, kaynatma, soğutma, fermantasyon, dinlenme, filtrasyon, dolum, pastörizasyon, etiketleme, stoklama ve dağıtımını kapsamaktadır. Bu aşamalardan elde edilen yan ürünler (maya fazlası vb.) yüksek miktarda kirlenmeye sebep olabilmektedir (Simate ve diğ., 2011). Su tüketimi, atıksu arıtımı ve katı-sıvı ayrımı bira endüstrisinde önemli ekonomik harcamaların yapıldığı ve gelişmeye açık konulardır. 1 litre birayı üretmek için toplamda 4 ila 10 litre kadar su durulama ve soğutma suyu olarak tüketilmektedir. Bunun %90'ı kanala deşarj edilmektedir. Ayrıca üretim esnasında %8–15 oranında su kaybı oluşmaktadır (Janhom ve diğ., 2009; Simate ve diğ., 2011; Fakoya ve diğ., 2013). Bira prosesleri haricinde tankların, şişelerin, makinelerin ve yerlerin temizliğinde de yüksek miktarda su kullanılmakta ve atıksu oluşmaktadır (Fakoya ve diğ., 2013). Bira üretimi yüksek miktarda su tüketimine sebep olmaktadır.



Şekil 2.1: Bira üretimi prosesi aşamaları şematik gösterimi (Simate ve diğ., 2011).

2.1.2. Bira Endüstrisi Atıksularının Özellikleri

Bira endüstrisi, diğer endüstriler ile karşılaştırıldığında yüksek miktarda su tüketiminin ve buna bağlı olarak da yüksek oranda atıksu oluşumunun gerçekleştiği proseslere sahiptir (Simate ve diğ, 2011). Bira endüstrisinden kaynaklanan atıksular şeker, çözünebilir nişasta, etanol, uçucu yağ asitleri ve AKM içermektedir (Akunna ve diğ., 2015). Bira üretimindeki proseslerin her biri (malt üretimi, öğütme prosesi, arpa mayası prosesi, fermantasyon, şartlandırma, filtreleme, paketleme vb.) organik içeriğine bağlı olarak farklı kirletici konsantrasyonuna sahip atıksu üretmektedir (Mussatto ve diğ., 2006; Baloch ve diğ., 2007). Bira atıksularındaki partiküler yapıdaki organik bileşiklerin çoğu kullanılan tahıllardan, şerbetçi otundan ve mayadan kaynaklanmaktadır. Harcanan tahıl taneleri ve bira malt artıkları bira üretiminde oluşan toplam yan ürünlerin %85'ini oluşturmaktadır. Bu yan ürünlerin %75'ini nem ve %25'ine tekabül eden

katı içeriğinin %10'nu su, %20'sini protein ve %70'ni lifler oluşturmaktadır (Mussatto ve diğ., 2006). Diğer atık kaynakları arasında ezme/öğütme işleminden gelen atık likör ve istenilen miktarın dışında kalan bira atığı bulunmaktadır. Tipik bir bira endüstrisine ait atıksu karakterizasyonu Tablo 2.1'de verilmiştir. Tablo 2.2'de ise literatürde yer alan bira endüstrisi atıksuları ile yapılan çalışmalara ait atıksu karakterizasyon değerleri verilmiştir.

Tablo 2.1: Tipik bira endüstrisi atıksuyunun karakteristik değerleri (Akunna ve diğ., 2015).

Parametre	**Değer Aralığı**	**Tipik Değeri**
KOİ (mg/L)	1800-50000	10000
BOİ (mg/L)	2700-38000	16000
TKM (mg/L)	5100-8750	5500
TKN (mg/L)	20-600	50
TP (mg/L)	4-103	10
SO_4^{2-} (mg/L)	20-50	35
UYA (mg/L)	1000-2500	1250
AKM (mg/L)	2901-3000	2950
TÇM (mg/L)	2020-5940	3000
Sıcaklık (°C)	18-40	25
pH	5-11	9

BOİ: Biyokimyasal oksijen ihtiyacı, UYA: Uçucu yağ asitleri, TÇM: Toplam çözünmüş madde.

Tablo 2.2: Literatürde bira atıksuyu ile yapılan çalışmalara ait atıksu karakterizasyonları.

Parametre	**Birim**	**KAYNAKLAR**						
		Cronin C. ve diğ., 1998	İnce B. ve diğ., 2000	Xiangwen S. ve diğ., 2008	Simate S., ve diğ., 2011	Choi H., 2015	Chen H. ve diğ., 2016	Eyvaz M., 2016
Proses	-	UASB	AnMBR	AnAKR	AnMBR	Koagülasyon /Flokülasyon	AnMBR	Elektro koagülasyon
pH	-	7±0.2	3.5-4.5	3.2-3.9	3-12	5.1 ± 0.4	6.8-7.3	6.9±0.4
Sıcaklık	℃	19-24	36	33	18-40	-	35	30
KOİ	mg/L	1000-2500	80000–90000	22500–32500	2000-6000	5200 ± 300.5	17000 ±600	3440 ± 180
BOİ	mg/L	1703±509	65000–80000	-	1200-3600	2224 ± 52.4	-	2165 ± 90
UYA	mg/L	-	400-1600	300-1500	1000-2500	-	-	-
PO_4^{3-}-P	mg/L	-	90–100	-	10-50	8.1 ± 1.1	55.0 ± 2.0	-
NH_4^+–N	mg/L	-	-	-	-	16.2 ± 5.4	101.0 ± 5.0	-
TP	mg/L	-	-	144-216	-	12.3 ± 1.5	66.0 ± 2.0	21±5
TN	mg/L	-	-	-	-	43.6 ± 6.2	268 ± 18	73±7
TKN	mg/L	-	110–210	320-450	25-80	-	-	-
TKM	mg/L	2134±681	-	-	5100–8750	-	-	-
TUKM	mg/L	1016±504	-	-	-	-	-	-
TÇM	mg/L	-	-	-	2020–5940	-	-	-
AKM	g/L	206±136	100–150	-	2901–3000	997.5 ± 50.7	950 ± 450	1180 ± 57

TN: Toplam azot

2.1.3. Bira Endüstrisi Atıksularının Arıtımı

Bira endüstrisi atıksuları ile yapılmış çalışmalardan da görüldüğü üzere (Tablo 2.2), bira üretiminden kaynaklanan atıksuların karakteristiği değişken özellik göstermektedir. Bu atıksuların sucul ortama karışması biyolojik yaşam için ciddi sonuçlar doğurabilmektedir. Bira endüstrisi atıksularının içerisinde yer alan organik maddelerin parçalanması esnasında alıcı

ortamdaki oksijenin kullanılması, ortamda biyolojik yaşam için gerekli olan oksijen miktarını azaltabilmektedir. Oksijen eksikliği ise sucul yaşam içerisinde doğrudan veya belirli bir süre sonunda yaşam koşullarını sınırlandırmaktadır (Rashed ve diğ., 2011).

Bira endüstrisi atıksularının arıtımında fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtma yöntemleri veya bunların hibrit olarak kullanıldığı alternatif arıtma yöntemleri kullanılmaktadır. Bira endüstrisi atıksularının fiziksel arıtımında; eleme, parçalama/öğütme, dengeleme, sedimantasyon, flotasyon ve filtrasyon yöntemleri kullanılmaktadır. Kimyasal arıtma amaçlı olarak; koagülasyon–flokülasyon, adsorpsiyon ve oksidasyon yöntemleri uygulanmaktadır. Biyolojik arıtma prosesleri olarak; aktif çamur sistemi, havalandırmalı lagünler, damlatmalı filtreler, döner biyodiskler, stabilizasyon havuzları ve anaerobik arıtma prosesleri kullanılmaktadır (Simate ve diğ., 2015).

Aşağıda literatürde yer alan farklı arıtma teknolojileri ile bira atıksuyunun arıtımı üzerine yapılan bazı çalışmalar özetlenmiştir.

Cronin ve diğ. (1998) tarafından yapılan bir çalışmada bira endüstrisi atıksuyunun iki adet (A ve B) 16 L hacimli yukarı akışlı anaerobik çamur yataklı reaktörde arıtılabilirliği test edilmiştir. Reaktörler sürekli olarak 19–24°C sıcaklıkta işletilmiştir. A reaktörü, 1.98 gUAKM/L'de aklime edilmiş çamur ile B reaktörü ise 1.98 gUAKM/L aklime edilmiş ve 3.95 gUAKM/L aklime edilmemiş çamur olmak üzere toplamda 5.93 gUAKM/L çamur ile işletilmiştir. Ham atıksuyun karakteristik değerleri KOİ: 1000–2500 mg/L ve AKM: 500 mg/L olarak belirtilmiştir. Reaktör A'da, hidrolik bekletme süresi (HBS): 3 gün ve Substrat/Biyokütle (F/M): 0.38 gKOİ/gUAKM·gün'de en yüksek KOİ giderimi (%71) elde edilmiştir. HBS: 3 gün değerinde reaktör B'de %83 KOİ giderim verimi elde edilmiştir.

İnce ve diğ. (2000) tarafından yapılan bir çalışmada bira endüstrisi atıksularının anaerobik ardışık kesikli reaktör (AnAKR) ve çapraz akışlı UF membranının hibrit kullanıldığı bir sistem ile arıtılabilirliği araştırılmış ve enerji maliyetlerinin azaltılması hedeflenmiştir. Sistem toplamda 15 hafta süreyle işletilmiş ve KOİ ve BOİ giderim verimleri %99 civarında bulunmuştur. CH_4 üretiminin 0.28–0.35 m^3CH_4/kgKOİ aralığında olduğu belirlenmiştir. UF membranı ile AnAKR çıkış suyunun %71 oranında geri kazanıldığı ve 87 MJ/gün enerji kazanımı gerçekleştiği belirtilmiştir.

Braeken ve diğ. (2004) yaptıkları bir çalışmada bira endüstrisi atıksularının (biyolojik arıtma çıkışı ve şişe yıkama, mayalama ve durulama proseslerine ait atıksular) çapraz akışlı NF sistemi ile arıtımını ve geri kazanımını hedeflemişlerdir. Çalışmadan 4 farklı NF membranı (UTC−20, UTC−60, Desal−HL−51 ve Desal−5−DK) kullanılmıştır. İstenilen miktar ve kalitede su eldesi Desal−5−DK membranı ile sağlanmıştır. UTC−20, UTC−60, Desal−HL−51 ve Desal−5−DK membranlarının KOİ giderim verimleri şişe durulama atıksuyunun arıtımında sırasıyla %81, %75, %91 ve %93, mayalama prosesine ait atıksuyun arıtımında sırasıyla %95, %96, %96, %95, durulama prosesine ait atıksuyun arıtımında sırasıyla %99, %69, %99, %88 ve biyolojik arıtma çıkışının arıtımında tüm membran türlerinde %100 olarak belirlenmiştir.

Zupančič ve diğ. (2007) yaptıkları bir çalışmada yüksek kirletici içerikli bira endüstrisi atıksuyunun termofilik koşullarda işletilen tam karışımlı AnAKR sisteminde arıtılabilirliğini araştırmışlardır. İşletim süresince organik yükleme oranı (OYH) 3.23 kgKOİ/m^3·gün'den 8.57 kgKOİ/m^3·gün'e çıkarılmıştır. KOİ giderim verimi %79.6−88.9 aralığında değişim göstermiştir. İşletme süresince AKM giderim oranı %78.5−90.5 aralığında değişmiştir. CH_4 üretiminin ise 371−418 LCH_4/kgKOİ olduğu belirtilmiştir.

Xiangwen ve diğ. (2008) tarafından yapılan bir çalışmada pilot ölçekli AnAKR'de bira atıksuyunun arıtımında yüksek KOİ giderimi, hızlı granülasyon ve yüksek CH_4 üretimi hedeflenmiştir. OYH: 3 kgKOİ/m^3·gün'de ve OYH: 5 kgKOİ/m^3·gün'e KOİ giderim veriminin >%90 olarak belirlenmiştir. UYA konsantrasyonu 300−1500 mg/L arasında değişim göstermiştir. AnAKR reaktörünün bira edüstrisi atıksularının arıtımı için potansiyel bir alternatif teşkil ettiği belirtilmiştir.

Torres ve diğ. (2011) yaptıkları bir çalışmada boru tipi membran modülünün kullanıldığı harici AnMBR ile yüksek organik askıda katı madde içerikli bira endüstrisi atıksularının arıtımını araştırmışlardır. Elde edilen biyogaz, akış rejimini düzenlemek amacıyla membran içine enjekte edilmiştir. İşletme sonucunda %97 KOİ giderimi elde edilmiştir. Reaktör 0.2−0.35 m/s'lik gaz yüzey hızlarında çalıştırılmıştır. Bu koşullar altında yapılan çalışmada oldukça düşük J_w değerleri (10 L/m^2·saat altında) elde edilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, membran filtrasyonunun biyokütle ayırımında ve atıksu içeriğindeki partiküler maddelerin tutulmasında oldukça etkili olduğu belirlenmiştir.

Liu ve diğ. (2015) tarafından yapılan bir çalışmada sentetik bira atıksuyunun (içeriğinde: 1.34 g/L maya özü ve 22 mL bira) AnMBR'de arıtılabilirlik çalışması süresince EPS'in işletme süresi boyunca yapısal değişimi incelenmiştir. AnMBR reaktör hacmi 15 L olup, 0.047 m^2 yüzey alanında ve 0.04 µm çapında hollow fiber (HF) membranı kullanılmıştır. Sistem, OYH: 2, 5, 7.5 ve 10 kgKOİ/m^3·gün, J_w 8 L/m^2·saat, pH 6.8–7 ve sıcaklık 35°C'de işletilmiştir. OYH 2 kgKOİ/m^3·gün'de KOİ giderim veriminin %99.2–99.6 aralığında olduğu belirtilmiştir. AnMBR sisteminde protein değerleri OYH: 2, 5, 7.5 ve 10 kgKOİ/m^3·gün'de sırasıyla; 373.8, 817.2, 687.5, 658.3 mg/L ve karbonhidrat değerleri sırasıyla; 131.4, 389.3, 176 ve 156.7 mg/L olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak, membran tarafından tutulan EPS yapılarının yük yoğunluğunun, konsantrasyon polarizasyonu katmanının yapısını ve geçirgenliğini önemli ölçüde etkileyeceği belirtilmiştir.

Choi ve diğ. (2015) yaptıkları bir çalışmada Mg–serisit flokülantını kullanarak, bira endüstrisi atıksularında organik ve inorganik maddelerin hızlı çöktürülmesini ve arıtmaya yardımcı çamur bertarafı kademelerinin kullanımını araştırmışlardır. Mg–serisit'in %98–100 aralığında organik ve inorganik türlerin giderimini sağladığı belirlenmiştir. Çalışma süresince elde edilen sonuçlara göre 1 mg/L Mg–serisit'in bira atıksuyuna eklenmesiyle atıksu içeriğinden 12.3 mg/L KOİ, 11.0 mg/L BOİ, 1.0 mg/L TN, 0.5 mg/L NH_4–N, 0.3 mg/L PO_4–P ve 0.4 mg/L TP'nin giderildiği belirlenmiştir.

Eyvaz ve diğ. (2016) yaptıkları bir çalışmada bira endüstrisi atıksularının arıtımında elektrokoagülasyon prosesinin ekonomik ve teknik açıdan uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Elektrokoagülasyon süresince dalgalı darbe akımı (DDA) ve doğru akım (DC) arasındaki giderim verimi farkları belirlenmiştir. İşletme sonunda DDA ile işletilen sistemden DC'ye göre %20 daha fazla KOİ giderim verimi elde edildiği ve giderimin DC'ye göre %50 daha hızlı başladığı belirlenmiştir. Çalışmada sonuç olarak elektrokoagülasyon prosesinin bira endüstrisi ve diğer endüstriyel atıksu arıtma proseslerinde ön arıtma kademesi olarak kullanılabileceği belirtilmiştir.

Biase ve diğ. (2016) yaptıkları bir çalışmada anaerobik akışkan yataklı biyofilm reaktör (AMBBR) ile bira endüstrisi atıksularının arıtılabilirliğini araştırmışlardır. Deneylerde iki adet 4 L'lik AMBBR sistemi (çalışma hacmi: % 25 ve 35) kullanılmıştır. İki reaktör protein içerikli sentetik atıksu ile beslenmiştir. Her iki reaktörde işletim süresince OYH: 20 kgKOİ/m^3·gün'de

yaklaşık %80 KOİ giderimi elde edilmiştir. %35 ve %25 çalışma hacimlerindeki reaktörlerde sırasıyla 0.36 m^3CH_4/kgKOİ ve 0.39 m^3CH_4/kgKOİ elde edilmiştir.

Chen ve diğ. (2016) tarafından yapılan bir çalışmada sentetik bira endüstrisi atıksuyunun 0.047 m^2 yüzey alanı ve 0.04 μm por çapına sahip batık HF membranı entegre edilmiş AnMBR sistemi ile arıtımı araştırılmıştır. Reaktör hacmi 15 L olup, AKM: 2.8 g/L ve UAKM: 1.8 g/L'dir. Sistem, OYH: 2, 5, 7.5 ve 10 kgKOİ/m^3·gün değerlerinde toplam 140 gün süre ile işletilmiştir. İşletme sonunda %98 KOİ ve %100 AKM giderimi sağlanmıştır. Çıkış suyunda patojen türlerin de tamamen giderildiği belirtilmiştir.

Liu ve diğ. (2017) yaptıkları bir çalışmada iki kademeli anaerobik/aerobik membran biyoreaktör sistemi ile bira endüstrisi atıksuyunun arıtılabilirliğini ve membran kirlenmesini azaltma yöntemlerini araştırmışlardır. Bira atıksuyu ile yürütülen arıtılabilirlik çalışmalarında HBS 42.44 saat'ten, 22.60 saat'e düşürüldüğünde, KOİ giderim veriminin % 73.8'de sabit kaldığı belirlenmiştir. AnMBR'de membran kirlenmesinin önlenmesinde, düzenli olarak biyogaz ile yapılan ters yıkamanın etkili olduğu belirlenmiştir.

Maintinguer ve diğ. (2017) yaptıkları bir çalışmada anaerobik yukarı akışlı çamur yataklı reaktör (UASB) sistemi kullanarak bira endüstrisi atıksuyu ile hidrojen üreten bakteri türlerinin granül çamur yapısı içerisinde izole edilebilmesini araştırmışlardır. Yapılan çalışmadan granül yapıda izole edilen türlerin, yapılan 16S ribo nükleik asit (rRNA) dizini araştırmalarına göre Enterobacter familyasına ait olduğu belirlenmiştir. Reaktör işletim süresince asetik asit, etanol ve metanol'ün yüksek konsantrasyonda olduğu belirtilmiştir. Fermantasyon sürecinde reaktör içerisinden alınan numunelerde, asetik asit (367.0 mg/L); bütrik asit (95.1 mg/L); propiyonik asit (42.3 mg/L), valerik asit (879.24 mg/L), etanol (1101.26 mg/L) ve metanol (437.01 mg/L) olduğu belirlenmiştir. 10 g/L glükoz eklendiğinde sistemde 1.8 molH_2/molglikoz ve 10 g/L galaktoz eklendiğinde 2.35 molH_2/molgalaktoz hidrojen üretimi sağlanmıştır.

Sawadogo ve diğ. (2018) yaptıkları çalışmada bira endüstrisi atıksuyunun membran biyoreaktör (MBR) ve nanofiltrasyon veya elektrodiyaliz hibrit sistemi ile arıtılabilirliği ve geri kazanımını araştırmışlardır. MBR sistemi farklı OYH'de (7 kgKOİ/m^3·gün ve 10.6 kgKOİ/m^3·gün) 110 gün boyunca işletilmiştir. OYH 7 kgKOİ/m^3·gün'de ve HBS: 30 saat işletme koşullarında bira atıksuyu ile beslenen hibrit MBR sisteminin KOİ giderim veriminin %95 ve NF membranı süzüntüsünde KOİ giderim veriminin de %99 olduğu belirlenmiştir.

2.2. İLERİ OSMOZ PROSESLERİ

Osmoz, fiziksel bir proses olup osmotik basınç farkına bağlı olarak suyun yarı geçirgen bir membrandan hareketi olarak tanımlanmaktadır (Cath ve diğ., 2006). Seçici geçirgen bir membran suyun geçişine izin verirken çözünmüş molekül veya iyonların geçişine izin vermez (Miller ve diğ., 2006; Cath ve diğ., 2006). Osmotik basınç, bir zar (membran) ile ayrılmış olan az mineralli (az tuzlu) suyun daha çok mineral içeren su tarafına doğru geçişini engellemek için tuzlu su tarafına uygulanan basınçtır. Osmotik basınç farkı, sürücü kuvvet olarak görev yapmaktadır. Osmotik basınç, belirli bir hacim çözücü içinde çözünmüş madde moleküllerinin konsantrasyonuyla doğru orantılıdır. Osmoz prosesi günümüzde İO olarak kendinden söz ettirmektedir. İO, oldukça yüksek seviyelerdeki konsantre akışın seyrelmesi ve besleme akımının konsantre hale gelmesiyle sonuçlanan bir işlemdir (Holloway ve diğ., 2007; Wang ve diğ., 2017a; Tan ve diğ., 2008). Ters osmoz (TO) prosesinde uygulanan hidrolik basınç, membran boyunca kütle taşınımı gerçekleştiren etkin güçtür. İO'da ise osmotik basıncın bizzat kendisi kütle taşınımı için etkin güçtür (Çakmak, 2014).

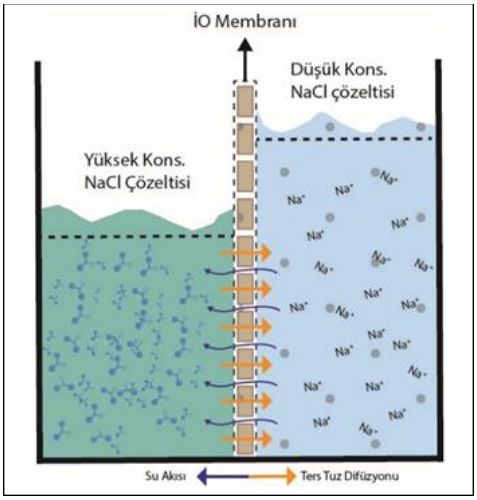
Osmoz prosesi, 1960 yılında doğal kaynak sularında gerçekleşen osmos kavramının ispatıyla ortaya çıkmış ve günümüz İO teknolojilerinin gelişimine ışık tutmuştur (Cath ve diğ., 2006). Literatürde yapılan bazı çalışmalarda İO prosesinin kullanıldığı alanlar aşağıda verilmiştir;

- Laboratuvar ölçekli kesikli uygulamalarda endüstriyel atıksuların konsantre edilmesi/arıtılmasında (Votta ve diğ., 1974; Holloway ve diğ., 2015),
- Pilot ölçekli çapraz akışlı sistemde sızıntı suyunun konsantre edilmesinde (Beaudry ve diğ., 1997),
- Evsel atıksuların arıtılması/konsantre edilmesinde (Holloway ve diğ., 2007; Achilli ve diğ., 2009),
- Deniz Suyu ve tuzlu suların laboratuvar ölçekli sistemlerde desalinasyonunda (McCutcheon ve diğ., 2006b; Cath ve diğ., 2006),
- Gıda endüstrisi atıksularının arıtılmasında (Beaudry ve diğ., 1990; Wrolstad ve diğ., 1993),
- İçme suyu teminine destek oluşturmak amacıyla su havzası rehabilitesinde (Beaudry ve diğ., 1999; Flynn ve diğ., 1998),
- Deniz Suyunun desalinasyonunda (Cohen ve diğ., 2004; McGinnis ve diğ., 2005),

- İlaç sektöründe sıvı fazda osmotik kuvvet ile kana ilaç enjektesinde (Wright ve diğ., 2003; Bhatt ve diğ., 2004),
- Osmotik sürücü kuvetti ile yenilenebilir enerji potansiyeli oluşturulmasında (Jellinek ve diğ., 1981; Aaberg ve diğ., 2003),
- Enerji üretiminde (Lee ve diğ., 1981; Achilli ve diğ., 2009).

2.2.1. İO Membranlarının Çalışma Prensibi

İO prosesi, suyun seçici geçirgen bir membran boyunca düşük konsantrasyondaki çözeltiden yüksek konsantrasyondaki çözeltiye geçtiği doğal bir süreçtir. Farklı konsantrasyonlardaki çözeltiler farklı osmotik basınç oluştururlar. Osmotik basınç ise çözeltinin konsantrasyonunun artmasına paralel olarak artmaktadır. Elde edilen osmotik basınç, suyun çözelti içerisinde düşük konsantrasyondan yüksek konsantrasyona olan transferinde itici kuvvet olarak görev yapmaktadır (Çakmak, 2014). İO membranları, atıksu akışı esnasında neredeyse tüm çözünmüş bileşenlerin membrandan geçişini engellerken sadece su moleküllerinin difüze olmasına olanak vermektedir. Su moleküllerinin taşınması ile birlikte düşük konsantrasyondaki çözeltinin konsantrasyonu artarken, yüksek konsantrasyondaki çözelti seyrelir. Sonuç olarak membran yüzeyinde etkili olan osmotik basıncın azalması ile su taşınım akısı da azalacaktır. Bu sebeple tüm membran yüzeyinde etkin osmotik basınç, su moleküllerinin transferi için gerekli sürücü kuvvettir. Su akışı devam ettiği sürece membranın iki tarafında yer alan çözelti konsantrasyonları farkı da yavaş yavaş azalacaktır. Nihai olarak her iki çözeltinin de konsantrasyonu eşit seviyeye gelerek su akışı duracaktır. İO sisteminin çalışma prensibine ait şematik gösterim Şekil 2.2'de verilmiştir (Junyou ve diğ., 2011).



Şekil 2.2: İO prosesi (ÇÇ: NaCl) (Cath ve diğ., 2006).

Şekil 2.2'de gösterilen İO prosesinde ÇÇ olarak NaCl kullanılmıştır. Su molekülleri düşük NaCl konsantrasyonlu bölgeden (besleme), yüksek konsantrasyonlu NaCl çözeltisine difüze olmaktadır. Yüksek NaCl konsantrasyonu, suyun gerekli miktarda difüze olması için gerekli osmotik basınç sürücü kuvvetini oluşturmaktadır. ÇÇ'nin konsantrasyonu arttıkça, osmotik basınç da artmaktadır. Fakat çözeltideki osmotik basıncın artışı her zaman çözelti konsantrasyonu ile doğru orantılı değildir. Farklı çözelti tiplerinin osmotik basınçları, çözeltinin konsantrasyonunun artması ile artış gösterebilmektedir. Farklı tipteki tuz çözeltileri farklı seviyelerde osmotik basınç oluşturmaktadır (Cath ve diğ., 2006).

İO prosesleri, basınç geciktirmeli osmotik proses (PRO) ve basınç destekli osmotik (PAO) proses olmak üzere iki farklı şekilde işletilebilir (Chung ve diğ., 2015). İO membranının PRO işletimi, osmotik sürücü kuvvet olarak ÇÇ kullanılan İO prosesinde ÇÇ tankı sirkülasyonunun ve/veya ÇÇ tankının yüksek hidrolik güce sahip pompalar ile basınçlandırılması ile sağlanmaktadır (Lutchmiah ve diğ., 2014). Bu sayede İO membranı yüzeyine temas eden ÇÇ miktarı ve membran yüzeyine uygulanacak basınç artmaktadır (Cheng ve diğ., 2018). PRO uygulamalarda kullanılacak İO membranı yüksek basınca dayanıklı hale getirilmelidir. Bunun ile birlikte kullanılacak sirkülasyon kanallarında oluşacak deformasyonu ve basınç değişimlerinde İO membranı yüzeyinde meydana gelecek yıpranmaları önlemek amacıyla membran modülü ve 'spacer–(koruyucu tabaka)' özel seçilmelidir (Straub ve diğ., 2014). PRO prosesi, osmotik güç üretimi uygulamalarında ve İO membranında gerçekleşen dış konsantrasyon polarizasyonu (ECP) kirliliğinin düşürülmesi amacıyla kullanılmaktadır (Cheng ve diğ., 2018).

İO prosesinin PAO olarak işletimi, besleme çözeltisi/solüsyonu sirkülasyonu ve/veya besleme tankının yüksek hidrolik güce sahip pompalar ile basınçlandırılması ile gerçekleşmektedir (Jamil ve diğ., 2016). İO proseslerinin PAO modunda yapılan işletimlerinde membran aktif yüzeyi besleme ile direkt temas etmektedir. PAO işletiminde besleme tankının basıçlandırılması ile İO prosesinde elde edilen SÇÇ çıkışının konsantre edilme ihtiyacında düşüş gerçekleşmektedir (Cath ve diğ., 2006). İO membranın düz modda yerleşimi ile yüksek su akısı ve düşük iç konsantrasyon polarizasyonu (ICP) kirlenmesi sağlanabilmektedir (Blandin ve diğ., 2013). İO membranının PAO modunda işletiminin temel hedefi yüksek su akısı eldesidir (Cornelissen ve diğ., 2011). İkinci en önemli özelliği ise osmotik sürücü kuvvete sahip

İO prosesinin dezavantajları içerisinde yer alan J_s'de azalma sağlamasıdır (Hancock ve diğ., 2011).

İO membranlarının avantajlarını özetlersek;

- Yüksek tuz tutma kapasitesi,
- Osmotik sürücü kuvvet ile su akımı sayesinde düşük hidrolik güç ihtiyacı ve enerji sarfiyatlarında düşüş sağlaması,
- Konvansiyonel membranlara göre daha düşük kirlenme eğilimine sahip olması,
- Hidrolik basıncın oldukça küçük olmasından dolayı kalıcı kirlenme etkisinin az olması,
- Besleme çözeltilerinin geniş aralıkta olması,
- Enerji gereksiniminin ve dizayn maliyetlerinin az olması,
- Yüksek organik madde giderimi,
- Kirletici maddeleri çok yüksek oranda reddetme kapasitesine sahip olması,
- Yüksek osmotik sürücü kuvvet sağlayan ÇÇ türleri ile yüksek akı eldesi,
- Yüksek su geri kazanım oranı,

İO proseslerinde yaygın olarak karşılaşılan dezavantajları özetlersek;

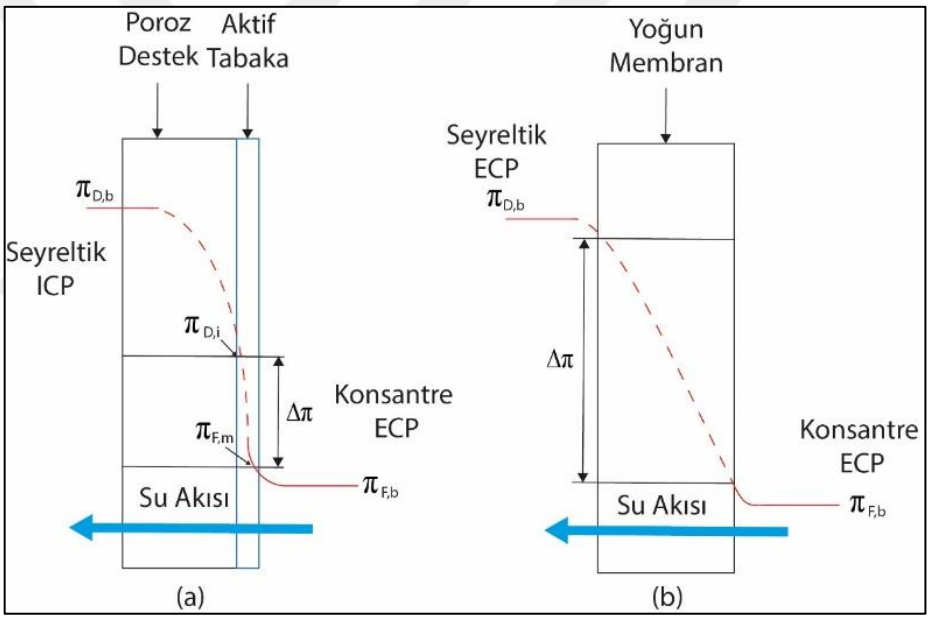
- ÇÇ'nin tekrar konsantre edilme ihtiyacı,
- Geri kazanım yapılmaksızın işletilen sistemlerde kimyasal maliyeti,
- Ters tuz difüzyonu (RSF).

2.2.2. İO Membranının Kirlenmesi ve Temizliği

Konsantrasyon polarizasyonu, osmotik basınçlı sistemlerde akı düşüşüne sebep olan bir olaydır. Osmotik basınçlı membran sistemleri için verilen J_w eşitliğinde $\Delta\pi$ membranın aktif katmanı boyunca olan osmotik basınç farkını ifade etmektedir. Bu tür sistemlerde membranın aktif veya seçici üst katmanındaki basınç farkının mevcut osmotik basınç farkından çok daha küçük olması, su akısında azalmaya sebep olmaktadır. Osmotik basınçlı sistemlerde kullanılan membranın asimetrik yapısına bağlı olarak iki tip konsantrasyon polarizasyonundan bahsetmek mümkündür.

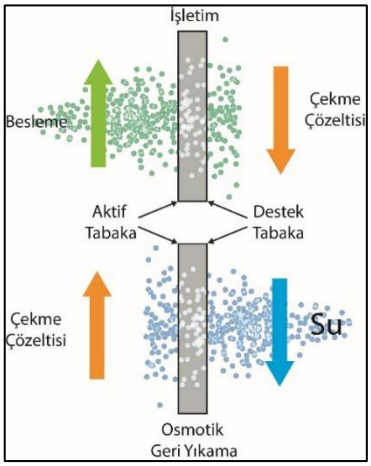
Osmotik basınçlı sistemlerde konsantrasyon polarizasyonu hem besleme hem de süzüntü kısmında görülmektedir. Besleme çözeltisi, membranın aktif katmanı üzerinde akarken çözünmüş maddeler aktif katman üzerinde birikmektedir. Bu birikim, dış konsantrasyon

polarizasyonu (ECP) olarak adlandırılır. ÇÇ, beslemeden gelen J_w ile birlikte seyrelmektedir. Bu seyrelme, seyrelmiş dış konsantrasyon polarizasyonu (DECP) olarak adlandırılır. ECP ve DECP'nin her ikisi de etkin olan osmotik gücü azaltır. Dış konsantrasyon polarizasyonunun etkileri akış hızı arttırılarak, türbülans oluşturularak ve su akışı meydana getirilerek azaltılabilmektedir. İç konsantrasyon polarizasyonu (ICP), İO membranının destek tabakası içinde meydana gelir ve bu tabakanın enine sınırlarında farklı çözünmüş maddelerin birikimini ifade etmektedir. ICP'nin artması, İO membranının beslemeye bakan aktif yüzeyindeki osmotik basınç gradyanını azaltmakta ve J_w'ninde azalmasına sebep olmaktadır. Literatürdeki İO çalışmalarında, ICP'nin artışının J_w değerinin % 80'den daha fazla azaltabilen bir etkisi olduğu belirtilmiştir (Gray ve diğ., 2006; McCutcheon ve diğ., 2006a). Şekil 2.3'te İO proseslerinde ICP ve ECP oluşumu yer almaktadır.



Şekil 2.3: İO için (a) ICP ve (b) ECP konsantrasyon polarizasyonu (McCutcheon ve diğ., 2006a).

Şekil 2.3'ten görüleceği üzere İO proseslerinde kirlenmeye neden olan esas etken ICP kaynaklıdır. ICP, besleme ve ÇÇ'leri arasındaki 'net' osmotik basınç farkı değil, membran içerisindeki ÇÇ ve besleme taraflarında meydana gelen konsantrasyon farkından hesap edilen 'etkin' osmotik basınç farkının, proseste sürücü kuvvet olarak kullanılmasına neden olmaktadır. İO membranları düşük kirlenme eğilimine sahip olmasına rağmen artan ICP'nin etkisi ile kirlenme eğilimi göstermekte (kalıcı kirlenme göstermez) ve periyodik temizleme yöntemlerine ihtiyaç duymaktadır (Büyüksarı, 2013). Şekil 2.4'te İO prosesinde temizleme yöntemlerinden biri olan geri yıkama mekanizması gösterilmektedir (Tan ve diğ., 2008).



Şekil 2.4: İO prosesinde osmotik geri yıkama mekanizması (Tan ve diğ., 2008).

Tablo 2.3'te literatürde İO membranın temizlenmesi ve J_w kaybının azaltılması için uygulanan temizleme yöntemleri verilmiştir.

Tablo 2.3: İO membranlarında temizleme yöntemleri.

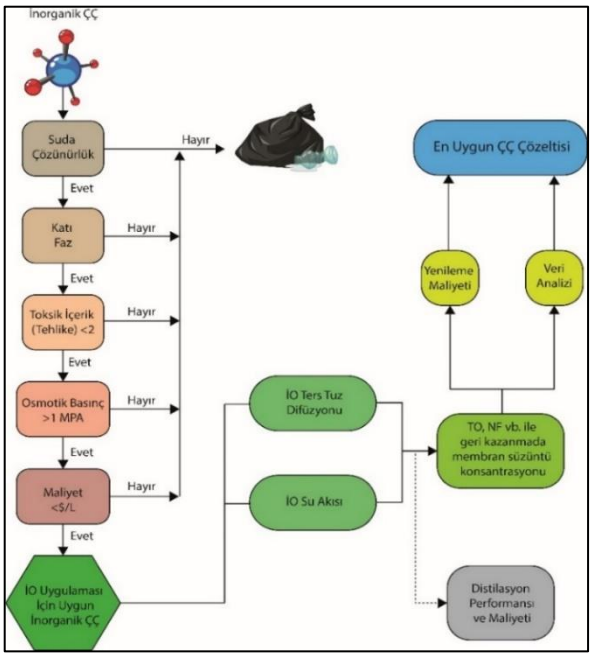
Teknoloji	Temizlik Yöntemi	Temizleme Süresi	Membran	Kaynak
Harici İO + TO	Kimyasal temizleme: a) 4 L saf su ile membran yüzeyinin yıkanması, b) NaOH ile (pH:11) ters kanaldan 30 dak. sirkülasyon, c) Akı geri kazanımı: %24.	8 saat aralıklarla	CTA	Holloway ve diğ., 2007
Harici İO + MD	Kimyasal temizleme: a) 0.029 M $C_{10}H_{14}N_2Na_2O_8$ ve 0.058 M NaOH kimyasalları ile yüzeyin temizlenmesi, b) 4 L saf suyun besleme kanallarından 30 dak. sürküle edilmesi, c) Temizleme solüsyonuna membran daldırılarak 0.2 L/dak. sirkülasyon hızında 1 saat yıkama, d) Sonrasında 8 L saf su ile membran kanllarının yıkanması.	J_w azaldığında	PTFE + CTA	Martinetti ve diğ., 2009
Harici İO	Osmotik geri yıkama (flushing–hızlı yıkama): a) 50 mM NaCl ile ters İO kanalından sirkülasyon, b) Sirkülasyon süresince İO modülü saf su tankı içerisine daldırılmakta, c) Akı geri kazanımı: %98.	1 kez/gün	TFC + CTA	Mi ve diğ., 2009
Harici İO + TO	Osmotik geri yıkama (flushing–hızlı yıkama): a) Saf su ile 15 dak. durulama, b) İO sirkülasyon kanalları besleme ile ters kanalize edilerek ile 21 cm/sn sirkülasyon hızında osmotik geri yıkama.	1 kez/gün	CA + PA	Mi ve diğ., 2010
Harici İO	Osmotik geri yıkama (flushing–hızlı yıkama): a) %4 NaCl ile besleme ve saf su sirkülasyonu, b) Hava difüzörleri ile 12.5 L/dak. hava ile membran yüzeyini süpürme. Kimyasal temizleme: a) %1 NaOCl, 0.8% $C_{10}H_{14}N_2Na_2O_8$ ve %1 Alconox (sodyum içerikli karbonat ve sülfat karışımı) çözeltileri ile membran aktif yüzeyin kimyasal yıkama.	J_w azaldığında	CTA	Linares ve diğ., 2013
Harici İO	Osmotik geri yıkama (flushing–hızlı yıkama): a) İO sirkülesinden 3 kat hızlı çapraz akış hızında saf su ile 30 dak. yıkama, b) Osmotik geri yıkamada; KCl ile %100, $NH_4H_2PO_4$ ile %70 ve MKP ile %80 akı geri kazanımı.	1 kez/gün	CTA	Kim ve diğ., 2017
AnOMBR	Kimyasal temizleme: a) 0.2% sodyum hidroksit (NaOH) , b) 0.5% hidroklorikasit (HCl) c) 2% $C_6H_8O_7$, 0.2% $C_{10}H_{14}N_2Na_2O_8$, 0.2% $NaC_{12}H_{25}SO_4$ ve 0.5% H_2O_2 ile ayrı ayrı kimyasal yıkama.	J_w azaldığında	TFC	Wang ve diğ., 2017b

*CTA:selülöz tri–asetat membranı, TFC: ince film kompozit membran, PTFE: Poli–tetrafloro–etilen membranı, CA :selülöz asetat membranı, PA: polamid membran.

Bu çalışmalarda akı geri kazanım oranı yüksek olan temizleme yönteminin osmotik geri yıkama (flushing) olduğu belirlenmiştir. Osmotik geri yıkamada, İO membranı ters kanalından yüksek kanal akış hızında sirküle edilen ÇÇ'nin membran yüzeyine ters bir osmotik basınç uygulaması ile gerçekleşmektedir (Linares ve diğ., 2013). Yaygın olarak kullanılan bir diğer yöntem ise kimyasal temizlemedir. Kimyasal temizliğin en önemli dezavantajı membran yapısının zamanla zarar görmesi ve uzun süreli işletmelerde kimyasal maliyetini arttırmasıdır (Holloway ve diğ., 2007; Martinetti ve diğ., 2009; Linares ve diğ., 2013).

2.2.3. İO Prosesinde Çekme Çözeltisi Seçimi ve Önemi

İO işleminde etkin gücün kaynağı, membranın süzüntü tarafındaki konsantre çözeltisidir. Bu çözelti literatürde draw solüsyon, osmotik ajan, osmotik ortam, etkin solüsyon, osmotik motor, örnek solüsyon veya tuzlu su gibi terimlerle ifade edilmektedir. İO prosesinde farklı konsantrasyonlardaki ÇÇ'ler farklı basınçlarda osmotik basınç oluşturmaktadır. Farklı konsantrasyonlara sahip ÇÇ'ler farklı kimyasal ve fiziksel karakteristiğe sahip olduğundan İO proseslerinin performansı da direkt etkilenmektedir (Achilli ve diğ., 2010). ÇÇ'lerin seçim prosedürü Şekil 2.5'te açıklanmıştır.



Şekil 2.5: İnorganik bileşenli ÇÇ'lerin seçimi (Achilli ve diğ., 2010).

Bazı ÇÇ'ler diğer ÇÇ türlerine göre düşük konsantrasyonlarda, yüksek osmotik basınç ve yüksek su akısı oluşturabilmektedir. Ancak, membranda çözelti reddi oldukça düşük

olabilmektedir. Bu da ÇÇ'lerin membran yüzeyinden hızlı bir şekilde geçerek besleme çözeltisinde birikmesine neden olmaktadır. Bu ÇÇ'ler proses için uygun maliyet sağlasa dahi süreç İO prosesinin performansını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu sebeple yüksek su akısının oluşturulması ve membran yüzeyinden yüksek tuz reddi, uygun ÇÇ seçimi ile mümkün olmaktadır. İO proseslerinde sıklıkla kullanılan organik ve inorganik ÇÇ çeşitleri ve bu çözeltilere ait konsantrasyon ve difüzyon katsayıları Tablo 2.4'te verilmiştir.

Tablo 2.4: Literatürde yaygın kullanılan organik ve inorganik ÇÇ'ler (Ansari ve diğ., 2015).

ÇÇ Türleri		Konsantrasyon (M)	Difüzyon Katsayısı (m^2/s)
İnorganik	Sodyum Klorür (NaCl)	0.65	1.47×10^{-9}
	Magnezyum Sülfat ($MgSO_4$)	1.24	3.7×10^{-10}
Organik (iyonik)	Sodyum Asetat (CH_3COONa)	0.72	1.44×10^{-9}
	Magnezyum Asetat ($Mg(CH_3COO)_2$)	0.84	1.14×10^{-9}
	Sodyum Fortmat (HCOONa)	0.72	1.59×10^{-9}
	EDTA disodyum tuzu ($C_{10}H_{14}N_2Na_2O_8$)	0.30	5.83×10^{-10}
Organik (kovalent)	Glikoz ($C_6H_{12}O_6$)	1.13	6.7×10^{-10}
	Glisin ($C_2H_5NO_2$)	1.31	1.06×10^{-9}
	Gliserin ($C_3H_8O_3$)	1.27	9.3×10^{-10}
	Üre (CH_4N_2O)	1.26	1.38×10^{-9}

İdeal bir ÇÇ türü yüksek osmotik etkinliğe sahip olmalıdır. Yüksek osmotik basınca sahip olabilmesi için düşük moleküler ağırlıkta olması ve sudaki çözünürlüğünün yüksek olması gerekmektedir. Aynı zamanda, membrana kimyasal (reaksiyon, çözünme veya adsorbsiyon aracılığıyla) veya fiziksel olarak zarar vermemesi, çevre veya insan sağlığı için en az etkiye sahip olması da beklenmektedir. Ayrıca fiyatının uygun olması olması ve besleme çözeltisinden daha yüksek osmotik basınca sahip olması da istenmektedir. İO için diğer önemli bir kriter, işletim sırasında seyreltilen ÇÇ'yi tekrar konsantre edecek uygun bir prosesin seçilmesidir. Literatürde ÇÇ'nin seçimi ve İO proseslerinde kullanılabilirliğini belirlemek amacıyla yapılan sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır (Achilli ve diğ., 2009; Yang ve diğ., 2009; Choi ve diğ., 2009; Xiao ve diğ., 2011; Junyou ve diğ., 2011; Jin ve diğ., 2012; Nawaz ve diğ., 2013; Zhang ve diğ., 2014; Huang ve diğ., 2015).

2.2.4. Çekme Çözeltilerinin Anaerobik Ortama Etkileri

Literatürde yer alan farklı atıksuların besleme olarak kullanıldığı İO uygulamalarında yer alan ÇÇ kimyasalları ve bu ÇÇ'lerin İO proseslerinde kullanılan konsantrasyon, osmotik basınç, maksimum çözünürlük değerleri ve kullanılan besleme çözeltileri Tablo 2.5'te özetlenmiştir.

Tablo 2.5: Literatürde yaygın olarak kullanılan çekme çözeltisi türleri.

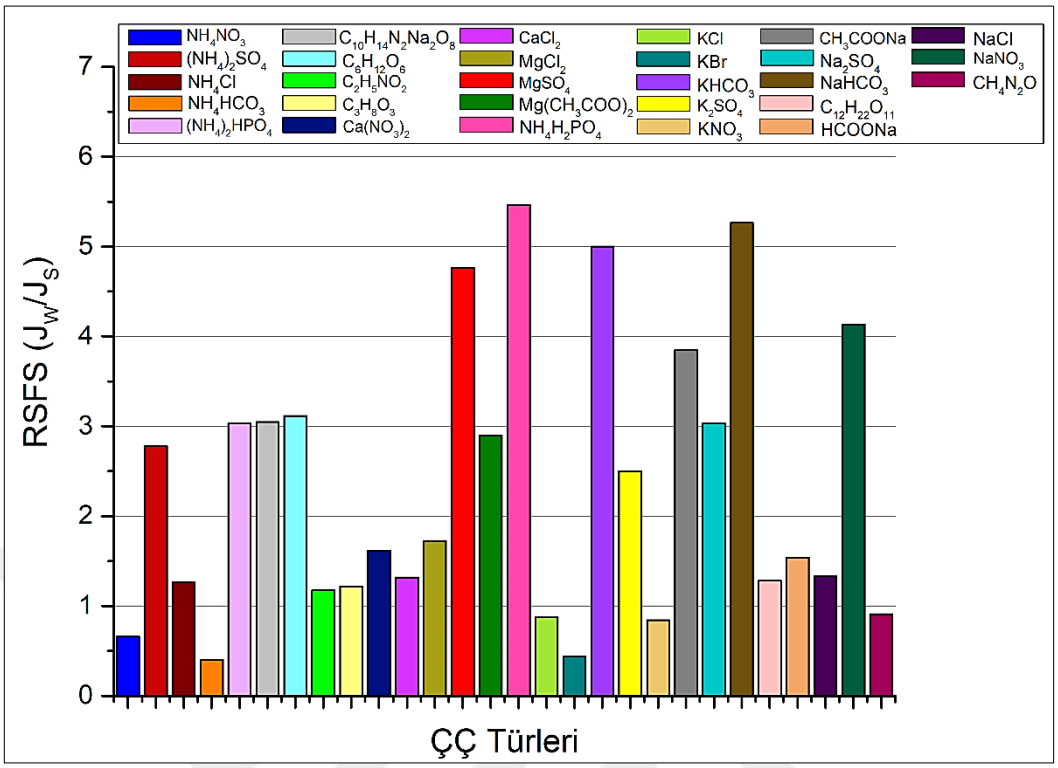
ÇÇ İsmi	Kullanılan Kons. (M)			Osmotik Basınç (bar)			Besleme	Maks. Çözünürlük (M)	Tipi	Kaynak
Amonyum nitrat (NH_4NO_3)	2			65.75			Deniz Suyu	23.98	İnorganik	Phuntsho ve diğ., 2011; Hau ve diğ., 2014;
Amonyum sülfat ($(NH_4)_2SO_4$)	0.30	0.56	0.82	13.99	27.99	41.99	Saf su	5.70	İnorganik	Achilli ve diğ.,2010; Phuntsho ve diğ., 2011
Amonyum klorür (NH_4Cl)	0.32	0.61	0.90	13.99	27.99	41.99	Saf su	6.95	İnorganik	Achilli ve diğ., 2010; Phuntsho ve diğ., 2011
Amonyum bikarbonat (NH_4HCO_3)	0.32	0.67	1.05	13.99	27.99	41.99	Saf su	2.78	İnorganik	Achilli ve diğ., 2010; Ge ve diğ., 2013
Mono–amonyum fosfat ($(NH_4)H_2PO_4$)	2.00			87.44			Deniz Suyu	3.70	İnorganik	Phuntsho ve diğ., 2011
Di-amonyum hidrojen fosfat ($(NH_4)_2HPO_4$)	2.00			96.25			Deniz Suyu	6.50	İnorganik	Phuntsho ve diğ., 2011
Glikoz ($C_6H_{12}O_6$)	0.50		1.00	–			Evsel Atıksu	2.61	Organik (kovalent)	Yong ve diğ., 2012; Ansari ve diğ., 2015
Glisin ($C_2H_5NO_2$)	1.24			24.19			Evsel Atıksu	3.33	Organik (kovalent)	Ansari ve diğ., 2015
Gliserin ($C_3H_8O_3$)	1.27			29.99			Evsel Atıksu	5.00	Organik (kovalent)	Ansari ve diğ., 2015
Üre (CH_4N_2O)	1.26			29.99			Evsel Atıksu	16.65	Organik (kovalent)	Yong ve diğ., 2012; Ansari ve diğ., 2015
EDTA disodyum tuzu ($C_{10}H_{12}N_2Na_2O_8$)	0.30			–			Evsel Atıksu	0.50	Organik (iyonik)	Ansari ve diğ., 2015
Kalsiyum nitrat ($Ca(NO_3)_2$)	0.25	0.53	0.80	13.99	27.99	41.99	Saf su	7.90	İnorganik	Achilli ve diğ., 2010; Phuntsho ve diğ., 2011
Kalsiyum klorür ($CaCl_2$)	0.21	0.39	0.56	13.99	27.99	41.99	Saf su	6.68	İnorganik	Achilli ve diğ., 2010
Magnezyum klorür ($MgCl_2$)	0.21			13.99			Saf su	5.69	İnorganik	Achilli ve diğ., 2010; Ge ve diğ., 2013
Magnezyum sülfat ($MgSO_4$)	0.61		1.17	13.99		27.99	Saf su	2.49	İnorganik	Achilli ve diğ., 2010; Ansari ve diğ., 2015
Magnezyum Asetat ($Mg(CH_3COO)_2$)	0.54	1.16	1.85	13.99	27.99	41.99	Evsel Atıksu	5.60	Organik (iyonik)	Bowden ve diğ., 2012; Ansari ve diğ., 2015
Potasyum klorür (KCl)	0.31			13.99			Saf su	4.60	İnorganik	Achilli ve diğ., 2010; Phuntsho ve diğ., 2011; Ge ve diğ., 2013
Potasyum bromür (KBr)	0.32	0.60	0.88	13.99	27.99	41.99	Saf su	5.46	İnorganik	Achilli ve diğ., 2010
Potasyum bikarbonat ($KHCO_3$)	0.32	0.65	0.99	13.99	27.99	41.99	Saf su	3.62	İnorganik	Achilli ve diğ., 2010
Potasyum sülfat (K_2SO_4)	0.28		0.58	13.99		27.99	Saf su	0.64	İnorganik	Achilli ve diğ., 2010
Potasyum nitrat (KNO_3)	2.00			65.75			Deniz Suyu	3.30	İnorganik	Phuntsho ve diğ., 2011
Poliakrilik asit sodyum tuzları (PAA–Na)	0.72			44.58			Saf su	0.80	Organik (iyonik)	Ge ve diğ., 2013
Sodyum asetat ($C_2H_3NaO_2$)	0.52	1.10	1.69	13.99	27.99	41.99	Evsel Atıksu	4.51	Organik (iyonik)	Bowden ve diğ., 2012; Ansari vr diğ., 2015
Sodyum sülfat (Na_2SO_4)	0.29	0.60	0.90	13.99	27.99	41.99	Saf su	1.41	İnorganik	Achilli ve diğ., 2010
Sodyum bikarbonat ($NaHCO_3$)	0.36		0.76	13.99		27.99	Saf su	1.12	İnorganik	Achilli ve diğ., 2010
Sakkaroz ($C_{12}H_{22}O_{11}$)	1.00			27.05			Saf su	5.75	Organik (iyonik)	Ge ve diğ., 2013
Sodyum format (HCOONa)	0.68			28.37			Saf su	8.10	Organik (iyonik)	Bowden ve diğ., 2012; Ge ve diğ., 2013; Ansari ve diğ., 2015
Sodyum klorür (NaCl)	0.30	0.60	0.88	13.99	27.99	41.99	Saf su	6.13	İnorganik	Achilli ve diğ., 2010; Yong ve diğ., 2012; Ansari ve diğ., 2015
Sodyum nitrat ($NaNO_3$)	2.00			82.37			Deniz Suyu	10.50	İnorganik	Phuntsho ve diğ., 2011

Literatürde yaygın kullanılan ÇÇ'lerin anaerobik ortama etkileri aşağıda özet olarak verilmiştir.

Yapılan araştırmalarda da **$NH_4H_2PO_4$**'ın AnMBR'de çok düşük birikim sağladığı (Kim ve diğ., 2016; Kim Y. ve diğ., 2017), inhibisyon etkisinin bulunmadığı (Phuntsho ve diğ., 2011), düşük konsantrasyonlarda bile çok yüksek biyogaz eldesi sağladığı ve BMP testlerinde yüksek CH_4 verimi elde edildiği belirtilmiştir (Phuntsho ve diğ., 2011; Huang ve diğ., 2012). **$CaCl_2$** içeriğindeki kalsiyum miktarının anaerobik ortamda istenilen aralığı 100–200 mg/L'dir (Öztürk ve diğ., 2005). BMP testlerinde ve kesikli çalışmalarda CH_4 üretimine olumsuz etkisi olmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca pH tamponlama kapasitesine olumsuz bir etkisi olmadığı da belirlenmiştir (Achilli ve diğ., 2010; Heo ve diğ., 2016; He ve diğ., 2016). **$MgCl_2$** içeriğindeki magnezyum miktarının anaerobik ortamda istenilen aralığı 75–250 mg/L'dir (Öztürk ve diğ., 2005). Anaerobik fazda biyolojik bakterilere düşük konsantrasyonlarda olumsuz etkisi olmadığı belirlenmiştir (Achilli ve diğ., 2010; Ge ve diğ., 2013; Hamdan ve diğ., 2015). **$MgSO_4$** yapısındaki magnezyum miktarının anaerobik ortamda istenilen aralığı 75–250 mg/L'dir (Öztürk ve diğ., 2005). Anaerobik ortamda amonyağın giderimini sağlamakta (%80), aşırı birikimi ise ortamda pH değerini arttırarak inhibe edici etki oluşturmaktadır (Huang ve diğ., 2012; Holloway ve diğ., 2015; He ve diğ., 2016). **KNO_3**'ın içeriğindeki potasyum miktarının anaerobik ortamda istenilen aralığı 200–400 mg/L olarak belirtilmiştir (Öztürk ve diğ., 2005). Sülfat indirgeyen bakterilerin (SRB) besi kaynağı olarak rol alabilmektedir. Ortamdaki indirgenmiş bileşiklerin CO_2 ve asetata oksidasyonunu sağlamaktadır (Öztürk ve diğ., 2005; Phuntsho ve diğ., 2011). **NaCl** kısa zincirli yağ asitlerinin oluşmasını desteklemektedir ve 20–35°C sıcaklıklarda oldukça etkilidir. NaOH ile birleşmesi durumunda EPS yapılarını parçalayıcı etkisi vardır. Yüksek konsantrasyonda arke aktivitesini yavaşlatıcı etkisinin olduğu ve biyolojik ortamda %6'dan fazla konsantrasyonda bulunması durumunda CH_4 üreten bakterilerin aktivitesini yavaşlattığı belirtilmiştir (Duncan ve diğ., 1968; Öztürk ve diğ., 2005; Yong ve diğ., 2012; Ansari ve diğ., 2015; Hamdan ve diğ., 2015; Jin ve diğ., 2016). **$NaNO_3$**'ün anaerobik ortamda %2 ve daha az konsantrasyonda bulunması durumunda olumsuz bir etkisi belirlenmemiştir. Düşük konsantrasyonlarda kullanıldığında ortamda CH_4 aktivitesini arttırıcı etkisi olduğu belirtilmiştir (Duncan ve diğ., 1968; Phuntsho ve diğ., 2011; Sakthivel ve diğ., 2012; Ansari ve diğ., 2015).

$C_6H_{12}O_6$'un biyolojik parçalanabilen bir ürün olduğu, anaerobik ortamda biyogaz üretimine hızlı ve olumlu etkisi olduğu, arkeal türler için substrat olarak kullanılabildiği ve pilot ölçekteki uygulamalarda enerji geri kazanımını %40'a kadar arttırabildiği belirlenmiştir (Rodrigues ve diğ., 2005; Yong ve diğ., 2012; Ansari ve diğ., 2015; Gajaraj ve diğ., 2017). Ancak, J_w değerinin diğer ÇÇ'lere kıyasla düşük olması ve düşük konsantrasyonda çalışılabilmesi sebebiyle tercih edilmediği de dikkati çekmektedir (Yong ve diğ., 2012; Ansari ve diğ., 2015). **$C_2H_5NO_2$,** anaerobik ortamda biyolojik parçalanabilirliği yüksek organik bir ÇÇ olduğu için tercih edilmektedir. Sodyum inhibisyonunda en etkili bileşen olarak rol almaktadır. Tuz bileşenlerinin yoğun olduğu anaerobik ortamlara eklendiğinde, CH_4 üretimini istenilen seviyede geri kazanabildiği belirlenmiştir (Vyrides ve diğ., 2009; Lutchmiah ve diğ., 2014; Ansari ve diğ., 2015). **$C_3H_8O_3$**'in düşük seviyelerdeki mevcut CH_4 üretimini iki katına çıkarabildiği belirtilmiştir. Toplam konsantrasyonun %2'den fazlasına çıkması durumunda ise toksik etkisi vardır. %15 Gliserin ve %85 atıksu kullanıldığı denemelerde biyolojik parçanabilirlik sağlanmış ve arkeal türlerde toksisite gözlemlenmemiştir (Rodrigues ve diğ., 2005; Smith ve diğ., 2008; Thomas ve diğ., 2011; Ansari ve diğ., 2015). **$C_{10}H_{14}N_2Na_2O_8$**'ün CH_4 üretiminde oldukça etkili ve anaerobik ortamı destekleyici bir yapısı olduğu belirlenmiştir. Düşük konsantrasyonlarda daha etkin olduğu gözlemlenmiştir (Ansari ve diğ., 2015; Nguyen ve diğ., 2015). **PAA–Na**'nın anaerobik ortamı olumlu/olumsuz etkileyen bir etkisi olmadığı görülmemiştir. İO çalışmalarına göre reaktör içerisindeki birikimi viskozitede artışa neden olmaktadır (JACC Report, 1993; Ge ve diğ., 2012; Ge ve diğ., 2013). **HCOONa**'nın CH_4 miktarını artırmada etkili olduğu, ortamda fermantasyon ürünü olarak bulunabildiği, içeriğinin mikrobiyal yapıyı destekleyici olduğu, bileşenindeki sodyumun miktarının anaerobik ortamda istenilen aralığı 100–200 mg/L olması gerektiği belirtilmiştir (Öztürk ve diğ., 2005; Phuntsho ve diğ., 2011; Bowden ve diğ., 2012; Ge ve diğ., 2013; Ansari ve diğ., 2015). **CH_3COONa**'nın CH_4 miktarını arttırdığı, asidojenler için besi kaynağı olduğu, yüksek konsantrasyonda bulunması durumunda arkeal fazda olumsuz etki oluşturduğu ve CO_2 konsantrasyonunu arttırdığı belirtilmiştir (Öztürk ve diğ., 2005; Bowden ve diğ., 2012; Holloway ve diğ., 2015).

Literatürde yer alan bazı ÇÇ'lerin İO performanslarının değerlendirmesi aşağıda verilmiştir. ÇÇ'lerin, farklı uygulama yöntemi ve atıksular ile yürütülen çalışmalardaki J_w ve J_s değerleri ile RSFS (ters tuz akımı seçiciliği) değeri hesaplanmıştır. Şekil 2.6'da tüm ÇÇ türlerinin RSFS değerleri yer almaktadır.



Şekil 2.6: Literatürde yaygın kullanılan ÇÇ'lerin RSFS değerleri.

$NH_4H_2PO_4$'ün membran yüzeyinden difüze olma miktarının yüksek olduğu ve J_s artışının hızlı gerçekleştiği belirtilmiştir. İO prosesinde yüksek J_w değeri sağlamaktadır. Fakat düşük konsantrasyonlarda dahi yüksek J_s değeri sergilemektedir (Phuntsho ve diğ., 2011; Kim ve diğ., 2016). **KCl** inorganik ÇÇ'ler arasında en yüksek 4. osmotik basınca sahiptir (Tablo 2.5). Diğer tüm inorganik ÇÇ'lere göre daha yüksek J_w değerini sağladığı belirlenmiştir (Achilli ve diğ., 2010; Phuntsho ve diğ., 2011; Ge ve diğ., 2013; Heo ve diğ., 2016; Kim ve diğ., 2016; Kim ve diğ., 2017). **$KHCO_3$** büyük hidratlı anyonlar grubunda yer almaktadır. Grubundaki en düşük J_s değerine sahiptir. J_w değeri diğer ÇÇ'lerin J_w değeri ortalamasının üzerindedir (Achilli ve diğ., 2010; He ve diğ., 2016). **Na_2SO_4** amonyum içerikli ÇÇ türlerine göre daha yüksek J_w değerinde çalışabilmektedir. J_s değerinin düşük olduğu belirtilmiştir (Achilli ve diğ., 2010; Heo ve diğ., 2016). **$NaHCO_3$**'ın 42 bar'dan daha yüksek osmotik basınçta etkili olmadığı belirlenmiştir. Suda çözünürlüğü düşük olması nedeniyle yüksek konsantrasyonda çalışılmaya uygun değildir. J_s değerinin çok düşük olduğu ve yüksek J_w değeri sağladığı belirlenmiştir (Achilli ve diğ., 2010; Ge ve diğ., 2013). **NaCl**'nin 1 M ve üzeri konsantrasyonlarda J_w değeri 10–20 L/m^2saat olarak belirlenmiştir. İnorganik ÇÇ'lere göre yüksek J_w değerine sahiptir. İnorganik ÇÇ'ler arasında en düşük J_s değerine sahip olduğu olduğu belirlenmiştir. Yapılan İO çalışmalarında, toksik etki göstermemesi ve optimum işletme performansına sahip olması sebebi ile en yaygın

kullanılan ÇÇ olduğu dikakti çekmektedir (Achilli ve diğ., 2010; Yong ve diğ., 2012; Ge ve diğ., 2013; Lutchmiah ve diğ., 2014; Ansari ve diğ., 2015; Hamdan ve diğ., 2015; Holloway ve diğ., 2015; Heo ve diğ., 2016). **$NaNO_3$**'ın osmotik basınç değeri diğer ÇÇ'lere göre daha düşüktür. Saf su J_w değeri ÇÇ'ler arasında en iyi 2. ÇÇ'dir (Tablo 2.5). İşletme süresince pH değerini maksimum 7'ye kadar yükselttiği belirlenmiştir (Phuntsho ve diğ., 2011; Kim ve diğ., 2016). **$(NH_4)_2SO_4$** literatürde İO proseslerinde olumlu etkiye sahip ÇÇ'ler arasında en yüksek 2. osmotik basınca sahip, en düşük J_s değeri sağlayan ve saf su J_w değeri en iyi 4. ÇÇ olarak değerlendirilmektedir (Achilli ve diğ., 2010; Phuntsho ve diğ., 2011). **NH_4Cl**, ÇÇ'ler arasında en yüksek 3. osmotik basınca sahip ÇÇ türüdür. Besleme olarak saf su kullanılan çalışmalar arasında J_w değeri en iyi 3. ÇÇ türüdür (Tablo 2.5) (Achilli ve diğ., 2010; Phuntsho ve diğ., 2011; Kim ve diğ., 2016).

PAA–Na yüksek J_w değerine (0.72 M'de 22 L/m^2·saat) sahiptir. Düşük molarite değerlerinde bile yüksek osmotik basınç ve J_w değeri sağlamaktadır. Diğer tüm inorganik ÇÇ'lere göre çok düşük J_s değerine sahiptir (Ge ve diğ., 2012; Ge ve diğ., 2013). **CH_3COONa** organik ÇÇ'ler arasında HCOONa'dan sonra en iyi J_w değerine sahiptir. pH değeri dengede kalarak uzun süre çalışabilmektedir. J_s değerinin düşük olduğu belirlenmiştir (Bowden ve diğ., 2012; Ansari ve diğ., 2015; Holloway ve diğ., 2015). **$C_{12}H_{22}O_{11}$**'un J_w değeri 1 M'da 12.9 L/m^2·saat'dir. $MgCl_2$ ve NaCl'ye göre daha düşük J_s değeri sergilediği, atıksu arıtımında tercih edilebileceği, diğer ÇÇ'leri ile karşılaştırıldığında ortalama bir J_w değerine sahip olduğu ve maliyetinin düşük olduğu belirtilmiştir (Rodrigues ve diğ., 2005; Su ve diğ., 2012; Ge ve diğ., 2013; Hamdan ve diğ., 2015; Lupti ve diğ., 2016). **HCOONa** organik ÇÇ'leri arasında en yüksek J_w değerine sahiptir. Çok düşük J_s değerine sahip olması sebebi ile besleme çözeltisinde düşük birikim sağladığı belirtilmiştir (Bowden ve diğ., 2012; Ge ve diğ., 2013; Ansari ve diğ., 2015).

Literatürde ÇÇ'lerin anaerobik ortama olan etkilerinin harici ve/veya dahili İO prosesler ile test edildiği kısıtlı sayıda çalışmaya rastlanılmıştır (Ansari ve diğ., 2015; Kim ve diğ., 2016; Chekli ve diğ., 2017; Kim ve diğ., 2017; Li ve diğ., 2017). Tablo 2.6'da literatürde yaygın kullanılan ÇÇ'lerin İO performansı ve CH_4 potansiyellerini araştıran çalışmalar aşağıda özet olarak verilmiştir.

Tablo 2.6: Literatürde ÇÇ'lerin İO performansı ve CH_4 potansiyellerini araştıran çalışmalar.

ÇÇ Türleri	ÇÇ İşletme Modu	*Akı ($L/m^2 \cdot saat$)	Reaktör ve ÇÇ Hacmi	İşletme Modu ve Süresi	İşletme Süreci	Stok ÇÇ	Özel Durumlar	Geri Kazanım Oranı (%)	BMP Verileri	J_w ve J_s Takibi	Kaynak
$MgSO_4$, NaCl, $C_2H_3NaO_2$, $Mg(CH_3COO)_2$, HCOONa, PAA–Na, $C_2H_5NO_2$, $C_3H_8O_3$, $C_6H_{12}O_6$, CH_4N_2O	Sabit osmotik basınç (30 bar)	J_0: 8.5 J_w: 2.0	Besleme: 3 L ÇÇ: 2 L	İO (harici) - BMP Analizi - 6 saat	Kesikli 6 saat işletme	–	2 saat'te bir DS stok besleme	90	NaCl ile en yüksek biyogaz eldesi	ICP	Ansari ve diğ., 2015
NH_4Cl, DAP, $NaNO_3$, KCl, KH_2PO_4, SOA, CH_4N_2O, NH_4NO_3, $NH_4H_2PO_4$, KNO_3, $Ca(NO_3)_2$	Sabit Kons. (1 M)	J_0: 11.1 J_w: 2.0	Reaktör: 6 L ÇÇ: 2 L	İO (harici) AnMBR - İO (dahili)-AnMBR - 10 gün	ÇY: 10 gün HBS: başlangıç akı değerine bağlı	3 M	DAP en yüksek Osmotik basıncı sağladı (51.3 bar)	90	$NH_4H_2PO_4$ ile en yüksek biyogaz eldesi	ICP	Kim ve diğ., 2016
NH_4NO_3, SOA, NH_3Cl, $Ca(NO_3)_2$, KCl, $NH_4H_2PO_4$, $(NH_4)_2HPO_4$, KNO_3, KH_2PO_4	Değişen Kons. (1 M) ve 2 M)	J_0: 11.8 J_w: 7.9	–	İO (harici) - BMP Analizi - 4 gün	Kesikli 24 saat işletme	–	9 ÇÇ'den 3 tane seçilerek farklı geri kazanım oranları test edilmiştir.	20 40 60 80 95	%90 geri kazanım oranında en yüksek biyogaz eldesi	Terazi	Chekli ve diğ., 2017
$NH_4H_2PO_4$, MKP, KCl	(1 M)	J_0: 9.8 J_w: 9.0	Reaktör: 2 L ÇÇ: 2 L	İO (harici) - UF (harici) /MBR 55 gün	HBS: 20–24 saat, ÇY: 160 gün	UF ile tekrar kons.	Stabilize: 7 gün, dinlen. 9 gün, İO modu: 12–15 gün	70-100	MKP> $NH_4H_2PO_4$ > KCl	Terazi	Kim Y. vd., 2017
KCl, KNO_3, KH_2PO_4	Sabit Kons. (1 M)	J_0: 4.0 J_w: 2.0	Besleme: 1 L ÇÇ: 1 L	İO (harici) BMP Analizi 30 gün	–	Manuel kontrol	ÇÇ kons. 24 saatlik RSF oranında	80	KNO_3 en yüksek biyogaz eldesi	Terazi	Li ve diğ., 2017

*J_0: döngü başındaki akı değeri J_w: döngü sonundaki akı değeri
Chekli ve diğ., 2017 çalışması TFC–İO membranı ile diğer çalışmalar CTA–İO membranı ile yapılmıştır.

Ansari ve diğ. (2015) tarafından yapılan bir çalışmada 10 farklı ÇÇ türü kullanılarak harici İO ve BMP deneyleri gerçekleştirilmiştir. $C_3H_8O_3$ ve CH_4N_2O'nin J_w değerleri sırasıyla 3.09 $L/m^2 \cdot saat$ ve 1.37 $L/m^2 \cdot saat$, J_s değerleri sırasıyla 15.2 $g/m^2 \cdot saat$ ve 106.3 $g/m^2 \cdot saat$ olarak belirlenmiştir. Yüksek J_s'ye sahip bu ÇÇ'ler yapılan çalışmada elenmiştir. En yüksek J_w değeri (4.1 $L/m^2 \cdot saat$) NaCl ile elde edilmiştir. BMP testi için gerekli C_f konsantrasyonlarının hesaplanmasında geri kazanım oranının (R) %90 olduğu kabul edilmiştir. ÇÇ türlerinin her biri için bulunan J_w ve J_s değerlerine göre C_f değişkenlik göstermiştir (1.06–5.78 g/L). En yüksek CH_4 eldesi sırasıyla; $C_2H_5NO_2$ (1500 $mLCH_4$), $C_6H_{12}O_6$ (1250 $mLCH_4$), CH_3COONa (1200 $mLCH_4$), $Mg(CH_3COO)_2$ (1100 $mLCH_4$) ve saf suda (1050 $mLCH_4$) elde edilirken, diğer ÇÇ'lerde CH_4 üretiminin daha düşük olduğu belirtilmiştir.

Kim ve diğ. (2016) tarafından yapılan bir çalışmada kesikli İO (harici)−AnMBR çalışmasında 11 farklı ÇÇ türünün İO performansına etkisi test edilmiştir. Harici İO testlerinde en yüksek J_w değeri (11.13 L/m²·saat) KCl ile elde edilirken, en yüksek J_s değeri ise 257.7 g/m²·saat ile CH_4N_2O'da görülmüştür. CH_4N_2O aynı zamanda 2.12 L/m²·saat ile en düşük J_w değeri sahip ÇÇ olarak belirtilmiştir. En yüksek RSFS değeri (5.98 g/L) $NH_4H_2PO_4$ ile elde edilmiştir. ÇÇ'lerin CH_4 üretimine olan olumsuz etkilerinin incelenmesi amacı ile BMP testi yapılmıştır. BMP testi için C_f konsantrasyonları, her bir ÇÇ'nin %90 geri kazanım hedefi ile hazırlanmıştır. BMP çalışmasında en düşük biyogaz hacmi (49 mL) NH_4NO_3 ile elde edilirken, en yüksek biyogaz hacmi (313 mL) $NH_4H_2PO_4$ ile elde edilmiştir.

Chekli ve diğ. (2017) tarafından yapılan bir çalışmada TFC membranı ile harici İO performans ve BMP deneyleri gerçekleştirilmiştir. İO performans testlerinde 9 farklı ÇÇ ($C_6H_{12}O_6$, Pepton, Sığır ekstraktı, CH_4N_2O, $NaHCO_3$, KH_2PO_4, NH_4Cl, $MgCl_2.6H_2O$, $CaCl_2.2H_2O$) türü (1 M ve 2 M) kullanılmıştır. ÇÇ'lerin İO performansı 1 M konsantrasyonda ve 24 saatlik denemeler ile test edilmiştir. Bu ÇÇ'ler arasından seçilen türler de 2 M konsantrasyonda 4 günlük denemeler ile test edilmiştir. BMP deneyleri, 9 farklı ÇÇ türü karışımının (390 mg/L KOİ eşdeğerinde hazırlanmıştır) %20, %40, %60, %80 ve %95 oranında geri kazanım hedeflerinde gerçekleştirilmiştir. BMP testi sonuçlarına göre en yüksek biyogaz hacmi %95 geri kazanım oranında 2800 mL olarak elde edilirken, diğer geri kazanım oranlarında 640 mL (%80), 280 mL (%60), 260 mL (%40) ve 130 mL (%20) olarak elde edilmiştir.

Kim ve diğ. (2017), CTA–İO membranının kullanıldığı harici İO–AnMBR sisteminde 55 gün süren bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. 1 M KCl, $NH_4H_2PO_4$ ve Mono Potasyum Fosfat (KH_2PO_4) ÇÇ'leri ile İO performans testleri yapılmış ve %70–100 aralığındaki geri kazanım oranındaki değişimin anaerobik reaktörde biyogaz üretimine olan etkisi incelenmiştir. İO performans testlerinde KCl, $NH_4H_2PO_4$ ve KH_2PO_4 için J_0 değerleri sırasıyla, 9.06, 9.56 ve 9.82 L/m²·saat olarak belirlenmiştir. İO–AnMBR sistemi, ÇÇ olarak KCl kullanılarak işletime alınmıştır. İşletmenin 2. gününde CH_4 üretiminin 0.178 LCH_4/gKOİ'den 0.301 LCH_4/gKOİ'ye yükseldiği belirtilmiştir. 4. gün itibari ile reaktör içerisindeki tuzluluğun artması ile birlikte reaktör içerisinde toplam organik karbon (TOK) gideriminde ve biyogaz/CH_4 üretiminde ani bir düşüş gözlenmiştir. 4. gün sonunda ise biyogaz üretimi tamamen durmuştur. Sistem performansını geri kazanmak amacı ile İO modu durdurulmuş ve AnMBR (UF) ile işletime devam edilmiştir. 8 gün süren bu işletimden sonra İO sistemi tekrardan devreye alınmış ve

sistem $NH_4H_2PO_4$ ÇÇ'si ile işletilmiştir. İşletmenin sonunda CH_4 üretimi 0.084 LCH_4/gKOİ değerine kadar düşmüştür. Sistem çamur stabilizasyonu için tekrar durdurulmuş ve 8 gün süreyle İO modu çalıştırılmamıştır. Sistem, KH_2PO_4 ÇÇ'si kullanılarak tekrar işletmeye alınmıştır. Çalışma süreci sonunda CH_4 miktarı 0.05 LCH_4/gKOİ olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlarda inorganik yapıda olan ÇÇ türlerinin anaerobik aktiviteyi olumsuz yönde etkilediği belirlenmiştir.

Li ve diğ. (2017) tarafından yapılan bir çalışmada, CTA–İO membranı ile kesikli İO ve BMP deneyleri gerçekleştirilmiştir. ÇÇ olarak 1 M KCl, KNO_3 ve KH_2PO_4 kullanılmıştır. ÇÇ'lerin İO performans testlerinde KCl, KNO_3 ve KH_2PO_4 için J_0 değerleri sırasıyla 9.0, 8.5 ve 8.0 L/m²·saat olarak belirlenmiştir. 700 mL aşı çamuru ve 50 mL ÇÇ kullanılarak yapılan BMP testlerinde her bir ÇÇ türünün biyogaz hacmi 25 gün boyunca ölçülmüştür. Çalışma sonunda elde edilen verilere göre KNO_3, saf su numunesi, KH_2PO_4 ve KCl için biyogaz hacimleri sırasıyla; 1400, 1400, 1350 ve 1150 mL olarak bulunmuştur. Kullanılan 3 ÇÇ'den en yüksek biyogaz hacmi KNO_3'da ortaya çıkarken, biyogaz hacminde en düşük CH_4 içeriği (50 mL) bu ÇÇ ile elde edilmiştir. KH_2PO_4'te 238 mL CH_4, ve KCl'de 170 mL CH_4 elde edilmiştir.

Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde inorganik ÇÇ'lerin CH_4 potansiyellerinin organik ÇÇ'lere göre daha düşük olduğu fakat J_w ve J_s performanslarının daha iyi olabileceği belirlenmiştir. Sistem optimizasyonlarının, geri yıkama süreleri ve çamur stabilizasyon periyotlarının düzgün ayarlanması ve uygun ÇÇ seçimi yapıldığı takdirde İO–AnMBR ve/veya AnOMBR çalışmalarının başarıya ulaşabileceği belirtilmiştir.

2.2.5. Çekme Çözeltilerinin Geri Kazanım Amaçlı Kullanımı

İO teknolojisinin geliştirilmesi ve ÇÇ'nin geri kazanımını hedefleyen araştırmalar Tablo 2.7'de özetlenmiştir.

Tablo 2.7: Literatürde İO proseslerinde geri kazanım amaçlı kullanılan ÇÇ türleri**.**

ÇÇ	Geri Kazanım Yöntemi	Dezavantajı	Kaynak
NH_4^+–N ve karbon dioksit	Isıtma	Yüksek enerji ihtiyacı	Neff ve diğ., 1964
Uçucu çözücüler (örneğin SO_2)	Isıtma veya hava sıyırma	Yüksek enerji ihtiyacı, toksik	Batchelder ve diğ., 1965
Organik asit ve İnorganik tuzlar	Sıcaklık değişimi veya kimyasal reaksiyon	Karmaşık prosedürler, birçok aşındırıcı kimyasal tutulumu	Hough ve diğ., 1970
Al_2SO_4	$Ca(OH)_2$ ile çöktürme	Toksik yan ürünler	Frank ve diğ., 1972
Glikoz	Düşük basınçlı TO	Yüksek enerji ihtiyacı	Yaeli ve diğ., 1992
KNO_3 ve SO_2	SO_2 geri kazanımı	Yüksek enerji ihtiyacı, toksik	McGinnis ve diğ., 2002
Manyetik nanopartiküller	Kanister ayırıcı ile geri kazanım	İstenmeyen performans, yığılma	Adham ve diğ., 2007
Dendrimers	pH ayarlama ya da UF	–	Adham ve diğ., 2007
Albümin	Isıtılması suretiyle katılaştırma ve denatüre etme	–	Adham ve diğ., 2007
Tuz, etanol	Pervaporasyon tabanlı ayrımlar	Yüksek ters çözeltisi akısı ve düşük su akışı	McCormick ve diğ., 2008
2-metilimidazol bazlı çözücüler	MD	Pahalı malzemeler	Yen ve diğ., 2010
Manyetik nanopartiküller	Manyetik dış alan ile geri dönüştürme	Aglomerasyon	Ling ve diğ., 2011
Uyaranlara duyarlı polimer hidrojeller	Polimer hidrojellerin büzülmesi	Yüksek enerji ihtiyacı, düşük su akısı	Li ve diğ., 2011
Hidrofilik nanopartiküller	UF	Düşük su akısı	Ling ve diğ., 2011
Yağ asidi-polietilen glikol	Termal Yöntem	Düşük su akısı	Lyer ve diğ., 2011
Sakkaroz	NF	Göreli olarak düşük su akısı	Su ve diğ., 2012
Polielektrolitler	UF	Göreceli olarak yüksek viskoziteli	Ge ve diğ., 2012
Organik tuzlar	RO	Düşük su akısı, yüksek enerji sarfiyatı	Bowden ve diğ., 2012
Poliglikol kopolimerleri	NF	Yüksek viskozite, ciddi bir ICP	Carmignani ve diğ., 2012
Magnezyum sülfat ($MgSO_4$) ve bakır sülfat ($CuSO_4$)	Çöktürme	–	Alnaizy ve diğ., 2013
Değiştirilebilir polarite çözücü (SPS)	TO	–	Stone ve diğ., 2013
Fe/Cr/Na ile oksalik asit kompleksleri	NF	–	Ge ve Chung, 2014
Misel çözeltisi	UF	–	Gadelha ve diğ., 2014
Poligliserol kaplı manyetik nanopartikül	Manyetik ayırma	–	Cai ve diğ., 2014
Trimetilamin-karbondioksit	Isıtma	Yüksek enerji ihtiyacı	Long ve Wang, 2015
Dimetil eter	Solar enerji ile ısıtma	–	Sato ve diğ., 2017
Poli (4-stirensülfonik asit-ko-maleik asit)	NF	–	Huang ve diğ., 2017
İnorganik Gübre	Direkt kullanım	–	Kim ve diğ., 2017
Triton-x114 ile birleştirilmiş polielektrolit	MD	–	Ray ve diğ., 2018

ÇÇ'nin değerlendirilmesi amacıyla kullanılan sıvı gübre çeşitlerine ait literatür çalışmaları aşağıda Tablo 2.8'de verilmiştir. İO prosesinde tek tip bir teknolojik uygulama söz konusu olsa da, ÇÇ'yi konsantre etme ve su kazanımı uygulamasına bağlı olarak farklı hibrit sistemler

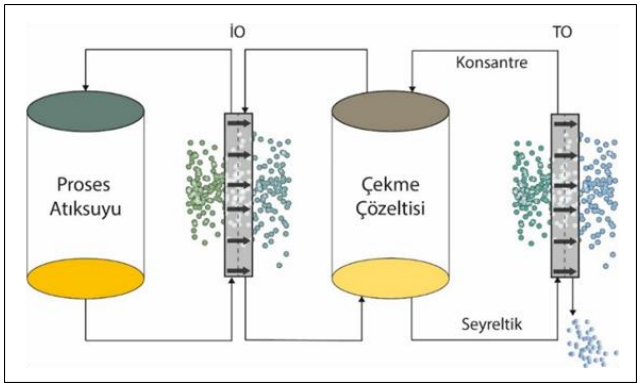
kullanılabilmektedir. İO için önemli bir ölçüt, işletim sırasında seyreltilen ÇÇ'yi tekrar konsantre edebilen uygun bir prosesin seçilmesidir.

İO prosesinde tek değerlikli ve suda yüksek çözünürlüğe sahip (örn.; NaCl veya KCl) tuzların kullanılması İO/TO hibrit çalışmalarında daha yüksek konsantre eldesi sağlamaktadır. TO prosesi, ÇÇ'yi konsantre etme ve su eldesi amacıyla kullanılmaktadır. Ancak yüksek tuz konsantrasyonlarında su eldesi için iki ya da üç kademeli TO uygulaması gerekli olabilmektedir. Ancak, TO sisteminde kirlenme gözlenmekte ve buna bağlı olarak akı düşmektedir.

Tablo 2.8: Literatürde ÇÇ'nin geri kazanımı amacıyla kullanılan kimyasal gübre çeşitleri.

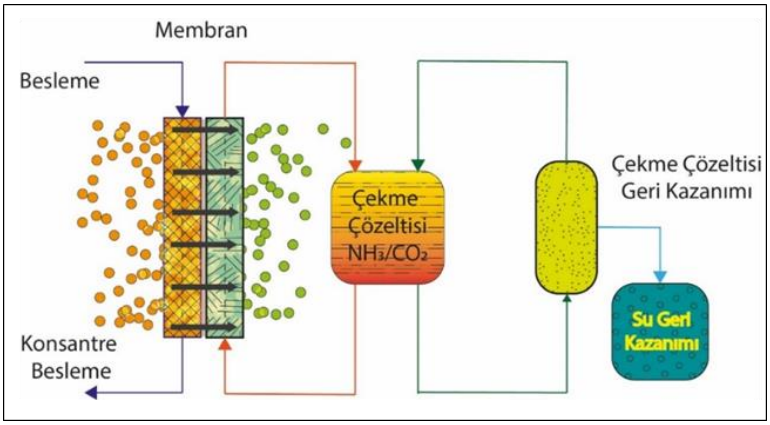
Gübrenin Adı	Molekül Ağırlığı	Saflığı (%)
Amonyum nitrat (NH_4NO_3)	80.04	98.5
Amonyum sülfat ($(NH_4)_2SO_4$)	132.1	99.0
Amonyum klorür (NH_4Cl)	53.5	98.5
Kalsiyum nitrat ($Ca(NO_3)_2$)	164.1	98.5
Sodyum nitrat ($NaNO_3$)	85.0	98.0
Potasyum klorür (KCl)	74.6	99.0
Mono–amonyum fosfat ($(NH_4)H_2PO_4$)	115.0	98.0
Di-amonyum hidrojen fosfat ($(NH_4)_2HPO_4$)	132.1	98.5
Potasyum nitrat (KNO_3)	101.1	99.0

İO/TO kombine sistemine ait şematik gösterim Şekil 2.7'de yer almaktadır.



Şekil 2.7: İO/TO hibrit sistemi.

Bir diğer uygulama şekli olan NH_3/CO_2–İO sistemine ait şematik gösterim Şekil 2.8'de yer almaktadır. Bu sistemde, ÇÇ tankına alınan suyun kazanımı, 60°C üzeri sıcaklıkta NH_4HCO_3'ın NH_4^+–N ve CO_2 gazlarına dönüştürülerek ÇÇ tankına geri devrettirilmesi ve diğer taraftan amonyum bikarbonatın sudan giderilmesi suretiyle sağlanabilmektedir.



Şekil 2.8: NH_3/CO_2 İO hibrit sistemi.

Besleme akımını konsantre etmede, besleme çözeltisine zarar verecek yüksek basınç veya ısıya gereksinim duyulmaması İO sisteminin kullanımını değerli hale getirmektedir. İO prosesinin en büyük dezavantajı ise, ÇÇ'nin tekrar konsantre edilme ihtiyacıdır. Bu dezavantaj da ileri osmoz ve TO sistemlerinin kombine kullanılmasıyla ortadan kaldırılmaktadır. Ayrıca ÇÇ olarak Deniz Suyunun kullanılabildiği uygulamalar ise, amaçlanan hedefler doğrultusunda eğer etkin işletilebilirlerse, İO prosesi ile ulaşılan maliyetlerin çok düşük olması avantajını beraberinde getirmektedir (Holloway ve diğ., 2015).

2.3. ANAEROBİK OSMOTİK MEMBRAN BİYOREAKTÖRLER

Son yıllarda enerji ve kısmi olarak su geri kazanımı sağlanabilen AnMBR'lerin dezavantajlarını azaltan ve ortadan kaldıran AnOMBR'ler geliştirmeye başlanmıştır. AnOMBR, İO prosesinin AnMBR'ye entegre edilmesi ile oluşturulan bir arıtma prosesidir. Bu proseste, osmotik basınç ÇÇ ile sağlanmaktadır. Bu proseste membran düşük kirlenme eğilimi göstermekte ve yüksek kirletici madde giderimi sağlanabilmektedir (Achilli ve diğ., 2009). İO membranının osmotik basınç sürücü kuvvet ile çalıştırılması, enerji sarfiyatlarının düşürülmesini de sağlamaktadır. AnOMBR sistemlerinin osmotik sürücü kuvvetini oluşturan ÇÇ'lerin ters difüzyonu ile oluşan biyoreaktör içerisindeki tuz birikimi ise reaktör içerisinde mikrobiyal yapıda değişikliğe sebep olarak biyolojik performansta inhibe edici etki oluşturabilmekte ve J_w değerini düşürebilmektedir (Achilli ve diğ., 2009; Kim ve diğ., 2014; Kim ve diğ., 2016).

Son yıllarda, yüksek tutma kapasitesine sahip İO membranlarının MBR'lere uygulanmasına yönelik araştırmalar artmıştır. Bu teknolojiler ile küçük boyuttaki kirletici maddelerin membran tarafından etkin bir şekilde giderimi amaçlanmaktadır. Bu alanda geliştirilen teknolojilerin ilki İO membranının MBR'ye entegre edilmesi ile oluşturulan aerobik osmotik membran

biyoreaktör (OMBR) sistemleridir. Konvansiyonel MBR teknolojileri ile karşılaştırıldığında OMBR sistemlerinde, daha az membran kirlenmesi görülmekte, enerji tüketimi düşük olmakta ve daha iyi arıtma verimi sağlanabilmektedir (Yang ve diğ., 2009; Alturki ve diğ., 2010; Xiao ve diğ., 2011; Jin ve diğ., 2012; Nawaz ve diğ., 2013; Zhang ve diğ., 2014; Huang ve diğ., 2015; Luo ve diğ., 2016; Aftab ve diğ., 2017). Basınç sürücülü membranlar ile karşılaştırıldığında İO membranının daha düşük kirlenme eğilimi göstermesi, osmotik sürücü kuvvetle akım sağlayabilmesi ve daha yüksek kalitede çıkış suyu eldesi gibi özellikleri İO prosesinin uygulama alanını genişletmiştir (Chen ve diğ., 2014). İO membranının yüksek tuz reddi ve enerji maliyetlerinde düşüş sağlama potansiyeli sebebiyle, Deniz Suyu desalinasyonu ve su arıtımı gibi prosesler haricinde de kullanım alanı gelişmektedir (Achilli ve diğ., 2009; Alturki ve diğ., 2012). Literatürde İO membranlarının MBR sistemleri ile hibrit ve/veya kombine işletildiği bir çok çalışmada hem evsel hem de endüstriyel atıksularda yüksek organik madde giderimi, etkili su akısı ve yüksek kirletici giderimi sağlanmıştır (Cornelissen ve diğ, 2008; Achilli ve diğ., 2009; Zhang ve diğ., 2012; Zhang ve diğ., 2014; Huang ve diğ., 2015; Luo ve diğ., 2016; Aftab ve diğ., 2017). Literatürde AnOMBR sisteminde İO membranının uygulanabilirliği, ÇÇ optimizasyonu ve AnOMBR sisteminin arıtma veriminin iyileştirilmesi yönünde sınırlı çalışmalar yer almaktadır (Achilli ve diğ., 2009; Kim ve diğ., 2014; Chen ve diğ., 2014; Gu ve diğ., 2015; Kim ve diğ., 2016; Hou ve diğ., 2017; Li ve diğ., 2017; Wang ve diğ., 2017a; Zhang ve diğ., 2017).

İO membranının; yüksek tuz reddi, yüksek konsantre etme oranı, kirletici yüklerin tutulması, yüksek arıtma verimi ve osmotik sürücü kuvvetin etkisi ile düşük hidrolik basınç gereksinimi gibi avantajları sayesinde günümüzde aerobik ve anaerobik membran biyoreaktör sistemlerinde hibrit olarak kullanımını gündeme getirmiştir (Hou ve diğ., 2017). Hem anaerobik hem de aerobik membran biyoreaktörlerin MF, UF ve NF membranları ile yürütülen çalışmalara kıyasla İO membranı, çıkış suyu kalitesi çok yüksektir (Zhang ve diğ., 2017). Tablo 2.8'de İO membranının entegre edildiği OMBR ve AnOMBR sistemlerinde karşılaşılan avantaj ve dezavantajlar yer almaktadır.

Tablo 2.9: AnOMBR ve OMBR sistemlerinin avantaj ve dezavantajları.

AnOMBR		**OMBR**	
Avantajları	**Dezavantajları**	**Avantajları**	**Dezavantajları**
Enerji gereksinimlerinde minimize edilmesi	Ters tuz difüzyonu	Enerji sarfiyatında düşüş sağlaması	Ters tuz difüzyonu
Çok yüksek kalitede çıkış suyu eldesi	–	Yüksek kalitede çıkış suyu eldesi	Yüksek konsantrede çamur bertarafı maliyeti
Yüksek miktarda canlı biyokütle korunması	Kimyasal maliyeti	–	Kimyasal maliyeti
Yüksek organik kirletici ve nütrient giderimi	Yüksek osmoliteye sahip ÇÇ gereksinimi	–	Yüksek osmoliteye sahip ÇÇ gereksinimi
Farklı besleme türleri ile çalışabilme	–	Düşük kirliliğe sahip atıksuların arıtımı	Havalandırma maliyeti
Daha düşük hidrolik basınç sebebiyle İO membranının daha az kirlenmesi	Reaktörde tuz birikimi	Konvansiyonel membranlara göre daha az kirlenme	Reaktörde tuz birikimi
Canlı biyokütle artışına bağlı yüksek enerji eldesi	–	–	Yüksek iç konsantrasyon polarizasyonu
Dizayn ve kurulum maliyetlerinin düşük olması	ÇÇ'nin konsantre edilme ihtiyacı	–	ÇÇ'nin konsantre edilme ihtiyacı

2.3.1. AnOMBR Sistemi ile Yapılan Arıtılabilirlik Çalışmaları

AnOMBR sistemleri ile yapılan çalışmalar sınırlı sayıda olup tüm çalışmalar son 6 sene içinde gerçekleşmiştir. Bu çalışmalara ait literatür özeti Tablo 2.9'da verilmiştir. Bu çalışmaların genellikle sentetik atıksu ile yapıldığı ve ÇÇ olarak çoğunlukla NaCl'nin kullanıldığı dikkati çekmektedir.

Tablo 2.10: Literatürde yer alan AnOMBR çalışmaları.

ÇÇ Türü	Atıksu	Membran	İşletme Koşulları	Akı* (L/m²·saat)	Temizleme	Reaktör ve ÇÇ Hacmi	Giderim Verimi (%)	Kaynak
NaCl– (0.5 M)	Sentetik Kentsel Atıksu	CTA–İO (250 cm^2)	HBS:15–40 saat ÇY: 90 gün İşletme: 155 gün Döngü: 22 gün	J_0: 9.5 J_w: 3.5	Her döngü sonunda, İO membranı temizliği (R: %94)	Reaktör: 3.6 L ÇÇ: 2 L	TOK: 96 TP: 00 NH_4^+–N: 62.7–81.2	Chen ve diğ., 2014
NaCl– (0.5 M)	Sentetik Seyreltik Atıksu	CTA–İO (250 cm^2)	HBS: 15–40 saat ÇY: 90 gün İşletme: 125 gün Döngü: 15 gün	J_0: 10.0 J_w: 3.0	0.4 L/dak. membrandan ÇÇ sirkülasyonu	Reaktör: 3.6 L, ÇÇ: 3 L	KOİ: 95 TP: 100 NH_4–N: 70–80	Gu ve diğ., 2015
NaCl– (0.5 M)	Sentetik Atıksu	CTA–İO (272 cm^2)	İşletme: 70 gün Döngü: 11 gün	(MEC-AnOMBR) J_0: 10 J_w: 3.8 (MRC-AnOMBR) J_0: 8.7 J_w: 4.0	Günlük osmotik geri yıkama çeşme suyu ile (R: %98)	Reaktör: 4.5 L, ÇÇ: 5 L	TP: >99, KOİ: >93, NH_4^+–N: 28–45	Hou ve diğ., 2017
$MgCl_2$ (0.36) ve NaCl (0.5 M)	Sentetik Evsel Atıksu	TFC–İO (250 cm^2) + PVDF–MF (250 cm^2)	HBS: 12–90 saat ÇY: 90 gün İşletme: 90 gün Döngü: –	($MgCl_2$) J_0: 7.8 J_w: 2.3 (NaCl) J_0: 8.1 J_w: 2.5	–	Reaktör: 4.9 L ÇÇ: 4 L	NH_4^+–N: 57.5–87.6 TOK: 97.7–98 TP: >99	Hu ve diğ., 2017
$MgCl_2$ – (1 M)	Sentetik Tekstil Boya Atıksuyu	CTA–İO (44.5 cm^2)	HBS: 48 saat ÇY: sonsuz İşletme: 60 gün Döngü: 15 gün	J_0: 9.63 J_w: 1.98	Kimyasal temizleme (R: %80)	Reaktör: 10 L, ÇÇ: –	KOİ: 99.4, Renk : 100,	Li ve diğ., 2017
NaCl– (0.5 M)	Sentetik Evsel Atıksu	CTA–İO (250 cm^2) + PVDF–MF (250 cm^2)	HBS: 35-60 saat ÇY: 80 gün İşletme: 100 gün Döngü: –	J_0: 6.0 J_w: 1.5	Osmotik geri yıkama ve reaktör tabanından biyogaz geri devri (2 L/dak.) (R: %75)	Reaktör: 4.98 L, ÇÇ: –	NH_4^+–N: 39–50 TP: 99	Wang ve diğ., 2017a
NaCl– (0.5 M)	Sentetik Atıksu	TFC–İO (250 cm^2)	HBS: 12.5–90 saat ÇY: 90 gün İşletme: 25 gün Döngü: –	J_0: 9.3 J_w: 2.0	Kimyasal temizleme	Reaktör: 4.98 L ÇÇ: 4 L	–	Wang ve diğ., 2017b
NaCl– (0.5 M)	İlaç aktif Madde İçeren Sentetik Atıksu	TFC–İO (250 cm^2)	HBS: 15-40 saat ÇY: 60 gün İşletme: 90 gün Döngü: 26 gün	–	Günlük osmotik geri yıkama çeşme suyu ile (R: %80)	–	TOK: 80	Wu ve diğ., 2017
$Mg(CH_3COO)_2$– (2 M)	Sentetik Atıksu	CTA–İO (150 cm^2)	HBS: – ÇY: – İşletme: 42 gün Döngü: 10–13 gün	(AnOMBR) J_0: 3.8 J_w: 1.09 (AnOMEBR) J_0: 3.53 J_w: 1.09	Osmotik geri yıkama + kimyasal temizleme (R: %90)	Reaktör: 6.8 L, ÇÇ: 1.8 L	KOİ: 96, NH_4^+–N: 51.43 TP: 73.22 (AnOMBR) KOİ: 98, NH_4^+–N: 58 TP: 77.29 (AnOMEBR)	Zhang ve diğ., 2017
NaCl– (0.5 M)	İlaç Aktif Madde İçeren Sentetik Evsel Atıksu	TFC–İO (250 cm^2)	HBS: 15-40 saat ÇY: 60 gün İşletme: 100 gün Döngü: 28 gün	J_0: 10.5 J_w: 1.5	20 günde bir yeni İO membranı ile değişim	Reaktör: 5 L, ÇÇ: 5 L	ilaç aktif madde 30–60 TN: 62.7-81.2 TP: 99 TOK: 94	Wang ve diğ., 2018
NaCl– (0.25/0.5/1/2 M)	Sentetik Kentsel Atıksu	TFC–İO (250 cm^2) + PVDF–MF (250 cm^2)	HBS: 7–15 saat ÇY: 100 gün İşletme: 60 gün Döngü: –	(0.25 M) J_0: 4.2 J_w: 1.85 (0.5 M) J_0: 7.6 J_w: 2.3 (1 M) J_0: 13.8 J_w: 5.0 (2 M) J_0: 17.0 J_w: 3.0	–	Reaktör: 4.98 L ÇÇ: 4 L	TP: 89-99 NH_4^+–N: 35–53 TOK: 98–99	Wang ve diğ., 2019
$MgSO_4$ – (1.5 M)	Sentetik Atıksu	CTA–İO (270-351 cm^2) + PVDF–MF (250 cm^2) + PTFE–MD (100 cm^2)	HBS: 2 gün ÇY: 43 gün İşletme: 43 gün Döngü: –	(AnOMBR) J_0: 1.46 J_w: 1.05	Osmotik geri yıkama (R: %97)	Reaktör: 5 L, ÇÇ: 5 L	KOİ: 99.9 PO_4^{3-}: >98 NH_4^+–N: 85–96	Chang ve diğ., 2019

*J_0: döngü başındaki akı değeri J_w: döngü sonundaki akı değeri

AnOMBR sistemlerinde yüksek iyon tutma kapasitesine sahip İO membranı kullanımı sayesinde tek değerlikli tuzlar da dâhil olmak üzere kolloidal ve çözünmüş katıların büyük bir kısmı tutulmaktadır. AnOMBR sistemlerinde yüksek iyon tutma kapasitesine sahip İO membranı kullanımı sayesinde tek değerlikli tuzlar da dâhil olmak üzere kolloidal ve çözünmüş katıların büyük bir kısmı tutulmaktadır. Böylece, daha iyi kalitede çıkış suyu elde edilmektedir. Tablo 2.9'da yer alan çalışmalardan görüldüğü üzere, %100'e varan oranlarda TOK ve TP giderimleri söz konusudur. Azot giderimleri ise organik madde TP'ye göre daha düşüktür. Çalışmalarda NH_4^+–N'in en fazla %80 oranında giderildiği görülmektedir. Bu avantajlarına rağmen, AnOMBR sistemlerinde MBR sistemlerine göre çok düşük J_w elde edilmektedir (Tablo 2.8). Bu durum, AnOMBR'lerin atıksu arıtımında uygulanmasını kısıtlayan en önemli etken olup ana nedenleri: (i) tuz birikmesi, (ii) membran kirlenmesi ve (iii) dahili konsantrasyon polarizasyonudur (Wang ve diğ., 2016; She ve diğ., 2016; Hou ve diğ., 2017).

Literatürde yer alan AnOMBR çalışmalarının detaylı özeti aşağıda yer almaktadır.

Chen ve diğ. (2014) yılında yaptıkları çalışmada AnOMBR sistemi 160 gün süresince ve toplamda 8 döngüde işletilmiştir. AnOMBR sisteminde İO'nun işletim performansı ve arıtma verimliliği incelemiştir. ÇÇ olarak NaCl ve besleme olarak sentetik kentsel atıksu kullanılmıştır. Reaktörde iletkenlik 1.0 mS/cm ile 20.5 mS/cm aralığında değişim göstermiştir. 3 günlük sürekli işletme sonunda reaktörde NaCl konsantrasyonunun yaklaşık olarak 3.72 g NaCl/L olduğu belirlenmiştir. İşletim sürecinin başlangıcında J_0 9.50 L/m²·saat ile 6.54 L/m²·saat aralığında değişim gösterirken, işletmenin son döngüsünde 3.50 L/m²·saat'e düştüğü belirlenmiştir. Çalışma süresince biyokütle konsantrasyonunun 3.90–4.60 gUAKM/L'de tutmak amacıyla reaktöre aşı çamuru eklenmiştir. CH_4 üretimi işletim süresince ortalama olarak 0.21 LCH_4/gKOİ bulunmuştur. İşletim sürecinin ilk döngüsü 22 gün sürmüştür. Takip eden döngülerde işletme süresi kısalmış ve reaktöre aşı çamuru eklenerek devam edilmiştir. Ayrıca, her döngü sonunda reaktör çökmeye bırakılmış ve üst faz alınarak yeni atıksu beslemesi ile işletime devam edilmiştir. Sistemde UAKM konsantrasyonu dengelendiğinde iletkenliğin olumsuz etkisine maruz kalınmaksızın kararlı bir AnOMBR işletimi sağlanabileceği belirtilmiştir.

Gu ve diğ. (2015) tarafından yapılan bir çalışmada AnOMBR sistemi 120 gün süresince ve toplamda 9 döngüde işletilmiştir. AnOMBR sistemi ile sentetik olarak hazırlanmış seyreltik atıksuyun arıtımı ve enerji geri kazanımı hedeflenmiştir. Sistemde HBS: 15 saat ve ÇY: 90 gün olarak belirlenmiştir. İO membranı aktif membran yüzey alanı 280 cm^2 dir. Günlük akı 3.0–10.0 $L/m^2 \cdot$saat aralığında değişim göstermiştir. 90 günlük süren işletme süresince KOİ giderim verimi ortalama %95 olarak bulunmuştur. İletkenlik üst sınır değeri 25 mS/cm olarak belirlenmiştir. Her bir döngünün yaklaşık olarak 15 gün sürdüğü ve her bir döngü süresince pH değerinin 7.0'dan 7.6'ya yükseldiği belirtilmiştir. Reaktör tabanına yerleştrilen tübik difüzör ile sürekli olarak 2 L/dak.'da biyogaz geri devri yapılarak çamurun karışması ve membran kirlenmesinin azaltılması hedeflenmiştir. Reaktör içerisinde UAKM konsantrasyonunun 2.5 g/L'de sabit tutulduğu ve HBS'nin işletme süresince 15 ile 40 saat aralığında değiştiği belirtilmiştir. Her bir döngü sonunda reaktör çökmeye bırakılmış ve üst faz alınarak reaktör işletime başlanmıştır. Her bir döngüde reaktör içi iletkenlik seviyesinin yaklaşık 10 günde 1 mS/cm'den 20 mS/cm ulaştığı belirtilmiştir. CH_4 üretimi işletim süresince 0.25–0.30 LCH_4/gKOİ olarak bulunmuştur.

Hou ve diğ. (2017) yaptıkları bir çalışmada MEC teknolojisi ile AnOMBR reaktörü (reaktör hacmi: 4.5 L) birleştirerek Glikoz içeren sentetik atıksuyun arıtımı ve sisteme dahil edilen mikrobiyal geri kazanım hücresi (MRC) ile nütrient geri kazanımı hedeflemiştir. ÇÇ olarak 0.5 M NaCl kullanılmıştır. Reaktörde ortalama CH_4 üretimi 0.15 LCH_4/gKOİ dir. MEC cihazının entegre edildiği AnOMEBR sistemler ile elektrik alan oluşturularak tuzluluk artışının azaltılması hedeflenmiş, ancak iletkenlik 12.57−12.7 mS/cm seviyelerinde tutulabilmiştir. MEC cihazının entegre edildiği AnOMEBR sisteminde J_0 10 $L/m^2 \cdot$saat ve J_w 3.8 $L/m^2 \cdot$saat olduğu belirlenmiştir. MRC entegre işletilen sistemde J_0 8.7 $L/m^2 \cdot$saat ve J_w 4.0 $L/m^2 \cdot$saat olarak belirlenmiştir. 70 günlük uzun süreli işletme süresince giderim verimleri TP: >99, KOİ: >93, NH_4^+–N: %25–45 olarak belirlenmiştir.

Hu ve diğ. (2017) yaptıkları bir çalışmada MF ve İO membranları ile entegre edilen AnOMBR'de sentetik evsel atıksuyun arıtılabilirliğini araştırmışlardır. RSF kaynaklı tuz artışının reaktör içerisinde sabit tutulması hedeflenmiştir. Çalışmada ÇÇ olarak $MgCl_2$ ve NaCl kullanılmıştır. ÇÇ olarak NaCl kullanıldığında RSF'nin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Her iki ÇÇ ile işletim süresince MF membranı kullanıldığında iletkenlik değerinin 2.5−3.8 mS/cm aralığında değiştiği belirlenmiştir. Her iki sistemde de TP giderimi >%99, TOK giderimi

%97−98 ve TN giderimi %57.5−87.6 aralığında değişim göstermiştir. MF membranının entegre edilmesi ile AnOMBR sistemlerinin daha uzun süreli işletiminin sağlanacağı belirtilmiştir.

Li ve diğ. (2017) yaptıkları bir çalışmada AnOMBR sisteminde (reaktör hacmi 10 L) sentetik tekstil boya atıksuyu kullanarak sistem arıtma performansı araştırılmıştır. Reaktör C/N/P oranı 200/5/1 olarak belirlenmiştir. AnOMBR'de CTA−İO membranı (etkin membran yüzey alanı: 44.5 cm^2) kullanılmıştır. Sistem 60 gün süre boyunca işletilmiştir. ÇÇ olarak $MgCl_2$ (1 M konsantrasyonda) kullanılmıştır. İşletme süresinin başlangıcında J_0 9.63 L/m²·saat olarak bulunmuş, işletme sürecinin sonunda 1.98 L/m²·saat'e düşmüştür. HBS: 48 saat olarak belirlenmiştir. Uzun süreli işletme süresince KOİ %99.4 ve renk giderimi %100 olarak belirlenmiştir.

Wang ve diğ. (2017a) yaptıkları bir çalışmada içerisinde batık MF ve İO membranları yer alan AnOMBR sisteminde 100 gün süreyle, sentetik evsel atıksu kullanılarak anaerobik işletme verimliliği araştırılmıştır. Reaktörde aşı çamuru olarak evsel atıksu arıtma tesisi susuzlaştırma çamuru ve ÇÇ olarak 0.5 M NaCl kullanılmıştır. HBS: 35−60 saat ve ÇY: 80 gün olarak belirlenmiştir. Uzun süreli işletme sonucunda NH_4^+−N: %39-50 (MF ile %81) ve TP: %90 giderim verimi elde edilmiştir. Reaktörde CH_4 üretiminin ise 0.25–0.28 LCH_4/gKOİ olduğu belirtilmiştir.

Wang ve diğ. (2017b) yaptıkları bir çalışmada TFC−İO membranı kullanarak AnOMBR sisteminde kimyasal temizleme prosedürü seçiminin İO membranı üzerindeki olumlu etkilerini ve AnOMBR sisteminin uzun süreli işletimini hedeflemişlerdir. Atıksu olarak sentetik atıksu ve ÇÇ olarak 0.5 M NaCl kullanılmıştır. İşletme süresince HBS 12−90 saat aralığında değişim göstermiştir. Elde ettikleri sonuçlara göre sitrik asit ($C_6H_8O_7$), disodyum etilendiamintetraasetat ($EDTA_2Na$), hidroklorik asit (HC1), sodyum dodesil sülfat ($NaC_{12}H_{25}SO_4$) ve sodyum hidroksitin (NaOH) düşük bir temizleme verimliliğine sahip olduğu, hidrojen peroksitin (H_2O_2) membran yüzeyinde oluşan kirliliğin neredeyse %100 giderdiği belirtilmiştir. Fakat uzun süreli işletimlerde yüksek konsantrasyonda H_2O_2 kullanımının membran yüzeyini yıprattığı belirlenmiştir. İşletim süresince J_w değeri 9.3 L/m²·saat'ten 2.0 L/m²·saat'e düşmüştür.

Wu ve diğ. (2017) tarafından yapılan bir çalışmada, TFC–İO membranının kullanıldığı harici İO–AnMBR sistemi 90 gün süre ile HBS: 15–40 saat ve ÇY: 60 gün'de işletilmiştir. Besleme olarak ilaç aktif madde içeren sentetik atıksu ve ÇÇ olarak 0.5 M NaCl kullanılmıştır. İşletme süresince sistem içerisindeki tuzluluk (mS/cm) ve CH_4 üretimi (LCH_4/gKOİ) takip edilmiştir. Tuzluluğun 5 mS/cm altında olduğu 5. günde CH_4 veriminin 0.15 LCH_4/gKOİ olduğu belirlenmiştir. 10. günde CH_4 miktarı 0.18 LCH_4/gKOİ değerine ulaşmıştır. Reaktörün yüksek tuzluluğa ulaştığı anda (24 mS/cm) CH_4 miktarı 0.18 LCH_4/gKOİ olarak bulunmuştur. İşletme sonunda ise reaktör içi iletkenlik 15 mS/cm ve CH_4 miktarı 0.16 LCH_4/gKOİ olarak belirlenmiştir.

Zhang ve diğ. (2017) yaptıkları bir çalışmada AnOMBR ve AnOMEBR'de sentetik atıksuyun (içeriğinde glikoz, amonyum klorür ve potasyum dihidrojen fosfat barındıran) arıtımını araştırmışlardır. Reaktörlerde ÇÇ olarak 2 M $Mg(CH_3COO)_2$ kullanılmıştır. AnOMBR ve AnOMEBR sistemlerinde İO akısı sırasıyla 3.8–1.09 L/m²·saat aralığında ve 3.53–1.09 L/m²·saat aralığında değişkenlik göstermiştir. 42 günlük uzun süreli işletme sonucunda AnOMBR sisteminde giderim verimleri KOİ %96, NH_4^+–N %51.4 ve TP %73.2 olarak belirlenmiştir. AnOMEBR sisteminde ise giderim verimleri KOİ %98, NH_4^+–N %58 ve TP %77.3 olarak bulunmuştur.

Wang ve diğ. (2018) yaptıkları çalışmada içeriğinde kemoterapi işlemleri nedeniyle ortaya çıkan ilaç aktif maddeleri içeren sentetik evsel atıksuyun AnOMBR sistemlerinde arıtılabilirliğini araştırmışlardır. Kurulan sistemde HBS: 15 ile 40 saat ve ÇY: 60 gün olarak belirlenmiştir. İlaç aktif madde içeriklerinden; doksorubisin (Dox), epirubisin (Epi), tamoksifen (Tam), mitotand (Mit), azatioprin (Aza), siklofosfamid (CP)'nin, metotreksat (Met)'in ve flutamid (Flu)'un tamamının giderildiği belirtilmiştir. İşletim süresince TOK giderim verimi %94, TP giderimi %99 ve TN giderimi %62.7−81.5 olarak belirlenmiştir. AnOMBR sisteminde işletim süresince 0.15−0.25 LCH_4/gKOİ elde edilmiştir. AnOMBR işletiminde her döngü yaklaşık olarak 20 gün sürmüş ve her döngü sonunda İO membranı değiştirilerek işletime devam edilmiştir. İşletme süresince J_w değişimi 10.5−1.5 L/m²·saat aralığında değişim göstermiştir.

Wang ve diğ. (2019) yaptıkları çalışmada AnOMBR sistemlerinde sürücü kuvvetin etkisini öne çıkarmak amacıyla reaktör içerisinde dahili olarak MF ve İO membranları yerleştirerek J_w performansında ve arıtma verimlerinde iyileştirme sağlanmasını hedeflemişlerdir. AnOMBR sistemi TFC–İO membranı kullanarak toplamda 60 gün süre ile sentetik olarak hazırlanan kentsel atıksu ile işletilmiştir. İşletim süresince ÇY 100 gün olarak sabitlenmiş ve HBS 7–15 saat aralığında değişim göstermiştir. NaCl'nin farklı konsantrasyonları kullanılmış (0.25, 0.5, 1 ve 2 M) ve J_w değeri 17.0 ile 1.85 L/m²·saat aralığında değişim göstermiştir. 2 M NaCl ile en yüksek RSF değeri elde edilmiştir. İşletim süresince TP %89–99, NH_4^+–N %35–53 ve TOK %98–99 oranında giderilmiştir.

Chang ve diğ. (2019) yaptıkları bir çalışmada mesofilik koşullarda işletilen hibrit MF–AnOMBR+MD sisteminde 3500 mg/L KOİ eşdeğerinde hazırladıkları sentetik atıksuyun arıtımını ve fosfor geri kazanımını araştırmışlardır. Çalışmada ÇÇ olarak 1.5 M $MgSO_4$ kullanılmıştır. Sistemde nütrient gideriminin >%99.9 ve organik madde giderim veriminin yaklaşık %100 olduğu belirtilmiştir. Daldırılmış MF membranı ile çalıştırılan AnOMBR sisteminin tuz birikimini yavaşlattığı belirlenmiştir. İşletme süresince CH_4 veriminin 0.11–0.24 LCH_4/gKOİ aralığında değiştiği belirtilmiştir. MF süzüntüsünde P'nin 60 mg/L olarak geri kazanılabildiği belirlenmiştir. Yapılan çalışma ile hem yüksek nütrient kazanımının mümkün olduğunu hem de hibrit sistemde Membran Distilasyonu (MD) ile ÇÇ geri kazanımı ve biyogazın ısıtma için kullanılmasının mümkün olduğu belirtilmiştir. Bu sayede hem kimyasal hem de enerji maliyetlerinde düşüş sağlanabileceğini belirtmişlerdir.

2.4. ATIKSULARIN GERİ KAZANIMI VE YENİDEN KULLANIMI

Son yıllarda endüstrileşmenin ve nüfus artışının büyük hız kazanmasıyla mevcut su kaynakları hızla tükenmekte ve kirlenmektedir. Bu durum, su ve yiyecek sağlama ihtiyaçlarının artışını da beraberinde getirmekte ve su kıtlığına neden olmaktadır. Dünya'daki toplam su miktarı 1 milyar 400 milyon km^3'tür. Bu suyun %97'si denizlerdeki ve okyanuslardaki tuzlu sulardan ibarettir. Geriye kalan sadece % 2.5'luk kısım tatlı suları teşkil etmekte olup bunun çok az bir kısmının çeşitli maksatlar için kullanılabilir olduğu belirlenmiştir. Ülkemizde mevcut 112 milyar m^3 kullanılabilir su kaynağından yararlanma oranı yaklaşık %39 olup, bu kaynağın 32 milyar m^3'ü (%73) sulamada, 7 milyar m^3'ü (%16) içme ve kullanmada, 5 milyar m^3'ü (%11) sanayide kullanılmaktadır. Ülkemiz, 2013 yılı itibarıyla kişi başına düşen yaklaşık 1.500 m^3/yıl

kullanılabilir su miktarı ile su kısıtı bulunan ülkeler arasında yer almaktadır. 2030 yılında kişi başına düşen 1.100 m^3/yıl kullanılabilir su miktarıyla ülkemizin su sıkıntısı çeken bir ülke durumuna gelmesi öngörülmektedir (DPT, 2013). Doğal su kaynakları ile su ihtiyacı arasında giderek büyüyen açık, atıksuların arıtılarak tekrar kullanılmasını gündeme getirmiştir. Su ihtiyacının artması, artan doğal su kaynakları fiyatları ve gelişen geri kazanım teknolojileri, atıksuların tekrar kullanılmasını hem çevre hem de kaynakların ekonomik kullanımı yönünden cazip hale getirmektedir. Geri kazanılmış su, suyun tekrar kullanımı için uygun kalitede olduğu kabul edilen, işlenmiş bir atıksudur (Lyu ve diğ., 2016). Atıksuların arıtılması ve geri kazanılmasındaki amaç su kaynaklarının korunmasıve temiz su kaynaklarının tüketiminin azaltılmasıdır. Atıksuların geri kazanılması ve yeniden kullanılmasında atıksuyun belli standartlara getirilmesi ve belli parametrelerin göz önünde tutulması gerekmektedir (Büyükkamacı ve diğ., 2009). Arıtılmış atıksuyun geri kullanımı için seçilecek teknoloji; arıtılmış atık suyun özellikleri, geri kullanım amaçları için kalite kriterleri, güvenilirlik, işletme kolaylığı ve ekonomik imkân konuları göz önüne alınarak belirlenmelidir. Geri kazanılmış atıksuların sıkça kullanıldığı alanlar aşağıda verilmiştir:

- Kentsel kullanım,
- Endüstriyel kullanım,
- Yeraltı suyu beslemesi,
- Tarımsal sulama (Büyükkamacı ve diğ., 2009).

Evsel ve endüstriyel nitelikli arıtılmış atıksuyun yeniden kullanıldığı alanlardaki olası etkileri Tablo 2.11'de verilmektedir.

Tablo 2.11: Geri kazanılmış suyun kullanıldığı alanlar ve olası etkileri (EPA, 1992).

Kullanılan Alan	Olası Etkileri
Tarımsal sulama	Tuzun toprak ve ürün kalitesine etkisi
Yüzeysel sulama - Park-bahçe - Yeşil alanlar	Patojenlerin halk sağlığı üzerindeki etkisi, yüzeysel ve yer altı sularının kirlenme etkisi
Yeraltı suyu besleme	Geri kazanılmış sudaki iz organiklerin toksik etkileri, toplam çözünmüş katı maddeler ve patojenler
Çevresel kullanımlar - Gölet ve havuzlar - Balık üretim havuzları	Bakteri ve virüse bağlı sağlık etkileri, ötrofikasyon etkisi, koku, estetik etkiler, vb.
Endüstriyel Kullanım - Soğutma suyu - Proses suyu - Kazan suyu	Korozyon, bakteriyolojik film oluşumu, proses ve soğutma sularındaki patojenlerin insan sağlığına etkisi
Diğer kullanımlar - Yangın söndürme - Tuvalet temizliği - Araç yıkama	Aerosoller tarafından taşınan patojenler dolayısıyla insan sağlığına etkisi, korozyon, bakteriyolojik film gelişimi ve tortu oluşumunun su kalitesine etkisi, içme sularıyla temas etme riski

2.4.1. Kentsel Kullanım

Geri kazanılmış atıksuların kentsel amaçlı geri kullanımı genellikle; park, rekreasyon alanı, atletizm alanı, okul bahçesi ve oyun alanı, anayolların ve halka ait binaların ve tesislerin çevresindeki peyzaj alanlarının sulanması, işyeri, dükkân, ofis ve endüstriyel kuruluşların çevresindeki peyzaj alanlarının sulanması, ticari kullanımlar (araç yıkama tesisleri, pencere temizleme vb.), kent içindeki havuz, fıskiye, şelaleler gibi yapay kullanım alanlarına su verilmesi, inşaat projelerinde beton yapımı için ve toz kontrolünde su kullanımı, yangından korunmak üzere yangın söndürme suyu temini, binalarda tuvalet suyu olarak kullanımı ve golf sahalarının sulanması amacıyladır (EPA, 2004). Genellikle, geri kullanıma hazır hale getirilmiş suyun kesintili kaynak olduğu kabul edilmektedir. Toplum, arıtılmış atıksuyun kesintisiz bir kaynak olarak kullanımına karar verirse, arıtılmış suyun sistemde sürekli iletiminin ve sistem güvenilirliğinin sağlanması gerekmektedir (EPA,1992).

2.4.2. Endüstriyel Kullanım

Geri kazanılmış suyun endüstride kullanımı gelişmiş ülkelerde oldukça yaygındır. İçme suyu niteliğindeki suya ihtiyaç duymayan birçok endüstri için geri kazanılmış su idealdir. Atıksuyun geri kazanılması, endüstriyel atıksuyun tesis içinde geri çevrimi ile ve/veya evsel atıksu arıtma tesislerinde arıtılan suyun kullanılması ile olabilmektedir. Endüstrinin kendi içinde sularının geri çevrimi, çoğunlukla prosesin bir parçası olarak uygulanmaktadır. Endüstrilerin çoğu ya suları korumak ya da sıkı deşarj standartlarını sağlamak için atıksularını arıtıp sistemlerine geri çevirmektedirler.

Geri kazanılmış su, soğutma suyu, kazan besleme suyu ve proses suyu olarak endüstrilerde kullanılmaktadır. Pek çok endüstride, soğutma suyu ihtiyacı tesisteki en büyük su ihtiyacını oluşturmaktadır. Temiz su kaynaklarının kirlenmesi ve azalmasına bağlı olarak sanayiciler, açık çevrimli soğutma sistemlerinde ikincil atıksu arıtma üniteleri çıkış sularını kullanmaya yönelmişlerdir. Ancak, soğutma suyu olarak arıtılmış atıksuların kullanılması durumunda korozyon, çökelek oluşması ve mikrobiyal büyüme gibi konulara dikkat edilmesi gereklidir (Büyükkamacı ve diğ., 2009). Arıtılmış suların proses suyu olarak kullanımı durumunda her bir endüstri için ayrı inceleme yapmak gereklidir. Bazı endüstriler çok iyi kalitede suya ihtiyaç duyarken, bazı endüstriler daha az kaliteli suyla da üretim yapabilmektedir. Örneğin elektronik sanayi neredeyse destile su kalitesinde suya ihtiyaç duyarken deri sanayi daha düşük kaliteli suya ihtiyaç duyabilmektedir (EPA, 2004).

2.4.3. Yeraltı Suyu Beslemede Kullanım

Ülkemizde fazla kullanım alanı olmayan bir uygulama olup, arıtılmış atıksuların zemine sızdırılarak toprağın arıtma kapasitesinden yararlanılması gelişmiş bazı ülkelerde (ABD, Hollanda, Almanya gibi) uygulama alanı bulmaktadır. Arıtılmış atıksular yeraltı suyuna, yüzeysel püskürtme, nehire deşarj, kum filtrasyonu, toprak-su arıtma sistemleri ve doğrudan enjeksiyon gibi yöntemlerle verilebilmektedir.

Arıtılmış atıksuların yer altı suyuna deşarj edilmesinin amaçları aşağıda verilmektedir:

- Kıyı alanlarında akifere tuzlu su girişimini önlemek,
- Atıksuyun daha iyi arıtılmasını ve tekrar kullanımını sağlamak,
- İçme suyu ya da diğer akiferlerin su kapasitesinin arttırılmasını sağlamak,
- Arıtılmış suyun depolanmasını sağlamak,
- Yeraltı su seviyesindeki azalmayı önlemek (Büyükkamacı ve diğ., 2009).

2.4.4. Tarımsal Sulamada Kullanım

Tarımsal faaliyetler için atıksuların yeniden kullanılması su kaynakları yönetiminin bir başka yöntemini oluşturmaktadır (Başkan, 2006). UNESCO–WWAP 2003 yılı verilerine göre, dünyada suyun %70'den fazlası tarımsal sulama için kullanılmaktadır. Bu nedenle, arıtılmış atıksuyun sulamada uygulanması büyük bir potansiyel olarak görülmektedir (Norton ve diğ., 2013). Tarımda arıtılmış atıksuların kullanımının pek çok avantajı vardır. Öncelikle üretimin artmasına katkıda bulunur. Bunun nedeni arıtılmış atıksuların, bitkinin besin maddesi olan nütrientleri içermesidir. Arıtılmış sudaki azot ve fosforun büyük bir kısmı bitkiler tarafından kolaylıkla kullanılabilen formlarda bulunmaktadır. Toprakta ihtiyaç duyulan element içeriklerinin arıtılmış su ile sulanması esnasında topraktaki enzim faaliyetleri de iyileştirilerek, tarımsal sulama, gübre kullanımını ve bitkisel üretim maliyetinden tasarruf edilebilmektedir (Başkan, 2006). Lyu ve diğ. (2016) yaptıkları bir çalışmada geri kazanılmış sulama suyu ile azot ve fosfor kullanımının sırasıyla 7140–8610 ton/yıl ve 1119–1590 ton/yıl azaltılabileceği tahmin edilmiştir. Atıksuların tarımsal amaçlı kullanımına elverişli olan sektörlere örnek olarak konserve, şeker, gübre, süt ürünleri, meşrubat ve kağıt endüstrisi verilebilir. Ancak solvent, yağ, ağır metal, petrol ürünleri ve toksik madde içeren atıksu üreten endüstrilerin atıksularının

tarımda kullanılması önerilmemektedir. Geri kazanılmış atıksuyun tarımsal amaçlı yeniden kullanımında dikkat edilmesi gereken en temel parametler aşağıda özetlenmiştir.

Arıtılmış atıksuların sulamadaki kalite parametreleri söz konusu olduğunda dikkat edilmesi gereken faktörler; tuzluluk, sodyum oranı, eser elementler, bakiye klor, nütrientler, toplam koliform ve fekal koliform miktarlarıdır (Başkan ve diğ., 2006).

Tuzluluk sulamada en önemli parametrelerden birisidir ve iyon değişimi ve TO işlemlerinin uygulanmasını gerektirmektedir. Geri kazanılan sudaki tuzluluk hem toprağı hem de mahsüllerin gelişimini etkilemektedir. Sodyum formundaki tuzluluk, şişme ve dispersiyona neden olmakta ve toprak özelliklerinin değişimine yol açmaktadır (Chakrabarti, 1995). Tuzluluğun toprak üzerindeki en önemli etkisi hidrolik iletkenliği azaltmasıdır. Bu olay sonucunda su topraktan süzülüp bitkilere kolaylıkla ulaşamamaktadır (Magesan ve diğ., 2000). Sulama suyundaki sodyum içeriği önemli bir parametredir. Yüksek sodyum ve yüksek tuzluluk toprağın fiziksel şartlarının zayıflamasına neden olmakta ve permeabiliteyi düşürmektedir. Topraktaki sodyumun etkisi SAR (Sodyum Adsorpsiyon Oranı) ile değerlendirilir. SAR değeri ile suyun sulamaya uygunluğu belirlenmektedir. Yüksek SAR değeri yüksek tuzluluğun işaretidir. Toprakta sodyumun kalsiyuma oranı 3:1 değerini aştığında toprak agregaları dağılma eğilimi göstermektedir. Eğer sodyum konsantrasyonu yüksek arıtılmış atıksular ile sulama yapılması planlanıyor ise toprağın alkalinitesi ayarlanarak kalsiyum oranı dengelenmelidir (Başkan, 2006).

Ağır metallerin asıl kaynakları motorlu araçlar, zirai gübreler ve böcek ilaçları, organik gübreler, evsel ve endüstriyel atıklar, metal endüstrileri ve madenlerdir. Genelde kadmiyum, bakır, molibden, nikel ve çinko hayvanlar ve insanlarda ciddi sağlık problemlerine neden olmakta ve bitkilerde birikebilmektedirler (Papadopoulos ve diğ., 1993). Tablo 2.14'te tarımsal sulamada izin verilebilen maksimum ağır metal ve toksik elementlerin konsantrasyonları yer almaktadır.

1 mg/L'den düşük serbest bakiye klor bitkiler için zararlı değildir, ancak hassas bitkiler 0.05 mg/L'den düşük seviyelerde bile zarar görebilmektedir. Bazı bitkiler bünyelerinde kloru biriktirebilir ancak bu da sodyum gibi yaprakların yanmasına neden olmaktadır. 5 mg/L'den yüksek konsantrasyondaki klor çoğu bitkiye zarar vermektedir (Başkan ve diğ., 2006).

Sulamada bitki büyümesi açısından en önemli nütrientler azot, fosfor, potasyum, çinko, bor ve sülfürdür. Bitkilerin büyümesi için sulama suyunda yeterli miktarda azot bulunmalıdır. Fakat aşırı miktarda bulunması durumunda ise bitkilerin büyümesi ve olgunlaşması gecikmektedir (Papadopoulos ve diğ., 1993).

Geri kazanılan sularda, insanlara patojenik etki yapabilen mikroorganizmalar arasında en sık rastlananlar türler enterik orijinlidir. Enterik patojenler canlıların dışkıları yoluyla yayılırlar. Sularda bulunabilecek enterik patojenler; bakteriler, virüsler, protozoalar ve helmintler olarak sıralanabilir (Feachem ve diğ., 1983).

2.4.5. Yasal Yükümlülükler

Ülkemizde arıtılmış atıksuların tarımsal amaçlı kullanımı ile ilgili olarak Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (SKKY) kapsamında çıkartılan Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği'nde (AAT–TUT–2010) sulamada geri kullanılacak arıtılmış atıksuların sınıflandırılması, sulama suyunun kimyasal kalitesinin değerlendirilmesi ve sulama sularında izin verilebilen maksimum ağır metal ve toksik elementlerin konsantrasyonları olmak üzere tarımsal sulamada uygulanan yasal yükümlülükler belirlenmiştir. Tablo 2.12'de sulamada geri kullanılması uygun arıtılmış atıksuların sınıflandırması yer almaktadır.

Tablo 2.12: Sulamada geri kullanılacak arıtılmış atıksuların sınıflandırılması (AAT–TUT–2010).

Geri kazanım türü	Arıtma tipi	Geri kazanılmış suyun kalitesi[a]	İzleme periyodu	Uygulama mesafesi[b]
Sınıf A				
a-Tarımsal sulama: Ticari olarak işlenmeyen gıda ürünleri[l] *b-Kentsel alanların sulanması*				
a)Yüzeysel ve yağmurlama sulama ile sulanan ve ham olarak direkt olarak yenilebilen her tür gıda ürünü **b)**Her türlü yeşil alan sulaması (Parklar vb.)	-İkincil arıtma -Filtrasyon -Dezenfeksiyon	-pH=6-9 -$BOİ_5$ < 20 mg/L -Bulanıklık < 2 NTU -Fekal koliform: 0/100 mL -Bazı durumlarda, spesifik virüs, protozoa ve helmint analizi istenebilir. -Bakiye klor > 1 mg/L	-pH: Haftalık -$BOİ_5$: Haftalık -Bulanıklık: Sürekli -Koliform: günlük -Bakiye klor: sürekli	İçme suyu temin edilen kuyulara en az 50 m mesafede
Sınıf B				
a-Tarımsal sulama: Ticari olarak işlenen gıda ürünleri[m] *b-Girişi kısıtlı sulama alanları* *c- Tarımsal sulama: Gıda ürünü olmayan bitkiler*				
a)Meyve bahçeleri ve üzüm bağları gibi ürünlerin salma sulama ile sulanması **b)**Çim üretimi ve kültür tarımı gibi halkın girişinin kısıtlı olduğu yerler **c)**Otlak hayvanları için mera sulaması	-İkincil arıtma -Dezenfeksiyon	-pH=6–9 -$BOİ_5$ < 30 mg/L -AKM < 30 mg/L -Fekal koliform < 200 ad/100 mL -Bazı durumlarda, spesifik virüs, protozoa ve helmint analizi istenebilir. -Bakiye klor > 1 mg/L	-pH: Haftalık -$BOİ_5$: Haftalık -AKM: günlük -Koliform: günlük -Bakiye klor: sürekli	-İçme suyu temin edilen kuyulara en az 90 m mesafede. -Yağmurlama sulama yapılıyor ise halkın bulunduğu ortama en az 30 m mesafede

Aşağıda yer alan Tablo 2.13'te AAT–TUT 2010'da belirlenen sulama suyunun kimyasal kalitesinin değerlendirilmesi için gerekli bilgiler yer almaktadır.

Tablo 2.13: Sulama suyunun kimyasal kalitesinin değerlendirilmesi (AAT–TUT–2010).

Parametreler		Birimler	Kullanımında Zarar Derecesi		
			Yok (I. Sınıf Su)	Az – Orta (II. Sınıf Su)	Tehlikeli (III. Sınıf Su)
Tuzluluk					
İletkenlik		µS/cm	< 700	700–3000	>3000
Toplam Çözünmüş Madde		mg/L	< 500	500–2000	>2000
Geçirgenlik					
SAR_{Tad}	0–3		EC ≥ 0.7	0.7–0.2	< 0.2
	3–6		≥ 1.2	1.2–0.3	< 0.3
	6–12		≥ 1.9	1.9–0.5	< 0.5
	12–20		≥ 2.9	2.9–1.3	< 1.3
	20–40		≥ 5.0	5.0–2.9	< 2.9
Özgül İyon Toksisitesi					
Sodyum (Na)					
Yüzey sulaması		mg/L	< 3	3–9	> 9
Damlatmalı sulama		mg/L	< 70	> 70	
Klorür (Cl)					
Yüzey sulaması		mg/L	< 140	140 –350	> 350
Damlatmalı sulama		mg/L	< 100	> 100	
Bor (B)		mg/L	< 0.7	0.7-3.0	> 3.0

*Çalışmamızda TÇM: iletkenlik değerinin 0.67 ile çarpımı ile hesaplanmıştır.

Tebliğde sulama sularında izin verilebilen maksimum ağır metal ve toksik elementlerin konsantrasyonlarını gösterimi Tablo 2.14'te verilmektedir.

Tablo 2.14: Sulama sularında izin verilebilen maksimum ağır metal ve toksik elementlerin konsantrasyonları (AAT–TUT–2010).

Elementler	Birim alana verilebilecek maksimum toplam miktarlar kg/ha	İzin Verilebilen Maksimum Konsantrasyonlar	
		Her türlü zeminde sürekli sulama yapılması durumunda sınır değerler mg/L	pH değeri 6.0–8.5 arasında olan killi zeminlerde 24 yıldan daha az sulama yapıldığında, mg/L
Alüminyum (Al)	4600.00	5.00	20.0
Arsenik (As)	90.00	0.10	2.00
Berilyum (Be)	90.00	0.10	0.50
Bor (B)	680.00	*	2.00
Kadmiyum (Cd)	9.00	0.01	0.05
Krom (Cr)	90.00	0.10	1.00
Kobalt (Co)	45.00	0.05	5.00
Bakır (Cu)	190.00	0.20	5.00
Florür (F)	920.00	1.00	15.00
Demir (Fe)	4600.00	5.00	20.00
Kurşun (Pb)	4600.00	5.00	10.00
Lityum (Li)[1/]	-	2.50	2.50
Manganez (Mn)	920.00	0.20	10.00
Molibden (Mo)	9.00	0.01	0.05[2/]
Nikel (Ni)	920.00	0.20	2.00
Selenyum (Se)	16.00	0.02	0.02
Vanadyum (V)	-	0.10	1.00
Çinko (Zn)	1840.00	2.00	10.00

* Bitki hassasiyetine göre değişen toleranslarda; >4 mg/L Toleranslı, 2–4 orta toleranslı, 1–2 orta hassas, 0.5–1 hassas türdeki bitkiler için belirlenen aralık değerleridir.

2.5. MEMBRAN KONSANTRE AKIMLARININ BERTERAFI

Membrandan proseslerde membrandan geçen akım "süzüntü", geçemeyen akım ise "konsantre" olarak adlandırılır. Membranın gözenek çapından daha küçük olan maddeler membrandan geçerek süzüntüye karışmakta, bu sırada daha büyük moleküller veya çözünmüş maddeler tutularak konsantre akımında kalmaktadırlar. Konsantre yönetim stratejilerinin seçiminde; maliyetler, çevreye etkileri, yasal izinler ve yönetmelikler, alan ihtiyaçları, enerji kullanımı ve kolay uygulanabilir olması gibi birçok faktörün dikkate alınması gerekmektedir. Tarım ve Orman Bakanlığının '*Alıcı Ortam Kalitesi Açısından Membran Konsantre Akımlarının Yönetimi Tebliği*, 2013' membran prosesleri kullanarak içme ve kullanma suyu temini, endüstriyel su geri kazanımı ve kimyasal yıkama işlemleri yapılması neticesinde meydana gelen konsantre akımların yönetimini sağlamaktır. Konsantre akımları, alıcı ortama boşaltılma öncesi deşarj kriterlerini sağlayan arıtılmış atıksular ile karıştırılıp seyreltilerek deşarj edilebilir ve bu tür karışım halindeki uygulamalarda, karışım bölgesi sonundaki bütün deşarj kriterlerinin sağlanması gerekmektedir. Konsantre akımlarının hacimlerinin azaltılması kapsamında öncelikle tesis içerisinde gerekli tedbirlerin alınması ve ilgili hacim azaltma yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir. Konsantre hacimini azaltma yöntemleri;

a) Birden fazla kademeli TO (kimyasal çöktürmeli, biyolojik azaltmalı)
b) İki adımlı NF
c) MD, İO
vd. uygulanabilir yöntemlerdir.

Konsantre akımlarının bertarafı için aşağıda yer alan yöntemler tavsiye edilmektedir;

a) Alıcı ortama (deniz, iç sular vs.) ve kanalizasyona deşarj
b) Derin kuyu enjeksiyonu
c) Buharlaştırma havuzları (bölgesel olarak kullanılabilir)
ç) Arazi uygulamaları
d) Sıfır deşarj veya ona yakın deşarj (kristalizasyon, buharlaştırma) kullanılabilir.

Konsantre akımların bertarafı, Deniz Suyunun tuzsuzlaştırılması sonucu oluşan konsantre akımları ve yüzeysel suların, yeraltı sularının ve atıksuların arıtılması sonucu oluşan akımlar olmak üzere 3 ana grupta ayrılmıştır.

Bunlar; *i)* kapasitesi 1.000 ile 10.000 m^3/gün aralığında bulunan Deniz Suyu tuzsuzlaştırma tesisleri için konsantre akımın karışım bölgesinin son kısmında tuzluluk artışı binde 3'ü aşmayacak şekilde denize deşarjı zorunlu kılınmıştır, *ii)* kapasitesi 1.000 m^3/gün'den az olan Deniz Suyu tuzsuzlaştırma tesisleri için ise konsantre akımları sahil koruma bandından sonra deşarj edilebileceği belirlenmiştir, *iii)* kapasitesi 10.000 m^3/gün'den fazla olan Deniz Suyu tuzsuzlaştırma tesisleri için konsantre akımların hassas koy, körfez ve kıyılarda alıcı ortam kriterlerine uyularak derin deniz deşarjı ile, hassas olmayan koy, körfez ve kıyılarda ise karışım bölgesindeki tuzluluk artışı binde 3'ü aşmayacak şekilde, koyun açık denize en yakın uç noktasından derin deniz deşarjı ile denize deşarjı zorunlu olduğu belirtilmiştir. Bu tür konsantre akımların kanalizasyona deşarj standartları dikkate alınarak arıtımla sonuçlanan kanalizasyon sistemlerine veya evsel/endüstriyel ortak arıtma tesislerine deşarj edilmesi zorunlu kılınmıştır. İlgili Tebliğde 'Bölüm 4, Madde 3'te' yer alan bilgilere göre; Sanayi atıksularının arıtımı ve geri kazanımı sırasında ortaya çıkan konsantre akımlar yeraltı sularına ve her türlü yüzeysel sulara doğrudan deşarj edilemez. Bu tür konsantre akımların kanalizasyona deşarj standartları dikkate alınarak deşarj edilmesi zorunludur. Kanalizasyon veya evsel/endüstriyel ortak arıtma tesisi imkanı olmayan endüstriyel uygulamalarda ise, konsantre akımların ileri arıtma sonrası alıcı ortam kriterlerine uyularak deşarj edilmesi zorunludur. Deniz Suyu tuzsuzlaştırılması sonucu oluşan konsantre akımlar için alıcı ortam standartları Tablo 2.15'te verilmektedir. Yüzeysel suların, yeraltı sularının ve atıksuların arıtılması sonucu oluşan konsantre akımlar için alıcı ortam standartları Tablo 2.16'da verilmektedir.

Tablo 2.15: Deniz suyu tuzsuzlaştırılması sonucu oluşan konsantre akımlar için alıcı ortam standartları.

Parametre	**Birim**	**Alıcı Ortam Kriterleri**
Toplam askıda katı madde, AKM	mg/L	15 (günlük ort.) 20 (maksimum)
Bulanıklık	NTU	10 (günlük ort.) 15 (maksimum)
pH	–	6.5-9.0
Fe^{3+}	mg/L	2.0
Sıcaklık	°C	Alıcı ortam sıcaklığından en fazla 4°C yüksek (termik santral ile birleştirilmiş ise)
Azotlu bileşikler (NO_3-N, NO_2-N, NH_4^+–N, TKN, TN),		< Alıcı ortam deniz suyu konsantrasyonunun 1.7 katı[a]
Fosforlu bileşikler (PO_4-P, TP),		< Alıcı ortam deniz suyu konsantrasyonunun 1.7 katı [a]
Ağır metaller (Ag, Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb, Zn)		< Alıcı ortam deniz suyu konsantrasyonunun 1.7 katı [a]
Sahil koruma bandı genişliği	m	Derinliği 20 m ve altında olan sığ sularda kıyıdan: 500 Derinliği 20 m'den fazla olan derin sularda kıyıdan: 300
Deşarj derinliği	m	Deşarj 30 m derinlikten veya deniz tabanı eğiminin yeterli olmadığı durumlarda 1600 m açığa yapılmalıdır.
Difüzör (Yayıcı) deliklerinin tabana mesafesi	m	Difüzör deliklerinin deniz tabanından en az 2 m yukarıda olması istenmektedir.
Yüzey (5 m derinlik) Akıntı Hızı (en az)	m/sn	> 0,1
Tam karışım bölgesindeki tuzluluk artışı	%	≤ 0,3
Karışım bölgesinde konsantre akımlarının iletkenlik değeri	µS/cm	≤ (0,1 x Arka Plan Konsantrasyonu)

[a] Alıcı ortam numunesi difüzör montajından önce denizde difüzör çıkış noktasından 24 saatlik kompozit numune alınmalıdır.

Tablo 2.16: Yüzeysel suların, yeraltı sularının ve atıksuların arıtılması sonucu oluşan konsantre akımlar için alıcı ortam standartları.

Parametre	Birim	Alıcı Ortam Kriterleri
Tam karışım bölgesindeki tuzluluk artışı	%	≤ 0,3
Karışım bölgesinde konsantre akımlarının iletkenlik değeri	µS/cm	≤ (0,1 x Arka Plan Konsantrasyonu)

2.6. ÇİM ALANLARIN BAKIMI VE ÇİM YETİŞTİRME KOŞULLARI

Çim bitkisi estetik ya da işlevsel amaçlarla kullanılan, yeşilin faklı tonlarına sahip, genellikle üzerinde yürünebilen, 10–15 cm yüzeysel kök oluşturan bir yer örtücü bitkidir. Çim bitki örtüsü, tarımsal bir yararı olmayan ya da primer olarak böyle bir amaca hizmet etmeyen otsu bitkilerden oluşmaktadır. Bitkilerin oluşturduğu bu yeşil yüzey, ortamda bir çok görevi yerine getirir. Kent yeşil alan sistemi içerisinde çim alanlar estetik güzellik sağlamanın yanında spor yapma, oyun oynama, dinlenme gibi fonksiyonlar için de ortam oluşturur. Çim yüzeyler estetik ve fonksiyonel özellikleri ile özellikle günümüz kentlerinde dar mekanlarda yaşamak zorunda olan insan için, fiziksel ve ruhsal bakımdan sağlıklı bir mekan oluşturmaktadır.

Çim bitkileri ekolojik istekleri açısından "Serin İklim Çimleri" ve "Sıcak İklim Çimleri" olmak üzere iki temel gruba ayrılırlar. Sınıflandırmada en önemli ölçüt optimum yetişme sıcaklığıdır. Bu sıcaklık serin iklim çimleri (*Agrostis, Poa, Lolium, Festuca, Phleum, Agropyron*) için 15–25°C, sıcak iklim çimleri (*Cynodon, Dichondra, Buchloe, Paspalum, Stenotaphrum, Zoysia*) için ise 27–35°C'dir. Bu sıcaklıklar dışında çimlerin gelişmelerinde yavaşlama ve durma, dinlenmeye girme veya ölüm görülebilmektedir (Açıkgöz ve diğ., 1994; Gürbüz ve diğ., 2010). İngiliz çimi (Lolium perenne), çim alanların yapımında en çok kullanılan türler arasındadır. Özellikle tohumunun ucuz ve temininin kolay olması, kısa zamanda taze ve yeşil bir örtü oluşturması nedeni ile her türlü yeşil alanda saf olarak veya karışımlarda tercih edilmesi bir alışkanlık ve adet haline gelmiştir. Diğer bir serin iklim çim bitkisi olan kamışsı yumak (Festuca arundinacea), sert ve kaba yapısıyla tanınmaktadır. Sıcağa ve kurağa dayanımının yüksek olması nedeniyle spor alanları, park ve bahçelerde bu türün kullanımı yaygındır (Gürbüz ve diğ., 2010).

2.6.1. Çim Alanların Bakımı ve Sulama

Çim alanlarının su ihtiyacı doğal yağışlar ve sulama ile karşılanmaktadır. Çimlerde biçimden sonra su tüketimi artar. Çim alanları sulamaları İstanbul ilinde, mevsim ortalamaları nedeni ile 15 Nisan–30 Ekim arasında yapılır. Toprağın yüzeyden 15 cm derinliğe kadar nemce doygun

hale getirilmesi için günlük gerekli su miktarı 1 m^2 yeşil alan için 6 litre olmaktadır. Yeşil alanların sulanmasında kullanılacak suyun iyi kalitede olması ve fazla tuz içermemesi gerekmektedir. Sulama bütün alana homojen olarak uygulanmalıdır. Sulama mutlaka yağmurlama yoluyla yapılmalıdır. Kumlu topraklar, sık ve az miktarda sulamaya ihtiyaç duymaktadır. Killi ve ağır topraklar daha çok miktarda suya ihtiyaç duymaktadır. Uzun köklü çim her zaman daha az su istemektedir. Sulamada en önemli husus, suyun toprak tarafından en az 10–12 cm derinliğe kadar emilebilmesidir. Yeni oluşturulacak çim sahalarda, toprağın 15–20 gün (çim ekilene kadar) nemli tutulması gerekir. Çim alanlar buharlaşmanın en az olduğu zamanlarda, sabah (güneşin olmadığı saatlerde) ve akşam saatlerinde sulanmalıdır (Türemis ve diğ., 1990).

2.6.2. Çim Alanlarda İhtiyaç Duyulan Besin Maddeleri ve Gübreleme

Bitkilerde en sık görülen besin elementi eksikliği azottur. Bitkinin yeterli sıklıkta yüzeyi kaplamasını sağlamak, etkin büyüme, biçim esnasında oluşabilecek yaralanmalara karşı koruması, çevre koşulları ve hastalık vs. streslerine karşı korunması amacıyla bitkilerin yeterli miktarda azot ile gübrelenmesi gerekmektedir (Türemis ve diğ., 1990). Azot, bitki veya toprağın yapısına geçebileceği gibi nitrifikasyon, denitrifikasyon, buharlaşma ve sızma ile bitki kök bölgesinden veya biçildiğinde ekim alanından uzaklaşmaktadır. Azot, çim bitkilerinde sürgün ve kök büyümesi, sürgün sıklığı, renk, hastalık ve zararlılara dayanıklılık ve kendini yenileme kabiliyeti gibi çok önemli özelliklere etki yapmaktadır. Eksikliği halinde, bitki büyümesi durur, renk kötüleşir, bitki sıklığı ile hastalık ve zararlılara dayanıklılık azalmaktadır. Aşırı azotun bitkiye karışımında ise, kök gelişimi zayıflar, bitkiler aşırı büyür ve yıkanan azot ile yeraltı suları kirlenmektedir (Sincik ve diğ., 2004). Çim bitkilerinin kullandığı fosfor miktarı, azot ve potasyumdan daha azdır. Fosfor, yedek besin maddelerinin taşınmasını, köklenmeyi, olgunlaşmayı ve üremeyi olumlu yönde etkilemektedir. Fosforun etkisi fide döneminde daha belirgindir. Bu dönemde fosfor kök gelişimini ve kardeşlenmeyi teşvik etmektedir (Oral ve Açıkgöz, 2001).

Çim bitkilerinin önemli bakım işlerinden biri gübrelemedir. Bitkilerde klorofil, aminoasitler, nükleik asitler, enzimler ve vitaminler gibi yaşamsal öneme sahip maddelerin yapısında bulunan azot, çim bitkilerinin gübrelenmesinde en fazla kullanılan besin maddesi durumundadır. En uygun gübreleme zamanları; erken sonbahar (eylül), erken kış (kasım başı), erken bahar (mart-nisan) ve geç bahar (mayıs)'dır. Gübreleme toprak ısısının en düşük olduğu,

sabah veya akşam üstü yapılması tavsiye edilmektedir. Gübre uygulaması ıslak çime yapılmamalıdır. Gübre uygulamasından sonra çimin yanmasını önlemek amacıyla, gübrenin toprağa geçmesi için bol sulamak gerekmektedir. Gübreleme, havalandırma işleminden hemen sonra yapılırsa, besin maddelerinin kök tarafından daha etkili şekilde alınması sağlanmaktadır. Gübrelerin uygulama miktarı 1 m^2/6–10 gr oranını geçmemelidir. Bu miktar çimin zayıflığına, gübre içeriğine ve toprak pH'sına göre değişebilmektedir (Çimrin ve diğ., 2000).

Yeşil alanların gübrelenmesinde gerekli olan en önemli makro besin elementlerinden azot, fosfor ve potasyum (N–P–K) için, Beard (1973) 12/90–15–15, Hope (1983) 30–7–20, Açıkgöz (1994) 25–20–20 ve Avcıoğlu (1997) 25–15–15 kg/da dozlarını önermişlerdir. Bahsedilen dozlardaki gübreleme hem önemli bir maliyet getirmekte, hem de çim alanlar düzenli bir şekilde sulandığı için azot yıkanmasına neden olmaktadır. Yapılan araştırmalard, azotlu gübrelemenin içme ve sulama sularında nitrat oranını arttırdığı görülmüştür (Sincik ve diğ., 2004; Çığ, 2010). Tablo 2.17'de çim alanlarda kullanımı yaygın gübre içerikleri ve sağladığı faydalar verilmektedir.

Tablo 2.17: Çim alanlarında kullanılan gübre içerikleri ve yararları (Özşafak ve diğ., 2011).

Tür	Yararları
Azot (N)	Hücre ve bitki gelişiminde gereklidir
Fosfor (P)	Kök gelişimi için gereklidir
Potasyum (K)	Sıcaklık değişimlerine, kuruluğa ve hastalıklara karşı direnci arttırır
Magnezyum (Mg)	Renk oluşumuna katkıda bulunur

Literatürde yapılan araştırmalarda İO proses ile arıtılmış atıksuların gübre olarak kullanılabileceğine dair çok kısıtlı bilgiye rastlanılmıştır. İlgili çalışmalar aşağıda özetlenmektedir.

Phuntsho ve diğ. (2011) yaptıkları bir çalışmada, İO prosesinde yüksek osmotik basınca sahip organik ÇÇ bileşiklerini kullanarak Deniz Suyu tuzsuzlaştırılması hedeflemiştir. ÇÇ'lerin konsantre etme ihtiyacı olmaksızın değerlendirilmesi hedeflenmiştir.

Çalışma sonunda elde edilen seyreltik suyun deniz deşajına ve/veya bitki uygulamalarında kullanılabileceğini belirtmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; KCl, $NaNO_3$ ve KNO_3 ÇÇ türlerinin J_w değerlerinin çok yüksek olduğu, $NH_4H_2PO_4$, $(NH_4)_2HPO_4$, $Ca(NO_3)_2$ ve $(NH4)_2SO_4$ ÇÇ türlerinin ise en düşük J_s değerlerine sahip olduğu belirtilmiştir.

Zou ve diğ. (2016) yaptıkları bir çalışmada İO prosesinde ÇÇ olarak ticari gübreler kullanılmış ve SÇÇ'nin tarımsal amaçlı kullanıma uygun olması için gerekli su geri kazanım oranlarını araştırılmıştır. CTA–İO membranı kullanılarak yapılan çalışmada en yüksek J_w değeri (4.2 L/m²·saat) N–P–K oranı 15–30–15 olan ticari gübrede elde edilmiştir. 1 M konsantrasyonda, N–P–K oranı 24–8–16 olan ticari gübrede en düşük SÇÇ seyrelme oranı (%23) elde edildiği belirtilmiştir. 3 M konsantrasyonda, N–P–K oranı 24–8–16 olan ticari gübrede, SÇÇ seyrelme oranının %42 olduğu belirtilmiştir. SÇÇ içeriklerinin yüksek su geri kazanım oranında gübre olarak kullanımının uygun olduğu belirtilmiştir.

Kim ve diğ. (2017) yaptıkları bir çalışmada AnMBR çıkış suyunun FDFO sistemi ile ileri arıtımında, osmotik basıncı yüksek gübre çeşitlerinin İO sistemlerinde ÇÇ olarak kullanılması sonucunda çıkış suyunda seyreltik formda gübre elde edilebileceği ve tarımsal amaçlı kullanıma uygun olduğunu belirtmişlerdir.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. ATIKSU VE ÇAMUR KARAKTERİZASYONU

3.1.1. Bira Endüstrisi Atıksuyunun Karakterizasyonu

Doktora tez çalışmasında kullanılan atıksu, İstanbul ili sınırları içerisinde bulunan bira üretimi yapan bir fabrikanın atıksu arıtma tesisi dengeleme havuzu çıkışından temin edilmiştir. Atıksu +4°C'de soğuk odada depolanmıştır. Aşağıda Tablo 3.1'de bira atıksuyuna ait karakterizasyon verilmektedir.

Tablo 3.1: Çalışmada kullanılan bira atıksuyunun karakterizasyonu.

PARAMETRE	BİRİM	DEĞER
pH	–	7.0
İletkenlik	mS/cm	3.86±0.34
KOİ	mg/L	2950±70
$BOİ_5$	mg/L	1780±50
SAK_{254}	m^{-1}	376±13.45
RES_{436}	m^{-1}	128.4±5.80
AKM	m/L	825±35.36
UAKM	m/L	605±77.78
TKM	g/L	3.2±0.14
TUKM	g/L	1.56±0.05
TKN	mg/L	68.2±5.37
NH_4^+–N	mg/L	52.24±8.15
TP	mg/L	10.04±0.48
Alkalinite	mg$CaCO_3$/L	1475±150
Cl^-	mg/L	365±92
Ca	mg/L	119.6
Cu	mg/L	1968.0
Fe	mg/L	37.57
Mg	mg/L	37.31
Mn	mg/L	0.07
Ni	mg/L	0.16
Zn	mg/L	0.44
Co	mg/L	0.00

3.1.2. Aşı Çamuru Karakterizasyonu

Çalışmada kullanılan aşı çamuru, İstanbul ilinde bulunan bir çikolata fabrikasının anaerobik arıtma tesisinden temin edilmiştir. BMP çalışmalarında ve AnOMBR sisteminin işletiminde bu aşı çamuru kullanılmıştır. Anaerobik aşı çamuruna ait analiz sonuçları aşağıda Tablo 3.2'de verilmektedir.

Tablo 3.2: Anaerobik aşı çamuru karakterizasyonu.

Parametre	Birim	Değer
TKM	g/L	51.24
TUKM	g/L	34.25
AKM	g/L	47.00
UAKM	g/L	31.30
Hidrofobisite	%	19.86
Viskozite	Cp	122.62
UAKM/AKM	%	66.60
TUKM/TKM	%	66.84

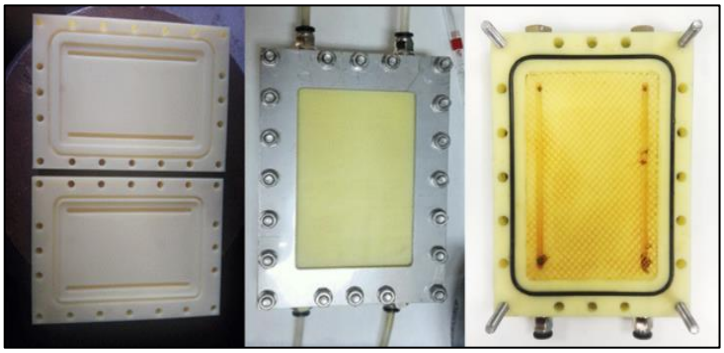
3.2. İO MEMBRANI VE MEMBRAN MODÜLÜNÜN ÖZELLİKLERİ

Kesikli ve sürekli yürütülen tüm çalışmalarda CTA–İO membranı kullanılmıştır. CTA membranları FTS–H_2O firmasından (ABD) temin edilmiştir. Tablo 3.3'te deneylerde kullanılan İO membranının teknik özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.3: İO membranın teknik özellikleri.

Ticari İsmi	CTA–İO
Membran malzemesi	Selülöz triasetat
Maksimum Sıcaklık, °C	50
pH aralığı	3–7
Maksimum Giriş Basıncı, bar	5.20
Minimum Transmembran Basıncı, bar	0.35

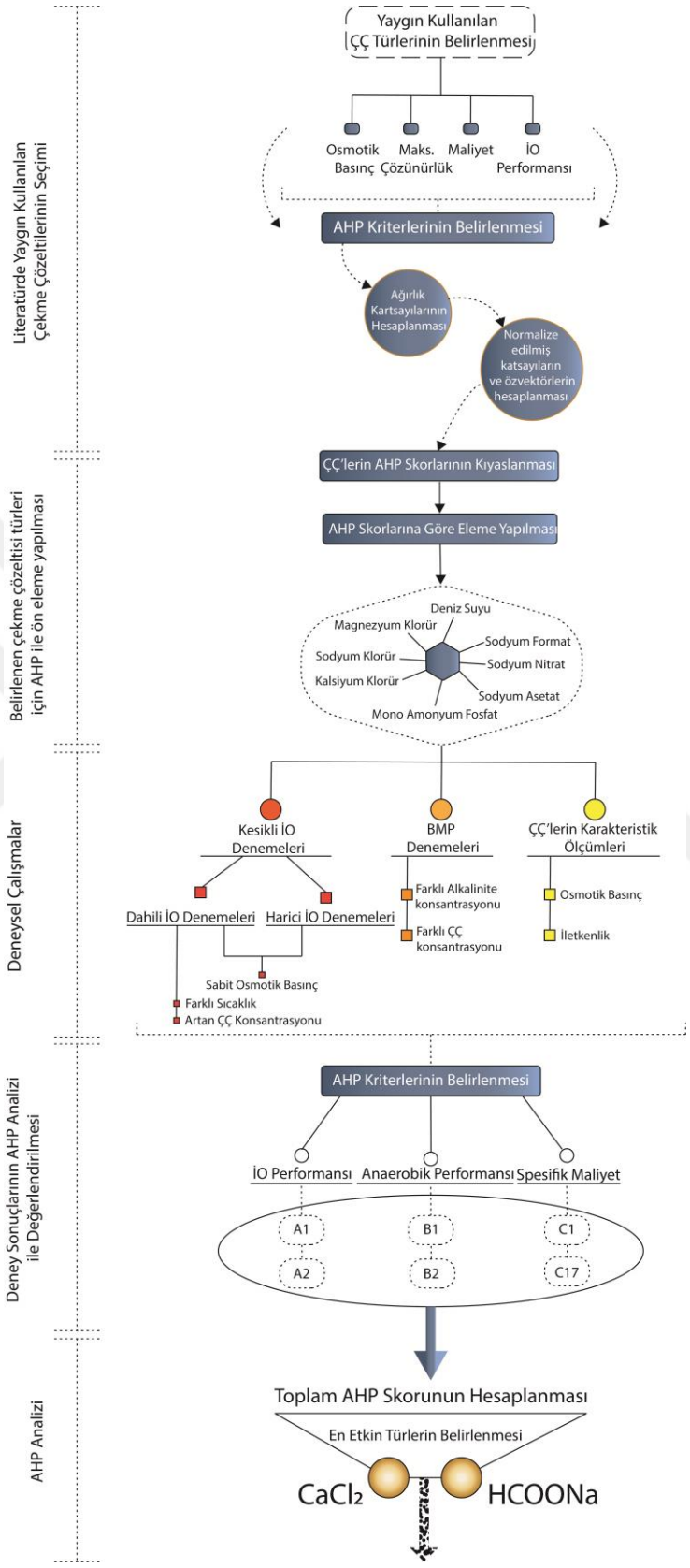
Deneylerde kestamit ve paslanmaz çelik malzemeden üretilmiş membran modülü kullanılmıştır. Membran modülünün ölçüleri 18×13×3 cm olup 4 mm'lik kanallardan oluşan giriş ve çıkış hattı bulunmaktadır. Aktif membran yüzeyi ölçüleri 12.5×8.0 cm olup ve toplam membran yüzey alanı 100 cm^2'dir. Modül harici ve dahili uygulamalarda kullanılabilecek şekilde İO prosesine uygun şekilde tasarlanmıştır. Harici olarak kullanılan modül, 2 adet akış kanalı olan 2 kestamit tabakadan ve yüksek basınca dayanıklı çelik kasetten oluşmaktadır. Kestamit tabakalar akış kanalları birbirine ters bakacak şekilde monte edilerek çapraz akış oluşturulmuştur. İki kestamit tabaka arasında İO membranı yer almaktadır. Membran aktif yüzeyi besleme kanalına dönük şekilde yerleştirilmiştir. Modülün dahili olarak kullanıldığı çalışmalarda çelik tabaka tek bir kestamit levha üzerine monte edilmiş ve membran aktif yüzeyi reaktör içerisine bakacak şekilde modüle yerleştirilmiştir. İO modülüne ait görüntüler aşağıda Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1: İO modülü ve kestamit tabakalar.

3.3. TEZ ÇALIŞMASININ AŞAMALARI

Doktora tez çalışmasında ilk olarak AnOMBR sisteminde kullanılacak ***ÇÇ türlerinin belirlenmesi*** amacıyla literatürde yaygın olarak kullanılan ÇÇ türleri araştırılmış ve 29 adet ÇÇ türü seçilmiştir. Literatürden alınan bilgiler doğrultusunda bu ÇÇ türlerinin kimyasal maliyetleri, İO performansı, osmotik basıncı ve maksimum çözünürlük değerleri belirlenmiştir. AHP analizi kullanılarak bu ÇÇ türleri karşılaştırılmış ve 7 farklı ÇÇ türü ($CaCl_2$, $MgCl_2$, MAP, HCOONa, NaCl, $C_2H_3NaO_2$, $NaNO_3$) belirlenmiştir. Çalışmanın sonraki aşamasında, belirlenen ÇÇ türleri ve Deniz Suyu ile ***kesikli çalışmalar*** gerçekleştirilmiştir. ÇÇ'lerin artan konsantrasyon değerlerinde osmotik basınç ve iletkenlik değerleri ölçülmüştür. Dahili ve harici kesikli sistemlerde besleme çözeltisi olarak saf su (sadece 30 bar osmotik basınç altında yürütülen çalışmalar) ve bira atıksuyu (tüm kesikli çalışmalarda) kullanılmıştır. Harici kesikli çalışmalarda ÇÇ'lerin ve Deniz Suyunun sabit 30 bar osmotik basınç altında İO performansı izlenmiştir. ÇÇ türlerinin sadece dahili kesikli çalışmalar ile 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1 ve 2 M konsantrasyonlarda İO performansı belirlenmiştir. ÇÇ türlerinin uzun süreli dahili AnOMBR'de kullanılmasının düşünülmesi sebebi ile dahili kesikli çalışmalarında farklı sıcaklık koşullarında (25°C ve 35°C), 1 M konsantrasyonda İO performansı belirlenmiştir. ÇÇ türleri ile artan alkalinite konsantrasyonunda ve farklı ÇÇ konsantrasyonlarında ***BMP testi*** gerçekleştirilmiştir. Kesikli çalışmalardan elde edilen J_w ve J_s değerleri, BMP testinden elde edilen metan miktarı ve piyasa araştırması ile belirlenen ÇÇ maliyeti verileri ile ikinci bir AHP analizi yapılmıştır. AHP analizi sonrasında AnOMBR için en uygun organik ÇÇ türü HCOONa ve inorganik ÇÇ türü $CaCl_2$ olarak belirlenmiştir. Uzun süreli AnOMBR çalışmalarında bu ÇÇ türlerinin kullanılmasına karar verilmiştir. ÇÇ'ler Deniz Suyu ile eş değer osmotik basınç (30 bar) değerinde (HCOONa: 0.72 M ve $CaCl_2$: 0.45 M) hazırlanmıştır. Çalışmanın bu aşamasında gerçekleştirilen deneysel programın şematik gösterimi Şekil 3.2'de yer almaktadır.



Şekil 3.2: Tez çalışmasının aşamaları–kısım (1).

Çalışmanın bir sonraki aşamasında, ***AnOMBR'de uzun süreli arıtılabilirlik çalışmaları*** gerçekleştirilmiştir. Her bir ÇÇ türü ile 30 bar osmotik basınç değerinde ve 35°C'de uzun süreli işletim gerçekleştirilmiştir. HCOONa ve $CaCl_2$'ün 30 bar osmotik basıncı sağlayan konsantrasyonları sırasıyla 0.72 M ve 0.45 M dir. Chen ve diğ. (2014) yaptıkları bir çalışmada AnOMBR sisteminde 30 mS/cm iletkenlik değerine ulaşıldığında İO performansının düştüğüne ve arıtma veriminin azaldığına dikkat çekmişlerdir. Bu sebeple AnOMBR sisteminin işletiminde iletkenlik değeri 30 mS/cm ulaştığı anda İO modu durdurulmuş ve AnOMBR çökmeye bırakılmıştır. Çökme işleminden sonra reaktördeki üst faz alınıp yeniden işletime geçilerek diğer döngü başaltılmıştır.

Sistem, ilk olarak organik ÇÇ (HCOONa) kullanılarak toplam 5 döngüde 70 gün süresince işletilmiştir. AnOMBR'nin uzun süreli işletiminin ikinci adımında inorganik ÇÇ ($CaCl_2$) ile yapılan çalışmalar, 5 döngüden oluşmuş ve toplam 57 gün sürmüştür. AnOMBR uzun süreli işletimin son adımında HCOONa ile 20 mS/cm iletkenlik üst sınır değerinde 3 döngüden oluşan ve toplam 40 gün süren bir çalışma yapılmıştır. AnOMBR sisteminde CH_4 miktarı, KOİ değişimi, iletkenlik değişimi, pH değişimi, J_w ve J_s değerleri günlük olarak takip edilmiştir. Sistemlerden belirli aralıklar ile alınan numunelerde ise TKN, NH_4^+–N, TP, orto–P, AKM, UAKM, TKM, TUKM, EPS ve SMP değişimleri takip edilmiştir.

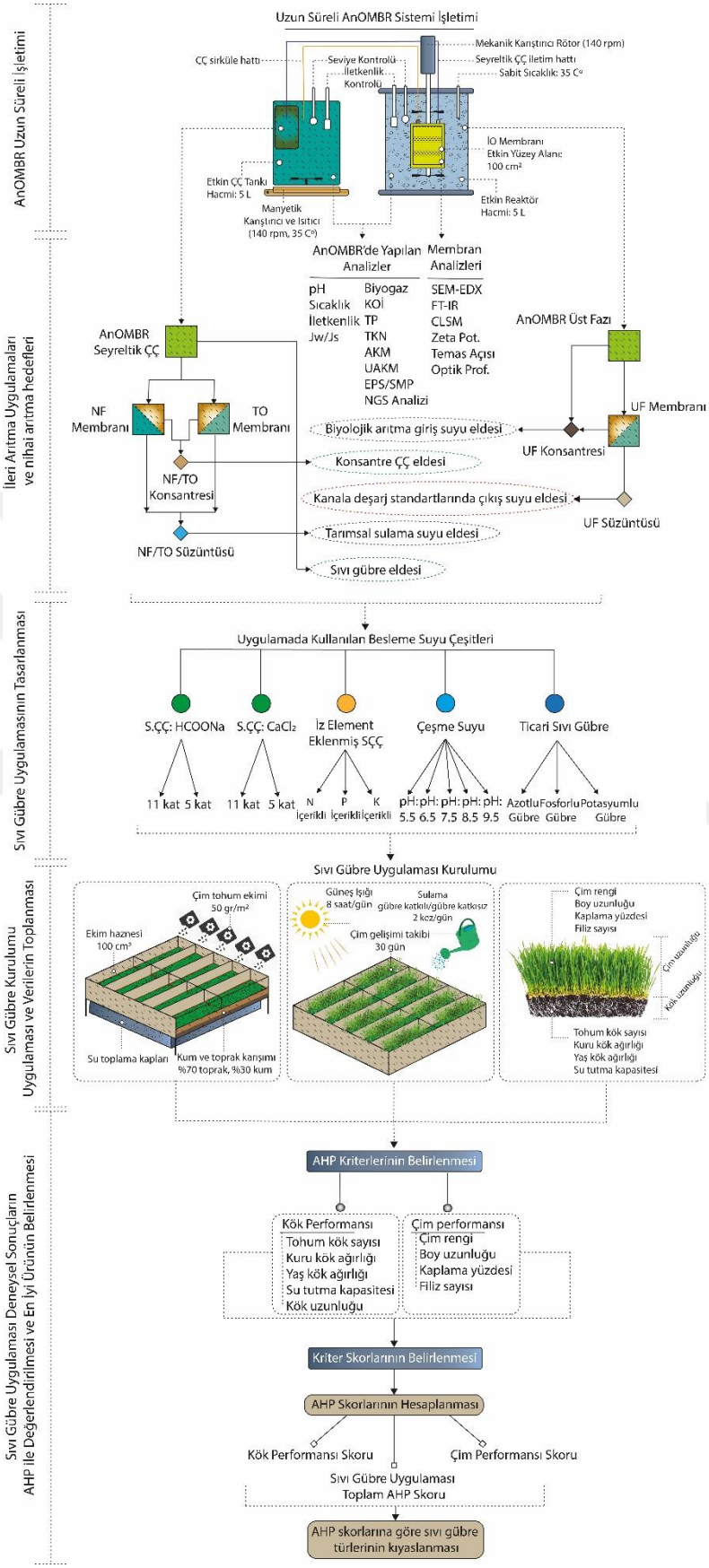
AnOMBR sistemlerinin ilk 3 döngüsünde işletim sürecinde herhangi bir değişiklik yapılmadan işletime devam edilmiştir. AnOMBR sistemlerinin 4. döngüsünde, İO membranın performansını arttırmak amacıyla yeni İO membranı takılmıştır. 5. döngüde, sistem içerisinde düşen UAKM konsantrasyonunu başlangıç değerine getirmek amacıyla reaktöre çamur ilavesi yapılmıştır.

Uzun süreli çalışmalar kapsamında, temiz ve kirli İO membranlarında otopsi çalışması gerçekleştirilmiştir. Temiz ve kirli membranlarda, membran yüzeyindeki kimyasal bağları incelemek amacıyla *FT–IR*, membranların yüzey yüklerini belirlemek amacıyla *Zeta Potansiyeli*, membranların yüzey pürüzlülüğünü belirlemek için *Optik Profilometre*, membran yüzeyi ve porlarındaki kirlenmeyi incelemek ve membran yüzeyindeki oluşan inorganik kirleticilerin tespit edilmesi amacıyla *SEM–EDS*, membranların hidrofobik/hidrofilik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla *Temas Açısı* ve membran yüzeyinde oluşan biyofilmin kalınlığı ve canlı hücre aktivitesini belirlemek için *Konfokal Mikroskop Görüntüleme* analizleri yapılmıştır.

Kirli membranların yüzeylerinden ekstrakte edilen kek çamurunda *EPS ve SMP* ölçümleri yapılarak membran kirlenmesine etkileri incelenmiştir. AnOMBR'lerde kullanılan aşı çamuru ve reaktörlerden işletim süreci sonunda alınan çamur numunelerinde bakteri türlerinin ve değişiminin belirlenmesi amacıyla NGS analizi gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın diğer bir aşamasında, AnOMBR uzun süreli işletiminin ilk 3 döngüsünden elde edilen kompozit SÇÇ ve reaktörün çökmesi sonrası elde edilen kompozit üst faz ile ***ileri arıtma çalışmaları (NF, TO ve UF)*** gerçekleştirilmiş ve nihai bertaraf hedefleri belirlenmiştir. Kompozit SÇÇ numuneleri ile TO ve NF, kompozit üst faz numuneleri ile UF deneyleri yapılmıştır. NF ve TO süzüntülerinin tarımsal sulama amaçlı kullanımı, NF ve TO konsantrelerinin ÇÇ olarak geri kazanımı, UF süzüntüsünden kanala deşarj standartlarına uygun çıkış suyu eldesi ve UF konsantresinin susuzlaştırma ünitelerinde ve/veya biyolojik arıtmada değerlendirilmesi araştırılmıştır. Ayrıca, kompozit üst fazın biyolojik sisteme geri devir ettirilmesi ve/veya derin deniz deşarjı kriterlerine uygunluğu araştırılmıştır.

Çalışmanın son aşamasında, AnOMBR'lerin uzun süreli işletiminden elde edilen ***SÇÇ'lerin sıvı gübre olarak kullanımı*** araştırılmıştır. Bu kapsamda kurulan düzenekte sıvı gübrenin çim yetiştiriciliği üzerindeki olumlu ve/veya olumsuz etkileri incelenmiştir. Bu uygulama; farklı pH değerlerinde çeşme suyu, SÇÇ çıkışları (5 ve 11 kat seyreltilmiş), ticari gübre (azot, fosfor ve potasyum içerikli) ve SÇÇ'lere iz element eklenerek hazırlanan karışımlar ile ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Çim uygulamasında çim kök ve filiz uzunlukları, çim rengi, filiz ve saçak sayısı, kaplama yüzdesi, toprak ve bitki su tutma kapasitesi, kuru ve yaş ağırlıkları sonuçları AHP analizi ile değerlendirlimiştir. Çalışmanın son aşamasına kadar gerçekleştirilen deneysel programın (kısım–2) şematik gösterimi Şekil 3.3'te yer almaktadır.

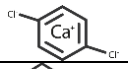
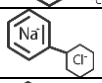
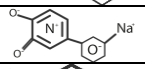
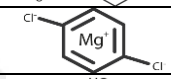
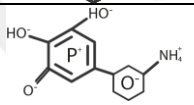
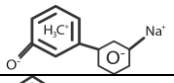
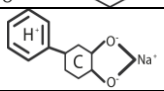


Şekil 3.3: Tez çalışmasının aşamaları–kısım (2).

3.4. ÇALIŞMADA KULLANILAN KİMYASALLAR

Çalışmada 7 adet farklı ÇÇ türü kullanılmıştır. Kesikli yapılan çalışmalarda İO performansını ÇÇ tipleri ile kıyaslamak amacıyla deniz tuzu kullanılmıştır. Deniz tuzunun osmotik basınç ve iletkenlik değerleri, NaCl eş değer alınarak hesaplanmıştır (Cai ve diğ., 2016). Çalışmalarda kullanılan ÇÇ kimyasallarının moleküler ağırlıkları, kimyasal formülleri ve kimyasal yapıları Tablo 3.4'te verilmiştir. Çalışmada kullanılan tüm ÇÇ kimyasalları 'Merck Millipore' firmasından temin edilmiştir.

Tablo 3.4: Çalışmada kullanılan ÇÇ kimyasalları.

Kimyasal Adı		Kimyasal Formülü	Moleküler Ağırlık (g/mol)	Kimyasal Yapısı
İnorganik Çekme Çözeltileri	Kalsiyum klorür	$CaCl_2$	147.02	
	Sodyum klorür	NaCl	58.50	
	Sodyum nitrat	$NaNO_3$	85.00	
	Magnezyum klorür	$MgCl_2$	95.00	
	Mono–amonyum fosfat	$NH_4H_2PO_4$	115.00	
Organik Çekme Çözeltileri	Sodyum asetat	$CH_3COONa.3H_2O$	136.08	
	Sodyum format	HCOONa	68.00	

Çalışma süresince yapılan analizlerde Tablo 3.5'te yer alan kimyasallar ve test kitleri kullanılmıştır.

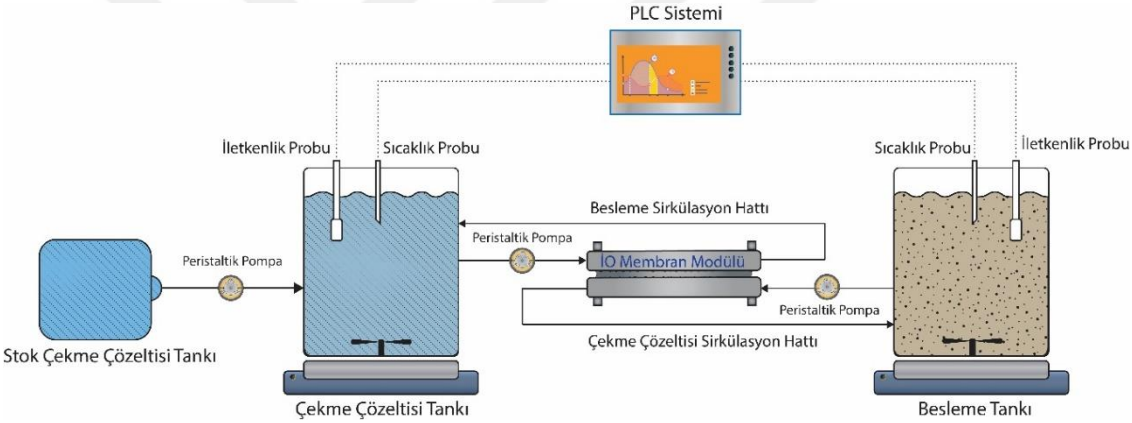
Tablo 3.5: Analizlerde kullanılan kimyasal maddeler ve test kitleri.

Kimyasal Formülü	Marka	Kimyasal Formülü	Marka	Kimyasal Formülü	Marka
NaOH	Merck	$NaHCO_3$	Merck	$Na_2B_4O_7.10H_2O$	Merck
$NaNO_3$	Merck	$MgSO_4.7H_2O$	Merck	Na_2SO_4	Merck
H_2SO_4	Merck	$FeCl_2.4H_2O$	Merck	Nitrat–test kiti	Merck
HCl	Merck	$CoCl_2.2H_2O$	Merck	$SnCl_2.2H_2O$	Carlo Erba
$(NH_4)6Mo_7O_{24}.4H_2O$	Merck	$NiCl_2.6H_2O$	Merck	KOİ–test kiti	Merck
H_3PO_4	Merck	$ZnCl_2$	Merck	NH_4Cl	Merck
$C_6H_8N_2O_2S$	Merck	$CuCl_2.2H_2O$	Merck	KH_2PO_4	Merck
$KNaC_4H_4O_6.4H_2O$	Merck	$MnCl_2.4H_2O$	Merck	$BaCl_2$	Merck
H_3BO_3	Merck	NaCl	Merck	$NaH_2PO_4.H_2O$	Merck
$C_{15}H_{15}N_3O_2$	Merck	$CaCl_2.2H_2O$	Merck	KCl	Merck
C_2H_6O	Merck	$Na_3PO_4.12H_2O$	Merck	Na_2CO_3	Merck
$CuSO_4.5H_2O$	Merck	H_3NO_3S	Merck	KI	Merck
Folin Reaktifi	Merck	KIO_3	Merck	C_2H_5OH	Merck

3.5. KESİKLİ İO DENEY DÜZENEKLERİ

3.5.1. Harici İO Deney Düzeneği ve Çalışma Prensibi

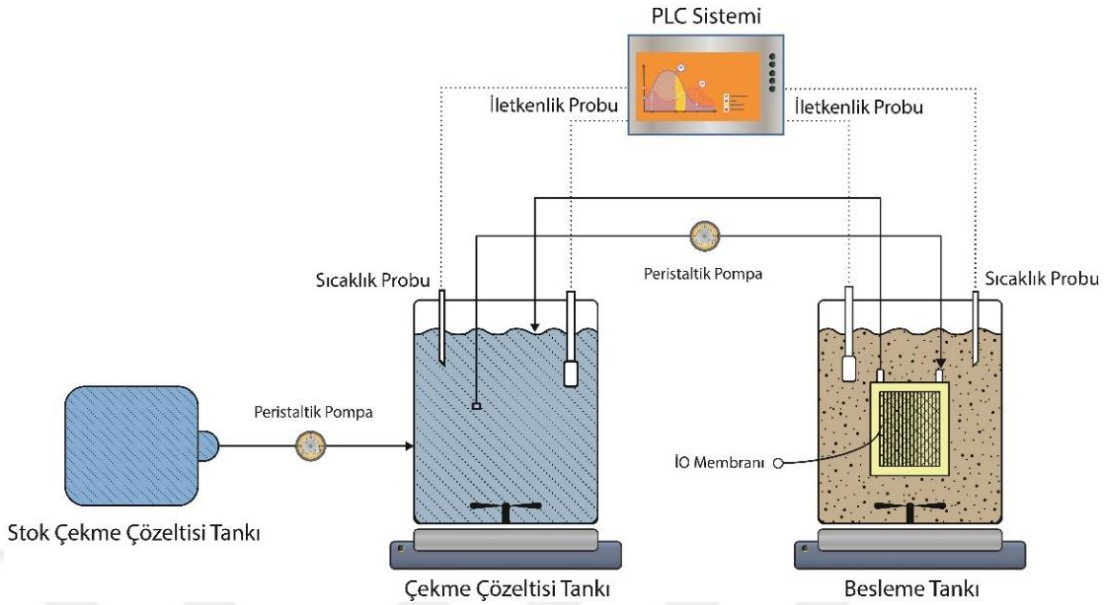
Harici kesikli İO çalışmalarında 5 L'lik 2 adet beher kullanılmıştır. Deneyler, 3 L ÇÇ ve 2 L besleme hacmi ile gerçekleşmiştir. Harici çalışmalarda sabit osmotik basınç ve iletkenlik değeri sağlamak amacıyla stok ÇÇ tankından ÇÇ tankına sirkülasyon otomatik olarak PLC otomasyonu ile sağlanmıştır. ÇÇ tankı ve besleme tankındaki sirkülasyonları sağlamak amacıyla 2 hat üzerine birer adet peristaltik pompa yerleştirilmiştir. Pompaların sirkülasyon hızı 1 L/dak. olacak şekilde ayarlanmıştır. Harici kesikli İO çalışmaları, sabit 30 bar osmotik basınç altında, besleme olarak saf su ve bira atıksuyu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.4'te harici kesikli İO düzeneğine ait şematik gösterim yer almaktadır.



Şekil 3.4: Harici kesikli İO çalışması düzeneği şematik gösterimi.

3.5.2. Dahili İO Deney Düzeneği ve Çalışma Prensibi

Dahili kesikli İO çalışmalarında İO membran modülü 5 L'lik bir behere daldırılarak test edilmiştir. Deneyler, 3 L ÇÇ ve 2 L besleme hacmi ile gerçekleşmiştir. Şekil 3.5'te dahili İO düzeneğine ait şematik gösterim verilmiştir.



Şekil 3.5: Dahili kesikli İO çalışması düzeneği şematik gösterimi.

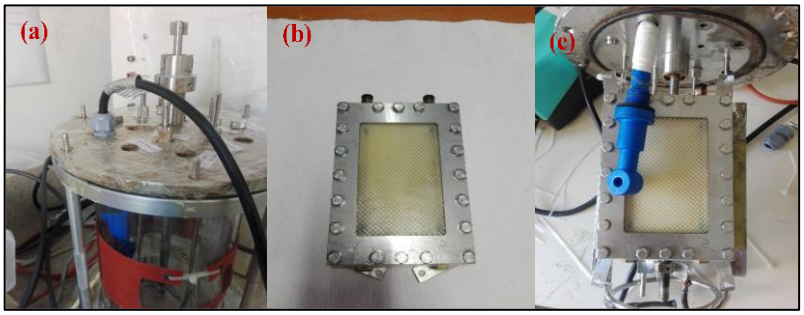
İO modülünde 1 adet giriş ve 1 adet çıkış kanalı bulunmaktadır. 1 adet peristaltik pompa yardımı ile ÇÇ tankından İO membran modülüne ÇÇ sirkülasyonu yapılmıştır. Sirküle edilen ÇÇ bu kanallardan geçerek membran yüzeyinden geçen su akısı ile birlikte ÇÇ tankına geri dönmektedir. ÇÇ ve besleme fazında yer alan birer adet iletkenlik probu yardımı ile tüm iletkenlik verileri anlık olarak PLC sistemine kaydedilmiştir. Deneylerde osmotik basıncı sabit tutmak için, ÇÇ tankındaki iletkenlik değişimi takip edilmiş ve ÇÇ tankında iletkenlik değerinin azaldığı durumlarda PLC sisteminin sağladığı otomasyon ile stok ÇÇ tankından ÇÇ tankına otomatik olarak sirkülasyon sağlanmıştır. İletkenlik istenilen seviyeye geldiğinde sirkülasyon otomatik olarak durmaktadır. Pompa çalışma süreleri ve geçen hacim PLC sistemine sürekli kaydedilmiş, J_w ve J_s değeri hesaplamalarında kullanılmıştır. Dahili kesikli çalışmalarda ÇÇ'lerin ve Deniz Suyunun sabit 30 bar osmotik basınç altında ve farklı konsantrasyonlarda (0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1 ve 2 M) İO performansları izlenmiştir. ÇÇ türlerinin uzun süreli dahili AnOMBR'de kullanılmasının düşünülmesi sebebi ile farklı sıcaklık koşullarında da (25°C ve 35°C) İO performansları (J_w ve J_s değerleri) belirlenmiştir. Dahili kesikli çalışmalarda her bir ÇÇ türü için deneyler 6 saat sürmüştür.

3.6. ANOMBR SİSTEMİ

3.6.1. AnOMBR Sisteminin Kurulumu

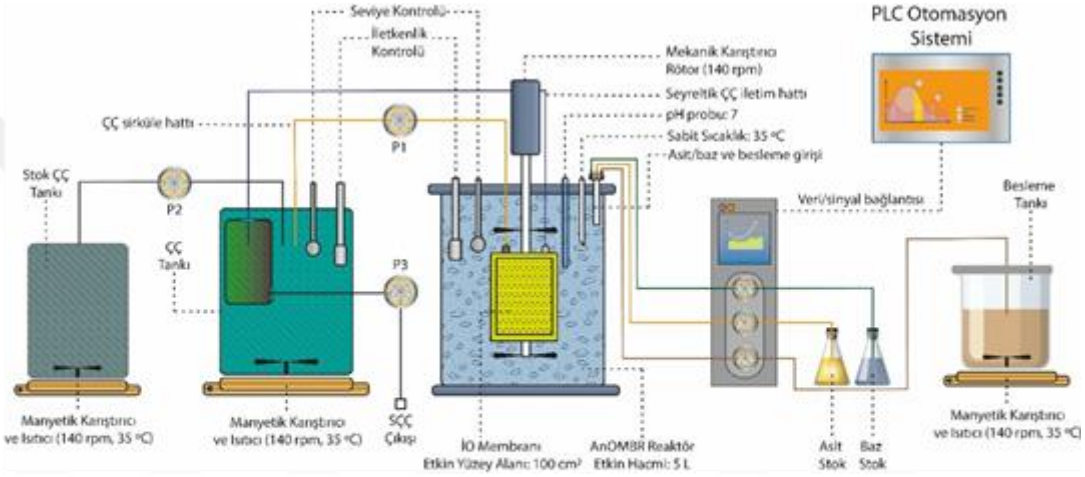
Çalışmada kullanılan AnOMBR sistemi, ELECTROLAB firmasından temin edilen FERMAC 320 marka fermantör ile PLC sisteminin (iletkenlik sensörleri ve peristaltik pompaların kontrol edildiği sistem) entegre çalıştığı tam otomasyonlu bir sistemdir. Reaktörün gövdesi kuvars camdır. Reaktörün üst kapak kısmı tamamen sızdırmaz özelliktedir. Sistemde 1 adet pH probu, 2 adet PLC bağlantılı iletkenlik probu (Chemitec marka, S411/IND probu), 2 adet termometre, 2 adet seviye sensörü, reaktöre bağlı sıcaklık ceketi, soğutma kanalları, ÇÇ tankı ve besleme tankı altına yerleştirilmiş 2 adet ısıtıcılı manyetik karıştırıcı bulunmaktadır.

Reaktör 6.5 L iç hacme sahiptir. Reaktör içerisinde yer alan seviye sensörü ile atıksu beslemesi 5 L hacimde sabit tutulmuştur. Reaktörde karıştırma işlemi, motor ve ucuna takılan pervaneler yardımı ile yapılmıştır. PLC sistemi ile AnOMBR ve ÇÇ tankındaki iletkenlik değişimleri izlenmiş ve 2 adet peristaltik pompa yardımı ile kontrol sağlanmıştır. ÇÇ tankı 5 L aktif hacme sahiptir. Membrandan osmotik basınç farkı ile çekilen arıtılmış atıksu, ÇÇ kabı içerisindeki SÇÇ haznesinde toplanmıştır ve iletkenlik değerine bağlı olarak hacim artışlarında seviye sensörlerinin gönderdiği sinyal ile seyrelmiş haldeki ÇÇ, SÇÇ çıkışına yönlendirilmiş, hacmin azaldığı ve/veya iletkenlik değerinin düştüğü durumlarda ise stok ÇÇ tankından otomatik olarak stok ÇÇ takviyesi yapılmıştır. Kontrol paneli üzerinde yer alan dahili pompalar yardımı ile sistemde pH ayarı ve besleme akımı sağlanmaktadır. J_w ve J_s değişimlerinin hesaplanmasında, ÇÇ tankı ve reaktör içerisinde yer alan iletkenlik problarının ve bu tanklara bağlı peristaltik pompaların aktardığı hacmin anlık verdiği ölçümlerin otomasyon sisteminde tanımlanmış kütle dengesi formülü kullanılmıştır. İO membran modülü reaktör içerisine paslanmaz çelikten yapılmış asma halkalar yardımı ile reaktörün tam ortasına yerleştirilmiştir. Şekil 3.6'da AnOMBR sisteminde iletkenlik probu ve membran modülü yerleşimine ait görsel yer almaktadır. Şekil 3.7'de AnOMBR sisteminin şematik şekli ve fotoğrafı verilmiştir.

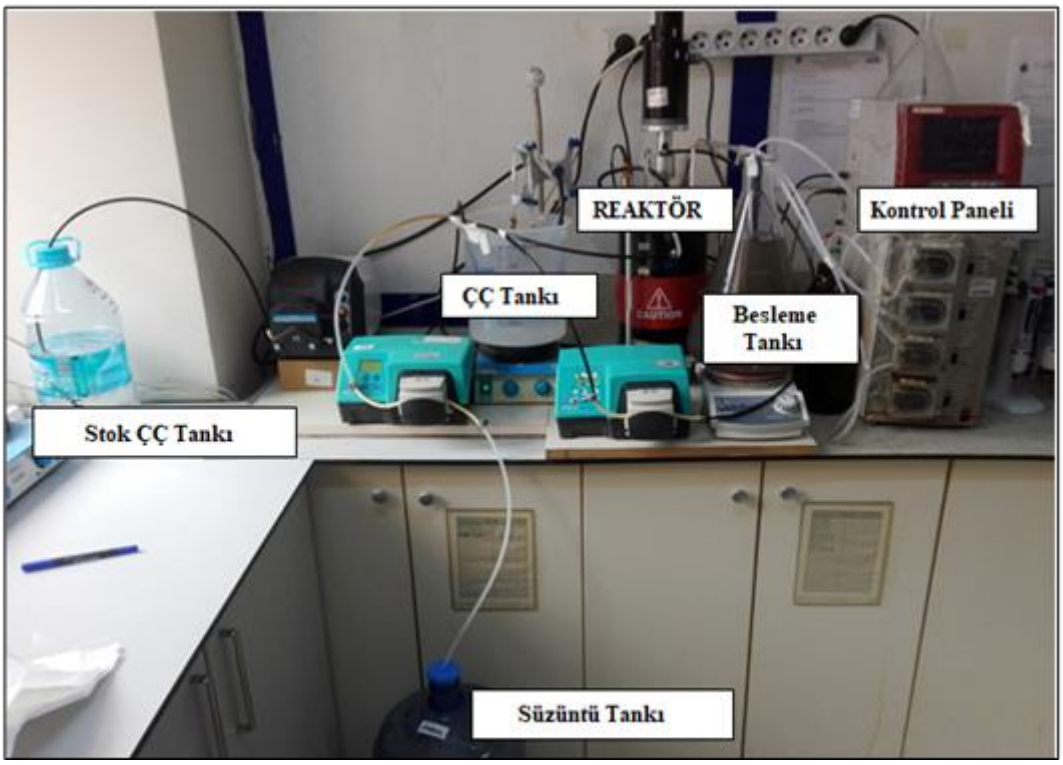


Şekil 3.6: AnMBR reaktör iletkenlik probu girişi (a), İO–dahili membran modülü (b), membran modülü ve iletkenlik probu reaktör içi yerleşimi (c).

(a)



(b)



Şekil 3.7: AnOMBR sisteminin şematik gösterimi (a), görsel gösterimi (b).

3.6.2. İO Membranı J_w ve J_s Hesabı

Kesikli İO çalışmalarında terazi kullanılarak yapılan J_w ve J_s ölçümlerinde sabit ve kararlı sonuç alınamamıştır. Literatürde yer alan Kim ve diğ. (2016) ve Ansari ve diğ. (2015) tarafından yapılan çalışmalarda, J_w ve J_s değişimlerinin konsantrasyona bağlı olarak ICP ölçümleri ile izlendiği ve kararlı sonuçlar elde edildiği belirlenmiştir. ICP yöntemi ile ölçüm yapma imkanımızın olmaması sebebi ile konsantrasyon değişimini takip edebileceğimiz farklı alternatifler araştırılmıştır. Bu kapsamda J_w ve J_s değişimleri osmotik basınç, iletkenlik ve TÇM ölçümleri ile izlenmiştir. Elde edilen verilere göre J_w ve J_s performansını en kararlı şekilde sağlayan parametrenin TÇM (g/L) olduğu belirlenmiştir. ÇÇ tankı ve reaktörde hacim değişimleri TÇM (g/L) değerine göre belrilenmiş ve J_w ve J_s değerleri hesaplanmıştır. Birim zamandaki hacim değişimi dV/dt olarak olarak ifade edilmektedir. J_w değeri, çözeltilerin konsantrasyon değişimine bağlı hacim değişimleri hesaplanarak elde edilmiştir. Besleme çözeltisine geçen ve konsantre olan TÇM (g/L) konsantrasyonu değişimi ile ΔC değeri elde edilmiştir. ΔC değeri ile J_w değerinin çarpılması ile J_s (g/m²·saat) değeri hesaplanmıştır. SÇÇ çıkışından çekilen ve ÇÇ tankına giriş yapan toplam hacim değimi hesaplanarak, başlangıçta (V_0) ve t anındaki (V_t) ÇÇ hacmi (L) belirlenmiştir. V_t'nin V_0'a bölünmesi ile ÇÇ seyrelme oranı (r (%)) belirlenmiştir. Yapılan çalışmaya ait ilgili formülasyonlar aşağıda verilmektedir.

$$J_w = \frac{1}{A}\frac{dV}{dt} \tag{3.1}$$

J_w : su akısı, L/m²·saat
A : etkin membran alanı, cm^2
dV/dt : akış oranı

$$J_S = J_w \times \Delta C \tag{3.2}$$

J_s : ters tuz akısı, g/m²·saat
ΔC : zaman karşı toplam çözünmüş madde konsantrasyonu değişimi

$$r\,(\%) = 100 \times \left|\frac{V_t}{V_0} - 1\right| \tag{3.3}$$

r : çekme çözeltisi seyrelme oranı (%)
V_t : t zamanındaki çekme çözeltisi hacmi (L)
V_0 : başlangıçtaki çekme çözeltisi hacmi (L)

3.6.3. İO Membranının Temizleme Yöntemi

Çalışmamızda İO membranını temizlemek için osmotik geri yıkama 'osmotic backwashing' yöntemi seçilmiştir. Her 24 saatlik işletim sürecinde, 23 saat işletim ve 1 saat temizleme prosedürü uygulanmıştır. Bu prosedürde ilk olarak membran modülünün yüzeyinde biriken çamur sıyırılmış ve reaktöre geri boşaltılmıştır. Bu işlem sonrasında membran, saf su ile geri

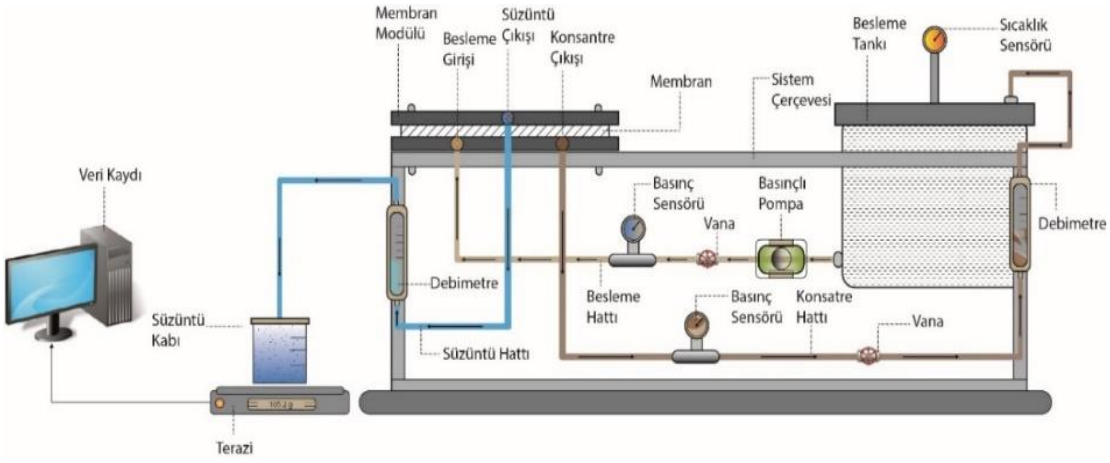
yıkanmış ve azot gazı geçirilmiştir. Son olarak membrana osmotik geri yıkama ‘osmotic back–washing’ uygulanmıştır. Membran, içerisinde ÇÇ çözeltisi bulunan bir kaba daldırılmış ve 30 dak. süre ile modül içerisinden saf su sirküle edilmiştir. Bu işlemi takiben membrandan yetkin yüzeyi tekrar saf su ile yıkanmış ve reaktöre geri takılmıştır.

3.7. İLERİ ARITMA ÇALIŞMALARI

AnOMBR sisteminin işletim süresince elde edilen kompozit üst faz ve SÇÇ çıkışları ile UF, NF ve TO membranları kullanılarak çapraz akışlı membran sisteminde ileri arıtma çalışmaları yürütülmüştür.

3.7.1. Deney Düzeneği

Çalışmada kullanılan çapraz akışlı membran sistemi deney düzeneği, OSMO firmasından temin edilmiş olup MF, UF, NF ve TO proseslerinin ayrı ayrı uygulanabildiği laboratuvar ölçekli bir membran sistemidir . Yüksek basınç pompası, membran hücresi, membrana girişte ve çıkışta olmak üzere iki adet manometre, süzüntü ve konsantre miktarının ölçüldüğü iki adet debimetre, hidroakümülatör, soğutma sistemi ve besleme tankı ünitelerinden meydana gelmektedir. Sistem 64 bara kadar basınç altında çalışabilmektedir. Membran hücresinin üst ve alt kapağının uzunluk, genişlik ve yüksekliği sırasıyla, 250×98×24 mm ve 224×98×18 mm’dir. Membranın konulduğu kısmın boyutları ise 224×59.8×20 mm’dir. Sistemde kullanılan plaka tipi membranların uzunluğu 200 mm, genişliği 40 mm olup, etkili membran alanı 80 cm^2’dir. Çapraz akışlı membran sistemine ait şematik Şekil 3.8’de gösterilmektedir.



Şekil 3.8: Çapraz akışlı membran sisteminin şematik gösterimi.

TO, NF ve UF çalışmaları, 25℃ sıcaklıkta ve 3 L/dak. Çapraz akış hızında gerçekleşmiştir. TO, NF ve UF deneylerinde sırasıyla 40, 30 ve 6 basınç değerleri kullanılmıştır. Her bir çalışmada 5 L besleme çözeltisi kullanılmıştır. Hacim azalma faktörü (VRF); 1, 2, 3 ve 4 değerlerinde süzüntülerden numune alınmış ve gerekli analizler yapılmıştır.

3.7.2. İleri Arıtma Çalışmalarında Kullanılan Membranların Karakteristiği

İleri arıtma çalışmalarında kullanılan plaka tipi ticari membranların özellikleri Tablo 3.6'da verilmiştir. Kullanılan membranlardan FM UP005 membranı Microdyn-Nadir GmbH'dan, Desal 5DL membranı GE–Osmonics'ten ve BW 30 membranı Dow–FilmTech'ten temin edilmiştir.

Tablo 3.6: Çapraz akışlı çalışmalarda kullanılan membranların teknik özellikleri.

	FM UP005 (UF)	Desal 5DL (NF)	BW 30 (TO)
Membran malzemesi	Hidrofilik polietersülfon	İnce Film Kompozit (TFC) Aktif Tabaka: Poliamid Destek Tabaka: Polisülfon	İnce Film Kompozit (TFC) Aktif Tabaka: Poliamid Destek tabaka: Polisülfon
Saf su akısı	> 30 L/m^2·saat	65 L/m^2·saat	4 L/m^2·saat
MWCO	5.0 kDa	150–300 Da	98 Da
pH aralığı	0–14	2–11	2–11
Maks. Sıcaklık	95 ^{0}C	90^{0}C	45^{0}C
Maks. işletme basıncı	-	40 Bar	41 bar
Giderme verimi (%)	92–97 (Dekstran T10 (% 1))	96 ($MgSO_4$)	99.7 (NaCl) 99.5 ($CaCl_2$)
	*Test şartları: 6 bar, 25 ^{0}C.	*Test şartları: 30 bar, 25 ^{0}C.	*Test şartları: 40 bar, 25 ^{0}C.

3.7.3. Çapraz Akışlı Sistemlerde Kullanılan Hesaplamalar

Süzüntü akısının belirlenmesi için bilgisayara bağlı terazi ile süzüntü miktarı 1 dak. aralıklarla ağırlık cinsinden ölçülmüştür. Dakikada bir alınan tartım sonucu bir yazılım programı (Sarto) ile otomatik olarak bilgisayara gönderilmiştir. Bilgisayarda toplanan veriler gr/dak. cinsinden olup, deney sonunda elde edilen tüm değerler 'excel' programında düzenlenmiştir. Bu düzenleme ile akı, L/m²·saat birimine dönüştürülmüştür. Akı, suyun yoğunluğu 1000 kg/m^3 ve membran alanı 0.008 m^2 alınarak aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$J\left(\frac{L}{m^2 \times saat}\right) = \frac{g/dak. \times 0.001 L/dak. \times 60 dak./saat}{0.008\ m^2} \quad (3.4)$$

Konsantrasyon modunda gerçekleştirilen deneylerde süzüntü akımı sürekli olarak ayrı bir kapta toplandığı için, besleme çözeltisi hacmi deney süresince azalmıştır. Bu durum da akıda sürekli

bir azalma ve ayırma performansında azalma veya artmaya neden olabilmektedir. Bu sebeple deneyler VRF değerine bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. VRF değeri aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır (Kaya, 2007).

$$VRF = \frac{V_f}{V_r} \tag{3.5}$$

V_f : Başlangıçtaki besleme hacmi (L)
V_r : Filtrasyon sırasındaki konsentrat hacmi (L)

Atıksuda yer alan kirletici maddelerin giderim verimleri deney sonunda elde edilen kompozit süzüntü numunesindeki kirletici madde konsantrasyonu (C_s) ve besleme çözeltisindeki kirletici madde konsantrasyonu (C_b) esas alınarak aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır (Kaya, 2007).

$$R\,(\%) = \left(1 - \frac{C_S}{C_b}\right) \times 100 \tag{3.6}$$

3.8. SIVI GÜBRE UYGULAMASI VE ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

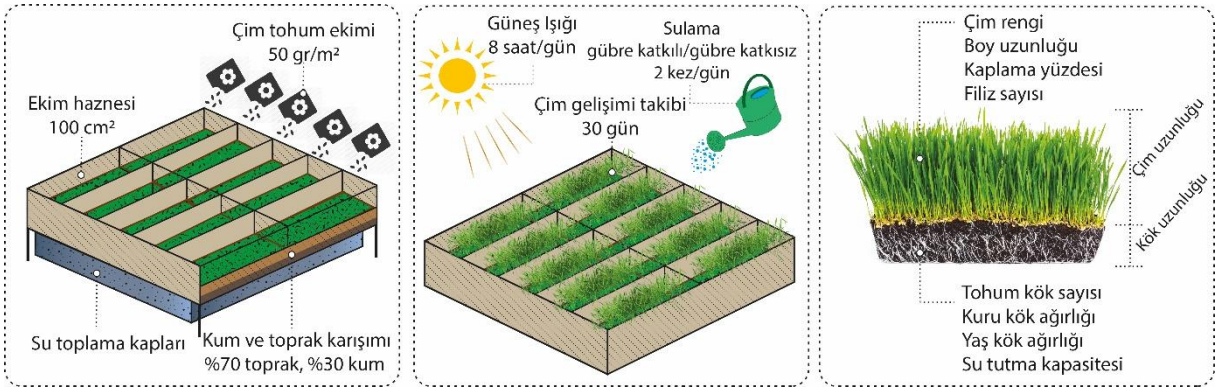
3.8.1. Sıvı Gübre Uygulaması Düzeneği

Sıvı gübre uygulamasının gerçekleştiği düzenek sıcaklığın 23–25°C'de sabit tutulduğu bir konteynırda kurulmuştur. Sıvı gübre uygulamasında ahşap üzeri plastik kaplamalı saksı düzeneği kurularak aynı anda 30 farklı denemeyi yürütebilecek hazneler yapılmıştır. Her bir deneme için kurulan haznenin boyutları 25×20 cm'dir ve her bir hazne 0.01 m^3 hacmindedir. Her bir haznenin tabanına küçük delikler açılarak topraktan süzülen suyun çıkışı tek bir noktada toplanmıştır. Toprağın su tutma kapasitesini belirlemek amacıyla düzeneğin alt kısmına su biriktirme kapları yerleştirilmiştir. Şekil 3.9'da kurulan düzeneğe ait gösterim yer almaktadır.



Şekil 3.9: Sıvı gübre uygulaması düzeneği.

Her bir hazneye yerleştirilen toprak 20 cm yüksekliğindedir. Hazne içerisindeki toprak bir silindir ile sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan toprak üzerine 1.25 gr çim tohumu serpilmiştir. Çim tohumu ekimini takiben her bir hazneye 1 cm yükseliğinde toprak eklenmiştir. Her bir hazneye ilgili stok su kaplarından can suyu verilmiştir. Suyun, haznenin tüm alanına yayılmasına özen gösterilmiştir. Sabah ve akşam olmak üzere günde 2 kez sulama işlemi gerçekleştirilmiştir, Günlük toplam sulama miktarı her bir hazne için 0.56 L'dir. Gün ışığının her bir hazneye eşit dağılımı için günde 8 saat ışıklandırma ile gün ışığı sağlanmıştır. 30 günlük deney süresince toprağın su tutma kapasitesi ve çim tohumlarının ilk filizlenme süresi ve boy uzunlukları takip edilmiştir. 30 gün sonunda ise toprağın toplam su tutma kapasitesi, çim boy uzunluğu, çim kök boy uzunluğu, çim rengi, çimlenme alanı kaplama yüzdesi, bir kökten elde edilen filiz sayısı, her bir tohumdan elde edilen kök sayısı, kuru kök ağırlığı ve yaş kök ağırlığı değerlendirilmiştir. Kurulan düzeneğe ait şematik gösterim Şekil 3.10'da gösterilmektedir.



Şekil 3.10: Sıvı gübre uygulamasına ait şematik gösterimi.

3.8.2. Toprak Karakterizasyonu

Çalışmada, Sarıkaya Ltd. firmasından temin edilen torf bitki toprağı kullanılmıştır ve teknik özellikleri Tablo 3.7'de verilmiştir. Eren İnşaat Ltd. firmasından temin edilen kum ile toprağın su tutma kapasitesinin arttırılması hedeflenmiştir. Toprak ve kum sırasıyla %70 ve %30 oranlarında homojen olarak karıştırılmış ve haznelere bu karışımından 10 L yerleştirilmiştir.

Tablo 3.7: Sıvı gübre uygulamasından kullanılan toprağın teknik özellikleri.

Parametre	Değer Aralığı
pH	5.5 – 6.0
İletkenlik	1000 – 1200 mS/cm
NO_3–N	40 – 50 mg/L
Fosfor (P)	15 – 20 mg/L
Potasyum (K)	70 – 100 mg/L
Kalsiyum (Ca)	40 – 60 mg/L
Magnezyum (Mg)	20 – 25 mg/L

3.8.3. Çim Tohumu Karakterizasyonu

Çalışmada kullanılan çim tohumları Genta Tarım A.Ş. firmasından temin edilmiştir. Çim tohumunun tavsiye edilen ekim miktarı 1 kg/40 m^2'dir. Her bir hazne için toplam 1.25 gr/0.05 m^2 oranında çim kullanılmıştır. Çim tohumuna ait teknik özellikler Tablo 3.8'de verilmiştir.

Tablo 3.8: Çim tohumunun teknik özellikleri.



Çim Tohumu Karışımı	
Karışımın Yüzdesi	**Tür**
% 25	Lollum perenne NERUDA (İngiliz çimi)
% 20	Lollum perenne GREENWAY (İngiliz çimi)
% 20	Festuca rubra MYSTIC (kırmızı yumak)
% 20	Festuca rubra BELLAIRE (kırmızı yumak)
% 10	Festuca rubra trichophylla GREENLIGHT (narin kırmızı yumak)
% 5	Poa pratensis GREENPLAY (çayır salkım otu)

3.8.4. Sıvı Gübre Uygulamasında Kullanılan Gübre Numuneleri

Uzun süreli AnOMBR işletiminde HCOONa ve $CaCl_2$ ile yapılan çalışmalar sonucu elde edilen SÇÇ çıkışları, tarımsal sulama standartlarına uygun şekilde çeşme suyu kullanılarak 5 kat ve 11 kat olarak seyreltilmiş ve sıvı gübre olarak kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan ticari azot gübresi 'Markka Genetik Kimya' firmasından, ticari fosfor ve potasyum gübreleri ise 'BIGCHEM' firmasından temin edilmiştir. Ticari gübrelere ait teknik özellikler Tablo 3.9'da verilmiştir. Deneylerde kullanılan ticari gübreler 3 g/L konsantrasyonda hazırlanmıştır.

Tablo 3.9: Sıvı gübre uygulamasından kullanılan ticari gübrelerin teknik özellikleri.

	Fosfor Gübresi	**Potasyum Gübresi**	**Azot Gübresi**
	11.40.07+2.5 Zn	**10.05.40+TE**	**25.0.0.**
TN, mg/L	330.00	300.00	750.00
Fosfor Pentaoksit, P_2O_5 mg/L	1200.00	150.00	-
Potasyum Oksit, K_2O, mg/L	210.00	1200.00	-
Bor (B), mg/L	0.60	0.60	-
Demir (Fe), mg/L	1.20	1.20	12.00
Mangan (Mn), mg/L	1.20	1.20	9.00
Molibden (Mo), mg/L	0.06	0.06	-
Çinko (Zn),mg/L	75.00	1.20	6.00
Bakır (Cu), mg/L	-	-	3.00

3.8.5. Sıvı Gübre Uygulaması Düzeneğinin İşletimi

3.8.5. Sıvı Gübre Uygulamasına Ait Deneysel Ölçüm Yöntemleri

3.8.5.1. Çim sayısı ve kaplama yüzdesi (adet/cm^2)

20×25 cm boyutlarında hazırlanan tahta haznelerin 85 cm^2 alanı içinden alınan numunelerdeki bitki sürgünleri sayılarak değerlendirme yapılmıştır. 500 cm^2'de sürgün sayısı 100'den az ise *zayıf*", 100-200 arasında ise "*orta*" ve 200 sürgünden fazla ise "*sık*" olarak ifade edilmiştir (Beard, 1973; Avcıoglu, 1997). 85 cm^2 alan içerisinden alınan 2 örnek numunede sayım yapılmış ve toplam hazne boyutu ile orantılanarak çim kaplama yüzdesi belirlenmiştir.

3.8.5.2. Çim ve kök boy uzunlukları (cm)

Çim biçim döneminde her hazneden 85 cm^2 alanından 2 adet örnek alınmıştır. Bu bitkilerde ana sap yukarı kaldırılarak toprak seviyesinden en uçtaki parçaya kadar olan mesafe cm olarak ölçülmüş ve ardından 2 haznedeki çim ve kök boylarının ortalaması alınarak ortalama bitki boyu hesaplanmıştır (Sills ve diğ., 1983; Mehall ve diğ., 1983).

3.8.5.3. Bitki su tutma kapasitesi oranı, kuru ve yaş madde ağırlığı (%)

Çim biçimi sonrasında elde edilen çim örneklerinin yaş ağırlıkları ölçülmüştür. Daha sonra örnekler 105℃ sıcaklıkta 48 saat etüvde bekletildikten sonra kuru ağırlıkları belirlenmiştir. Kuru ve yaş ağırlıkların birbirine oranlanmasıyla kuru madde (bitki su tutma kapasitesi) oranları % olarak hesaplanmıştır (Bulgurlu ve diğ., 1978). Şekil 3.11'de çim örnekleri gösterilmiştir.



Şekil 3.11: Çim örnekleri a) etüv yerleşimi b) numune görüntüsü c) numune kapları.

3.8.5.4. Çim renginin ölçülmesi

Bitkilerin yaprak renklerinin görsel olarak belirlenmesi amacıyla, Nitrogen Parameters LCC firması'nın 6 panelli yaprak rengi çizelgesi kullanılarak renk parametresi belirlenmiştir (Wehner ve diğ. (1989), Goatley ve diğ. (1994), Oral ve Açıkgöz, (2001)). Renk çizelgesinde, 1: Sarı ve 6: Koyu yeşil olacak şekilde değerlendirilmiştir (1= Açık sarı, 2= Sarı, 3= Açık yeşil, 4= Yeşil, 5= Koyu yeşil, 6= Çok koyu yeşil).

3.8.5.5. Çim kardeş filiz ve kök saçağı sayısı

Kardeş sayısını tespit etmek amacıyla 30 gün sonunda 85 cm^2 alandan alınan 2 adet örnek bitki kökleriyle birlikte çıkartılmıştır (Şekil 3.12). Daha sonra bu toprak parçası üzerindeki kök saçaklarının ve çim filizlerinin eş kardeş sayıları belirlenmiştir (Yazgan, 1991).



Şekil 3.12: Sıvı gübre uygulaması numune örnekleri.

3.9. İSTATİKSEL ANALİZ YÖNTEMİ

3.9.1. Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP)

Analitik hiyerarşi prosesi, karar alternatiflerinin çoklu kriterlere göre sıralanmasına ve seçim yapılmasına yarayan nicel bir yöntemdir. Bir başka tanım ile her bir karar alternatifini, karar vericinin kriterlerini yakalama derecesine göre sıralamak için rakamsal değerler geliştirme sürecidir. AHP prosesinde normalize edilmiş her bir değer katsayısı için matris kurularak, kurulan matriste yer alan, her bir birim değere ağırlık katsayısı (önem seviyesi) verilmektedir. Ağırlık katsayısı bu çalışmada elde edilen her bir birim değerin (parametrenin) önemini ifade etmektedir. Tablo 3.10'da seçimi yapılan birim değerlerin karşılık gelen ağırlık katsayılarının seçim skalası verilmiştir (Saaty, 2008).

Tablo 3.10: Saaty yöntemine göre AHP ölçeği (Saaty, 2008).

Önem Derecesi	Açıklama
1	Eşit önem derecesi
2	Düşük önem derecesi
3	Orta önem derecesi
4	Orta üstü önem derecesi
5	Yüksek önem derecesi
6	Yüksek üstü önem derecesi
7	Çok yüksek önem derecesi
8	Çok yüksek üstü önem derecesi
9	En yüksek önem derecesi

Ağırlık katsayıları birim verilerin her biri için seçilir. Bu değerlere ait değişken katsayı değerleri matris kurularak hesaplanır. Tablo 3.11'de örnek V_1, V_2 değerleri için kurulan matriste ağırlık katsayıları sırasıyla 2 ve 6 olarak belirlenmiştir.

Tablo 3.11: Saaty yöntemine göre matris hesabı (Saaty, 2008).

	V_1	V_2	
V_1	1	0.33	V_1
V_2	3	1	V_2
	V_1	V_2	
Ağırlık Katsayısı	**2**	**6**	

*Ağırlık katsayısı çalışmamızda önem derecesi olarak ifade edilmektedir.

Kurulan matriste elde edilen verileri tüm değerlendirmede yer alan birim değerler ile kıyaslamak amacıyla matriste yer alan her birim değer, bağlı bulunduğu birim değer kümesinin toplamına bölünmesi ile normalize edilmiş birim katsayıları elde edilmektedir.

Tablo 3.12'de matris hesabında kullanılan V_1 ve V_2 veri örnekleri üzerinden normalizasyon hesabı verilmiştir.

Tablo 3.12: Saaty yöntemine göre normalizasyon (Saaty, 2008).

V_1	V_2
0.25	0.25
0.75	0.75

Elde dilen normalize edilmiş ağırlık katsayıları birim çalışma verilerinde değişken parametre değerlerine göre tek bir katsayı ifade etmesi gereklidir. Her bir normalize edilmiş ağırlık katsayısına denk gelen birim öz vektörünü belirlemek amacıyla birim veri katsayılarının geometrik ortalaması hesaplanır.

Aşağıdaki geometrik ortalama formülasyonu verilmektedir.

$$x\ (birim\ değer\ geometrik\ ortalaması) = \sqrt[n]{V_1 + V_2 + V_3 + \cdots . + V_n} \tag{3.7}$$

Yapılan hesaplamaların neticesinde ağırlıklı katsayıların normalize edilmiş tüm birim değerleri ortak kümede kıyaslanması için elde edilen öz vektör değerleri ile çarpılarak tüm katsayılar ortak kümede hesaplanır. Aşağıda yer alan formülasyonda ağırlıklı birim katsayı puanı hesabı verilmektedir.

$$Birim\ katsayı\ puanı\ = \frac{(X1*V_1^2+X2*V_2^2+X3*V_3^2 \ldots.+X8*V_8^2)}{(X1*V_1+X2*V_2+X3*\ V_3 \ldots.+X8*V_8)} \quad (3.8)$$

*X: her birim için hesaplanan öz vektör katsayısı

3.9.1.1. AHP'nin çalışmaya uyarlanması

Çalışma süresince AHP analizi; ÇÇ ön eleme çalışması, kesikli İO performans testleri ve sıvı gübre uygulaması sonuçlarının değerlendirilmesi aşamalarında kullanılmıştır. Yapılan 1. AHP analizinde, literatürde yer alan 29 farklı ÇÇ türü birbiri ile kıyaslanarak en iyi İO performansını, en düşük maliyet ve en düşük sarfiyatta sağlayan 7 farklı organik ve inorganik ÇÇ türü seçilmiştir. Yapılan 2. AHP analizi ile, seçilen 7 farklı ÇÇ tipi ve Deniz Suyunun İO membranı ile yürütülen kesikli performans testleri ve BMP çalışması sonuçlarında elde edilen verilerin birbirleri ile kıyaslanması sağlanmıştır. Bu sayede uzun süreli AnOMBR çalışmalarında kullanılacak en iyi organik ve inorganik ÇÇ tipi seçilmiştir. 3. AHP analizi, AnOMBR sistemi SÇÇ çıkışları ve diğer ticari gübre karışımları ile yapılan sıvı gübre uygulaması çalışmasında, en iyi sıvı gübre türünün belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Her bir AHP analizi için oluşturulan önem seviyeleri ve bu önem seviyelerine ait kurulan matris ve kriter grupları aşağıda 3 ana başlık altında verilmektedir.

3.9.1.2. ÇÇ ön eleme çalışması değerlendirme kriterleri

ÇÇ ön eleme çalışması kapsamında, 29 farklı ÇÇ türü arasında 4 ana parametre altında kıyaslama yapılmıştır. Tablo 3.13'te her bir parametreye ait ağırlık katsayıları verilmiştir.

Tablo 3.13: ÇÇ ön eleme çalışması parametrelerinin AHP'ye göre önem seviyeleri.

Kod	Parametre Açıklaması	Ağırlık Katsayısı	Açıklama
D1	Osmotik Basınç (bar) 1 M	**5**	Yüksek önem derecesi
D2	€/mol (Ton)	**7**	Çok yüksek önem derecesi
D3	İO Performansı - RSFS (J_w/J_s)	**9**	En yüksek önem derecesi
D4	Maksimum Çözünürlük (M)	**5**	Yüksek önem derecesi

ÇÇ'lerin maksimum çözünürlük ve osmotik basınç değerleri için ağırlık katsayısı 5 olarak belirlenmiştir. €/mol (Ton) parametresi her bir ÇÇ'nin tonajlı sipariş edilmesi durumunda 1 M için sarfedilen gram miktarın maliyetini ifade etmektedir. Maliyetin bu çalışmada 2. en önemli parametre olması nedeniyle ağırlık katsayı 7 olarak belirlenmiştir. Yapılan eleme çalışmasında en önemli kriterin İO performansı olması sebebiyle, önem derecesi bu parametre için 9 olarak belirlenmiştir. İO performansı değerlerlendirilirken her bir J_w ve J_s değerini ayrı gruplamak yerine RSFS değeri AHP analizinde kullanılmıştır. ÇÇ ön eleme çalışması değerleri ile kurulan

matriste, ağırlık katsayılarının taban ve tavan korelasyonları her bir parametre için hesaplanmıştır. Tablo 3.14'te her bir parametrenin matriste hesaplanan ağırlık katsayısı korelasyonları verilmiştir.

Elde edilen katsayıların normalize edilmiş vektörleri Tablo 3.15'te verilmiştir. Bu vektörlerin geometrik ortalaması alınarak hesaplanan öz vektör değerleri Tablo 3.16'da gösterilmiştir. En yüksek ve en düşük AHP skoru elde edilen nihai öz vektör değerlerinin her bir parametre için kurulan matrislerden elde edilen öz vektörler ile orantılanması ile elde edilmiştir.

Tablo 3.14: ÇÇ ön eleme çalışması parametreleri ağırlık katsayıları korelasyonu.

	D1	D2	D3	D4	
D1	**1.00**	0.71	0.56	1.00	**D1**
D2	1.40	**1.00**	0.78	1.40	**D2**
D3	1.80	1.29	**1.00**	1.80	**D3**
D4	1.00	0.71	0.56	**1.00**	**D4**
Ağırlık Katsayısı	**D1**	**D2**	**D3**	**D4**	
	5	**7**	**9**	**5**	

Tablo 3.15: ÇÇ ön eleme çalışması parametreleri normalize edilmiş katsayıları.

D1	D2	D3	D4
0.1923	0.1923	0.1923	0.1923
0.2692	0.2692	0.2692	0.2692
0.3462	0.3462	0.3462	0.3462
0.1923	0.1923	0.1923	0.1923

Tablo 3.16: ÇÇ ön eleme çalışması parametreleri öz vektörleri.

Kod	D1	D2	D3	D4
Öz Vektör	0.1923	0.2692	0.3462	0.1923

3.9.1.3. Kesikli İO performans çalışmaları ve BMP testi değerlendirme kriterleri

Kesikli performans testlerinin değerlendirilmesi için belirlenen önem seviyeleri Tablo 3.17'de yer almaktadır. ÇÇ'lerin maliyeti, İO performansı ve BMP testi sonuçlarının her bir alt grubu için belirlenen spesifik bir önem seviyesi bulunmaktadır.

Tablo 3.17: Kesikli performans testi parametrelerinin AHP'ye göre önem seviyeleri.

Kod	Parametre Açıklaması	Ağırlık Katsayısı	Açıklama
P_1	Kullanılan Konsantrasyon (M)	**5**	Yüksek önem derecesi
P_2	Çalışmada Kullanılan (g/L)	**6**	Yüksek üstü önem derecesi
P_3	Maliyet (Euro/L)	**8**	Çok yüksek üstü önem derecesi
P_4–P_{17}	İletkenlik (mS/cm): 0.1–3 M	**4**	Orta üstü önem derecesi
P_{18}	S_h-J_w (L/m²·saat) – 30 bar	**8**	Çok yüksek önem derecesi
P_{19}	S_h-J_s (g/m²·saat) – 30 bar	**7**	Çok yüksek üstü önem derecesi
P_{20}	S_d-J_w (L/m²·saat) – 30 bar	**7**	Çok yüksek önem derecesi
P_{21}	S_d-J_s (g/m²·saat) – 30 bar	**8**	Çok yüksek üstü önem derecesi
P_{22}	G_h-J_w (L/m²·saat) – 30 bar	**8**	Çok yüksek önem derecesi
P_{23}	G_h-J_s (g/m²·saat) – 30 bar	**7**	Çok yüksek üstü önem derecesi
P_{24}	G_d-J_w (L/m²·saat) – 30 bar	**7**	Çok yüksek önem derecesi
P_{25}	G_d-J_s (g/m²·saat) – 30 bar	**8**	Çok yüksek üstü önem derecesi
P_{26}	G_d-J_w (L/m²·saat) – 0.1 M	**7**	Çok yüksek önem derecesi
P_{27}	G_d-J_s (g/m²·saat) – 0.1 M	**8**	Çok yüksek üstü önem derecesi
P_{28}	G_d-J_w (L/m²·saat) – 0.3 M	**7**	Çok yüksek önem derecesi
P_{29}	G_d-J_s (g/m²·saat) – 0.3 M	**8**	Çok yüksek üstü önem derecesi
P_{30}	G_d-J_w (L/m²·saat) – 0.5 M	**7**	Çok yüksek önem derecesi
P_{31}	G_d-J_s (g/m²·saat) – 0.5 M	**8**	Çok yüksek üstü önem derecesi
P_{32}	G_d-J_w (L/m²·saat) – 0.7 M	**7**	Çok yüksek önem derecesi
P_{33}	G_d-J_s (g/m²·saat) – 0.7 M	**8**	Çok yüksek üstü önem derecesi
P_{34}	G_d-J_w (L/m²·saat) – 1 M	**7**	Çok yüksek önem derecesi
P_{35}	G_d-J_s (g/m²·saat) – 1 M	**8**	Çok yüksek üstü önem derecesi
P_{36}	G_d-J_w (L/m²·saat) – 2 M	**7**	Çok yüksek önem derecesi
P_{37}	G_d-J_s (g/m²·saat) – 2 M	**8**	Çok yüksek üstü önem derecesi
P_{38}	G_d-J_w (L/m²·saat) – 1 M/25 °C	**7**	Çok yüksek önem derecesi
P_{39}	G_d-J_s (g/m²·saat) – 1 M/25 °C	**8**	Çok yüksek üstü önem derecesi
P_{40}	G_d-J_w (L/m²·saat) – 1 M/35 °C	**7**	Çok yüksek önem derecesi
P_{41}	G_d-J_s (g/m²·saat) – 1 M/35 °C	**8**	Çok yüksek üstü önem derecesi
P_{42}	Üretilen CH_4 (mL) - 1260 mg$CaCO_3$/L	**7**	Çok yüksek önem derecesi
P_{43}	Üretilen CH_4 (mL) - 2500 mg$CaCO_3$/L	**8**	Çok yüksek üstü önem derecesi
P_{44}	Üretilen CH_4 (mL) - 4000 mg$CaCO_3$/L	**9**	En yüksek önem derecesi
P_{45}	Üretilen CH_4 (mL) – 0.1 M	**4**	Orta üstü önem derecesi
P_{46}	Üretilen CH_4 (mL) – 0.3 M	**5**	Yüksek önem derecesi
P_{47}	Üretilen CH_4 (mL) – 0.5 M	**6**	Yüksek üstü önem derecesi
P_{48}	Üretilen CH_4 (mL) – 0.7 M	**7**	Çok yüksek önem derecesi
P_{49}	Üretilen CH_4 (mL) – 1 M	**8**	Çok yüksek üstü önem derecesi
P_{50}	Üretilen CH_4 (mL) – 2 M	**9**	En yüksek önem derecesi

Birim maliyetin ve üretilen CH_4 miktarının, anaerobik koşullarda yapılacak bir işletme ve sistem yatırım maliyeti açısından önemli olduğundan ağırlık katsayısı 9 olarak belirlenmiştir. İO performansında dahili çalışmalarda ters tuz akımının anaerobik ortama inhibe edici etkisinden dolayı J_s değerlerinin önem derecesi 8 ve J_w değerleri önem derecesi 7 olarak belirlenmiştir. Harici çalışmalarda ise J_w için 8 ve J_s için 7 olarak belirlenmiştir. Üretilen CH_4

miktarı ve KOİ giderim verimlerinin önem derecesi, farklı alkalinite değerlerinde (1260, 2500, 4000 mg$CaCO_3$/L) 7–9 aralığında, farklı ÇÇ konsantrasyonlarında (0.1–2 M) 4–9 aralığında belirlenmiştir. Tüm çalışma verilerinin değerleri ile kurulan matriste, ağırlık katsayılarının taban ve tavan korelasyonları her bir parametre için hesaplanmıştır. Tablo 3.18'de dahili İO sistemlerinde her bir parametrenin matriste hesaplanan ağırlık katsayısı korelasyonları ve Tablo 3.19'da elde edilen katsayıların normalize edilmiş vektörleri verilmiştir. Bu vektörlerin geometrik ortalaması alınarak hesaplanan öz vektör değerleri Tablo 3.20'de verilmiştir.

Tablo 3.18: Dahili İO sistemi çalışmaları ağırlık katsayıları korelasyonu.

	P20	P21	P24	P25	P26	P27	P28	P29	P30	P31	P32	P33	P34	P35	P36	P37	P38	P39	P40	P41	
P20	**1.00**	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	**P20**
P21	1.14	**1.00**	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	**P21**
P24	1.00	0.88	**1.00**	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	**P24**
P25	1.14	1.00	1.14	**1.00**	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	**P25**
P26	1.00	0.88	1.00	0.88	**1.00**	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	**P26**
P27	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	**1.00**	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	**P27**
P28	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	**1.00**	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	**P28**
P29	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	**1.00**	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	**P29**
P30	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	**1.00**	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	**P30**
P31	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	**1.00**	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	**P31**
P32	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	**1.00**	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	**P32**
P33	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	**1.00**	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	**P33**
P34	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	**1.00**	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	**P34**
P35	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	**1.00**	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	**P35**
P36	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	**1.00**	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	**P36**
P37	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	**1.00**	1.14	1.00	1.14	1.00	**P37**
P38	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	**1.00**	0.88	1.00	0.88	**P38**
P39	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	**1.00**	1.14	1.00	**P39**
P40	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	1.00	0.88	**1.00**	0.88	**P40**
P41	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	1.00	1.14	**1.00**	**P41**
Ağırlık Katsayısı	**P20**	**P21**	**P24**	**P25**	**P26**	**P27**	**P28**	**P29**	**P30**	**P31**	**P32**	**P33**	**P34**	**P35**	**P36**	**P37**	**P38**	**P39**	**P40**	**P41**	
	7.00	8.00	7.00	8.00	7.00	8.00	7.00	8.00	7.00	8.00	7.00	8.00	7.00	8.00	7.00	8.00	7.00	8.00	7.00	8.00	

Tablo 3.19: Dahili İO sistemi çalışmaları normalize edilmiş katsayıları.

P20	P21	P24	P25	P26	P27	P28	P29	P30	P31	P32	P33	P34	P35	P36	P37	P38	P39	P40	P41
0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046
0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053
0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046
0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053
0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046
0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053
0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046
0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053
0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046
0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053
0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046
0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053
0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046
0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053
0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046
0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053
0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046
0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053
0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046
0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053
0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046
0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053

Tablo 3.20: Dahili İO sistemi çalışmaları parametrelerin öz vektörleri.

Kod	P20	P21	P24	P25	P26	P27	P28	P29	P30	P31
Öz Vektör	0.046667	0.053333	0.046667	0.053333	0.046667	0.053333	0.046667	0.053333	0.046667	0.053333
Kod	**P32**	**P33**	**P34**	**P35**	**P36**	**P37**	**P38**	**P39**	**P40**	**P41**
Öz Vektör	0.046667	0.053333	0.046667	0.053333	0.046667	0.053333	0.046667	0.053333	0.046667	0.053333

Tablo 3.21'de harici İO sistemlerinde her bir parametrenin matriste hesaplanan ağırlık katsayısı korelasyonları ve Tablo 3.22'de elde edilen katsayıların normalize edilmiş vektörleri

verilmiştir. Bu vektörlerin geometrik ortalaması alınarak hesaplanan öz vektör değerleri Tablo 3.23'te verilmiştir.

Tablo 3.21: Harici İO sistemi çalışmaları ağırlık katsayıları korelasyonu.

	P18	P19	P22	P23	
P18	**1.00**	0.88	1.00	0.88	**P18**
P19	1.14	**1.00**	1.14	1.00	**P19**
P22	1.00	0.88	**1.00**	0.88	**P22**
P23	1.14	1.00	1.14	**1.00**	**P23**
Ağırlık Katsayısı	**P18**	**P19**	**P22**	**P23**	
	7	8	7	8	

Tablo 3.22: Harici İO sistemi çalışmaları normalize edilmiş katsayıları.

P18	P19	P22	P23
0.233333	0.233333	0.233333	0.233333
0.266667	0.266667	0.266667	0.266667
0.233333	0.233333	0.233333	0.233333
0.266667	0.266667	0.266667	0.266667

Tablo 3.23: Harici İO sistemi çalışmaları parametrelerin öz vektörleri.

Kod	P18	P19	P22	P23
Öz Vektör	0.233333	0.266667	0.233333	0.266667

Tablo 3.24'te BMP testlerinde CH_4 üretimlerinin her bir ÇÇ türü için matriste hesaplanan ağırlık katsayısı korelasyonları ve Tablo 3.25'te elde edilen katsayıların normalize edilmiş vektörleri verilmiştir. Bu vektörlerin geometrik ortalaması alınarak hesaplanan öz vektör değerleri Tablo 3.26'da verilmiştir.

Tablo 3.24: BMP testi CH_4 üretimlerinin ağırlık katsayıları korelasyonu.

	P42	P43	P44	P45	P46	P47	P48	P49	P50	
P42	**1.00**	0.88	0.78	1.75	1.40	1.17	1.00	0.88	0.78	**P42**
P43	1.14	**1.00**	0.89	2.00	1.60	1.33	1.14	1.00	0.89	**P43**
P44	1.29	1.13	**1.00**	2.25	1.80	1.50	1.29	1.13	1.00	**P44**
P45	0.57	0.50	0.44	**1.00**	0.80	0.67	0.57	0.50	0.44	**P45**
P46	0.71	0.63	0.56	1.25	**1.00**	0.83	0.71	0.63	0.56	**P46**
P47	0.86	0.75	0.67	1.50	1.20	**1.00**	0.86	0.75	0.67	**P47**
P48	1.00	0.88	0.78	1.75	1.40	1.17	**1.00**	0.88	0.78	**P48**
P49	1.14	1.00	0.89	2.00	1.60	1.33	1.14	**1.00**	0.89	**P49**
P50	1.29	1.13	1.00	2.25	1.80	1.50	1.29	1.13	**1.00**	**P50**
Ağırlık Katsayısı	**P42**	**P43**	**P44**	**P45**	**P46**	**P47**	**P48**	**P49**	**P50**	
	7	8	9	4	5	6	7	8	9	

Tablo 3.25: BMP testi CH_4 üretimlerinin normalize edilmiş katsayıları.

P42	P43	P44	P45	P46	P47	P48	P49	P50
0.11111	0.11111	0.11111	0.11111	0.11111	0.11111	0.11111	0.11111	0.11111
0.12698	0.12698	0.12698	0.12698	0.12698	0.12698	0.12698	0.12698	0.12698
0.14286	0.14286	0.14286	0.14286	0.14286	0.14286	0.14286	0.14286	0.14286
0.06349	0.06349	0.06349	0.06349	0.06349	0.06349	0.06349	0.06349	0.06349
0.07937	0.07937	0.07937	0.07937	0.07937	0.07937	0.07937	0.07937	0.07937
0.09524	0.09524	0.09524	0.09524	0.09524	0.09524	0.09524	0.09524	0.09524
0.11111	0.11111	0.11111	0.11111	0.11111	0.11111	0.11111	0.11111	0.11111
0.12698	0.12698	0.12698	0.12698	0.12698	0.12698	0.12698	0.12698	0.12698
0.14286	0.14286	0.14286	0.14286	0.14286	0.14286	0.14286	0.14286	0.14286

Tablo 3.26: BMP testi CH_4 üretimlerinin öz vektörleri.

Kod	P42	P43	P44	P45	P46	P47	P48	P49	P50
Öz Vektör	0.111111	0.126984	0.142857	0.063492	0.079365	0.095238	0.111111	0.126984	0.142857

Tablo 3.27'de ÇÇ maliyeti ve iletkenlik değerlerinin her bir ÇÇ türü için matriste hesaplanan ağırlık katsayısı korelasyonları ve Tablo 3.28'de elde edilen katsayıların normalize edilmiş vektörleri verilmiştir. Bu vektörlerin geometrik ortalaması alınarak hesaplanan öz vektör değerleri Tablo 3.29'da verilmiştir.

Tablo 3.27: ÇÇ maliyeti ve iletkenlik değerlerinin ağırlık katsayıları korelasyonu.

	P3	P2	P1	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	
P3	**1.00**	0.83	0.63	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	**P3**
P2	1.20	**1.00**	0.75	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	**P2**
P1	1.60	1.33	**1.00**	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	**P1**
P4	0.80	0.67	0.50	**1.00**	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	**P4**
P5	0.80	0.67	0.50	1.00	**1.00**	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	**P5**
P6	0.80	0.67	0.50	1.00	1.00	**1.00**	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	**P6**
P7	0.80	0.67	0.50	1.00	1.00	1.00	**1.00**	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	**P7**
P8	0.80	0.67	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	**1.00**	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	**P8**
P9	0.80	0.67	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	**1.00**	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	**P9**
P10	0.80	0.67	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	**1.00**	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	**P10**
P11	0.80	0.67	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	**1.00**	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	**P11**
P12	0.80	0.67	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	**1.00**	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	**P12**
P13	0.80	0.67	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	**1.00**	1.00	1.00	1.00	1.00	**P13**
P14	0.80	0.67	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	**1.00**	1.00	1.00	1.00	**P14**
P15	0.80	0.67	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	**1.00**	1.00	1.00	**P15**
P16	0.80	0.67	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	**1.00**	1.00	**P16**
P17	0.80	0.67	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	**1.00**	**P17**
Ağırlık Katsayısı	**P1**	**P2**	**P3**	**P4**	**P5**	**P6**	**P7**	**P8**	**P9**	**P10**	**P11**	**P12**	**P13**	**P14**	**P15**	**P16**	**P17**	
	5	6	8	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	

Tablo 3.28: ÇÇ maliyeti ve iletkenlik değerlerinin normalize edilmiş katsayıları.

P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17
0.06667	0.06667	0.06667	0.06667	0.06667	0.06667	0.06667	0.06667	0.06667	0.06667	0.06667	0.06667	0.06667	0.06667	0.06667	0.06667	0.06667
0.08000	0.08000	0.08000	0.08000	0.08000	0.08000	0.08000	0.08000	0.08000	0.08000	0.08000	0.08000	0.08000	0.08000	0.08000	0.08000	0.08000
0.10667	0.10667	0.10667	0.10667	0.10667	0.10667	0.10667	0.10667	0.10667	0.10667	0.10667	0.10667	0.10667	0.10667	0.10667	0.10667	0.10667
0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333
0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333
0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333
0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333
0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333
0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333
0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333
0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333
0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333
0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333
0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333
0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333
0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333
0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333
0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333	0.05333

Tablo 3.29: ÇÇ maliyeti ve iletkenlik değerlerinin öz vektörleri.

Kod	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17
Öz Vektör	0.0666	0.08	0.1066	0.0533	0.0533	0.0533	0.0533	0.0533	0.0533	0.0533	0.0533	0.0533	0.0533	0.0533	0.0533	0.0533	0.0533

Tablo 3.30'da tüm parametrelerin genel değerlendirme (toplam AHP skoru) için hesaplanmış ağırlık katsayısı korelasyonları ve Tablo 3.31'de elde edilen katsayıların normalize edilmiş

vektörleri verilmektedir. Bu vektörlerin geometrik ortalaması alınarak hesaplanan öz vektör değerleri Tablo 3.32'de verilmiştir.

Tablo 3.30: Genel değerlendirme kriterleri ağırlık katsayıları korelasyonu**.**

	Spesifik Maliyet	İO Performansı	Anaerobik Performans	
A1 - ÇÇ Maliyeti	**1.00**	1.29	1.13	A1 - ÇÇ Maliyeti
A2 - İO Performansı	0.78	**1.00**	0.88	A2 - İO Performansı
A3 - Anaerobik Performansı	0.89	1.14	**1.00**	A3 - Anaerobik Performansı
Ağırlık Katsayısı	ÇÇ Maliyeti	İO Performansı	Anaerobik Performansı	
	9	7	8	

Tablo 3.31: Genel değerlendirme kriterleri normalize edilmiş katsayıları.

ÇÇ Maliyeti	İO Performansı	Anaerobik Performans
0.375	0.375	0.375
0.291	0.291	0.291
0.333	0.333	0.333

Tablo 3.32: Genel değerlendirme kriterleri öz vektörleri.

Kod	ÇÇ Maliyeti	İO Performansı	Anaerobik Performans
Öz Vektör	0.375	0.291667	0.333333

3.9.1.4. Sıvı Gübre uygulaması değerlendirme kriterleri

30 günlük deney sonucunda elde edilen 24 farklı sıvı gübre türüne ait 10 farklı ölçüm sonucu AHP analizi ile kıyaslanmıştır. Tablo 3.33'te her bir parametrenin AHP analizindeki önem seviyesi yer almaktadır.

Tablo 3.33: Sıvı gübre uygulaması parametrelerinin AHP'ye göre önem seviyeleri.

Kod	Parametre Açıklaması	Ağırlık Katsayısı	Açıklama
a1	Çim Boyu, cm	**6**	Yüksek üstü önem derecesi
a2	Kök Boyu, cm	**6**	Yüksek üstü önem derecesi
a3	Kök Saçak Sayısı	**8**	Çok yüksek önem derecesi
a4	Filiz Sayısı	**8**	Çok yüksek önem derecesi
a5	Kuru Kök Ağırlığı, g	**5**	Yüksek önem derecesi
a6	Yaş Kök Ağırlığı, g	**5**	Yüksek önem derecesi
a7	Bitki Su Tutma Oranı, %	**7**	Çok yüksek üstü önem derecesi
a8	Toprak Su Tutma Oranı, %	**7**	Çok yüksek üstü önem derecesi
a9	Kaplama Yüzdesi, %	**9**	En yüksek önem derecesi
a10	Çim Rengi, ch	**9**	En yüksek önem derecesi

Çim uygulamasında en önemli kalite parametreleri kaplama yüzdesi (%) ve çim rengidir. Bu iki parametre diğer ölçülen parametrelerinin bir sonucu niteliğinde olması nedeniyle en yüksek ağırlık katsayısı olarak 9 seçilmiştir. 2. en önemli parametre, bir kökün verdiği saçak sayısı ve bir kökten çıkan filiz sayısıdır. Kök saçak sayısının fazla oluşu bitkinin kök ağırlığını, boy

uzunluğunu ve su tutma kapasitesini doğrudan etkilerken, filiz sayısı çim rengi, çim boyu ve bitki su tutma oranı ile doğrudan ilişkilidir. Bu parametreler için ağırlık katsayısı 8 olarak belirlenmiştir. Diğer parametrelerden bitki su tutma oranları (%) ve toprak su tutma oranları (%) için 7, çim ve kök boyu uzunlunlukları (cm) için 6 ve kuru ve yaş kök ağırlıkları (g) için 5 ağırlık katsayısı değerleri verilmiştir. Tablo 3.34'te her bir parametrenin matriste hesaplanan ağırlık katsayısı korelasyonları verilmiştir.

Tablo 3.34: Sıvı gübre uygulaması ağırlık katsayıları korelasyonu.

	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	
a1	**1.00**	1.00	0.75	0.75	1.20	1.20	0.86	0.86	0.67	0.67	**a1**
a2	1.00	**1.00**	0.75	0.75	1.20	1.20	0.86	0.86	0.67	0.67	**a2**
a3	1.33	1.33	**1.00**	1.00	1.60	1.60	1.14	1.14	0.89	0.89	**a3**
a4	1.33	1.33	1.00	**1.00**	1.60	1.60	1.14	1.14	0.89	0.89	**a4**
a5	0.83	0.83	0.63	0.63	**1.00**	1.00	0.71	0.71	0.56	0.56	**a5**
a6	0.83	0.83	0.63	0.63	1.00	**1.00**	0.71	0.71	0.56	0.56	**a6**
a7	1.17	1.17	0.88	0.88	1.40	1.40	**1.00**	1.00	0.78	0.78	**a7**
a8	1.17	1.17	0.88	0.88	1.40	1.40	1.00	**1.00**	0.78	0.78	**a8**
a9	1.50	1.50	1.13	1.13	1.80	1.80	1.29	1.29	**1.00**	1.00	**a9**
a10	1.50	1.50	1.13	1.13	1.80	1.80	1.29	1.29	1.00	**1.00**	**a10**
Ağırlık Katsayısı	**a1**	**a2**	**a3**	**a4**	**a5**	**a6**	**a7**	**a8**	**a9**	**a10**	
	6	**6**	**8**	**8**	**5**	**5**	**7**	**7**	**9**	**9**	

Her bir parametre için elde edilen katsayıların normalize edilmiş vektörleri Tablo 3.35'te verilmektedir. Bu vektörlerin geometrik ortalaması alınarak hesaplanan öz vektör değerleri Tablo 3.36'da verilmiştir.

Tablo 3.35: Sıvı gübre uygulaması normalize edilmiş katsayıları.

a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10
0.0857	0.0857	0.0857	0.0857	0.0857	0.0857	0.0857	0.0857	0.0857	0.0857
0.0857	0.0857	0.0857	0.0857	0.0857	0.0857	0.0857	0.0857	0.0857	0.0857
0.1143	0.1143	0.1143	0.1143	0.1143	0.1143	0.1143	0.1143	0.1143	0.1143
0.1143	0.1143	0.1143	0.1143	0.1143	0.1143	0.1143	0.1143	0.1143	0.1143
0.0714	0.0714	0.0714	0.0714	0.0714	0.0714	0.0714	0.0714	0.0714	0.0714
0.0714	0.0714	0.0714	0.0714	0.0714	0.0714	0.0714	0.0714	0.0714	0.0714
0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000
0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000
0.1286	0.1286	0.1286	0.1286	0.1286	0.1286	0.1286	0.1286	0.1286	0.1286
0.1286	0.1286	0.1286	0.1286	0.1286	0.1286	0.1286	0.1286	0.1286	0.1286

Tablo 3.36: Sıvı gübre uygulaması öz vektörleri.

Kod	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10
Öz Vektör	0.0972	0.0972	0.0972	0.0972	0.0972	0.0972	0.0972	0.0972	0.0972	0.0972

3.10. DENEYSEL YÖNTEMLER

3.10.1. pH

pH ölçümleri, 4500–H^+ (APHA–AWWA–WEF, 1995)'de belirtilen standart yönteme göre Thermo Orion marka 3–Star modeli pH metre ile yapılmıştır.

3.10.2. İletkenlik

İletkenlik ölçümleri, 2510–B (APHA–AWWA–WEF, 1995)'de belirtilen standart yönteme göre ORION STAR marka iletkenlik ölçer cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

3.10.3. Toplam Sertlik

Toplam sertlik analizi, 2340 C (APHA–AWWA–WEF, 1995)'de belirtilen standart yönteme göre yapılmıştır.

3.10.4. Alkalinite

Alkalinite analizi, 2320–A (APHA–AWWA–WEF, 1995)'de belirtilen standart yönteme göre yapılmıştır.

3.10.5. Klorür

Klorür analizi, 4500–Cl^- –B (APHA–AWWA–WEF, 1995)'de belirtilen standart yönteme göre gerçekleştirilmiştir.

3.10.6. Askıda Katı Madde (AKM)

AKM analizi, 2540–A (APHA–AWWA–WEF, 1995)'de belirtilen standart yönteme göre yapılmıştır.

3.10.7. Uçucu Askıda Katı Madde (UAKM)

Uçucu askıda katı madde (UAKM) ölçümleri Standart Metot 2540–E (APHA, AWWA, WEF, 1998)'de belirtilen standart yönteme göre gerçekleştirilmiştir.

3.10.8. Sülfat

Sülfat ölçümü, 4500-SO_4^{2-} E (APHA–AWWA–WEF, 1995)'de belirtilen standart yönteme göre gerçekleştirilmiştir.

3.10.9. Nitrat Azotu (NO_3-N)

Nitrat tayini 1097130001 ürün numaralı 0,10–25 mg/L ölçüm aralığına sahip Merck kiti ile yapılmıştır.

3.10.10. Fekal Koliform

İstanbul Üniversitesi Veterinerlik Fakültesi Laboratuarlarında fekal koliform ölçümü 9221 E (APHA–AWWA–WEF, 1995) de belirtilen çoklu tüp fermantasyon tekniğine göre yapılmıştır. Fekal koliform miktarı, 100 mL'de en muhtemel sayı (EMS) olarak hesaplanmıştır.

3.10.11. Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ)

KOİ analizi, Merck marka kitler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçüm aralığı 25–1500 mg/L olan kitlere numune eklendikten sonra termoreaktörde 120 dak. boyunca kaynatma yapılmıştır. Kitler soğuduktan sonra 605 nm'de fotometre ile numunenin KOİ değeri belirlenmiştir.

3.10.12. Sodyum Adsorpsion Oranı (SAR)

Sodyum adsorpsiyon oranı, toprak bünyesindeki suda ve sulama suyunda sodyumun baskın iyon olduğu durumu göstermektedir. Yüksek sodyumlu durumlarda, toprak partikülleri birbirinden ayrılmaktadır. Böylelikle, su ve havanın toprak içine nüfuzu engellenmektedir. Sodyum oranı, sodyum adsorbsiyon oranı (SAR) (Konsantrasyonlar, meq/l cinsindendir.) ile gösterilmektedir. SAR, suyun sodyum (veya benzer alkaliler) açısından zararlılığının bir ölçüsü olarak kullanılmakta ve aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$\mathrm{SAR} = \frac{\mathrm{Na}}{\sqrt{\frac{\mathrm{Ca+Mg}}{2}}} \tag{3.9}$$

SAR değeri yerine son zamanlarda, revize edilerek tadil edilmiş SAR değeri (SAR_{tad}) olarak önerilmiştir. Burada, Ca^{+2} çözünürlüğünün, sudaki HCO_3 konsantrasyonuna bağlı olarak değişkenliği dikkate alınarak Ca_x değeri kullanılmaktadır. Ca_x, HCO_3/Ca ve EC'ye bağlı olarak değişmektedir.

$$\mathrm{SAR_{Tad}} = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca_X+Mg}{2}}} \tag{3.10}$$

Bu ifadedeki, Na^{+}, Mg^{+2} ve Ca_x konsantrasyonları da meq/L cinsindendir. Sulamada kullanılacak suyun alkalinitesinin düşük olduğu durumlarda SAR parametresinin kullanılması

önerilmektedir. Fakat kullanılacak suyun HCO_3 konsantrasyonu 120 mg/L (2 meq/L)'den ve CO_3 konsantrasyonu 15 mg/L (0,5 meq/L)'den yüksek olduğu durumlarda SAR_{tad} parametresinin kullanılmasının daha uygun olacağı belirtilmektedir (Carrow ve Duncan, 2012).

3.10.13. Spektral Absorpsiyon Katsayısı (SAK_{254})

SAK_{254} (Spektral Absorpsiyon Katsayısı) parametresi organik madde tayini için kullanılmaktadır. SAK_{254} parametresi su içindeki UV–ışınımını absorplayan maddeleri kapsar. SAK_{254} analizleri DIN 38404–C3 Normu'na göre yapılmıştır. Spektral Absorpsiyon Katsayısı SAK_{254} şu eşitlik ile hesaplanmıştır:

$$SAK_{254} = \frac{A_{254}}{d} \times f \tag{3.11}$$

A_{254}: 254 nm dalga boyunda su numunesinin absorbansı
d : küvetin kalınlığı, mm
f : birim dönüştürme faktörü, spektral absorpsiyon katsayısını m^{-1} olarak ifade etmek için, burada f: 1000

3.10.14. Renklilik Sayısı (RES) Ölçümü

Renk ölçümleri, RES (Renklilik Sayısı) parametresi ile yapılmıştır (Avrupa Normu EN ISO 7887). Su numunesi ölçümden önce 0.45 µm membran filtreden süzülür. Koyu renge sahip atıksular durumunda "optikçe saf su" ile seyreltme yapılır. Avrupa Normuna göre belirlenen limitler, 436 nm için 7 m^{-1}, 525 nm için 5m^{-1}, 620 nm için 3 m^{-1}'dir. 436 nm sarı, 525 nm kırmızı ve 620 nm mavi renge karşılık gelmektedir. Spektral Absorpsiyon değeri α (λ) aşağıdaki şekilde hesaplanır (EN ISO 7887):

$$\alpha = \frac{A}{d} \times f \tag{3.12}$$

A : λ dalga boyunda su numunesinin ekstinksiyonu (Absorbans)
d : küvet kalınlığı, mm
F : Spektral Absorpsiyon değerini m^{-1} biriminde elde etmek için faktör, burada f:1000.

Yukarıda yer alan ifadelerden bir renk parametresi olan RES elde edilmiştir:

$$RES = 100 \times ({}^{E_\lambda}/_{d}) \tag{3.13}$$

E_λ : Ekstinksiyon (belirli dalga boyunda)
d : Su numunesi kalınlığı (cm)

3.10.15. Toplam Kjheldal Azotu (TKN)

TKN ölçümleri Standart Metot 4500–Norg–B (APHA, AWWA, WEF, 1998)'de belirtilen standart yönteme göre yapılmıştır.

3.10.16. Toplam Fosfor (TP)

Toplam fosfor ölçümleri Standart Metot 4500–P D (APHA, AWWA, WEF, 1998)'de belirtilen standart yönteme göre yapılmıştır.

3.10.17. Biyolojik Oksijen İhtiyacı ($BOİ_5$)

$BOİ_5$ ölçümleri Standart Metot 5210–B (APHA, AWWA, WEF, 1998)'de belirtilen standart yönteme göre yapılmıştır.

3.10.18. Ağır Metal Analizleri

Ağır metal analzileri, İstanbul Üniversitesi İleri Analizler Laboratuvarı'nda Thermo Elemental X Series ICP–MS (Inductively Coupled Plasma– Mass Spektrometresi) cihazı ile yapılmıştır. Numunelerin ağır metal analizi öncesi, numuneler CEM Mars 5 marka mikrodalga cihazı kullanılarak nitrik asit (HNO_3) ile çözünürleştirme işlemi yapılmıştır. Çözünürleştirme işlemi 10 ml numune üzerine 5 ml HNO_3 ilave edilerek yapılmıştır. Hazırlanan numuneler, ICP–MS cihazında yer alan otomatik örnekleyici (sampler) vasıtasıyla iyonlaşma odalarına taşınır. Buharlaşan numuneler Torch kısmında 10000^oK'de parçalanarak MS (Kütle Spektorometresi) kısmına yönlendirilir. Numunelerin taşınması ve Torch kısmının soğutulması argon gazı ile sağlanır. MS kısmında örnekleyici ve skimmer konilerinden geçen numune mercekler tarafından yönlendirilerek Molibden Quadrupole'e düşürülmesi sağlanır. Uygulanan manyetik akım ile dedektörlere yönlendirilir, dedektör üzerine gelen sinyalleri çoğaltarak kütle/yük oranlarına göre ayırır ve ölçümleri yapılır.

3.10.19. Amonyak Azotu (NH_4^+–N) Analizi

NH_4^+–N ölçümleri Standart metot 4500–C (APHA, AWWA, WEF, 1998)'de belirtilen standart yönteme göre yapılmıştır. Titrimetrik metot kullanılmıştır.

3.10.20. Ortofosfat Analizi

Orto–fosfat ölçümleri Standart Metot 4500–P (APHA, AWWA, WEF, 1998)'ye göre yapılmıştır. Kolorimetrik yöntem kullanılmıştır.

3.10.21. Toplam Katı Madde (TKM)

TKM ölçümleri Standart Metot 2540–B (APHA, AWWA, WEF, 1998)'de belirtilen standart yönteme göre yapılmıştır.

3.10.22. Toplam Uçucu Katı Madde (TUKM)

TUKM ölçümleri Standart Metot 2540–E (APHA, AWWA, WEF, 1998)'de belirtilen standart yönteme göre yapılmıştır.

3.10.23. Hücre Dışı Polimerik Maddelerin Ekstraksiyonu

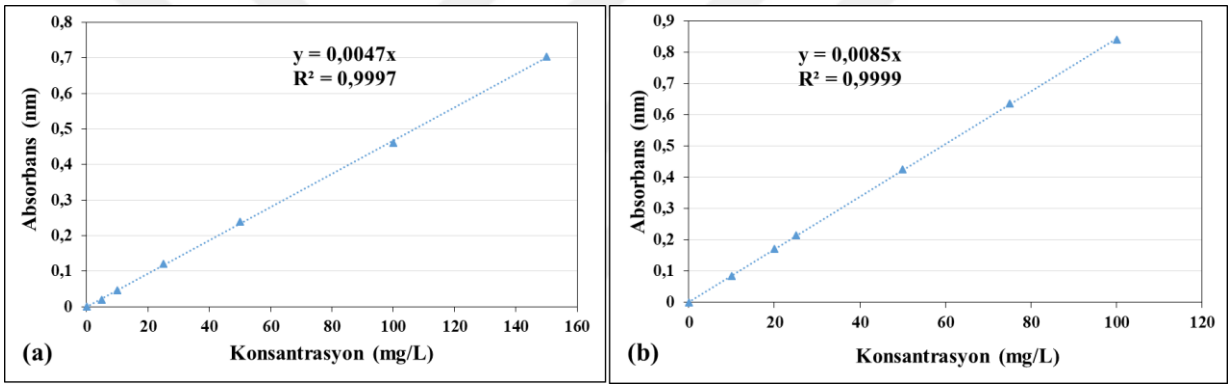
EPS ekstraksiyonunda Tinggang ve diğ. (2008) tarafından önerilen, formaldehit ile EPS ekstrakte etme yöntemi kullanılmıştır. Prosedürde belirli bir miktar numune falkon tüpüne alınarak, 4000 rpm'de 10 dak. santrifüjlenmiştir. Sonrasında üst faz alınarak 9000 rpm'de 20 dak. ile tekrar santrifüjlenmiştir (AKM'nin tamamen tutulduğundan emin olmak için ilk seferde elde edilen süpernatant 0.45 µm filtreden geçirilerek kullanılmıştır). Numune –20°C'de saklanmıştır. SMP'den arda kalan pelete 5ml numune için 6 µL %37'lik formaldehit olacak şekilde eklenip çalkalanarak soğuk odada 1 saat bekletilmiştir. Daha sonra numunenin üzerine 500 µL 1N NaOH eklenir, çalkalanıp soğuk odada 3 saat beklemeye bırakılmıştır. Bu işlem sonunda 9000 rpm'de 20 dak. santrifüjlenip süpernatant kısmı alınmıştır (Daha fazla numune hacmi ile çalışılacaksa kimyasalların hacmi de o oranda arttırılmalıdır).

3.10.24. Protein Analizi

Protein analizleri için Lowry ve diğ. (1951)'de geliştirdiği metot kullanılmıştır. Protein konsantrasyonunu ölçmek için 0.1 mL numuneye 0.1 mL 2 N NaOH eklenip blok ısıtıcıda 100°C'de 10 dak. hidroliz edilmiştir. Hidrolizat oda sıcaklığına soğutulduktan sonra 1 mL taze olarak hazırlanan kompleks reaktif eklenerek oda sıcaklığında 10 dak. bekletilmiştir. Sonrasında 0.1 mL Folin reaktifi eklenip, karışım vorteks yardımıyla karıştırılmıştır. Karışım oda sıcaklığında 30–60 dakika bekletilmiştir. Bekletme süresinin 60 dak.'yı geçmemesi önemlidir. Bekleme sonrası oluşan rengin absorbansı 750 nm'de spektrofotometre ile ölçülmüştür. Standartların konsantrasyonları absise, absorbansları ordinata yerleştirilerek standart eğri çizilir ve bilinmeyen protein konsantrasyonlarını tayin etmede kullanılmıştır. Şekil 3.13 (a)'da ilgili protein kalibrasyon grafiği verilmiştir.

3.10.25. Karbonhidrat Analizi

Karbonhidrat analizleri Dubois ve diğ. (1956) tarafından geliştirilen fenol–sülfirik asit yöntemiyle yapılmıştır. Standard olarak alginat kullanılmıştır. Analizde gerekli reaktifler %80 (w/w) fenol çözeltisi ve derişik sülfirik asittir. %80 (w/w) fenol çözeltisi hazırlamak için 80 g fenol tartılarak üzerinde 20 mL destile su ilave edilmiştir. Çözeltinin çözünmesi 3–4 saat sürmektedir. Karbonhidrat konsantrasyonu tayin edilecek numuneden 2 mL numune test tübüne aktarılmıştır. Tübe 50 µL %80 (w/w) fenol çözeltisi ve 5 mL derişik sülfirik asit ilave edilmiştir. Numune 10 dak. oda sıcaklığında bekletilmiştir. Oluşan sarı–turuncu renk bu yöntemin özelliğidir. Oluşan rengin absorbansı 480 nm'de spektrofotometre ile ölçülmüştür. Şekil 3.13 (b)'de ilgili karbonhidrat kalibrasyon grafiği verilmiştir.



Şekil 3.13: Çalışmada kullanılan standart protein (a) ve karbonhidrat (b) grafiği.

3.10.26. Göreceli Hidrofobisite

Göreceli hidrofobisite analizi için Rosenberg ve diğ. (1991) tarafından geliştirilen MATH (Microbial Adhesion To Hydrocarbons) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde mikroorganizmaların yüzey hidrofobisitesi n–hexadecan ile tespit edilmiştir. Deneyde bakteri süspansiyonu Tris–HCl tamponu (0.05M, pH=7.1) ile üç kere yıkanmış olup 600 nm'de ilk optik yoğunluğu (OD) okunmuş sonrasında n–hexadecan eklenmiş ve bakteri süspansiyonunun 15. dak. sonunda 600 nm'de son OD değeri okunmuştur. Hidrofobisite değeri yüzde cinsinden aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır.

$$\% = 1 - \frac{OD_{SON}}{OD_{ilk}} \times 100 \qquad (3.14)$$

3.10.27. Viskozite

ASTM D445–12 – Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (the Calculation of Dynamic Viscosity) standardına göre yapılmıştır. Çalışmada Brookfield firmasının 'DV–E VISCOSIMETER' cihazı kullanılmıştır.

3.10.28. Osmotik Basınç Tayini

Sıvı numunelerde osmotik basıç değeri aşağıda eştilik 3.17'de yer alan formülasyon ile hesaplanmıştır. Ölçümlerde, Metler Toledo marka yoğunluk ölçer cihazı ve 'Advanced Instruments' marka Osmo1™ osmolalite ölçer cihazı kullanılmıştır. Hesaplama sonucu elde edilen 'π' değeri Pascal cinsinden basınç değeri vermektedir. 1 bar = 10^5 pascal eşitliği kullanılarak her bir numunenin bar cinsinden osmotik basıncı hesaplanmıştır.

$$\pi = R \times T \times (m \times d) \tag{3.15}$$

π: basınç (Pa)
R: sabit katsayı (8.3145)
T: kelvin (298 ^{O})
m: osmolalite (mOsm)
d: yoğunluk (g/m^3)

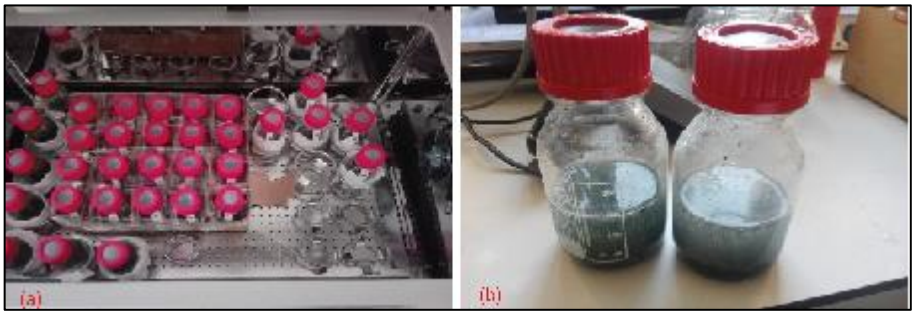
3.10.29. BMP (Biyolojik Metan Potansiyeli) Analizi

BMP testi, sabit ve farklı ÇÇ konsantrasyonlarında yürütülmüştür. Sabit konsantrasyonlarında yürütülen çalışmada kullanılan ÇÇ konsantrasyonu, aşağıda yer alan C_f formülü ile hesaplanmıştır. Hesaplamada, her bir ÇÇ numunesinin saf su performans testinden elde edilen J_w ve J_s değerleri kullanılmıştır.

$$C_f = \frac{1}{\frac{J_w}{J_s}} \times \frac{R}{1-R} \tag{3.16}$$

C_f: ÇÇ konsantrasyonu (g/L)
J_w: su akısı (L/m²·saat)
J_s: ters tuz akısı (g/m²·saat)
R: su geri kazanım oranı (%)

50 mL ÇÇ, 50 mL bira atıksuyu ve 50 mL anaerobik aşı çamuru 250 mL'lik fermantasyon şişelerine doldurulmuştur. Oluşan biyogaz geriye kalan boşluk alanında toplanmıştır. Şişelere çamur ve atıksu numuneleri konulduktan sonra üst boşluk hacmindeki havayı uzaklaştırmak ve anaerobik koşulları sağlamak için şişe 10 dak. süreyle azot gazı ile havalandırılmıştır. Havalandırma sonrasında şişeler 35℃'de çalkalamalı inkübatörde bekletilmiştir (Şekil 3.14). Deney sırasında oluşan ve biriken biyogazın hacmi 1 gün aralıklarla ölçülmüştür.



Şekil 3.14: BMP testi deney düzeneği (a), 250 ml fermantasyon şişesi (b).

3.10.30. Bakteriyel ve Arkeal İnceleme Analizi

3.10.30.1. DNA izolasyonu

Çamur numuneleri 200 mg örnek içerisinde 0.1 mm çaplı cam boncuk ve 400 µL parçalama çözeltisi (CTAB–hexadecyltrimethylammonium bromide–, TrisHCl pH 8, EDTA, NaCl) bulunan tüplere transfer edilmiş ve 1 dak. 6000 rpm'de homojenize edilmiştir. Yeni bir tüpe transfer edilen numunenin üzerine 400 µL bağlama çözeltisi (Guanidine thiocyanate, Tris–HCl, pH 8) eklenmiş, 10 dak., 95°C'de inkübe edilmiş, 400 µL 2–propanol eklenmiş ve silika kolona yüklenmiştir. 10000 rpm'de 1 dak. santrifüj ile kolondan geçirilen numunedeki DNA'lar silika kolonda tutulmuş, daha sonra iki defa yıkama çözeltisi (NaCl, Tris–HCl, pH 8; Etanol) ile yıkanmıştır. Silika kolon santrifügasyonla kurutulmuştur. DNA izolasyonu tamamlanmış örneklerdeki DNA'nın miktarı ve kalitesi spektrofotometrik yöntemlerle ölçülerek sonraki basamaklara uygunluğu test edilmiştir. OD260/OD280 oranı 1.8–2.0, OD260/OD230 oranı 2.0–2.2 aralığında ve en az 10 ng/ul (tercihen 50–300 ng/µL) konsantrasyonuna sahip DNA'lar ile diğer moleküler işlemler gerçekleştirilmiştir.

3.10.30.2. Yeni nesil dizileme (NGS)

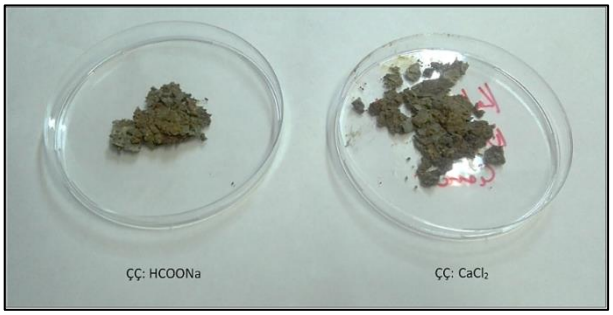
HRM analizleri sonucunda belirlenen gruplar, her grubun DNA'ları kendi içerisinde birleştirilerek analiz edilmiştir. Amplikon kütüphanelerinin oluşturulması için kullanılacak primer çifti 16S rRNA geninin V3–V4 bölgesini kapsayan yaklaşık 460 bp'lik bir bölgeyi hedeflemiştir (Klindworth ve diğ., 2013). Hedef spesifik primer çiftlerinin 5' ucuna, oluşturulan kütüphanenin Illumina indeks ve sekans adaptörleri ile uyumluluğu için, konnektör DNA dizileri eklenmiştir. 16S rRNA'ya özgü hedef spesifik primer–konnektör sekansları ileri primer için 'TCGTCGGCAGCGTCAGATGTGTATAAGAGACAG–CCTACGGGNGGCWGCAG –3' ve geri primer için 5'–GTCTCGTGGGCTCGGAGATGTGTATAAGAGACAG-GACTA

CHVGGGTATCTAATCC–3’ şeklindedir. İlk PCR “Biospeedy® Proof Reading DNA Polymerase 2x Reaction Mix” ve her bir primerden 200 nm kullanılarak uygulanmıştır. 95℃’de 3 dak.; 25 döngü 95℃’de 30 saniye, 55℃’de 30 saniye ve 72℃’de 30 saniye; 72℃’de 5 dak. PCR ürünü agaroz jelde yürütülerek boyutu (~550 bp) doğrulanmış ve “Biospeedy® PCR Product Purification Kit” kullanılarak saflaştırılmıştır. Saflaştırılmış ilk PCR örneğine ikinci PCR basamağı ile ikili indeks ve Illumina sekanslama adaptörleri Nextera XT Index Kit’i kullanılarak eklenmiş ve şu ısıl döngü programı kullanılmıştır: 95℃’de 3 dak.; 8 döngü 95℃’de 30 saniye, 55℃’de 30 saniye ve 72℃’de 30 saniye; 72℃’de 5 dak. PCR ürünü, “Biospeedy® PCR Product Purification Kit” kullanılarak saflaştırılmıştır. Son kütüphane, Bioanalyzer DNA 1000 çipi kullanılarak boyut (~630 bp) doğrulanması yapılmıştır. Son kütüphane 10 mM Tris pH 8.5 kullanılarak 4 nM’e seyreltilmiş ve 5 µl’lik alikotlar kütüphane havuzu oluşturmak için karıştırılmıştır. Her bir reaksiyona dahili kontrol olarak minimum %5 PhiX eklenmiştir. İşlenmemiş sekans verisi (ileri ve geri sekans okumaları birleştirilmiş olan) Mothur 1.36.1 versiyonu kullanılarak ayıklanmış, indirgenmiş ve analiz edilmiştir. İlk olarak indeks ve primer sekansları kırpılmış ve sonrasında özgün sekanslar tanımlanmıştır (Edgar, 2011).

3.11. MEMBRAN OTOPSİ ANALİZLERİ

3.11.1. Membran Üzerindeki Kek Tabakasında EPS Analizi

İO membranının yüzeyinde oluşan kek tabakasında EPS analizi Tinggang ve diğ. (2008) tarafından belirtilen yönteme göre gerçekleştirilmiştir: kek tabakasından belli miktarda su içeriği bilinen çamur tartılarak çözelti şişesine alınır (Şekil 3.15) ve belirli bir miktar numune falkon tüpüne alınarak 4000 rpm’de 10 dak. santrifüjlenir ve üst faz alınarak 9000 rpm’de 20 dak. ile tekrar santrifüje alınır (AKM’nin tamamen tutulduğundan emin olmak için. Bu aşama yerine ilk seferde elde edilen süpernatant 0.45 µm filtreden geçirilerek alınır. Kalan pelet üstüne numune başına 5 mL 6 µL %37’lik formaldehit eklenip çalkalanarak soğuk odada 1 saat bekletilir. Daha sonra numunenin üzerine 500 µL 1N NaOH eklenir ve çalkalanıp soğuk odada 3 saat beklemeye bırakılır. Bu işlem sonunda 9000 rpm’de 20 dak. santrifüjlenip süpernatant kısmı alınır (Daha fazla numune hacmi ile çalışılacaksa kimyasalların hacmi de o oranda arttırılmalıdır). Kimyasal ekstraksiyon ile elde edilmiş üst fazda yine protein ve karbonhidrat analizi yapılır. Bu değerlerin toplamı da bağlı veya ekstrakte edilmiş EPS’nin değerini vermektedir.



Şekil 3.15: İO membranlarının yüzeyinden alınan çamur numuneleri.

3.11.2. Temas Açısı Analizi

Temas açısı ölçümleri, İO membranının yüzeyinin hidrofobik/hidrofilik özelliklerinin belirlenerek yüzeydeki kirlenmenin analizi için yapılmıştır. Ölçümler, KSV CAM 101 Model Gonyimetre cihazı ile "Sessile Drop" metodu ile gerçekleştirilmiştir. Ölçüm öncesinde saf su içerisinde bekletilen temiz ve kirli İO membranları 24 saat oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır. Kurutulan membran bir lamel üzerinde gonyimetre cihazının numune tablasına yerleştirilmiştir. Mikro–şırınga ile membran yüzeyi üzerine yaklaşık 2 µL saf su damlatılmıştır. Oluşan görüntü cihazın bağlı bulunduğu kamera ile anında görüntülenmiştir. Su damlası ile membranın yaptığı sağ ve sol açı, cihazda yer alan yazılım desteği ile bilgisayarda otomatik olarak ölçülmüştür. Bu iki açının ortalaması membranın temas açısı olarak kaydedilmiştir.

3.11.3. Taramalı Elektron Mikroskopu Analizi (SEM)

İO membranının morfolojik yüzey özelliklerinin belirlenmesi amacıyla SEM analizi yapılmıştır. Ölçümde kullanılan cihaz Philips marka XL30 ESEM–FEG modelidir ve Boğaziçi Üniversitesi, İleri Teknolojiler AR–GE Merkezi, Elektron Mikroskobu Laboratuvarında bulunmaktadır. SEM cihazındaki numunelerin ölçümleri kuru ve ortam neminin çok az olduğu şartlarda gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle membran numuneleri saf su içerisinden çıkarıldıktan sonra saf su yıkanıp oda sıcaklığında 24 saat kurutulmuştur. Ardından, numuneler cihaza özel numune hücrelerine yerleştirilerek yüzeyler Au–Pd ile 3–4 nm kalınlıkta ve 30 dak. sürede kaplanmıştır. Kaplama işlemi Polaron SC7640 marka cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.16'da Au-Pd kaplama cihazı ve SEM cihazı gösterilmiştir. Taramalı elektron mikroskobunun EDS kısmı ile numunelerin yüzeyleri taranmış ve veriler pik olarak alınmıştır.



Şekil 3.16: Taramalı elektron mikroskobu ve Au-Pd kaplama cihazı.

3.11.4. Fourier Infrared Spektroskopisi (FT–IR)

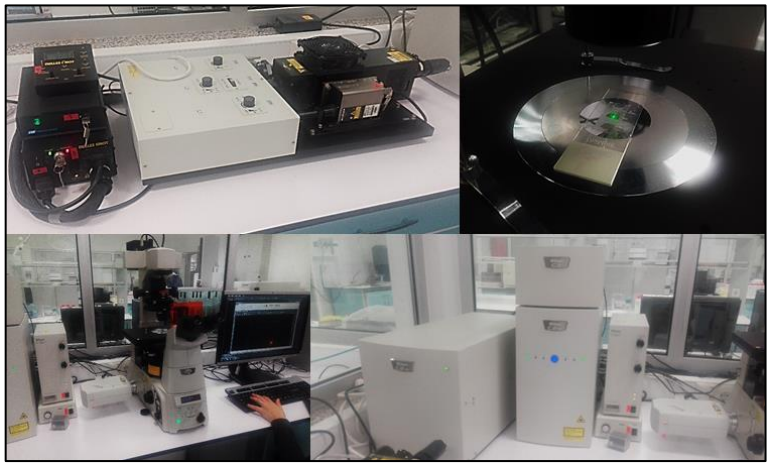
FTIR çalışmaları, MEM–TEK bünyesinde bulunan Perkin Elmer Universal ZTY Sampling Accessory FT–IR spektrometresinde gerçekleştirilmiştir. FTIR karakterizasyonu, temiz ve kirli İO membranında membran yüzeyindeki kimyasal bağların değişiminin incelenmesi için yapılmıştır. FT–IR analizleri, Zayıflatılmış Toplam Yansıtma (ZTY) metodu kullanılarak yapılmıştır. Analiz sonucu, 3 taramanın ortalamasının alınmasıyla 4000−450 cm^{-1} aralığında verilmiştir.

3.11.5. Elektrokinetik Analiz Deneyi

MEM–TEK bünyesinde bulunan elektrokinetik analiz cihazı ile (Anton Paar Surpaas) İO membranının yüzey yükleri ölçülmüştür.

3.11.6. Konfokal Mikroskop Görüntüleme

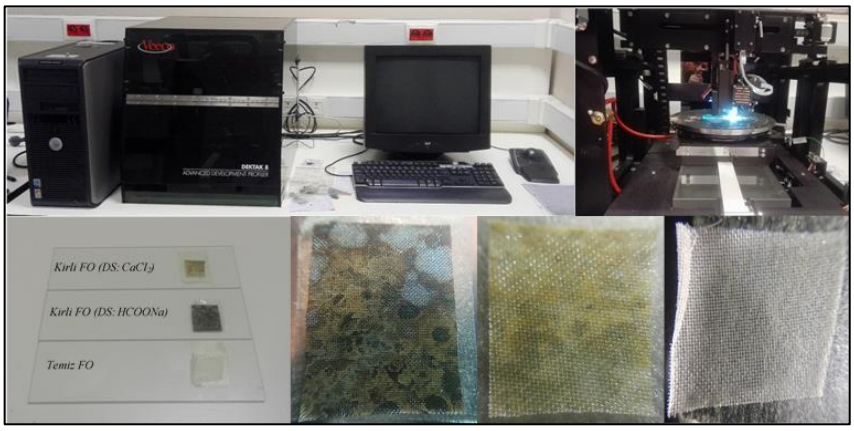
Kirli İO membranı üzerinde oluşmuş olan biyofilm tabakaları konfokal mikroskop ile incelenmiştir. Bu görüntülemede biyofilm kalınlığı ve canlı hücre aktivitesi gibi parametreler incelenmiştir. MEM–TEK bünyesindeki Nikon C2 marka ve model konfokal mikroskobu görüntülemede kullanılmıştır. Şekil 3.17'de CLSM cihazına ait ait görsel yer almaktadır. Membranlar 'Live/Dead baclight™ Bacterial viability kit' (Thermofisher Scientific) kullanılarak boyandı. Boya 1 ml distile su içerisine 1.5 µL komponent A, 1.5 µL komponent B'den eklenerek hazırlandı. Membranlar 1cm × 1cm kesilerek lam üzerine yapıştırıldı. Pipetle boya alınıp membranların üzeri boya ile kaplandı ve ışık almaz bir ortam içerisinde 30 dak. bekletildi. Nikon C2 konfokal mikroskobu kullanılarak görüntü alınırken NIS–Elements AR 4.10.01 programı kullanıldı.



Şekil 3.17: Konfokal mikroskop analiz düzeneği.

3.11.7. Optikprofilometre ile Yüzey Pürüzlülüğü Tayini

Temiz ve kirli İO membranlarının yüzey pürüzlülük değerleri belirlenmesi amacıyla Gebze Teknik Üniversitesi Malzeme ve Metalurji Mühendisliği bölüm laboratuvarında yer alan "Veeco Dektak 8" marka optik profilometre kullanılarak belirlenmiştir. Şekil 3.18'de optik profilometre cihazı ve membran numunelerine ait görsel yer almaktadır. Profilometre, elmas sivri ucun membran yüzeyinde gezdirilmesi ile ucun yüzeydeki girinti ve çıkıntılardan geçirilerek kaplamanın yüzey profilinin çıkarılması prensibi ile çalışmıştır. Temiz ve kirli İO membranı numunelerin yüzeylerinde 1000 µm × 1000 µm'lik bir alan taraması sonucu 50 farklı noktadan 3 boyutta (3-D) tarama yapılarak, yüzey profili ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri (Ra) alınmıştır. Elde edilen veriler, cihaz ile entegre olarak çalışan bilgisayar yazılımından (Dektak 32 ve Vision) alınmıştır. Aşağıda yer alan şekilde cihazda yapılan ölçüme ve membran hazırlama işlemine ait görsel yer almaktadır.



Şekil 3.18: Optikprofilometre cihazı ve İO membran örnekleri.

3.12. DENEYSEL ÇALIŞMA PLANI VE AŞAMALARI

AnOMBR'e ait ölçümü yapılan parametreler, ölçüm noktaları ve ölçüm sıklıkları Tablo 3.37'de verilmiştir.

Tablo 3.37: AnOMBR'de arıtılabilirlik, ileri arıtma çalışmaları ve İO membranında yapılan analizler.

Parametre	Giriş	AnOMBR	SÇÇ	Üst Faz Çıkışı	İO Membranı
Sıcaklık	–	7 gün/hafta	7 gün/hafta	Her döngü sonunda	–
İletkenlik	Atıksu alındığında	sürekli	sürekli	Her döngü sonunda	–
TÇM	Atıksu alındığında	sürekli	sürekli	Her döngü sonunda	–
Bulanıklık	Atıksu alındığında	–	Her döngü sonunda	Her döngü sonunda	–
pH	7 gün/hafta	7 gün/hafta	7 gün/hafta	Her döngü sonunda	–
KOİ	1 gün/hafta	7 gün/hafta	7 gün/hafta	Her döngü sonunda	–
$BOİ_5$	Atıksu alındığında	Kararlı hallerde	Kararlı hallerde	Her döngü sonunda	–
TKN	Atıksu alındığında	2 gün/hafta	2 gün/hafta	Her döngü sonunda	–
NH_4^+–N	Atıksu alındığında	2 gün/hafta	2 gün/hafta	Her döngü sonunda	–
NO_3–N	Atıksu alındığında	Kararlı hallerde	Her döngü sonunda	Her döngü sonunda	–
TP	Atıksu alındığında	2 gün/hafta	2 gün/hafta	Her döngü sonunda	–
PO_4-P	Atıksu alındığında	2 gün/hafta	2 gün/hafta	Her döngü sonunda	–
TKM	Atıksu alındığında	1 gün/hafta	1 gün/hafta	Her döngü sonunda	–
TUKM	Atıksu alındığında	1 gün/hafta	1 gün/hafta	Her döngü sonunda	–
AKM	Atıksu alındığında	3 gün/hafta	3 gün/hafta	Her döngü sonunda	–
UAKM	Atıksu alındığında	3 gün/hafta	3 gün/hafta	Her döngü sonunda	–
SMP	–	1 gün/ 2 hafta	1 gün/ 2hafta	–	–
EPS	–	1 gün/ 2 hafta	1 gün/ 2hafta	–	Çalışma Sonunda
Viskozite	–	1 gün/hafta	Kararlı hallerde	Her döngü sonunda	–
Boyut dağılımı	–	1 defa/2 hafta	–	–	–
Hidrofobisite	–	1 gün/hafta	Kararlı hallerde	–	–
Zeta Potansiyeli	–	Çamur aldındığında	–	–	Çalışma Sonunda
SO_4	Atıksu alındığında	Kararlı hallerde	Her döngü sonunda	Her döngü sonunda	–
Klorür	Atıksu alındığında	1 gün/hafta	Her döngü sonunda	Her döngü sonunda	–
Alkalinite	Atıksu alındığında	Kararlı hallerde	Her döngü sonunda	Her döngü sonunda	–
Toplam Sertlik	Atıksu alındığında	Kararlı hallerde	Her döngü sonunda	Her döngü sonunda	–
SAK_{254}	Atıksu alındığında	1 gün/hafta	1 gün/hafta		–
RES_{436}	Atıksu alındığında	1 gün/hafta	1 gün/hafta		–
Fecal koliform	Atıksu alındığında	–	Her döngü sonunda	Her döngü sonunda	–
SAR_{tad}	Atıksu alındığında	–	Her döngü sonunda	–	–
Temas Açısı	–	–	–	–	Çalışma Sonunda
SEM-EDS	–	–	–	–	Çalışma Sonunda
Optik Profilometre	–	–	–	–	Çalışma Sonunda
CLSM	–	–	–	–	Çalışma Sonunda
FT–IR	–	–	–	–	Çalışma Sonunda

4. BULGULAR

4.1. ÇALIŞMADA KULLANILACAK ÇEKME ÇÖZELTİLERİN SEÇİMİ

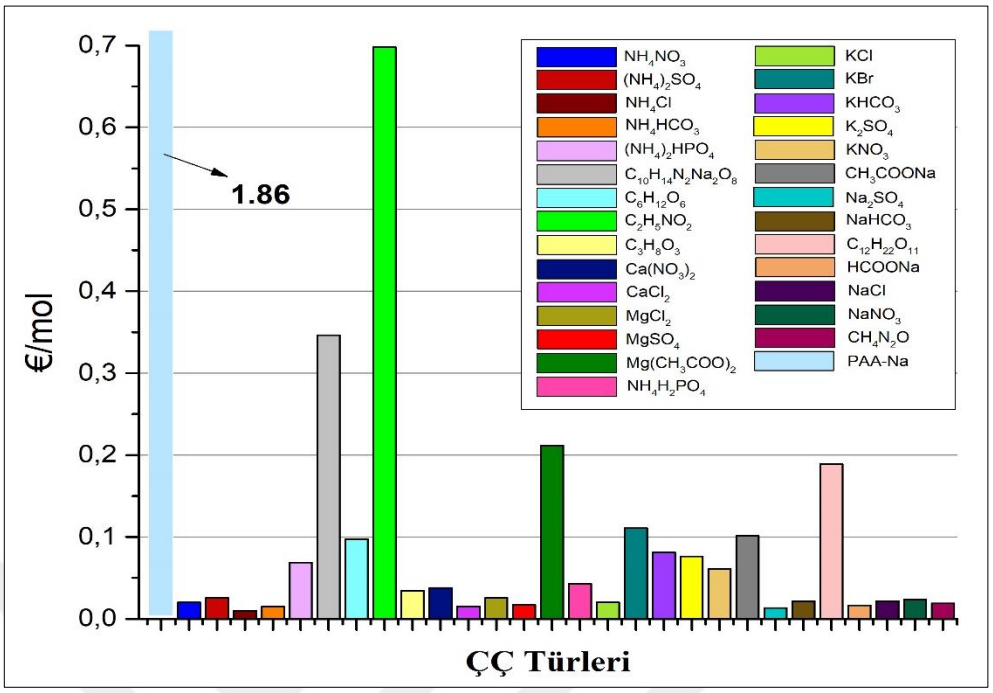
ÇÇ seçimi İO uygulamalarının en önemli aşamasıdır. İO proseslerinde ideal ÇÇ türünün yüksek J_w ve düşük J_s değerine sahip olması ve aynı zamanda düşük maliyette olması istenmektedir. İO prosesini AnMBR ile entegre ettiğimiz bu çalışmada, ÇÇ'lerin anaerobik ortamda inhibisyona neden olmaması da tercih sebeblerinden birisidir. Ayrıca, ÇÇ'lerin anaerobik ortamda besi görevi görebilecek ve/veya anaerobik ortamın performansını arttırabilecek yapıda olması istenmektedir.

Bu çalışmanın ilk aşamasını oluşturan ÇÇ ön elemesi çalışmasında, ÇÇ'lerin suda çözünürlük değerleri, osmotik basınç değerleri, maliyetleri ve RSFS değerleri kullanılmıştır. Bu kapsamda literatürde yer alan ve İO uygulamalarında yaygın olarak kullanılan 29 ÇÇ türünün RSFS değerleri 'Genel Bilgiler' başlığı altında Şekil 2.6'da verilmiştir. Yine aynı başlık altında Tablo 2.5'te ise osmotik basınç ve maksimum çözünürlük değerleri yer almaktadır. Piyasa araştırması yapılarak elde edilen ÇÇ'lerin maliyeti ise Şekil 4.1'de yer almaktadır. Tüm bu veriler ön eleme çalışması kapsamında AHP analizi ile değerlendirilmiş ve en iyi organik ve inorganik ÇÇ türleri seçilmiştir.

4.1.1. ÇÇ'lerin Maliyetlerinin Kıyaslanması

Literatür araştırması sonrasından belirlenen 29 ÇÇ türünün piyasa araştırması ile birim maliyetleri elde edilmiştir. ÇÇ'lerin maliyeti, 1 M konsantrasyona karşılık gelen toplam gram miktarı ile birim fiyatları çarpılarak €/mol olarak elde edilmiştir (Şekil 4.1).

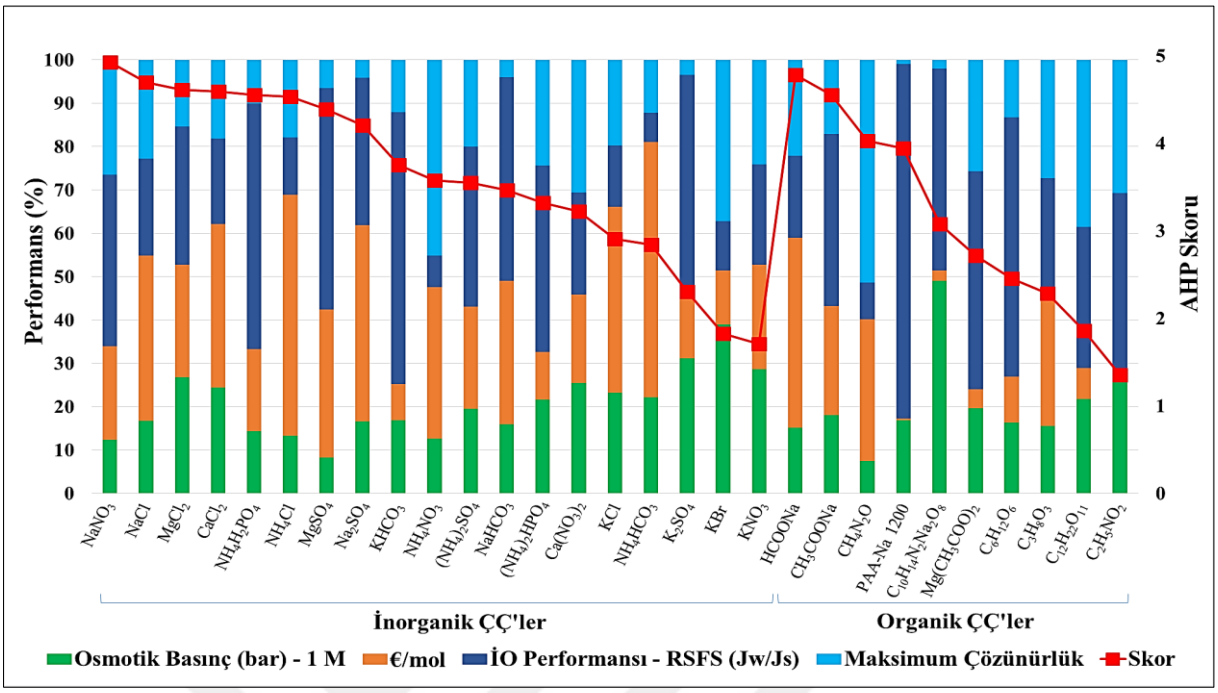
Maliyet açısından en yüksek ÇÇ'nin PAA–Na olduğu belirlenmiştir. CH_3COONa, $C_3H_8O_3$, $MgSO_4$, $C_{12}H_{22}O_{11}$, $MgCl_2$, $Mg(CH_3COO)_2$, Na_2SO_4, $C_2H_5NO_2$, K_2SO_4 ve $Ca(NO_3)_2$'nin de maliyetlerinin yüksek olduğu görülmüştür. Birim maliyeti 0.5 €/mol'den yüksek olan ÇÇ'ler, çalışmayı takiben yapılan performans değerlendirmesine dahil edilmemiştir. PAA–Na, birim fiyatı 1.86 €/mol olması sebebiyle en yüksek birim maliyete sahip ÇÇ türü olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.1: Çekme çözeltilerinin maliyetleri.

4.1.2. ÇÇ'lerin AHP Analizi ile Ön Eleme Sonuçları

AHP analizi ile yapılan ön eleme sonuçlarından elde edilen AHP skor değerleri Şekil 4.2'de verilmiştir. Tüm ÇÇ'lerin AHP skor değerlerinin toplamı 1 olup, şekil üzerinde 100 ile çarpılmış halleri verilmiştir. Her bir kriter grubunun skorları % olarak gösterilmiştir. ÇÇ'ler, organik ve inorganik olmak üzere en yüksek skora sahip olan ÇÇ'den en düşük skora sahip ÇÇ türüne doğru sıralanmıştır. AHP analizinde önem seviyeleri; ÇÇ'lerin osmotik basınç değerleri için 5, maliyetleri için 7, İO performansları için 9 ve maksimum çözünürlükleri için 5 olarak belirlenmiştir. Ağırlık katsayılarının matris hesaplaması Tablo 3.14'te, korelasyon dereceleri Tablo 3.15'te ve geometrik ortalamaları sonucu elde edilen öz vektör değerleri Tablo 3.16'da verilmiştir.



Şekil 4.2: ÇÇ'lerin ön eleme AHP skorları.

AHP sonuçları ve bazı özellikleri sebebiyle olumsuz etkiye neden olan ÇÇ türleri; $NaHCO_3$ (yüksek tuz birikimi yapması), Na_2SO_4 (arkeal türlerin aktivitesi üzerinde olumsuz etki yaratması), $KHCO_3$ (CO_2 içeriğini serbest bırakması), $C_{12}H_{22}O_{11}$ (anaerobik ortamı inhibe edici olması), KNO_3 (suda çözünürlüğünün çok düşük olması ve 0.5 M üzeri konsantrasyonlarda düşük J_w değeri eldesi), KCl (düşük CH_4 eldesi ve yüksek konsantrasyonlarda inhibe edici olması), $Mg(CH_3COO)_2$ (yüksek maliyetli ve anaerobik ortamda kararsız yapıda olması), $MgSO_4$ (geri kazanımı düşük ve yüksek konsantrasyonda inhibe edici olması), $C_3H_8O_3$ (yüksek J_s değeri ve düşük J_w değeri göstermesi), $C_2H_5NO_2$ (düşük J_w değerine sahip olması ve pH'yı 5'e düşürmesi), $C_6H_{12}O_6$ (sadece düşük konsantrasyonlarda çalışabilmesi ve J_s değerinin yüksek olması), NH_4Cl (düşük CH_4 eldesi ve yüksek difüze olma kapasitesi), $(NH_4)_2SO_4$ (arkeal türlerin aktivitesi üzerinde olumsuz etki yaratması ve H_2S oluşumunu desteklemesi) gibi olumsuz etkilere sahip olması nedeniyle seçilmemiştir. AHP skorlarına göre 7 adet ÇÇ belirlenmiştir: inorganik ÇÇ'ler; $NaNO_3$ (4.92), NaCl (4.69), $MgCl_2$ (4.61), $CaCl_2$ (4.58), $NH_4H_2PO_4$ (4.55) ve organik ÇÇ'ler; HCOONa (4.78), CH_3COONa (4.55). AHP analizinde yapılan değerlendirmede ÇÇ'lerin anaerobik ortama etkileri değerlendirilmemiş olup, sadece İO performansı ve karakteristik değerleri ile seçim yapılmıştır. Seçilen ÇÇ türlerinin anaerobik ortama olan etkileri bir sonraki başlık altında kesikli çalışmalar ile detaylandırılmıştır. Yapılan çalışmalarda 7 farklı ÇÇ türü ve Deniz Suyu kullanılmıştır.

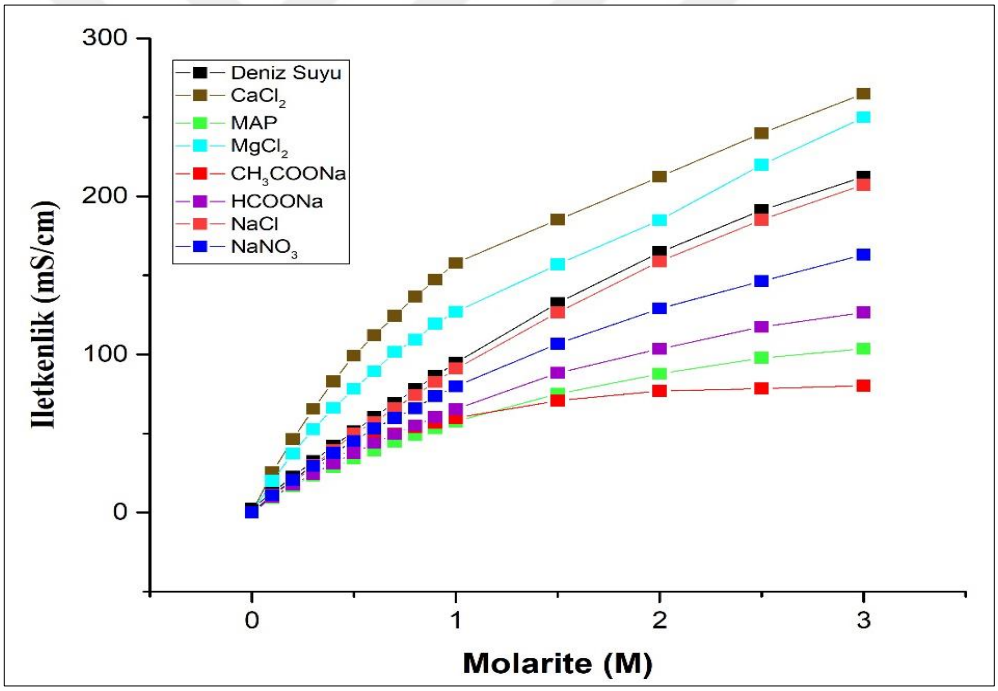
4.2. KESİKLİ İO TESTİ VE BMP ÇALIŞMASI SONUÇLARI

4.2.1. Seçilen ÇÇ'lerin Karakteristik Değerleri

Uzun süreli çalışmalar için hem uygun konsantrasyonun belirlenmesi hem de J_w ve J_s hesaplamalarında kulanılmak üzere her bir ÇÇ türünün ve Deniz Suyunun farklı konsantrasyonlardaki iletkenlik, TÇM ve osmotik basınç değerleri hesaplanmıştır.

4.2.1.1. ÇÇ'lerin farklı konsantrasyondaki iletkenlik ve TÇM değerleri

ÇÇ'lerin 0.1–3 M konsantrasyon aralığındaki iletkenlik ve TÇM değerleri ölçülmüştür. Şekil 4.3'te farklı molar konsantrasyonlarda hazırlanan her bir ÇÇ'nin iletkenlik değeri değişimi verilmiştir.

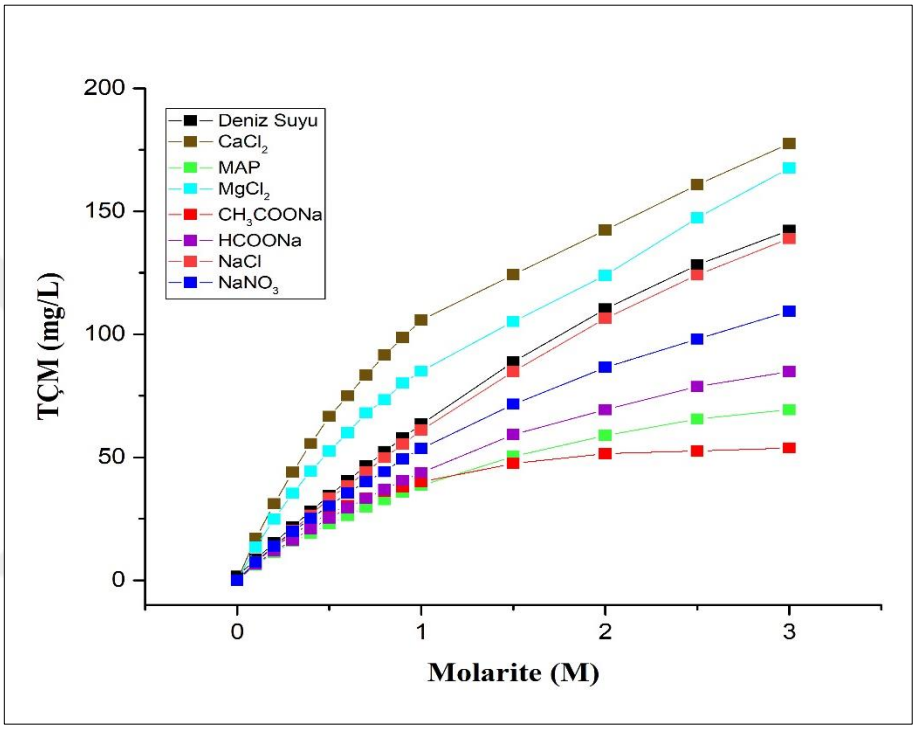


Şekil 4.3: ÇÇ'lerin farklı molar konsantrasyondaki iletkenlik (mS/cm) değerleri.

Şekil 4.3'te görüldüğü üzere, en yüksek iletkenlik değeri veren ÇÇ türünün $CaCl_2$ olduğu belirlenmiştir. $CaCl_2$'nin 3 M konsantrasyonda iletkenlik değeri 265 mS/cm ve 0.1 M konsantrasyondaki iletkenlik değeri 25.38 mS/cm olarak ölçülmüştür.

En düşük iletkenlik değerleri ise CH_3COONa ile elde edilmiştir. CH_3COONa'nın 3 M konsantrasyondaki iletkenlik değeri 80.2 mS/cm ve 0.1 M konsantrasyondaki iletkenlik değerinin 11.08 mS/cm olduğu belirlenmiştir.

Şekil 4.4'te her bir ÇÇ türünün artan konsantrasyondaki TÇM (mg/L) değişimleri gösterilmektedir.

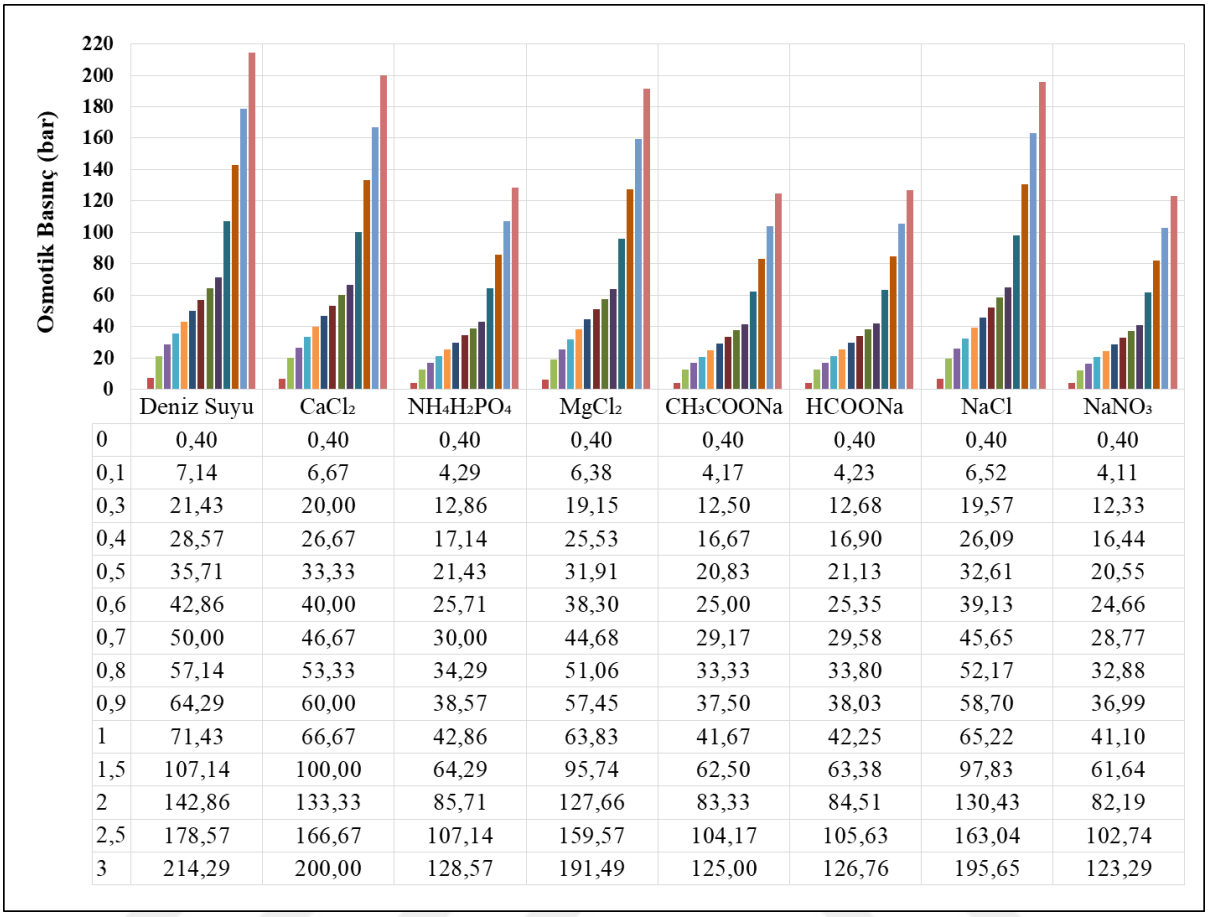


Şekil 4.4: ÇÇ'lerin farklı konsantrasyondaki TÇM (mg/L) değerleri.

Şekil 4.4'te görüldüğü gibi, ÇÇ'lerin farklı konsantrasyondaki TÇM (mg/L) değerleri, iletkenlik değerleri ile benzer değişim göstermiştir. En yüksek TÇM değeri $CaCl_2$ ile 3 M konsantrasyonda 177.5 mg/L olarak elde edilmiştir. 3 M konsantrasyonda en düşük TÇM değeri ise CH_3COONa ile 53.7 mg/L olarak belirlenmiştir.

4.2.1.2. ÇÇ'lerin farklı konsantrasyondaki osmotik basınç değerleri

ÇÇ'lerin 0.1–3 M konsantrasyon aralığındaki osmotik basınç değerleri, osmolite ve yoğunluk ölçülerek belirlenmiştir. Şekil 4.5'te her bir ÇÇ türünün farklı konsantrasyonlardaki osmotik basınç değerleri verilmiştir.



	Deniz Suyu	$CaCl_2$	$NH_4H_2PO_4$	$MgCl_2$	CH_3COONa	HCOONa	NaCl	$NaNO_3$
0	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
0,1	7,14	6,67	4,29	6,38	4,17	4,23	6,52	4,11
0,3	21,43	20,00	12,86	19,15	12,50	12,68	19,57	12,33
0,4	28,57	26,67	17,14	25,53	16,67	16,90	26,09	16,44
0,5	35,71	33,33	21,43	31,91	20,83	21,13	32,61	20,55
0,6	42,86	40,00	25,71	38,30	25,00	25,35	39,13	24,66
0,7	50,00	46,67	30,00	44,68	29,17	29,58	45,65	28,77
0,8	57,14	53,33	34,29	51,06	33,33	33,80	52,17	32,88
0,9	64,29	60,00	38,57	57,45	37,50	38,03	58,70	36,99
1	71,43	66,67	42,86	63,83	41,67	42,25	65,22	41,10
1,5	107,14	100,00	64,29	95,74	62,50	63,38	97,83	61,64
2	142,86	133,33	85,71	127,66	83,33	84,51	130,43	82,19
2,5	178,57	166,67	107,14	159,57	104,17	105,63	163,04	102,74
3	214,29	200,00	128,57	191,49	125,00	126,76	195,65	123,29

Şekil 4.5: ÇÇ'lerin farklı molar konsantrasyondaki osmotik basınç değerleri.

Şekil 4.5'te görüldüğü üzere, tüm konsantrasyon değerlerinde en yüksek osmotik basınç değerleri Deniz Suyu, en düşük osmotik basınç değerleri ise $NaNO_3$ ile elde edilmiştir. Kesikli ve uzun süreli çalışmalarda kullanılmak üzere her bir ÇÇ'nin 30 bar osmotik basınç değerine denk gelen molar konsantrasyonları belirlenmiştir. Her bir ÇÇ'nin yoğunluğu ve osmalitesi ölçülerek 30 bar osmotik basınç değerindeki molar konsantrasyonları hesaplanmıştır (Tablo 4.1).

Tablo 4.1: ÇÇ'lerin 30 bar osmotik basınçtaki molar konsantrasyonları.

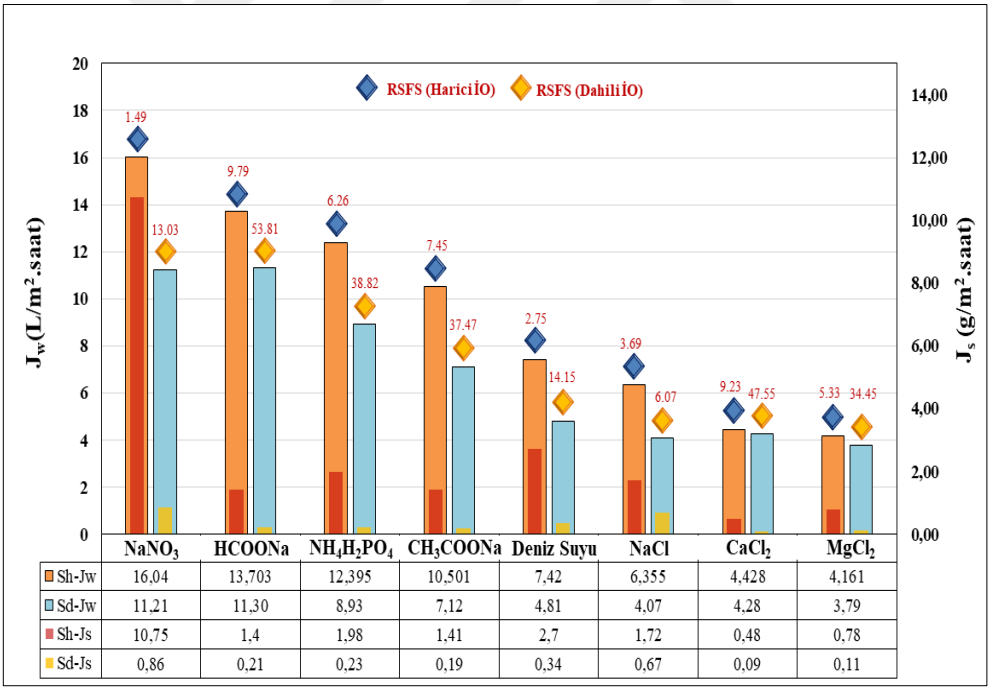
Kimyasal Adı	Kimyasal Formülü	Molar Konsantrasyon (M)	Molekül Ağırlığı (g/mol)
Mono–Amonyum Fosfat	$NH_4H_2PO_4$	0.70	115.00
Kalsiyum Klorür	$CaCl_2$	0.45	147.02
Magnezyum Klorür	$MgCl_2$	0.47	95.22
Sodyum Asetat	CH_3COONa	0.72	136.08
Sodyum Format	HCOONa	0.72	68.00
Sodyum Klorür	NaCl	0.65	58.44
Sodyum Nitrat	$NaNO_3$	0.73	84.99
Deniz Tuzu	–	0.45	60.0

4.2.2. Kesikli İO Performans Testi Sonuçları

Kesikli İO performans testlerinde $NaNO_3$, $NH_4H_2PO_4$, NaCl, CH_3COONa, HCOONa, $MgCl_2$, $CaCl_2$ ve Deniz Suyu; 30 bar sabit basınçta, farklı sıcaklıklarda (25°C ve 35°C) ve farklı konsantrasyonlarda (0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1 ve 2 M) dahili kesikli sistemlerde test edilmiştir. Harici kesikli sistemlerde deneyler sadece 30 bar sabit osmotik basınç altında ve 25°C'de gerçekleştirilmiştir. Harici ve dahili kesikli sistemlerde besleme çözeltisi olarak saf su (sadece 30 bar osmotik basınç altında yürütülen çalışmalarda) ve bira atıksuyu (tüm kesikli çalışmalarda) kullanılmış ve deneyler 6 saat sürmüştür.

4.2.2.1. Sabit osmotik basınç (30 bar) altında İO performansı

Sabit osmotik basınç altında, ***saf suyun*** besleme olarak kullanıldığı kesikli harici ve dahili İO çalışmalarında Deniz Suyu ve ÇÇ'lerin İO performansları belirlenmiştir (Şekil 4.6).



	$NaNO_3$	HCOONa	$NH_4H_2PO_4$	CH_3COONa	Deniz Suyu	NaCl	$CaCl_2$	$MgCl_2$
Sh-Jw	16,04	13,703	12,395	10,501	7,42	6,355	4,428	4,161
Sd-Jw	11,21	11,30	8,93	7,12	4,81	4,07	4,28	3,79
Sh-Js	10,75	1,4	1,98	1,41	2,7	1,72	0,48	0,78
Sd-Js	0,86	0,21	0,23	0,19	0,34	0,67	0,09	0,11

Şekil 4.6: ÇÇ'lerin sabit osmotik basınçta (30 bar) İO performansları (S: saf su, h: harici, d: dahili).

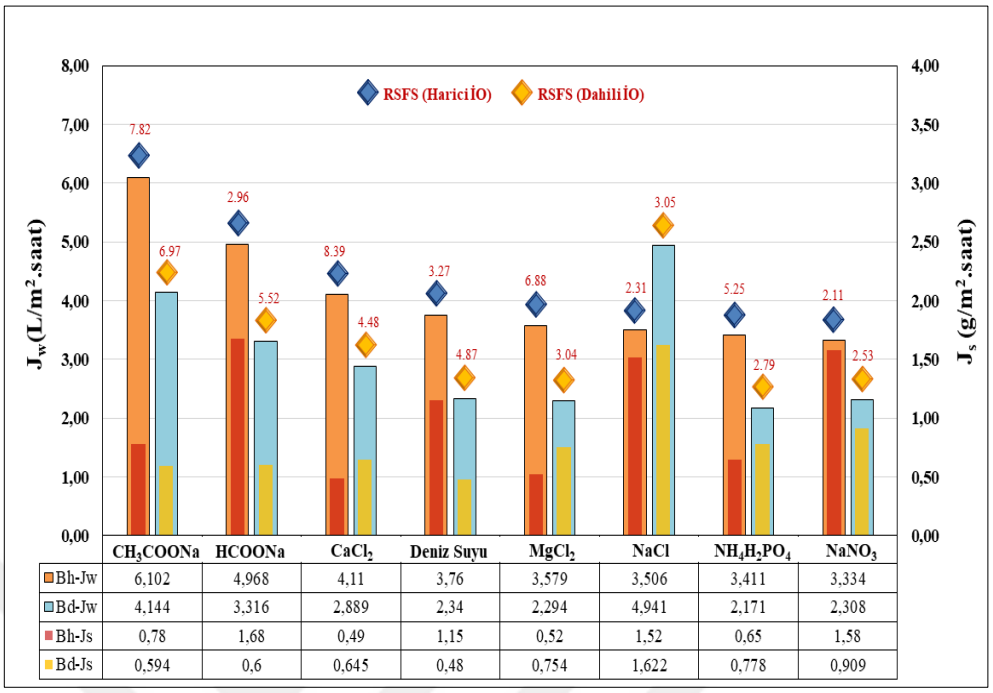
Harici İO çalışmasında en yüksek J_w değeri $NaNO_3$ (16.04 L/m²·saat) ile elde edilmiştir. Diğer ÇÇ türlerine ait J_w değerleri, HCOONa, $NH_4H_2PO_4$, CH_3COONa, Deniz Suyu, NaCl, $CaCl_2$ ve $MgCl_2$ için sırasıyla 13.70, 12.39, 10.50, 7.42, 6.35, 4.42 ve 4.16 L/m²·saat olarak belirlenmiştir. En yüksek J_s değeri 10.7 g/m²·saat ile $NaNO_3$'te elde edilmiştir. Diğer ÇÇ türlerine ait J_s değerleri, Deniz Suyu, $NH_4H_2PO_4$, NaCl, CH_3COONa, HCOONa, $MgCl_2$ ve $CaCl_2$ için

sırasıyla 2.70, 1.98, 1.72, 1.41, 1.4, 0.78 ve 0.48 g/m²·saat olarak belirlenmiştir. RSFS değeri birim J_w başına beslemeye geçen J_s değerini temsil etmektedir. Birimi L/g'dır. RSFS değerinin hem İO performansı için hem de osmotik anaerobik prosesler için yüksek olması tercih edilmektedir (Ansari, 2009). Saf suyun besleme olarak kullanıldığı harici kesikli çalışmalarda en yüksek RSFS değeri HCOONa (9.79), en düşük RSFS ise $NaNO_3$ ile (1.49) elde edilmiştir.

Dahili İO deneylerinde en yüksek J_w değeri HCOONa (11.30 L/m²·saat) ile elde edilmiştir. Diğer ÇÇ türlerine ait J_w değerleri, $NaNO_3$, $NH_4H_2PO_4$, CH_3COONa, Deniz Suyu, $CaCl_2$, NaCl ve $MgCl_2$ için sırasıyla 11.21, 8.93, 7.12, 4.81, 4.28, 4.07 ve 3.79 L/m²·saat olarak belirlenmiştir. En yüksek J_s değeri 0.86 g/m²·saat ile $NaNO_3$'te görülmüştür. Diğer ÇÇ türlerine ait J_s değerleri, NaCl, Deniz Suyu, $NH_4H_2PO_4$, HCOONa, CH_3COONa, $MgCl_2$ ve $CaCl_2$ için sırasıyla 0.67, 0.34, 0.23, 0.21, 0.19, 0.11 ve 0.09 g/m²·saat olarak belirlenmiştir.

En yüksek RSFS değeri HCOONa (53.81) ile elde edilmiştir. En düşük RSFS ise NaCl'de (6.07) bulunmuştur. Saf suyun besleme olarak kullanıldığı dahili sistemlerde yapılan çalışmalarda elde edilen J_w ve RSFS değerlerinin harici sistemlere göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. Her iki çalışmada da $MgCl_2$'ün en düşük J_w değerine sahip olduğu belirlenmiştir.

Şekil 4.7'de, sabit osmotik basınç altında ***bira atıksuyunun*** besleme olarak kullanıldığı kesikli ve dahili İO çalımalarında Deniz Suyu ve ÇÇ'lerin İO performansları verilmiştir.



	CH_3COONa	HCOONa	$CaCl_2$	Deniz Suyu	$MgCl_2$	NaCl	$NH_4H_2PO_4$	$NaNO_3$
Bh-Jw	6,102	4,968	4,11	3,76	3,579	3,506	3,411	3,334
Bd-Jw	4,144	3,316	2,889	2,34	2,294	4,941	2,171	2,308
Bh-Js	0,78	1,68	0,49	1,15	0,52	1,52	0,65	1,58
Bd-Js	0,594	0,6	0,645	0,48	0,754	1,622	0,778	0,909

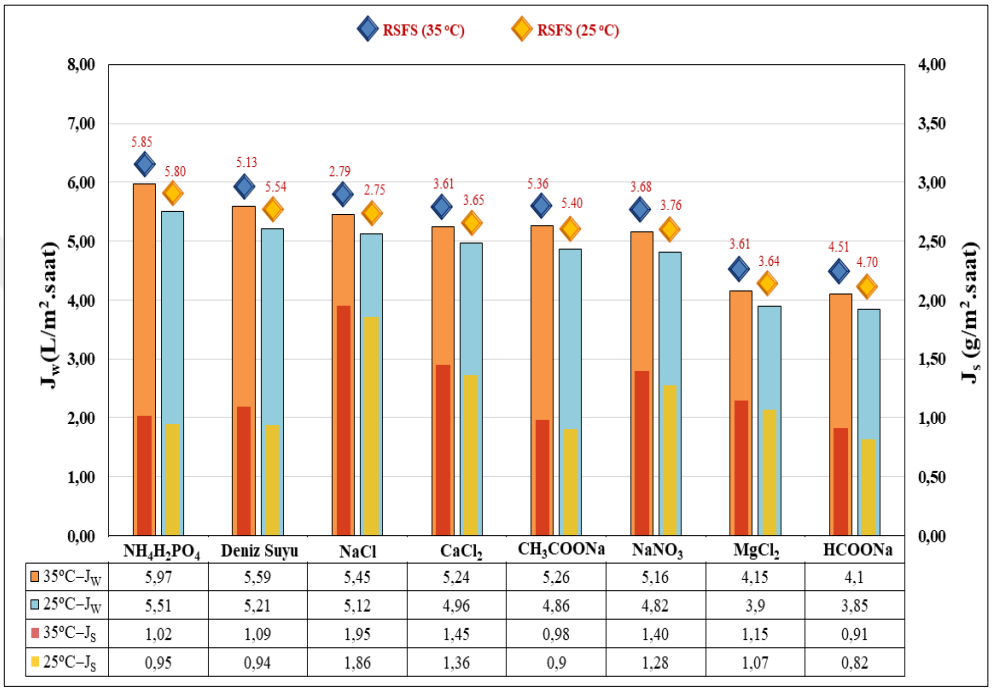
Şekil 4.7: ÇÇ'lerin sabit osmotik basınçta (30 bar) İO performansları (B: bira atıksuyu, h: harici, d: dahili).

Harici İO deneylerinde en yüksek J_w değeri CH_3COONa (6.10 L/m²·saat) ile elde edilmiştir. Diğer ÇÇ türlerine ait J_w değerleri, HCOONa, $CaCl_2$, Deniz Suyu, $MgCl_2$, NaCl, $NH_4H_2PO_4$ ve $NaNO_3$ için sırasıyla 4.96, 4.11, 3.76, 3.57, 3.50, 3.41 ve 3.33 L/m²·saat olarak belirlenmiştir. En yüksek J_s değeri 1.68 g/m²·saat ile HCOONa'ta elde edilmiştir. Diğer ÇÇ türlerine ait J_s değerleri, $NaNO_3$, NaCl, Deniz Suyu, CH_3COONa, $NH_4H_2PO_4$, $MgCl_2$ ve $CaCl_2$ için sırasıyla 1.58, 1.52, 1.15, 0.78, 0.65, 0.52 ve 0.49 g/m²·saat olarak belirlenmiştir. En yüksek RSFS değeri $CaCl_2$ (8.39) ile elde edilmiştir. En düşük RSFS ise $NaNO_3$'da (2.11) bulunmuştur.

Dahili İO deneylerinde en yüksek J_w değeri NaCl (4.94 L/m²·saat) ile elde edilmiştir. Diğer ÇÇ türlerine ait J_w değerleri, CH_3COONa, HCOONa, $CaCl_2$, Deniz Suyu, $NaNO_3$, $MgCl_2$ ve $NH_4H_2PO_4$ için sırasıyla 4.14, 3.31, 2.88, 2.34, 2,30, 2.29 ve 2.17 L/m²·saat olarak belirlenmiştir. En yüksek J_s değeri 1.62 g/m²·saat ile NaCl'de görülmüştür. Diğer ÇÇ türlerine ait J_s değerleri, $NaNO_3$, $NH_4H_2PO_4$, $MgCl_2$, $CaCl_2$, HCOONa, CH_3COONa ve Deniz Suyu için sırasıyla 0.91, 0.78, 0.75, 0.64, 0.60, 0.59 ve 0.48 g/m²·saat olarak belirlenmiştir. En yüksek RSFS değeri CH_3COONa (6.97) ile elde edilmiştir. En düşük RSFS değeri ise $NaNO_3$ (2.53) ile elde edilmiştir.

4.2.2.2. Farklı sıcaklıklarda İO performansı

ÇÇ türlerinin farklı sıcaklık koşullarında J_w ve J_s değerlerini belirlemek amacıyla, her bir ÇÇ türü ve Deniz suyu ile 1 M konsantrasyonda İO performans testi gerçekleştirilmiştir. Deneyler, bira atıksuyu ile dahili İO sisteminde, 25°C ve 35°C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.8'de ÇÇ'lerin farklı sıcaklıklardaki İO performansı değerleri verilmiştir.



	$NH_4H_2PO_4$	Deniz Suyu	NaCl	$CaCl_2$	CH_3COONa	$NaNO_3$	$MgCl_2$	HCOONa
35°C–J_W	5,97	5,59	5,45	5,24	5,26	5,16	4,15	4,1
25°C–J_W	5,51	5,21	5,12	4,96	4,86	4,82	3,9	3,85
35°C–J_S	1,02	1,09	1,95	1,45	0,98	1,40	1,15	0,91
25°C–J_S	0,95	0,94	1,86	1,36	0,9	1,28	1,07	0,82

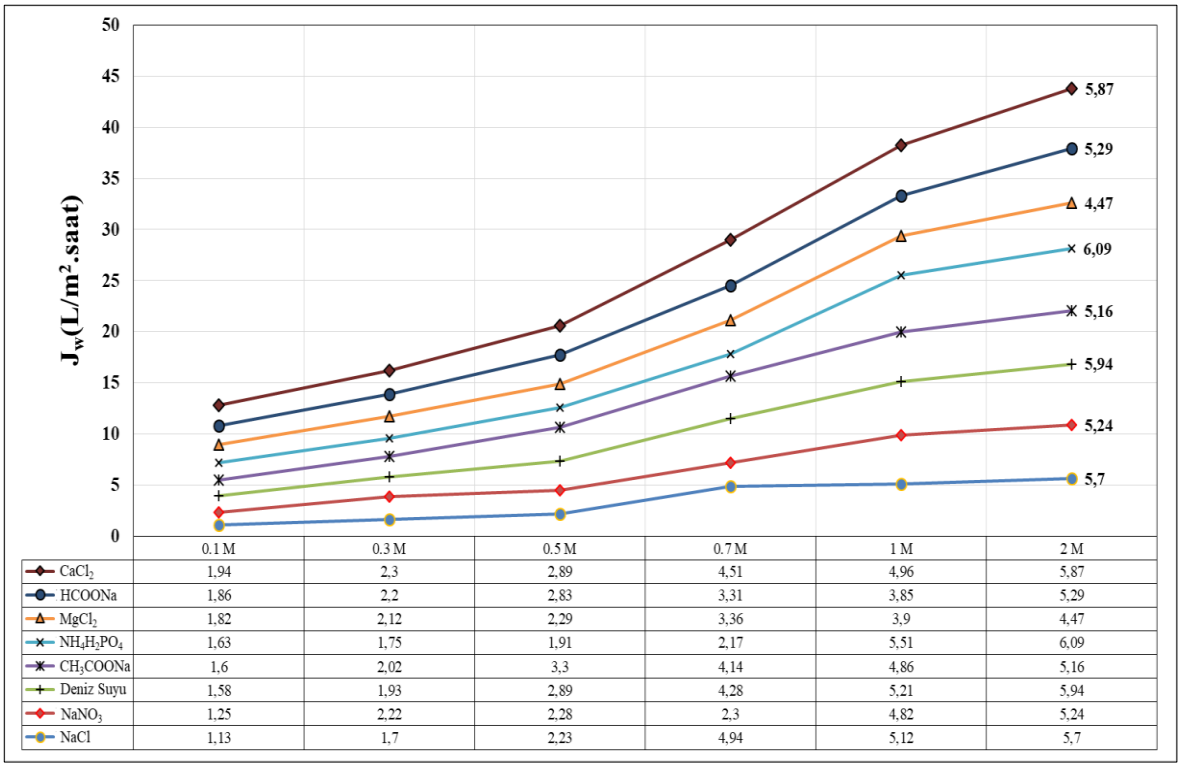
Şekil 4.8: ÇÇ'lerin farklı sıcaklıklardaki İO performansları.

25°C ve 35°C'de yapılan çalışmalarda en yüksek J_w değeri (sırasıyla 5.51 ve 5.97 L/m²·saat) $NH_4H_2PO_4$ ile elde edilmiştir. Diğer ÇÇ türlerine ait 25°C'de J_w değerleri, Deniz Suyu, NaCl, $CaCl_2$, CH_3COONa, $NaNO_3$, $MgCl_2$ ve HCOONa için sırasıyla 5.21, 5.12, 4.96, 4.86, 4.82, 3.90 ve 3.85 L/m²·saat olarak belirlenmiştir. Diğer ÇÇ türlerine ait 35°C'de J_w değerleri, Deniz Suyu, NaCl, CH_3COONa, $CaCl_2$, $NaNO_3$, $MgCl_2$ ve HCOONa için sırasıyla 5.59, 5.45, 5.26, 5.24, 5.16, 4.15 ve 4.10 L/m²·saat olarak belirlenmiştir. Sabit 25°C'de yapılan kesikli çalışmada, en yüksek RSFS değeri (5.80) $NH_4H_2PO_4$ ile elde edilmiştir. NaCl is en düşük RSFS oranı 2.75 ile en düşük İO performansına sahip ÇÇ türüdür. Sabit 35°C'de yapılan çalışmada ise büyükten küçüğe RSFS oranları sırasıyla; $NH_4H_2PO_4$: 5.85, CH_3COONa: 5.36, Deniz Suyu: 5.13, HCOONa: 4.51, $NaNO_3$: 3.68, $CaCl_2$: 3.61, $MgCl_2$: 3.60 ve NaCl: 2.79 olarak elde edilmiştir. Her bir ÇÇ türünün artan sıcaklık ile daha yüksek J_w değeri elde ettiği belirlenmiştir. Bununla

birlikte sıcaklık artışının, J_s değerini J_w değerine oranla daha az miktarda arttırdığı belirlenmiştir.

4.2.2.3. Farklı ÇÇ konsantrasyonlarında İO performansı

ÇÇ türlerinin farklı konsantrasyon değerlerinde J_w ve J_s değerlerini belirlemek amacıyla, her bir ÇÇ türü ile 0.1–2 M konsantrasyon aralığında İO performans testi yapılmıştır. Deneyler, bira atıksuyu ile dahili İO sisteminde gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.9'da ÇÇ türlerinin J_w değerleri yer almaktadır**.**



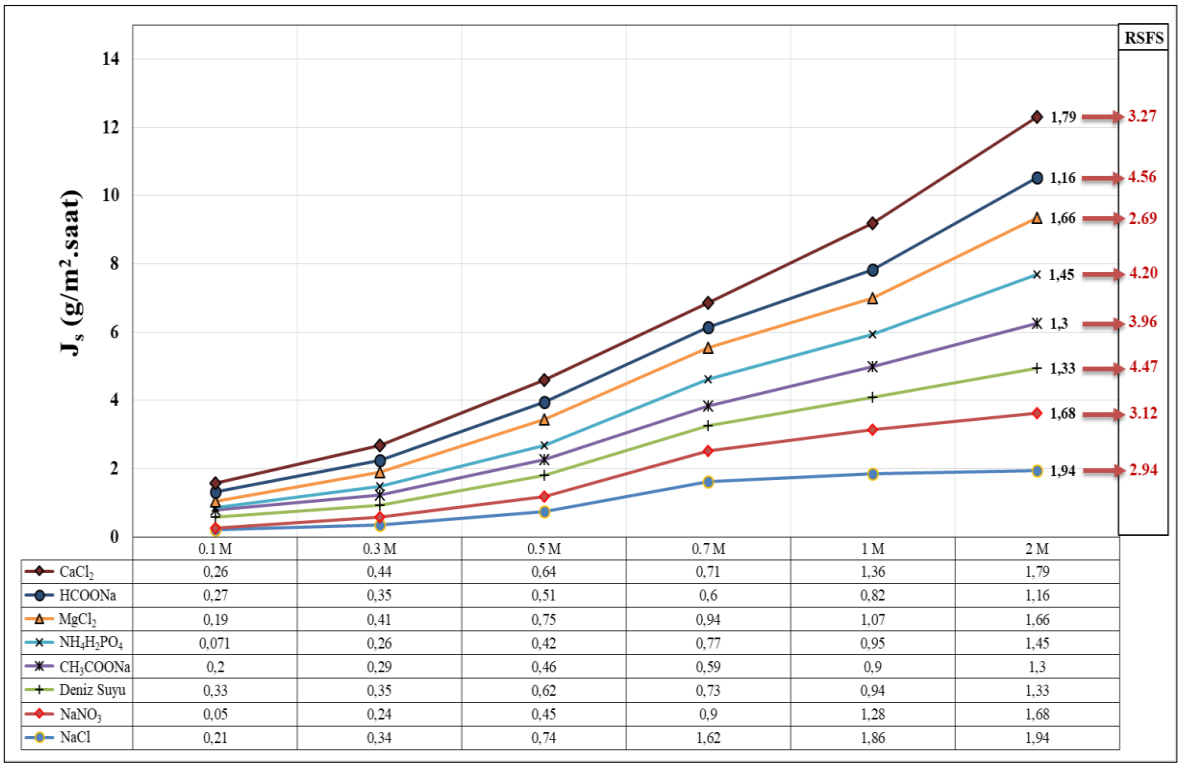
	0.1 M	0.3 M	0.5 M	0.7 M	1 M	2 M
$CaCl_2$	1,94	2,3	2,89	4,51	4,96	5,87
HCOONa	1,86	2,2	2,83	3,31	3,85	5,29
$MgCl_2$	1,82	2,12	2,29	3,36	3,9	4,47
$NH_4H_2PO_4$	1,63	1,75	1,91	2,17	5,51	6,09
CH_3COONa	1,6	2,02	3,3	4,14	4,86	5,16
Deniz Suyu	1,58	1,93	2,89	4,28	5,21	5,94
$NaNO_3$	1,25	2,22	2,28	2,3	4,82	5,24
NaCl	1,13	1,7	2,23	4,94	5,12	5,7

Şekil 4.9: ÇÇ'lerin farklı konsantrasyonda J_w değişimleri.

0.1 M konsantrasyonda yapılan çalışmada en yüksek J_w değeri $CaCl_2$ (1.94 L/m²·saat) ile elde edilmiştir. En düşük J_w değeri ise NaCl ile 1.13 L/m²·saat olarak belirlenmiştir. 0.3 M konsantrasyonda yapılan çalışmada, en yüksek J_w değeri $CaCl_2$ (2.30 L/m²·saat) ile en düşük J_w değeri ise NaCl (1.70 L/m²·saat) ile elde edilmiştir. 0.5 M konsantrasyonda yapılan çalışmada CH_3COONa 3.30 L/m²·saat ile en yüksek akı elde edilmiştir. En düşük akı ise $NH_4H_2PO_4$ ile 1.91 L/m²·saat olduğu görülmektedir. 0.7 M konsantrasyonda yapılan çalışmada da NaCl, 4.94 L/m²·saat ile en yüksek J_w değerini sağlamaktadır. 0.7 M konsantrasyonda en yüksek RSFS değerini 7.02 değeri ile CH_3COONa sağlamıştır. En düşük RSFS değeri (2.55) ise $NaNO_3$'da

görülmüştür. 1 M konsantrasyonda yapılan çalışmada $NH_4H_2PO_4$, 5.51 L/m²·saat (RSFS: 5.8) ile en yüksek J_w değeri elde edilmiştir. En düşük J_w ise HCOONa ile 3.85 L/m²·saat (RSFS: 4.69) olduğu görülmektedir. 2 M konsantrasyon değerinde yapılan çalışmada $NH_4H_2PO_4$ en yüksek J_w değeri (6.09 L/m²·saat–RSFS: 4.2) elde edilmiştir. 2 M konsantrasyonda en yüksek RSFS değeri (4.56) ise HCOONa'da, en düşük düşük RSFS değeri (2.69) ise $MgCl_2$'de bulunmuştur. Artan ÇÇ konsantrasyonu ile birlikte en yüksek J_w değerine $NH_4H_2PO_4$ ve en yüksek RSFS değerine HCOONa ile ulaşıldığı belirlenmiştir.

Artan ÇÇ konsantrasyonlarında J_s değişimleri Şekil 4.10'da verilmiştir.



	0.1 M	0.3 M	0.5 M	0.7 M	1 M	2 M
$CaCl_2$	0,26	0,44	0,64	0,71	1,36	1,79
HCOONa	0,27	0,35	0,51	0,6	0,82	1,16
$MgCl_2$	0,19	0,41	0,75	0,94	1,07	1,66
$NH_4H_2PO_4$	0,071	0,26	0,42	0,77	0,95	1,45
CH_3COONa	0,2	0,29	0,46	0,59	0,9	1,3
Deniz Suyu	0,33	0,35	0,62	0,73	0,94	1,33
$NaNO_3$	0,05	0,24	0,45	0,9	1,28	1,68
NaCl	0,21	0,34	0,74	1,62	1,86	1,94

Şekil 4.10: ÇÇ'lerin farklı konsantrasyonda J_s ve RSFS değişimleri.

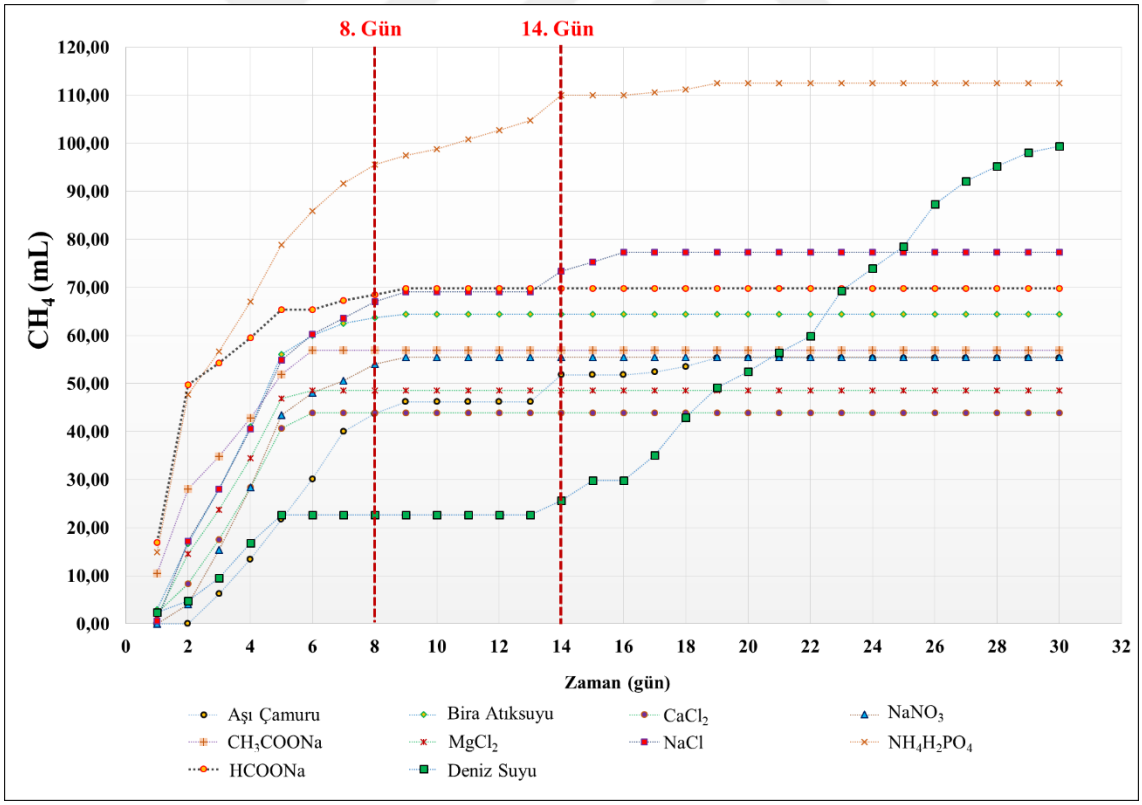
Şekil 4.10'da görüldüğü gibi, 0.1 M'de en yüksek J_s değeri (0.33 g/m²·saat) Deniz Suyu ile yapılan İO performans testinde elde edilmiştir. 0.5 M'de en yüksek J_s değeri (0.75 g/m²·saat) $MgCl_2$ ile yapılan İO performans testinde elde edilmiştir. 0.7 M'de ise en yüksek J_s değeri (1.62 g/m²·saat) NaCl ile elde edilmiştir. 1 M ve 2 M'de yapılan çalışmalarda en yüksek J_s değerleri NaCl ile edilmiştir (1.86 ve 1.94 g/m²·saat).

4.2.3. BMP Testi Sonuçları

BMP çalışmalarında kullanılan aşı çamuru, bir çikolata fabrikasının anaerobik arıtma tesisinden alınmıştır. Çamurda UAKM/AKM oranı %86.6 olarak belirlenmiştir. BMP testi kapsamında yapılan çalışmanın ilk aşamasında, CH_3COONa, HCOONa, NaCl, $NaNO_3$, $CaCl_2$, $MgCl_2$, $NH_4H_2PO_4$, Deniz Suyu ve Bira Atıksuyu (3000 mg/L KOİ) numuneleri 3 farklı alkalinite değerinde (1260, 2500 ve 4000 $mgCaCO_3/L$) test edilmiştir. Her bir numune (50 mL), %90 su geri kazanım oranına karşılık gelen sabit konsantrasyonda (C_f) hazırlanmıştır (Denklem 3.17). BMP testinin ikinci aşamasında, ÇÇ numuneleri 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1 ve 2 M konsantrasyonlarında hazırlanarak test edilmiştir.

4.2.3.1. Farklı alkalinite değerlerinde yapılan BMP deneyleri

Şekil 4.11'de, 1260 $mgCaCO_3/L$ alkalinite değerinde hazırlanan ÇÇ'lerin, aşı çamuru numunesinin ve bira atıksuyunun CH_4 üretim değişimleri verilmiştir.

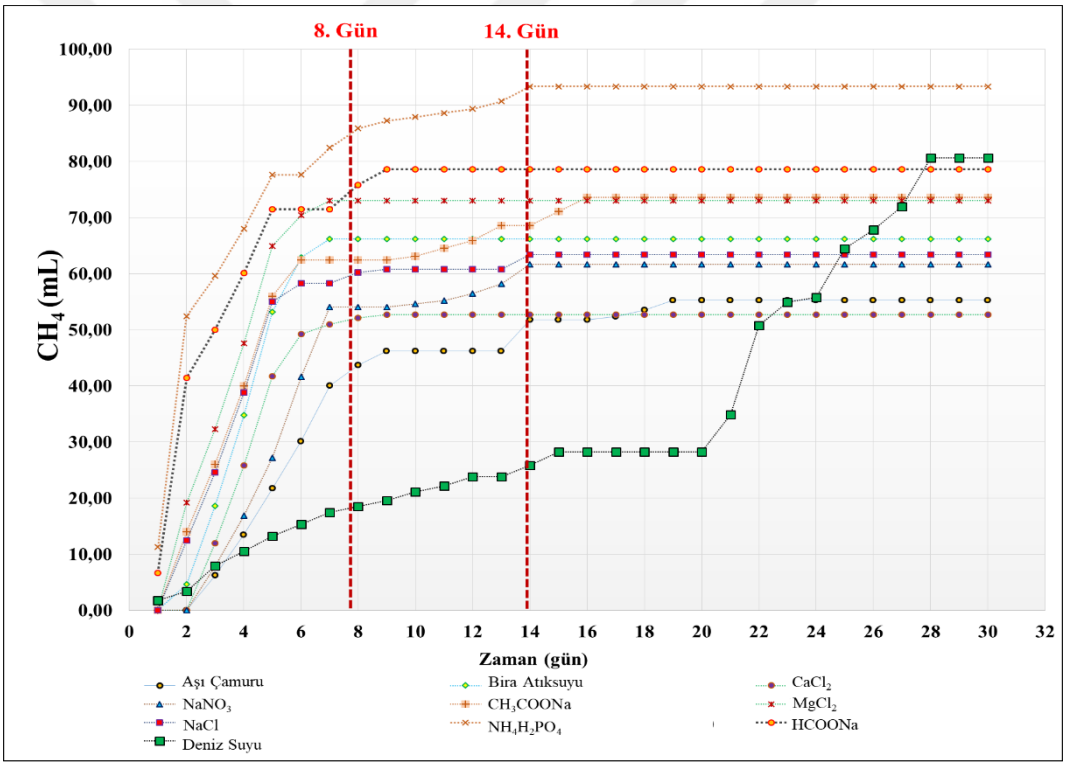


Şekil 4.11: 1260 $mgCaCO_3/L$ alkalinite değerinde elde edilen CH_4 miktarları.

Şekil 4.11'de görüldüğü gibi tüm numunelerdeki CH_4 miktarı 8. güne kadar artarak devam etmiştir. 8. gün itibari ile $NH_4H_2PO_4$ ve Deniz Suyu hariç, tüm numunelerde CH_4 miktarı artışının sabitlendiği belirlenmiştir. 14. gün itibariyle aşı çamuru numunesi ve NaCl'de CH_4

miktarının tekrardan arttığı görülmektedir. $NH_4H_2PO_4$'ün CH_4 miktarının 14. güne arttığı belirlenmiştir. Deniz Suyunda ise BMP testi süresince CH_4 miktarının arttığı belirlenmiştir.

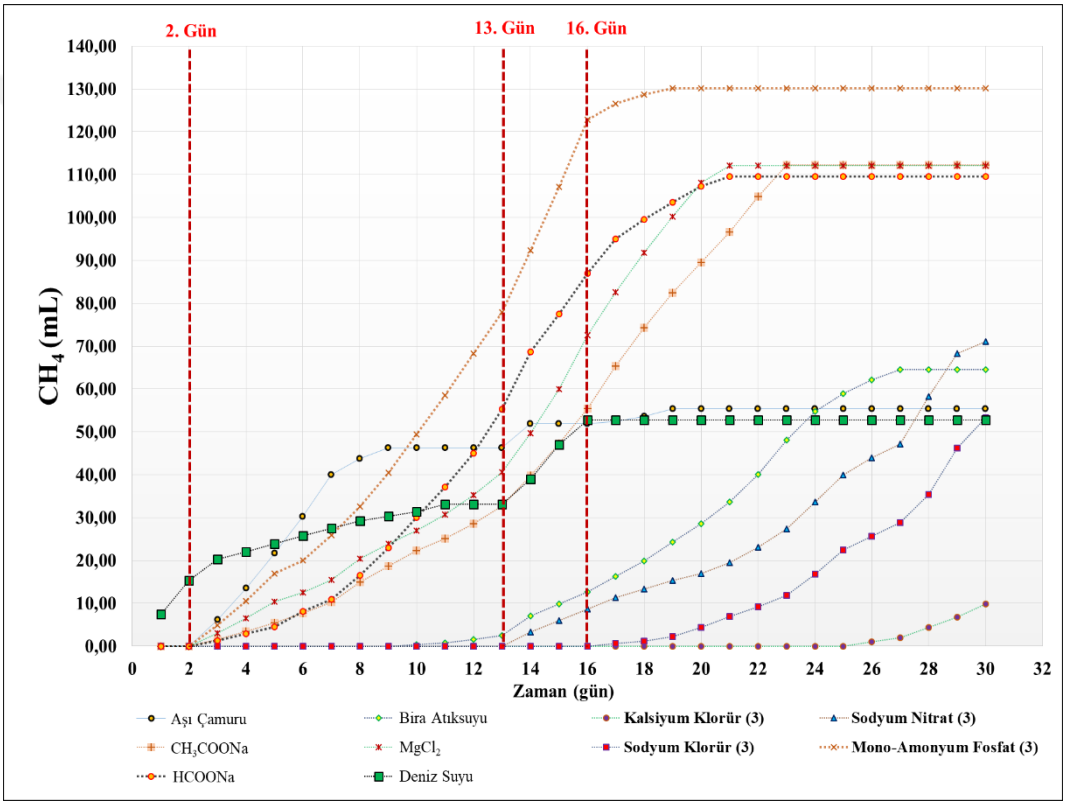
$NH_4H_2PO_4$, HCOONa, Deniz Suyu ve NaCl numunelerinde BMP testi sonunda aşı çamuru ve bira atıksuyu numunelerinden daha yüksek CH_4 üretimi elde edilmiştir. 30 gün süren BMP testi sonucunda elde edilen verilere göre en yüksek CH_4 miktarı (112.52 mL) $NH_4H_2PO_4$ ile sağlanmıştır. Diğer ÇÇ'lerde CH_4 üretimi miktarları, Deniz Suyu, NaCl, HCOONa, CH_3COONa, $NaNO_3$, $MgCl_2$ ve $CaCl_2$ için sırasıyla yaklaşık 99.5, 77, 70, 57, 55, 46 ve 44 mL olarak bulunmuştur. Bira atıksuyu numunesinde ise CH_4 üretimi miktarı 64 mL olarak belirlenmiştir. Şekil 4.12'de 2500 $mgCaCO_3/L$ alkalinite değerinde hazırlanan ÇÇ'lerin, aşı çamuru numunesinin ve bira atıksuyunun CH_4 üretim değişimleri verilmiştir.



Şekil 4.12: 2500 $mgCaCO_3/L$ alkalinite değerinde elde edilen CH_4 miktarları.

Şekil 4.12'de görüldüğü gibi deneylerde 5. güne kadar tüm numunelerde CH_4 miktarının hızlı bir artış göstermiştir. $CaCl_2$ ile yapılan deneyde, 17. günden sonra bu ÇÇ ile aşı çamurundan daha düşük CH_4 miktarı elde edilmiştir. 14. günden, 30. güne kadar geçen sürede tüm ÇÇ ve bira atıksuyu numunelerinin sabit bir CH_4 üretimine sahip olduğu görülmüştür. 30. gün sonunda $NH_4H_2PO_4$, Deniz Suyu, CH_3COONa, $MgCl_2$, NaCl, $NaNO_3$ ve HCOONa'nın CH_4 hacminin aşı çamurundan daha yüksek olduğu belirlenmiştir. 30 gün süren BMP testi sonucunda elde

edilen verilere göre 2500 $mgCaCO_3/L$ alkalinite değerinde ÇÇ'lere ait CH_4 üretimi miktarları $NH_4H_2PO_4$, Deniz Suyu, HCOONa, CH_3COONa, $MgCl_2$, NaCl, $NaNO_3$ ve $CaCl_2$ için sırasıyla yaklaşık 93, 81, 79, 74, 73, 63, 62 ve 53 mL olarak bulunmuştur. Bira atıksuyu numunesinde ise CH_4 miktarı 66 mL olarak ölçülmüştür. 1260 $mgCaCO_3/L$ alkalinite ile 2500 $mgCaCO_3/L$ alkalinite değerlerinde yapılan BMP değerlerini kıyasladığımızda, $NH_4H_2PO_4$ ve NaCl hariç tüm ÇÇ türlerinde CH_4 üretiminin 2500 $mgCaCO_3/L$ alkalinite değerinde daha yüksek olduğu görülmüştür. Şekil 4.13'te 4000 $mgCaCO_3/L$ alkalinite değerinde hazırlanan ÇÇ'lerin, aşı çamuru numunesinin ve bira atıksuyunun CH_4 üretim değişimleri verilmiştir.



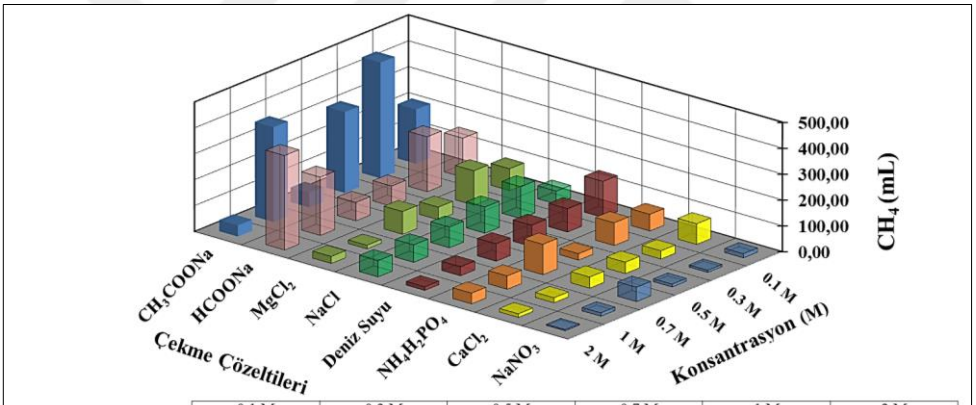
Şekil 4.13: 4000 $mgCaCO_3/L$ alkalinite değerinde elde edilen CH_4 miktarları.

4000 $mgCaCO_3/L$ alkalinitede hazırlanan tüm numunelerdeki CH_4 miktarları, 1260 mg/L ve 2500 $mgCaCO_3/L$ alkalinite değerlerinden farklılık göstermiştir. 4000 $mgCaCO_3/L$ alkalinite değerindeki CH_4 üretimi miktarları $NH_4H_2PO_4$, CH_3COONa, $MgCl_2$, HCOONa, $NaNO_3$, NaCl, Deniz Suyu ve $CaCl_2$ için sırasıyla yaklaşık 130, 112.2, 112.1, 110, 71, 53, 52 ve 10 mL olarak bulunmuştur. Bira atıksuyu numunesinin CH_4 miktarı ise 64.53 mL olarak belirlenmiştir. Diğer alkalinite konsantrasyonları ile kıyasladığımızda, 4000 $mgCaCO_3/L$ alkalinite değerinde elde edilen CH_4 üretim miktarları NaCl, Deniz Suyu ve $CaCl_2$ hariç tüm numunelerde daha yüksek bulunmuştur. $NH_4H_2PO_4$, HCOONa, CH_3COONa, Deniz Suyu ve $MgCl_2$ numunelerinde CH_4

üretiminin BMP testinin 2. günü itibari ile başladığı ve 16. güne arttığı görülmektedir. NaCl, $NaNO_3$, $CaCl_2$ ve bira atıksuyu numunelerinde ise CH_4 üretiminin 13. gün itibari ile başladığı ve 30. güne kadar artarak devam ettiği belirlenmiştir. $NaNO_3$, Deniz Suyu, NaCl ve $CaCl_2$'de çalışma süresince üretilen CH_4 miktarının, aşı çamuru numunesinin CH_4 miktarından daha düşük olduğu görülmektedir.

4.2.3.2. Farklı ÇÇ konsantrasyonlarında yapılan BMP deneyleri

Farklı konsantrasyon değerlerinde yürütülen BMP deneylerinde, ÇÇ'ler 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1 ve 2 M konsantrasyon değerlerinde test edilmiştir. Ayrıca, 3000 mg/L KOİ eşdeğerinde hazırlanan Glikoz ($C_6H_{12}O_6$) ile de deney gerçekleştirilmiştir. $C_6H_{12}O_6$ ile yapılan 30 günlük çalışmanın sonucunda toplam CH_4 miktarı 225 mL olarak belirlenmiştir. Şekil 4.14'te farklı konsantrasyonlarda hazırlanan tüm ÇÇ türlerine ait toplam CH_4 üretim miktarı yer almaktadır.



	0.1 M	0.3 M	0.5 M	0.7 M	1 M	2 M
CH_3COONa	209,87	447,00	312,13	56,86	366,01	43,13
HCOONa	150,69	212,11	78,22	71,31	224,85	364,35
$MgCl_2$	84,43	132,88	48,58	88,03	14,07	27,00
NaCl	49,87	123,06	100,99	79,90	67,36	62,68
Deniz Suyu	139,21	90,26	82,44	67,33	34,66	13,8
$NH_4H_2PO_4$	64,04	87,70	24,71	117,16	51,42	41,44
$CaCl_2$	79,64	31,61	43,87	42,90	19,35	13,56
$NaNO_3$	15,90	8,41	11,09	55,44	12,94	4,70

Şekil 4.14: ÇÇ'lerin farklı konsantrasyonlarında üretilen CH_4 miktarları.

2 M konsantrasyonda en yüksek CH_4 miktarı (364 mL) HCOONa ile elde edilmiştir. En düşük CH_4 miktarı (4.7 mL) ise $NaNO_3$ ile elde edilmiştir. Deniz Suyunun CH_4 miktarının 13.80 mL olduğu belirlenmiştir. 1 M konsantrasyonda ise en yüksek CH_4 miktarı (366 mL) CH_3COONa ile elde edilmiştir. 0.7 M konsantrasyonda yapılan BMP çalışmasında en yüksek CH_4 miktarı (117 mL) $NH_4H_2PO_4$ ile elde edilmiştir. En düşük CH_4 üretimi (43 mL) $CaCl_2$ ile elde edilmiştir. 0.5 M konsantrasyonda yapılan denemede ise en yüksek CH_4 miktarı (312 mL) CH_3COONa'de görülmüştür. 0.3 M konsantrasyonda yapılan çalışmada en yüksek CH_4 miktarı

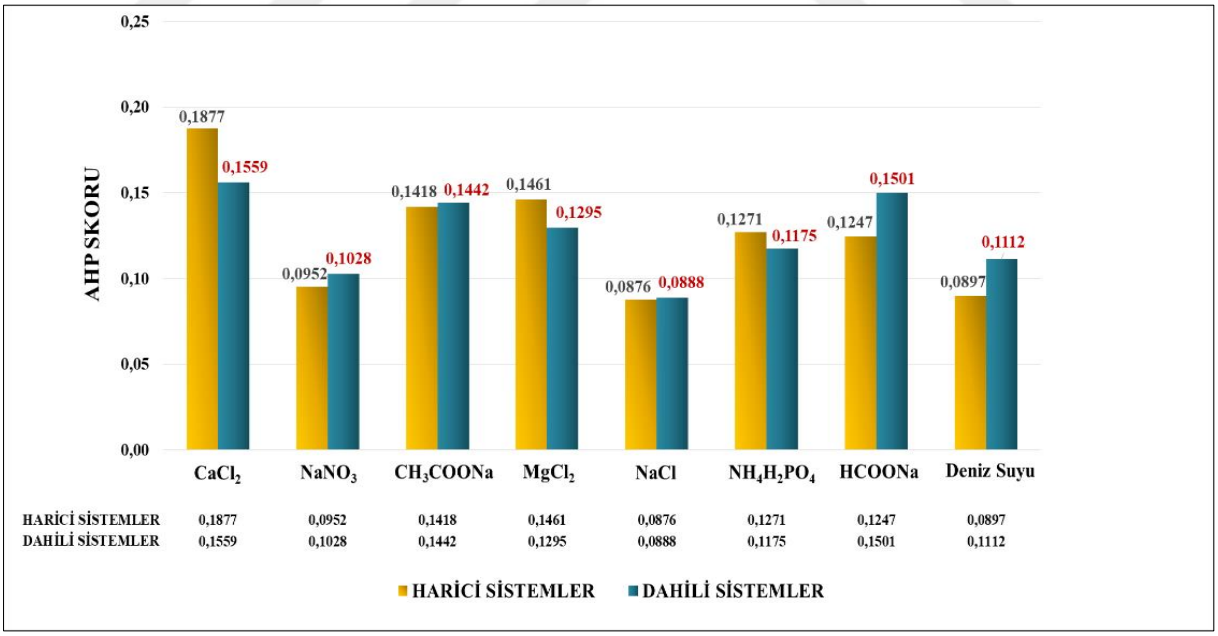
(447 mL) CH_3COONa ve en düşük CH_4 miktarı (8.5 mL) $NaNO_3$ ile elde edilmiştir. En düşük konsantrasyonda (0.1 M) yapılan BMP testinde en yüksek CH_4 miktarı (209 mL) CH_3COONa ve en yüksek CH_4 miktarı (16 mL) $NaNO_3$ ile elde edilmiştir.

4.2.4. Kesikli İO Çalışmalarının AHP Analizi ile Değerlendirilmesi

Yapılan tüm kesikli çalışmalara ait verilerin değerlendirilmesi ve AnOMBR sisteminde kullanılacak ÇÇ türlerini belirlemek amacı ile AHP analizi gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda yapılan çalışmalar 3 ana temelde incelenmiştir: (*i*) sabit osmotik basınçta (30 bar) dahili ve harici İO proseslerinin kıyaslanması (J_w ve J_s), *(ii)* tüm dahili kesikli İO çalışmaları ve BMP testi sonuçlarının değerlendirilmesi (J_w, J_s, CH_4 üretim miktarları ve ÇÇ maliyetleri) *(iii)* ÇÇ türlerinin yukarıda verilen tüm deneylerdeki toplam AHP skorlarının değerlendirilmesi (tüm çalışmalardan elde edilen J_w, J_s, CH_4 üretim miktarları ve ÇÇ maliyetleri).

4.2.4.1. Dahili ve harici İO uygulamalarının değerlendirilmesi

Şekil 4.15'te, dahili ve harici İO sistemlerinde 30 bar sabit osmotik basınç değerinde yapılan çalışmalardan elde edilen J_w ve J_s değerlerine ait AHP skorları verilmiştir.



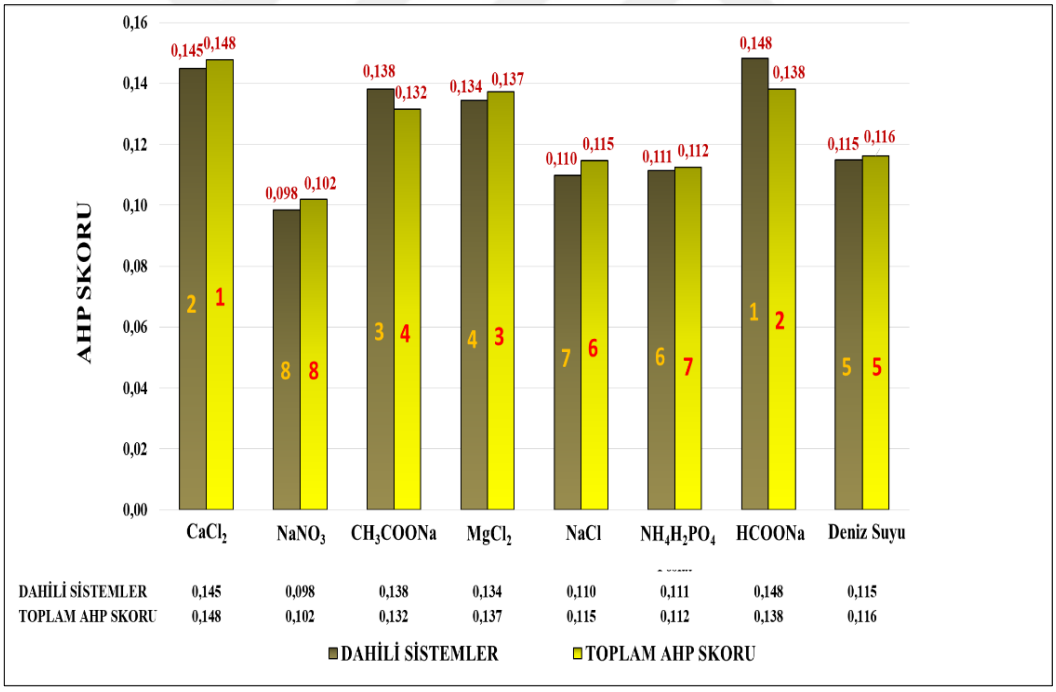
Şekil 4.15: 30 bar osmotik basınçta dahili ve harici sistemlerin AHP skorları.

ÇÇ'lerin AHP skorları, İO membranının dahili ve harici uygulamalardaki verimliliğini belirlemek amacıyla anaerobik performansın etkisi ve ÇÇ maliyetleri hesaba katılmadan değerlendirilmiştir. Dahili sistemlerde en yüksek performans 0.156'lık skor ile $CaCl_2$'de elde

edilmiştir. Diğer ÇÇ türleri HCOONa, CH_3COONa, $MgCl_2$, $NH_4H_2PO_4$, Deniz Suyu, $NaNO_3$ ve NaCl için AHP skorları sırasıyla 0.150, 0.144, 0.129, 0.117, 0.111, 0.103 ve 0.088 olarak belirlenmiştir. Harici İO sisteminde de en yüksek performansı gösteren ÇÇ türü, 0.187'lik skor ile $CaCl_2$ olarak belirlenmiştir. Harici sistemlerde en düşük İO performansını ise NaCl (0.087'lik skor) göstermiştir. Diğer ÇÇ türleri $MgCl_2$, CH_3COONa, $NH_4H_2PO_4$, HCOONa, $NaNO_3$ ve Deniz Suyu için AHP skorları sırasıyla 0.146, 0.142, 0.127, 0.125, 0.095 ve 0.089 olarak belirlenmiştir. İO performansı açısından hem dahili hem de harici İO uygulamalarında $CaCl_2$'nin en uygun ÇÇ türü olduğu görülmüştür.

4.2.4.2. AnOMBR uzun süreli işletimine uygun ÇÇ türünün belirlenmesi

Şekil 4.16'da tüm dahili kesikli İO çalışmaları ve BMP testi sonuçlarının değerlendirilmesine ait (J_w, J_s, CH_4 miktarları ve ÇÇ maliyetleri) AHP skorları ve toplam AHP skorları (tüm çalışma verileri) yer almaktadır.

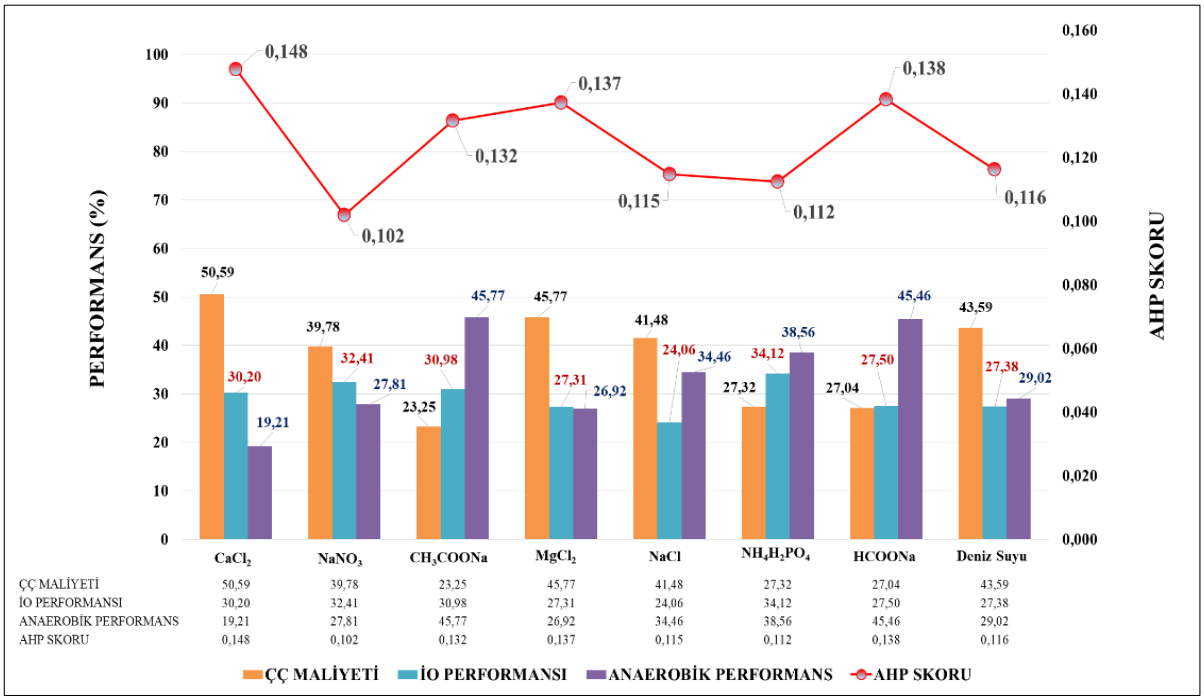


Şekil 4.16: Tüm dahili sistem test sonuçları skoru ile toplam AHP skorlarının kıyaslanması.

Dahili sistemlerde en yüksek AHP skoru (0.148) HCOONa ile elde edilmiştir. Diğer ÇÇ türlerine ait AHP skorları $CaCl_2$, CH_3COONa, $MgCl_2$, Deniz Suyu, $NH_4H_2PO_4$, NaCl ve $NaNO_3$ için sırasıyla 0.145, 0.138, 0.134, 0.115, 0.111, 0.110 ve 0.098 olarak belirlenmiştir. Toplam AHP skorları $CaCl_2$, HCOONa, $MgCl_2$, CH_3COONa, Deniz Suyu, NaCl, $NH_4H_2PO_4$ ve $NaNO_3$ için sırasıyla 0.148, 0.138, 0.137, 0.132, 0.116, 0.115, 0.112 ve 0.102 olarak belirlenmiştir.

HCOONa ve CH_3COONa ÇÇ türlerinin sadece dahili sistemler için elde edilen AHP skorunun, toplam AHP skorundan daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Uzun süreli işletimde kullanılmak uygun görülen ilk 3 sırada yer alan ÇÇ türleri, $CaCl_2$, HCOONa ve $MgCl_2$ olarak belirlenmiştir.

Şekil 4.17'de tüm deneylere ait toplam AHP skorlarının değerlendirilmesi (tüm çalışmalardan elde edilen J_w, J_s, CH_4 üretim miktarları ve ÇÇ maliyetleri) yer almaktadır.



Şekil 4.17: Tüm ÇÇ türlerinin AHP skorunun değerlendirilmesi.

Şekil 4.17'de görüldüğü üzere $CaCl_2$ en yüksek AHP skoruna (0.148) sahip inorganik ÇÇ türü olarak bulunmuştur. 0.148'lik AHP skorunun %50.59'unu ÇÇ maliyeti, %30.20'sini İO performansı ve %19.21'lik kısmını anaerobik performans oluşturmaktadır. $NaNO_3$, 0.102 AHP skoru ile en düşük verime sahip ÇÇ türü olarak belirlenmiştir. NaCl, diğer ÇÇ türlerine göre %24.06'lık İO performansı yüzdesiyle en düşük osmotik performans gösteren ÇÇ türü olmuştur. Organik ÇÇ türleri arasından en yüksek AHP skoru (0.138) HCOONa ile elde edilmiştir. 0.138'lik AHP skorunun %45.46'sı anaerobik performansından kaynaklanmaktadır. Bu oran tüm ÇÇ türleri arasında en yüksek anaerobik performansa karşılık gelmektedir. 0.138'lik AHP skorunun %27.04'ünü ÇÇ maliyeti ve %27.50'sini İO performansı oluşturmaktadır. Toplam AHP skorları ile yapılan değerlendirme sonucunda inorganik ÇÇ türü olarak $CaCl_2$ ve organik ÇÇ türü olarak HCOONa'ın AnOMBR sisteminde uzun süreli arıtılabilirlik çalışmasında kullanımına karar verilmiştir.

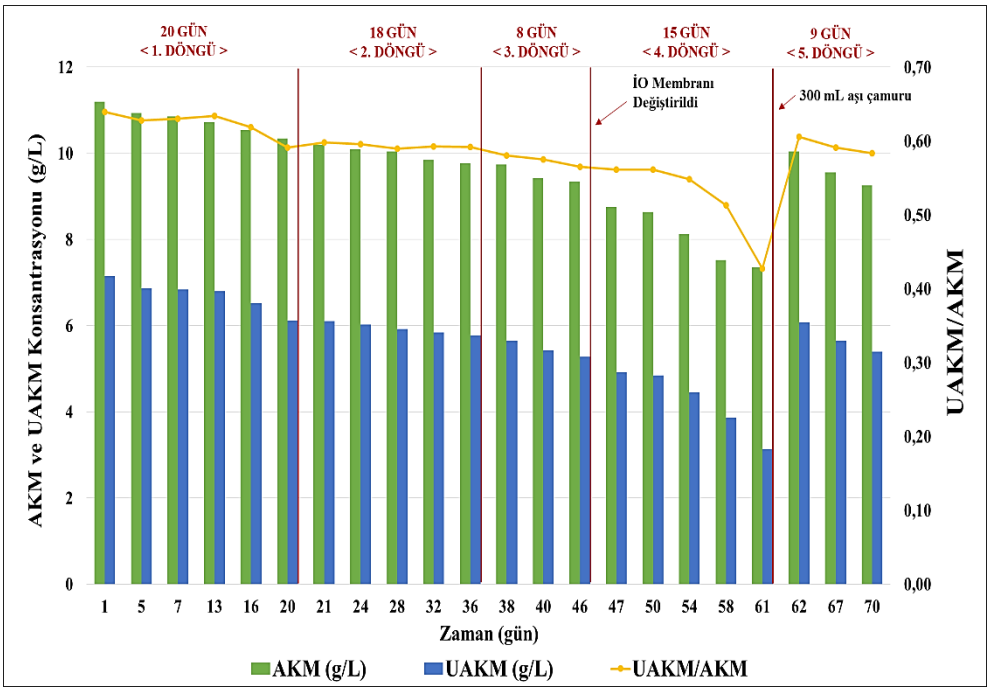
4.3. ANOMBR'DE UZUN SÜRELİ ARITABİLİRLİK ÇALIŞMALARI

4.3.1. AnOMBR–ÇÇ: HCOONa ile İşletimine Ait Deney Sonuçları

AnOMBR'de ÇÇ olarak HCOONa'nın kullanıldığı uzun süreli arıtılabilirlik çalışması 70 gün sürmüştür. Sistem, çalışma süresince 30 bar sabit osmotik basınç değerinde (ÇÇ konsantrasyonu 0.72 M) işletilmiştir. ÇÇ tankındaki 0.72 M'ye denk gelen iletkenlik ise 65.5 mS/cm'dir. ÇÇ tankına yerleştirilmiş olan iletkenlik probu 65.5 mS/cm değerinde sabitlenmiştir. Çalışma 5 döngüden oluşmaktadır: Sistem, ***1.(20 gün), 2.(18 gün) ve 3.(8 gün)*** döngülerde reaktör içinde iletkenlik değeri 30 mS/cm olana kadar işletilmiştir. İlk 3 döngüde, döngü sonlarında çökmeye bırakılan reaktörden üst faz alınmış ve SÇÇ'ler kompozit olarak biriktirilmiştir. ***4. döngüde (15 gün)*** reaktör çökmeye bırakılmış ve üst faz alınmış, İO membranı değiştirilmiş ve yeni membran ile işletime devam edilmiştir. ***5. döngüde (9 gün)*** azalan UAKM/AKM oranını yükseltmek amacıyla reaktöre aşı çamuru eklenmiş ve AKM miktarı 10 g/L'ye çıkartılmıştır.

4.3.1.1. AKM ve UAKM değişimleri

AnOMBR sistemindeki AKM ve UAKM değişimi Şekil 4.18'de verilmiştir.



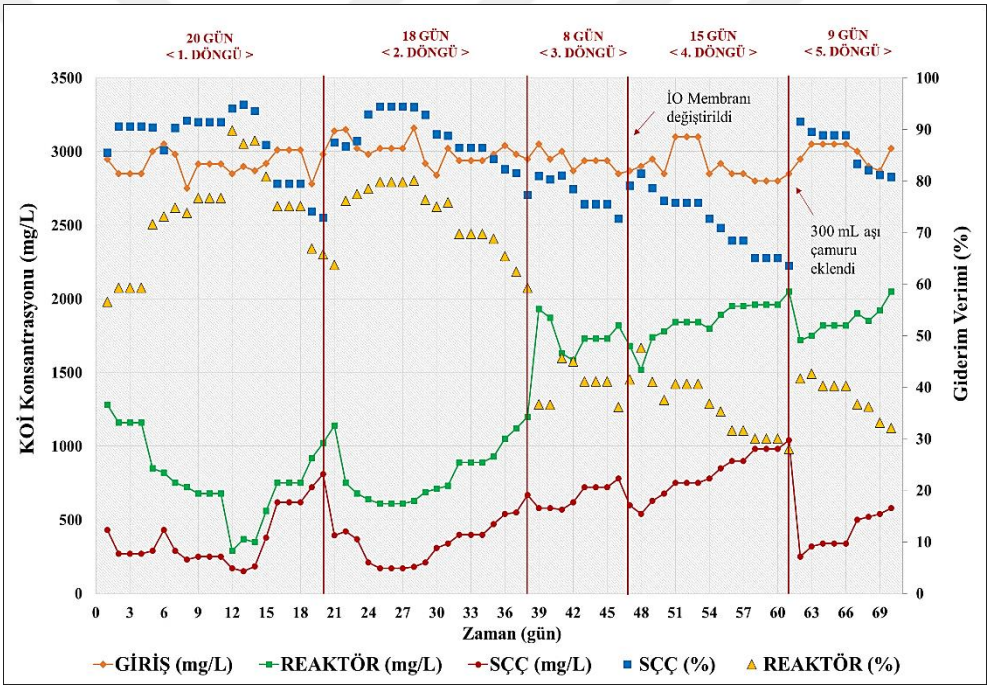
Şekil 4.18: AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) sisteminde AKM ve UAKM değişimleri.

İşletim süresince AnOMBR sisteminde ilk 4 döngüde AKM ve UAKM konsantrasyonu sürekli olarak azalmıştır. UAKM/AKM oranının da eş zamanlı düştüğü gözlemlenmiştir. İşletim

sürecinin başında 10 g/L olan AKM konsantrasyonu 4. döngünün sonunda 7.35 g/L'ye düşmüştür. UAKM miktarı ise başlangıçta 7 g/L olup, 4. döngüsü sonunda 3.14 g/L'ye düşmüştür. UAKM/AKM oranı başlangıçta ve 4. döngü sonunda sırasıyla, 0.64 ve 0.43 olarak belirlenmiştir. Çalışmanın 5. döngüsünde reaktöre toplamda 300 mL çamur eklenmiş, AKM 10 g/L ve UAKM 6.1 g/L'ye çıkartılmıştır. UAKM/AKM oranı 5. döngünün başlangıcında ve sonunda sırasıyla 0.61 ve 0.57 olarak bulunmuştur.

4.3.1.2. KOİ değişimi

Şekil 4.19'da AnOMBR sisteminde ve ÇÇ tankında KOİ konsantrasyonu değişimi ve KOİ giderim verimi verilmiştir.



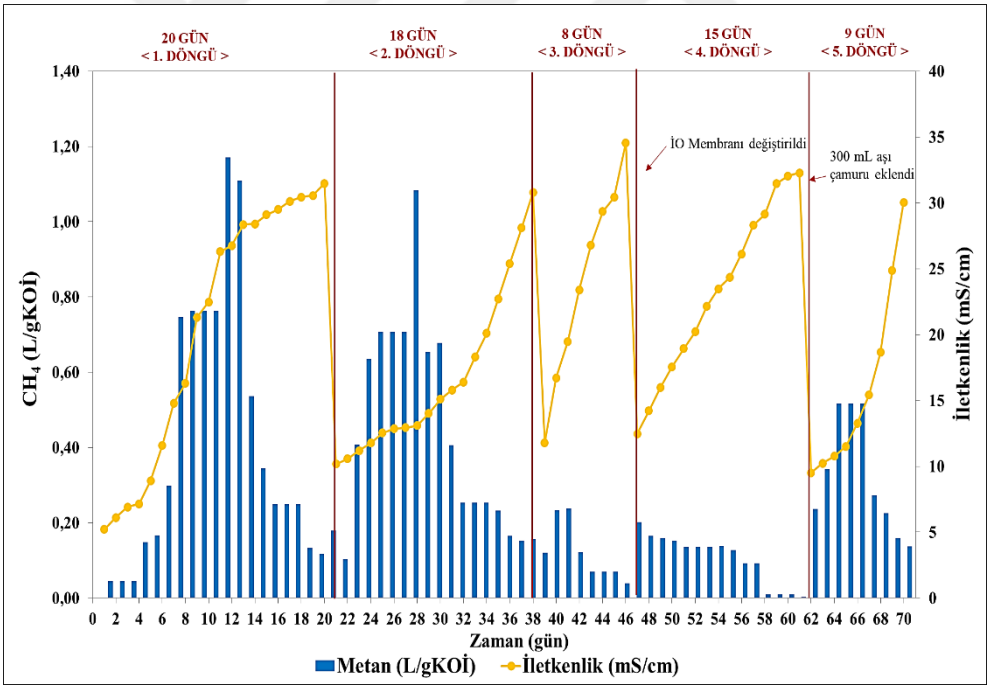
Şekil 4.19: AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) sisteminde KOİ değişimi.

İşletim süresince bira atıksuyunun KOİ konsantrasyonu 2750 mg/L ile 3000 mg/L arasında değişim göstermiştir. Çalışmanın ilk döngüsünde reaktör içerisinde KOİ giderim verimi 12. gün sonunda %90 olarak bulunmuştur. SÇÇ'de ise 12. günde KOİ giderim verimi %94 olarak belirlenmiştir. 12. günden sonra KOİ giderim verimi düşmeye başlamıştır. 20. gün itibari ile reaktör içerisinde iletkenlik seviyesi 30 mS/cm değerine ulaşmış ve sistem durdurulmuştur. 20. gün sonunda KOİ giderim veriminin reaktör içerisinde %66'ya ve SÇÇ çıkışında ise %73'e düştüğü belirlenmiştir. 2. döngünün ilk 7 gününde reaktörde KOİ giderim verimi %80'e, SÇÇ'de KOİ giderim verimi ise %94'e yükselmiştir. 2. döngünün sonunda reaktörde ve SÇÇ

çıkışında KOİ giderim verimi sırasıyla %59 ve %77'ye düşmüştür. 3. döngünün ilk günlerinde yükselen KOİ giderim verimi, döngünün sonunda reaktör içerisinde %36'ya ve SÇÇ çıkışında %72'ye düşmüştür. 4. döngünün ilk 3 gününde üst faz değişimine bağlı olarak KOİ giderim veriminin reaktör içerisinde %41'e yükseldiği görülmüştür. SÇÇ çıkışında ise KOİ giderim verimi %76 olarak belirlenmiştir. 4. döngüde İO membranının değiştirilmesinin KOİ giderim veriminin artışına olumlu bir etkisi olmadığı gözlemlenmiştir. 5. döngünün ilk günlerinde reaktör içerisinde KOİ giderim verimi %42'ye yükselmiş ve SÇÇ çıkışında %92 KOİ giderim verimi elde edilmiştir. 5. döngünün sonunda KOİ giderim verimi reaktörde %32 ve SÇÇ çıkışında %81 olarak belirlenmiştir.

4.3.1.3. Metan ve iletkenlik değişimleri

AnOMBR sisteminde iletkenlik ve CH_4 üretim miktarlarına ait değişim Şekil 4.20'de verilmiştir.



Şekil 4.20: AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) sisteminde iletkenlik ve CH_4 değişimleri.

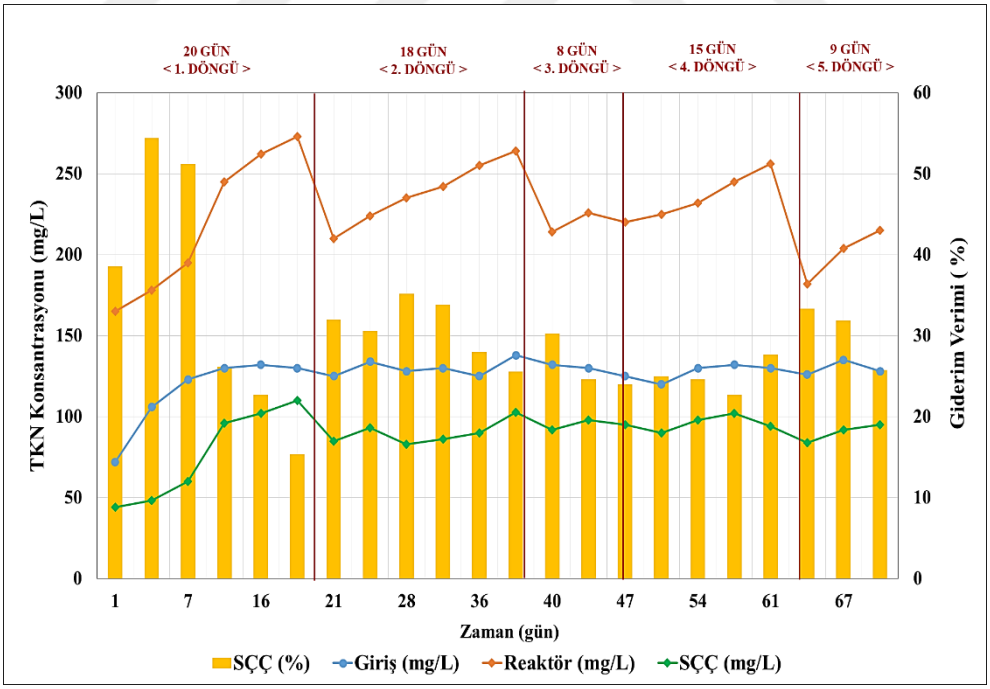
AnOMBR sisteminde iletkenlik değerinin her döngüde kademeli olarak arttığı görülmektedir. 1. döngü başlangıcında 5.2 mS/cm olan reaktör içi iletkenlik değeri 20 günlük işletme sonucunda 30.56 mS/cm'ye yükselmiştir. Reaktördeki üst fazın alınması sonrasında, 2., 3., 4. ve 5. döngülerin başlangıcında iletkenlik değeri sırasıyla 10.18, 11.80, 12.47 ve 9.5 mS/cm'ye düşmüştür. Her bir döngüde reaktör içerisindeki iletkenlik değeri, bir önceki döngüye göre daha

kısa sürede 30 mS/cm'ye yükselmiştir. İO membranının değiştiği 4. döngüde ise bu sürecin daha uzun sürdüğü (15 gün) görülmüştür.

Reaktör içerisinde CH_4 miktarının 1. döngüde iletkenlik seviyesinin 22 mS/cm üzerine çıktığı tarihten itibaren düşüşe geçtiği belirlenmiştir. En yüksek CH_4 miktarı 12. gün itibariyle 0.30 L/gKOİ olarak bulunmuştur. 1. döngünün sonunda ise CH_4 miktarı 0.08 L/gKOİ'ye düşmüştür. 2. döngüde ise 28 gün itibariyle tekrardan 0.33 L/gKOİ'ye yükselmiştir. Fakat 3. döngü içerisinde en yüksek CH_4 miktarı 40. gün itibariyle 0.18 L/gKOİ olarak elde edilmiştir. 4. döngü sonunda CH_4 miktarı 0.01 L/gKOİ'ye düşmüştür. 5. döngü itibariyle çamur ilavesine bağlı olarak CH_4 verimi 64. gün itibariyle 0.35 L/gKOİ'ye yükselmiştir. Sonuç olarak, iletkenlik artışının CH_4 miktarı üzerinde olumsuz bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir.

4.3.1.4. TP ve TKN değişimleri

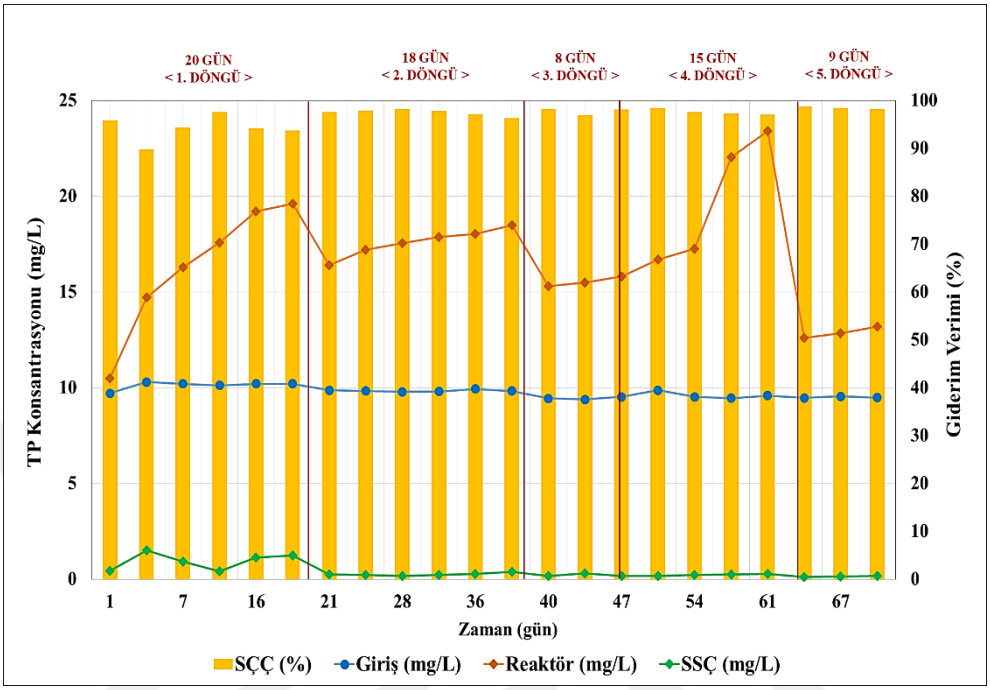
Şekil 4.21'de AnOMBR sisteminde ve ÇÇ tankında TKN konsantrasyonu değişimi ve TKN giderim verimi verilmiştir.



Şekil 4.21: AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) sisteminde TKN değişimi.

Şekil 4.21'de görüldüğü üzere, işletme süresince TKN konsantrasyonu reaktör içerisinde sürekli artış göstermiştir. SÇÇ çıkışında TKN giderim verimi ise %16–54 aralığında değişim göstermiştir. Üst fazın alındığı her döngü sonunda ise TKN konsantrasyonunun reaktör içerisinde azaldığı gözlemlenmiştir.

Şekil 4.22'de AnOMBR sisteminde ve ÇÇ tankında TP konsantrasyonu değişimi ve TP giderim verimi verilmiştir.

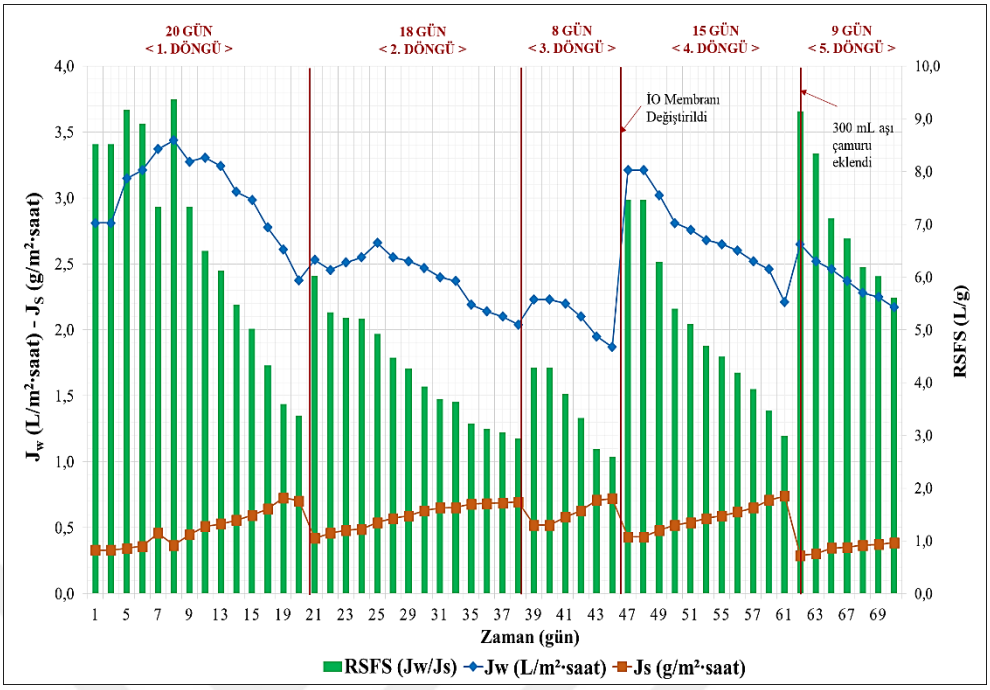


Şekil 4.22: AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) sisteminde TP değişimi.

Şekil 4.22'de görüldüğü üzere, SÇÇ çıkışında TP giderim veriminin işletim süresi boyunca %90–99 aralığında değişim göstermiştir. Reaktör içerisinde TP değerinin arttığı fakat üst faz değişimlerinden sonra tekrardan azaldığı görülmektedir.

4.3.1.5. J_w ve J_s değişimleri

Şekil 4.23'te AnOMBR'de J_w, J_s değişimi ve RSFS değerleri verilmiştir. AnOMBR'nin işletimi süresince J_w değeri; 1. döngüde 2.81 L/m²·saat'ten 2.38 L/m²·saat'e, 2. döngüde 2.53 L/m²·saat'ten 2.04 L/m²·saat'e ve 3. döngüde 2.23 L/m²·saat'ten 1.87 L/m²·saat'e düşmüştür. J_s değeri; 1. döngüde 0.330 g/m²·saat'ten 0.704 g/m²·saat'e, 2. döngüde 0.420 g/m²·saat'ten 0.700 g/m²·saat'e ve 3. döngüde 0.520 g/m²·saat'ten 0.720 g/m²·saat'e yükselmiştir. RSFS değeri 1., 2 ve 3. döngü başlangıçlarında sırasıyla 8.51, 6.02 ve 4.28 olarak bulunmuştur. 4. döngüde İO membranının değişimi ile J_w değeri 3.21 L/m²·saat'e yükselmiş, J_s değeri 0.430 g/m²·saat'e düşmüştür. 5. döngünün sonunda J_w değeri 2.17 L/m²·saat'e düşmüş ve J_s değeri 0.387 g/m²·saat'e yükselmiştir. RSFS değeri 5.61 olarak bulunmuştur. Günlük yapılan osmotik geri yıkama ile akı kaybının %90–95 oranında geri kazanıldığı belirlenmiştir.

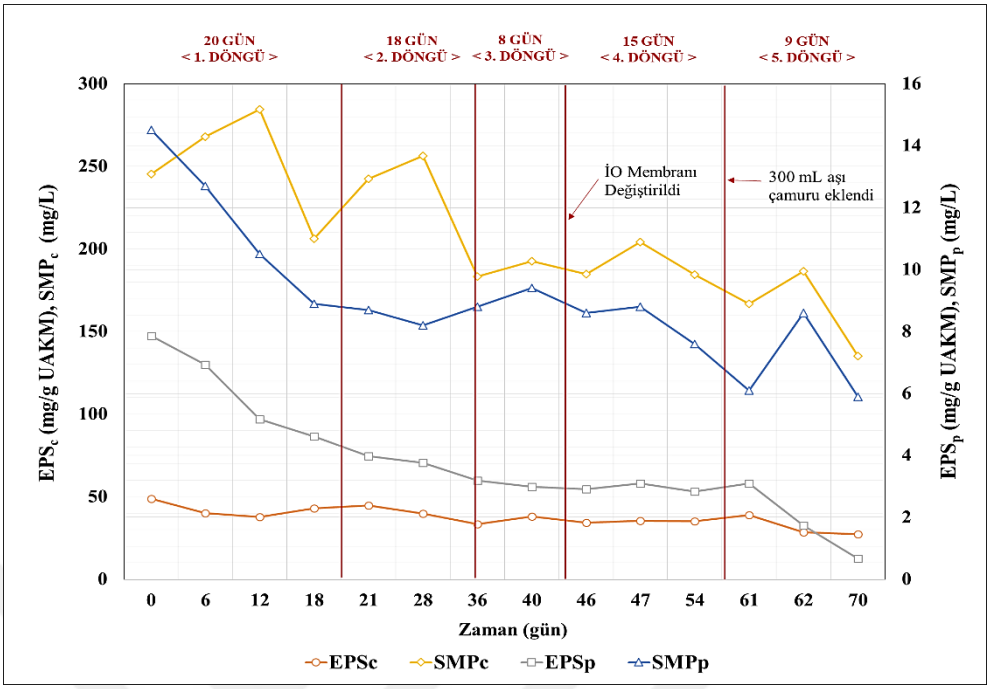


Şekil 4.23: AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) sisteminde J_w ve J_s değişimleri.

4.3.1.6. EPS ve SMP değişimleri

AnOMBR'de EPS ve SMP değişimi Şekil 4.24'te verilmektedir. 1. döngüde EPS_c değeri 48.7 mg/gUAKM'den 43.04 mg/gUAKM'ye düşmüştür. EPS_c değeri 2. döngüde 44.61 mg/gUAKM'ye yükselmiş, 3. döngüde 37.90 mg/gUAKM ve 4. döngüde 35.14 mg/gUAKM'ye düşmüştür. 5. döngü sonunda EPS_c değeri 27.24 mg/gUAKM olarak bulunmuştur. EPS_p değeri 1. döngüde 7.86'dan 4.61 mg/gUAKM'ye, 2. döngüde 3.98'den 3.18 mg/gUAKM'ye, 3. döngüde 3.18'den 2.99 mg/gUAKM'ye ve 4. döngüde 2.92'den 2.83 mg/gUAKM'ye düşmüştür. EPS_p, 5. döngü başlangıcında 3.09 mg/gUAKM'ye yükselmiş ve döngü sonunda 0.67 mg/gUAKM'ye düşmüştür.

SMP_c değeri 1., 2., 3., 4. ve 5. döngüde sırasıyla 245.3, 242.5, 192.6, 204 ve 186.4 mg/L olarak bulunmuştur. SMP_p değeri 1. ve 5. döngü başlangıçlarında sırasıyla 14.5 mg/L ve 8.6 mg/L olduğu belirlenmiştir. İşletim süresince SMP_p değeri 6–14.5 mg/L aralığında değişim göstermiştir.



Şekil 4.24: AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) sisteminde EPS ve SMP değişimleri.

4.3.1.7. Zeta Potansiyeli ve Boyut Dağılımı Değişimleri

AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) işletiminin 1. ve 4. döngülerinde alınan çamur numunelerinde biyokütle boyut dağılımının membran kirlenmesi üzerinde etkisini belirlemek amacıyla boyut dağılımı ve atıksuda bulunan maddelerin yüzey yüklerinin belirlenmesinde zeta potansiyeli ölçümleri yapılmıştır. Tablo 4.2'de AnOMBR(ÇÇ: HCOONa)'de zeta potansiyeli ve boyut dağılımı değişimleri yer almaktadır.

Tablo 4.2: AnOMBR(ÇÇ: HCOONa)'da zeta potansiyeli ve boyut dağılımı değişimi.

Zaman (gün)	Zeta Potansiyeli (mV)	Boyut Dağılımı (µm)		
		d10	d50	d90
1.	–30.5	21.9	72.9	398.6
57.	–21.6	10.7	32.5	114.7

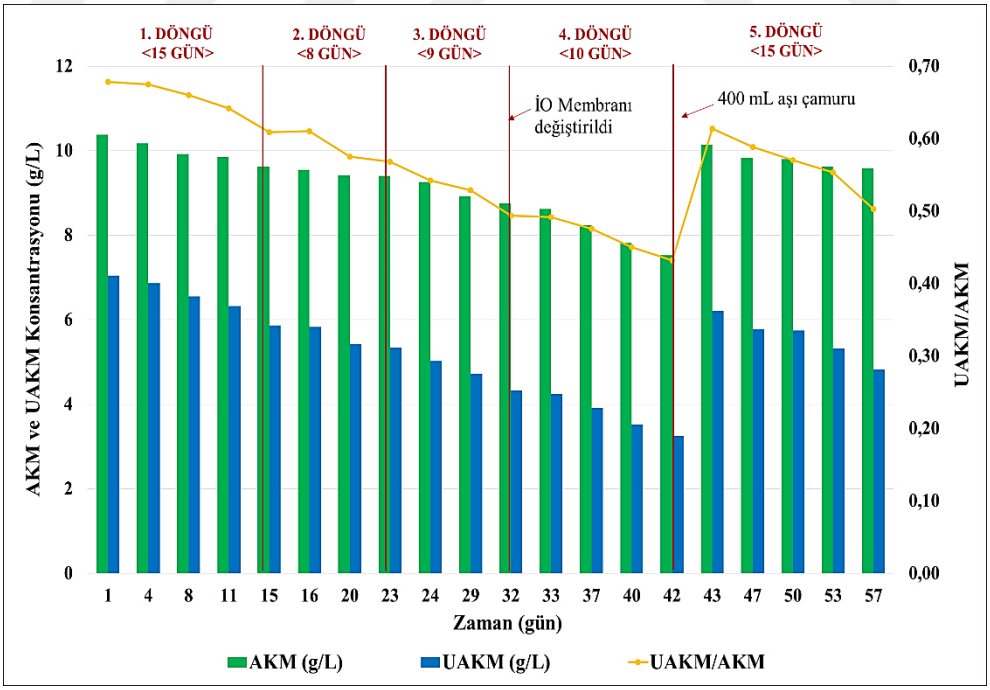
Tablo 4.2'ye bakıldığında 1. ve 57. günler arasında zeta ponsiyelinin –30.5 mV'den –21.6 mV'ye yükseldiği görülmektedir. Boyut dağılımı ise d10, d50 ve d90'da sırasıyla 21.9 µm'dan 10.7 µm'ye, 72.9 µm'dan 32.5 µm'ye ve 398.6 µm'dan 114.7 µm'ye düşmüştür.

4.3.2. AnOMBR–ÇÇ: $CaCl_2$ ile İşletimine Ait Deney Sonuçları

AnOMBR'de ÇÇ olarak $CaCl_2$'ün kullanıldığı uzun süreli arıtılabilirlik çalışması 57 gün sürmüştür. Sistem, çalışma süresince 30 bar sabit osmotik basınç değerinde (ÇÇ konsantrasyonu 0.45 M) işletilmiştir. ÇÇ tankındaki 0.45 M'ye denk gelen iletkenlik ise 99.5 mS/cm'dir. ÇÇ tankına yerleştirilmiş olan iletkenlik probu 99.5 mS/cm değerinde sabitlenmiştir. Çalışma 5 döngüden oluşmaktadır: Sistem, ***1.(15 gün), 2.(8 gün) ve 3.(9 gün)*** döngülerde reaktör içinde iletkenlik değeri 30 mS/cm olana kadar işletilmiştir. İlk 3 döngüde reaktör döngü sonlarında çökmeye bırakılarak, sistemden üst faz alınmış, sistemden alınan üst fazlar ve SÇÇ'ler kompozit olarak biriktirilmiştir. ***4. döngüde (10 gün)*** reaktör döngü sonunda çökmeye bırakılarak üst faz alınmış, İO membranı değiştirilmiş ve yeni membran ile işletime devam edilmiştir. ***5. döngüde (15 gün)*** azalan UAKM/AKM oranını yükseltmek amacıyla reaktöre aşı çamuru eklenmiş ve AKM miktarı 10 g/L'ye çıkartılmıştır.

4.3.2.1. AKM ve UAKM değişimleri

AnOMBR sistemindeki AKM ve UAKM değişimi Şekil 4.25'te verilmiştir.



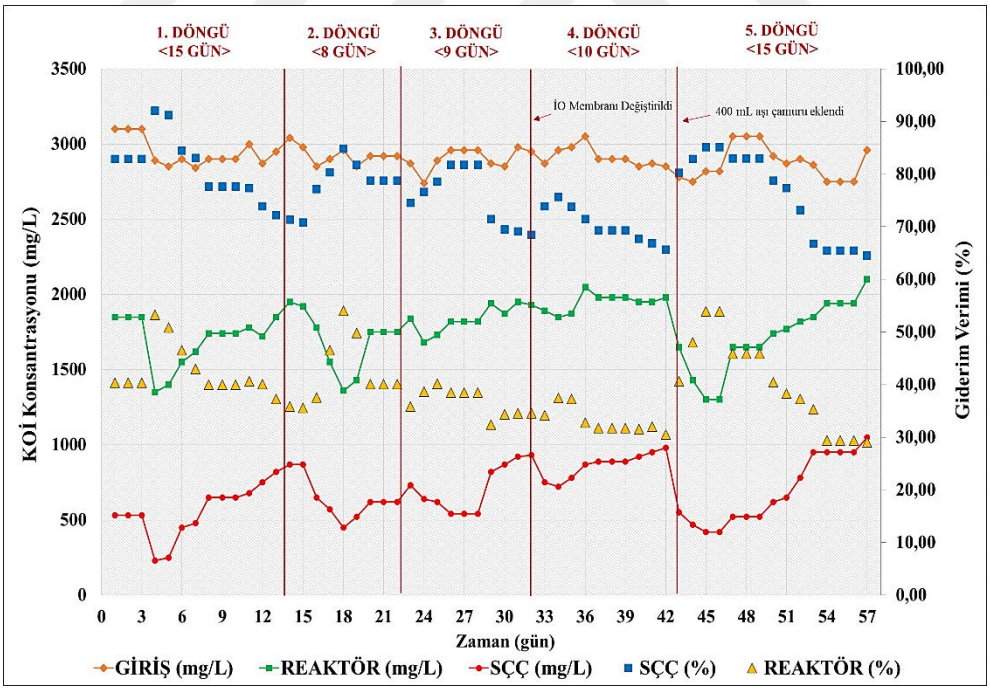
Şekil 4.25: AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) sisteminde AKM ve UAKM değişimleri.

AnOMBR sisteminde ilk 4 döngüde AKM ve UAKM konsantrasyonu sürekli olarak azalmıştır. İşletim sürecinin başında; 10 g/L olan AKM konsantrasyonu 4. döngü sonunda 7.52 g/L'ye düşmüştür. UAKM miktarı başlangıçta 7 g/L olup 4. döngü sonucunda 3.25 g/L'ye düşmüştür.

5. döngü sonrasında eklenen 400 mL aşı çamurununda etkisiyle AKM ve UAKM konsantrasyonları sırasıyla; 10.14 ve 6.22 g/L'ye yükselmiştir. UAKM/AKM oranı ise işletim sürecinin başında 0.68 iken, 5. döngü sonunda 0.50'ye düşmüştür.

4.3.2.2. KOİ değişimi

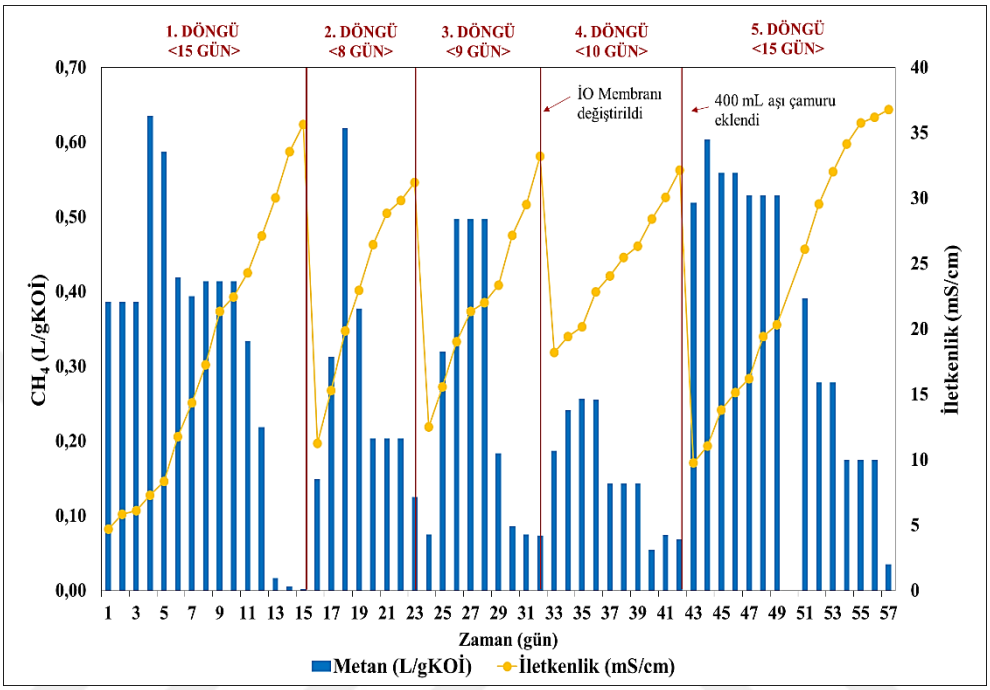
Şekil 4.26'da AnOMBR sisteminde ve ÇÇ tankında KOİ konsantrasyonu değişimi ve KOİ giderim verimi verilmiştir. Çalışma süresince reaktör içerisinde en yüksek KOİ giderim verimi 18. gün sonunda %54 olarak bulunmuştur. SÇÇ'de ise en yüksek KOİ giderim verimi 4. günde %92 olarak elde edilmiştir. 18. günde KOİ giderim verimi reaktör içerisinde %54 ve SÇÇ çıkışında %85 olarak belirlenmiştir. 4. döngünün sonunda KOİ giderim verimi, reaktör içerisinde %30'a ve SÇÇ çıkışında %65'e düşmüştür. 5. döngünün başlangıcında reaktör içerisinde KOİ giderim verimi %54'e yükselmiş ve SÇÇ çıkışında %85 KOİ giderim verimi elde edilmiştir. 5. döngünün sonunda KOİ giderim verimi reaktörde %29 ve SÇÇ çıkışında %65 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.26: AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) sisteminde KOİ değişimi.

4.3.2.3. Metan ve iletkenlik değişimleri

AnOMBR sisteminde iletkenlik ve CH_4 üretim miktarlarına ait değişim Şekil 4.27'de verilmiştir.

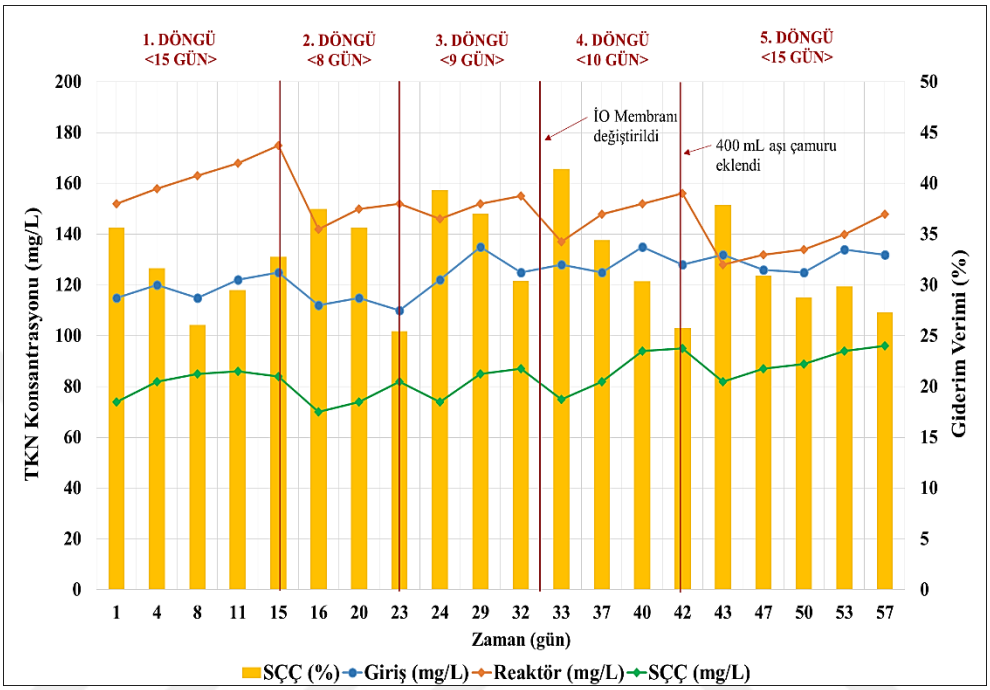


Şekil 4.27: AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) sisteminde iletkenlik ve CH_4 değişimleri.

AnOMBR sisteminde iletkenlik değerinin her döngüde kademeli olarak arttığı görülmektedir. 1. döngü başlangıcında 4.72 mS/cm olan iletkenlik değeri 15 günlük işletme sonucunda 35.67 mS/cm'ye yükselmiştir. Reaktördeki üst fazın alınması sonrasında, 2., 3., 4. ve 5. döngülerin başlangıcında iletkenlik değeri sırasıyla 11.27, 12.51, 18.23 ve 9.78 mS/cm'ye düşmüştür. Her bir döngüde reaktör içerisindeki iletkenlik değeri, bir önceki döngüye göre daha kısa sürede 30 mS/cm'ye yükselmiştir. Reaktör içerisinde CH_4 miktarı, 1. döngüde iletkenlik seviyesinin 22 mS/cm üzerine çıktığı tarihten itibaren azalmaya başlamıştır. En yüksek CH_4 miktarı 4. gün itibariyle 0.25 L/gKOİ olarak bulunmuştur. 1. döngünün sonunda ise CH_4 miktarı 0.002 L/gKOİ'ye düşmüştür. 2. döngüde CH_4 miktarı 0.03–0.19 L/gKOİ arasında değişim göstermiştir. 3. döngüde en yüksek CH_4 miktarı 0.16 L/gKOİ olarak elde edilmiştir. 4. döngü sonunda CH_4 miktarı 0.01 L/gKOİ'ye düşmüştür. 5. döngüde CH_4 mikatrı 44. Günde 0.20 L/gKOİ'ye yükselmiş, döngü sonunda 0.01 L/gKOİ'ye düşmüştür. Sonuç olarak, iletkenlik artışının CH_4 verimi üzerinde olumsuz bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir.

4.3.2.4. TP ve TKN değişimleri

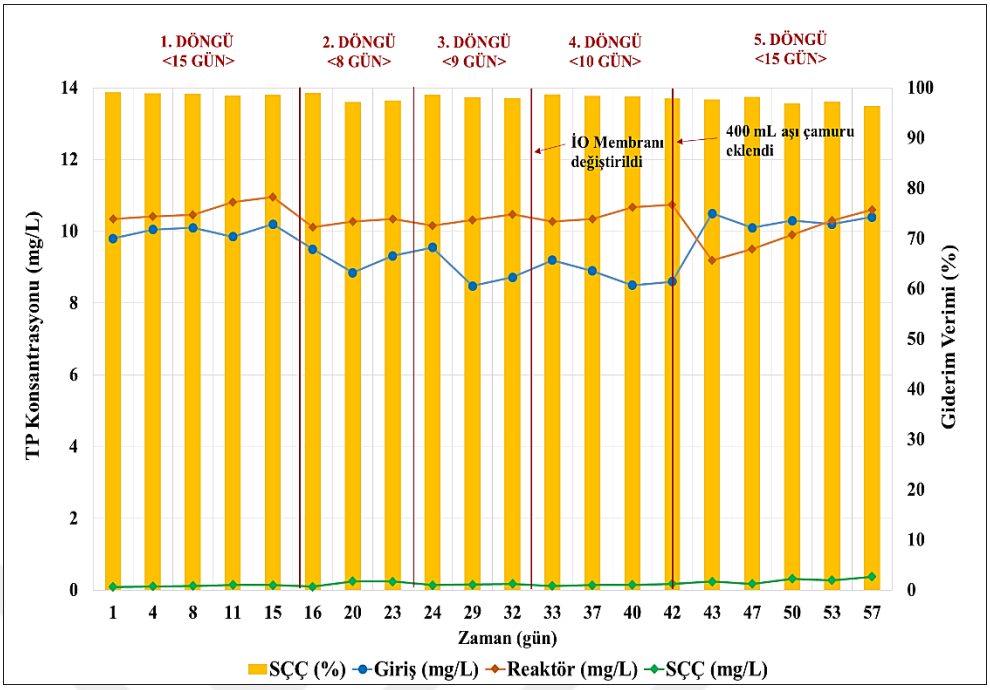
Şekil 4.28'de AnOMBR sisteminde ve ÇÇ tankında TKN konsantrasyonu değişimi ve TKN giderim verimi verilmiştir.



Şekil 4.28: AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) sisteminde TKN değişimi.

Şekil 4.28'de görüldüğü üzere işletme süresince TKN konsantrasyonu reaktör içerisinde 128–175 mg/L aralığında değişim göstermiştir. SÇÇ çıkışında TKN giderim verimi ise %26–41 aralığında değişim göstermiştir. Üst fazın alındığı her döngü sonunda ise TKN konsantrasyonunun reaktör içerisinde azaldığı gözlemlenmiştir.

Şekil 4.29'da AnOMBR sisteminde ve ÇÇ tankında TP konsantrasyonu değişimi ve TP giderim verimi verilmiştir.

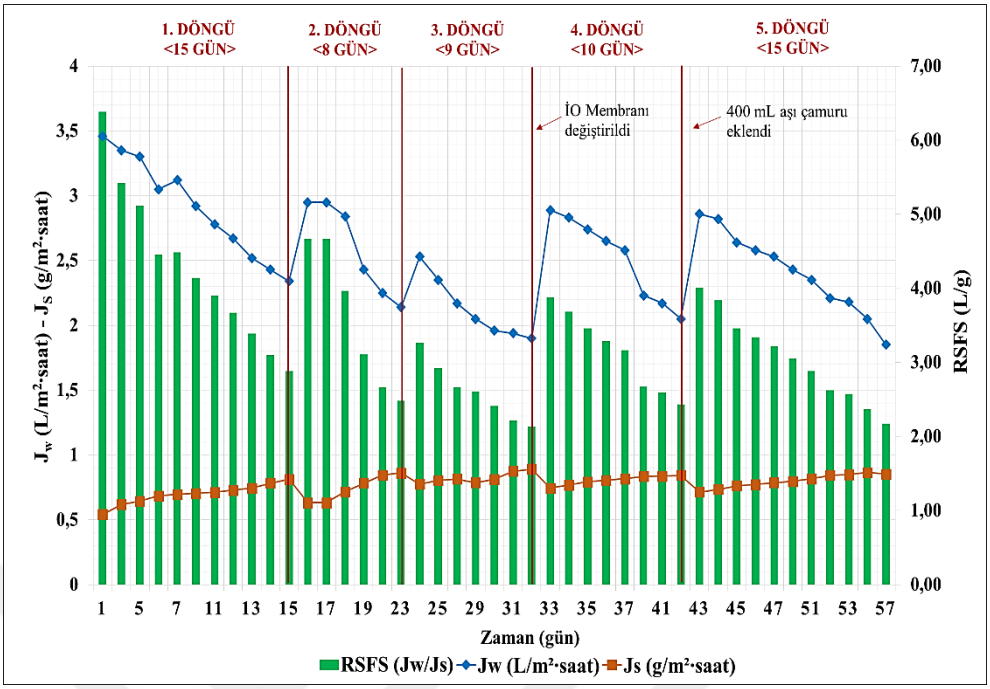


Şekil 4.29: AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) sisteminde TP değişimi.

Şekil 4.29'da görüldüğü üzere, SÇÇ çıkışında TP giderim verimi işletim süresi boyunca %96 –99 aralığında değişim göstermiştir. Reaktör içerisinde TP değeri 9.20–10.95 mg/L aralığında değişim göstermiştir.

4.3.2.5. J_w ve J_s değişimleri

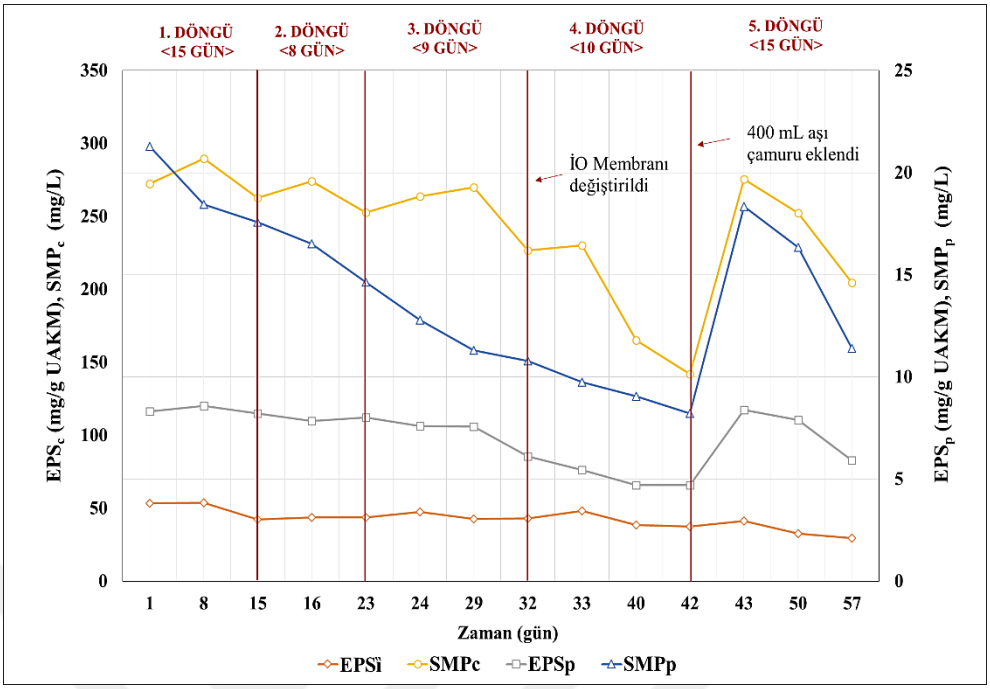
Şekil 4.30'da AnOMBR'de günlük J_w, J_s değişimi ve RSFS değeri gösterilmektedir. AnOMBR işletimi süresince J_w değeri; 1. döngüde 3.46 L/m²·saat'ten 2.34 L/m²·saat'e, 2. döngüde 2.95 L/m²·saat'ten 2.14 L/m²·saat'e ve 3. döngüde 2.53 L/m²·saat'ten 1.90 L/m²·saat'e düşmüştür. J_s değeri: 1. döngüde 0.542 g/m²·saat'ten 0.812 g/m²·saat'e, 2. döngüde 0.632 g/m²·saat'ten 0.862 g/m²·saat'e ve 3. döngüde 0.775 g/m²·saat'ten 0.892 g/m²·saat'e yükselmiştir. RSFS değeri 1., 2. ve 3. döngü başlangıçlarında sırasıyla 6.38, 4.67 ve 3.26 olarak bulunmuştur. 4. döngüde İO membranının değişimi ile J_w değeri 3.88 L/m²·saat'e yükselmiş, J_s değeri 0.745 g/m²·saat'e düşmüştür. 5. döngünün sonunda J_w değeri 1.85 L/m²·saat'e düşmüş ve J_s değeri 0.852 g/m²·saat'e yükselmiştir. RSFS değeri 2.17 olarak bulunmuştur. Günlük yapılan osmotik geri yıkama ile akı kaybının %87–92 oranında geri kazanıldığı belirlenmiştir.



Şekil 4.30: AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) sisteminde J_w ve J_s değişimleri.

4.3.2.6. EPS ve SMP değişimleri

AnOMBR'de EPS ve SMP değişimi Şekil 4.31'de verilmiştir. 1. döngüde EPS_c 53.43 mg/gUAKM'den 42.34 mg/gUAKM'ye düşmüştür. EPS_c değeri 2. döngüde 43.89 mg/gUAKM, 3. döngüde 42.83 mg/gUAKM, 4. döngüde 37.67 mg/gUAKM ve 5. döngü sonunda 29.71mg/gUAKM'ye düşmüştür. EPS_p değeri 1. döngüde 8.33'ten 8.21 mg/gUAKM'ye, 2. döngüde 7.86'den 8.01 mg/gUAKM'ye, 3. döngüde 7.60'dan 6.12 mg/gUAKM'ye, 4. döngüde 5.46'dan 4.71 mg/gUAKM'ye düşmüştür. EPS_p, 5. döngü başlangıcında 8.38 mg/gUAKM'ye yükselmiş ve döngü sonunda 5.93 mg/gUAKM'ye düşmüştür. SMP_c değeri 1., 2., 3., 4. ve 5. döngü sonlarında sırasıyla 263, 253, 227, 142 ve 204 mg/L olarak bulunmuştur. 3. döngüde SMP_c değerlerinde artış gözlemlenmiştir. SMP_p değeri tüm işletme süresince 11–21 mg/L aralığında değişim göstermiştir.



Şekil 4.31: AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) sisteminde EPS ve SMP değişimleri.

4.3.2.7. Zeta potansiyeli ve boyut dağılımı değişimi

AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) işletiminin 1. ve 4. döngülerinde alınan çamur numunelerinde biyokütle boyut dağılımının membran kirlenmesi üzerinde etkisini belirlemek amacıyla boyut dağılımı ve atıksuda bulunan maddelerin yüzey yüklerinin belirlenmesinde zeta potansiyeli ölçümleri yapılmıştır. Tablo 4.3'te AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$)'de zeta potansiyeli ve boyut dağılımı değişimleri yer almaktadır.

Tablo 4.3: AnOMBR(ÇÇ: $CaCl_2$)'de zeta potansiyeli ve boyut dağılımı değişimi.

Zaman (gün)	Zeta Potansiyeli (mV)	Boyut Dağılımı (µm)		
		d10	d50	d90
1.	–30.5	21.9	72.9	398.6
42.	–13.2	10.4	35.3	268.5

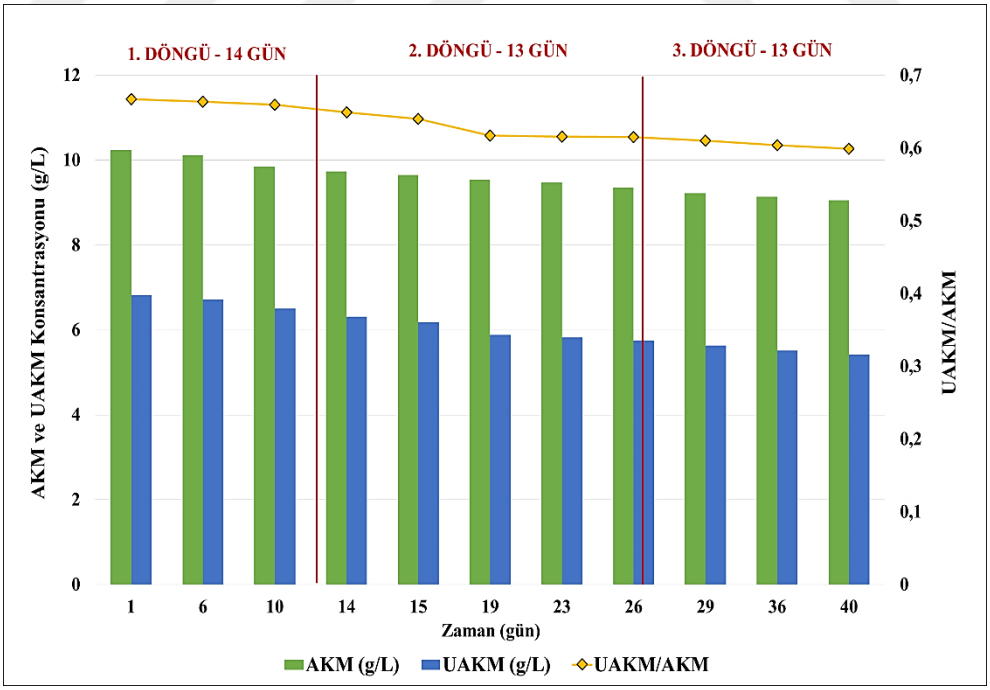
Tablo 4.3'e bakıldığında 1. ve 42. günler arasında zeta ponsiyelinin –30.5 mV'den –13.2 mV'ye yükseldiği görülmektedir. Boyut dağılımında ise d10, d50 ve d90'da sırasıyla 21.9 µm'dan 10.4 µm'ye, 72.9 µm'dan 35.3 µm'ye ve 398.6 µm'den 268.5 µm'ye düşmüştür.

4.3.3. AnOMBR'nin Düşük İletkenlik Değerinde İşletimi

AnOMBR sistemi, iletkenlik üst sınır değeri 20 mS/cm değerinde 40 gün işletilmiştir. ÇÇ olarak HCOONa (0.72 M) kullanılmıştır. Bu işletim sisteminde, hem anaerobik aktivitenin hem de İO'nun performansının iyileştirilmesi ve daha kararlı işletme koşullarının belirlenmesi hedeflenmiştir. Çalışma 3 döngüden oluşmaktadır: Sistem, ***1.(14 gün), 2.(13 gün) ve 3.(13 gün)*** döngülerde reaktör içinde iletkenlik değeri 20 mS/cm olana kadar işletilmiştir. Sistem, İO membranı değiştirilmeden ve aşı çamuru eklenmeden işletilmiştir.

4.3.3.1. AKM ve UAKM değişimleri

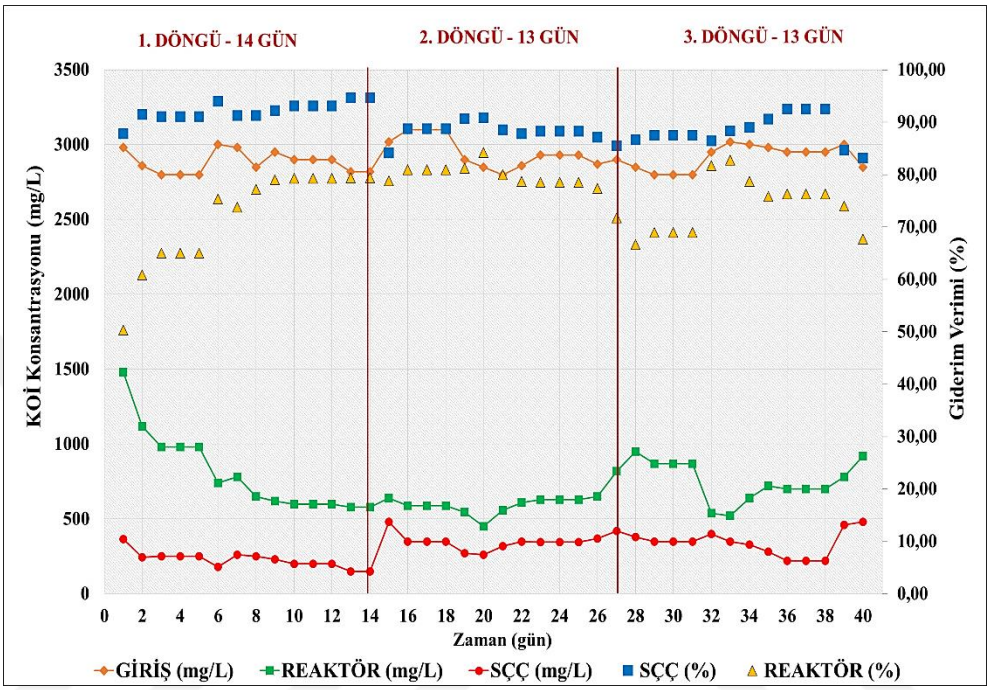
AnOMBR sistemindeki AKM ve UAKM değişimi Şekil 4.32'de verilmiştir. İşletim süresince AnOMBR sisteminde AKM ve UAKM konsantrasyonunda değişim çok fazla olmamıştır. İşletim sürecinin başında 10 g/L olan AKM konsantrasyonu değeri 1. döngü sonunda 9.7 g/L'ye düşmüştür. UAKM miktarı ise başlangıçta 6.8 g/L olup, 1. döngünün sonunda 6.3 g/L olarak bulunmuştur. UAKM/AKM oranı başlangıçta ve 3. döngü sonunda sırasıyla, 0.64 ve 0.60 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.32: AnOMBR (ÇÇ: HCOONa–20 mS/cm) sisteminde AKM ve UAKM değişimleri.

4.3.3.2. KOİ değişimi

Şekil 4.33'te AnOMBR sisteminde ve ÇÇ tankında KOİ konsantrasyonu değişimi ve KOİ giderim verimi verilmiştir.



Şekil 4.33: AnOMBR (ÇÇ: HCOONa – 20 mS/cm) sisteminde KOİ değişimi.

Çalışmanın ilk döngüsünde reaktör içerisinde KOİ giderim verimi 14. gün sonunda %79 olarak bulunmuştur. SÇÇ'de ise 14. günde KOİ giderim verimi %95 olarak belirlenmiştir. 1. döngüde, reaktör içerisinde KOİ giderim verimi 8. güne kadar sürekli artış göstermiş ve sonrasında hemen hemen sabit kalmıştır. 2. döngü sonunda KOİ giderim verimi, reaktör içerisinde %77'ye ve SÇÇ çıkışında %87'e düşmüştür. 3. döngüde KOİ giderim verimi reaktör içerisinde %70–83, SÇÇ çıkışında %85–93 aralığında değişim göstermiştir.

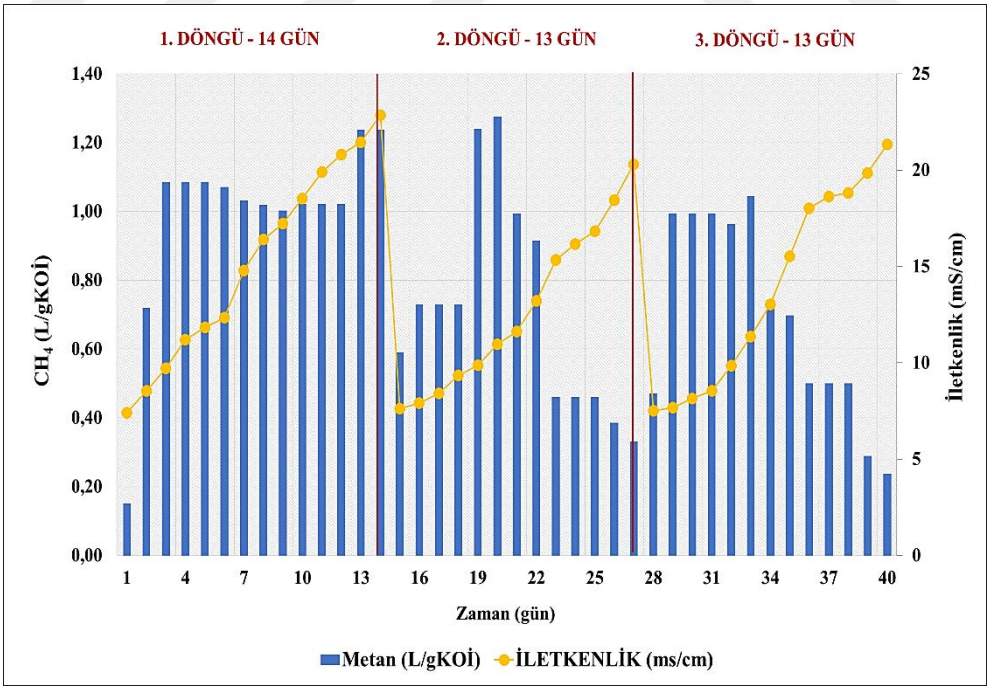
AnOMBR–HCOONa sisteminde 30 mS/cm üst sınır değerinde yapılan çalışmada iletkenlik artışı ile birlikte reaktör (%89'dan %32'ye) ve SÇÇ çıkışında (%94'ten, %63'e) KOİ giderim verimleri sürekli azalma göstermiştir. 20 mS/cm iletkenlik üst sınır değerinde yapılan çalışmada reaktör içerisinde KOİ giderim verimi %72–84 aralığında değişim göstermiştir. HCOONa ile yapılan bir önceki çalışmanın 2. döngüsünde iletkenlik 20 mS/cm'e ulaştığında KOİ giderim verimi, reaktör içerisinde %70 ve SÇÇ çıkışında %86 olarak bulunmuştur. 20 mS/cm iletkenlik üst sınır değerinde yapılan çalışmada, reaktör içerisinde 20 mS/cm iletkenlik değerine ulaşıldığında KOİ giderim verimi, reaktör içerisinde %79 ve SÇÇ çıkışında %94 olarak

bulunmuştur. 20 mS/cm iletkenlik üst sınır değerinde yapılan işletimin KOİ giderim verimleri üzerinde olumlu etkisi olduğu gözlemlenmiştir.

4.3.3.3. Metan ve iletkenlik değişimleri

AnOMBR sisteminde iletkenlik ve CH_4 üretim miktarlarına ait değişim Şekil 4.34'te verilmiştir. AnOMBR sisteminde iletkenlik her döngüde kademeli olarak artış göstermiştir. 1. döngü başlangıcında reaktör içerisinde 7.42 mS/cm olan iletkenlik değeri 14. günde 20 mS/cm'ye yükselmiştir. Reaktördeki üst fazın alınması sonrasında, 2., ve 3. döngülerin başlangıcında iletkenlik değeri sırasıyla 7.63 ve 7.52 mS/cm'ye düşmüştür.

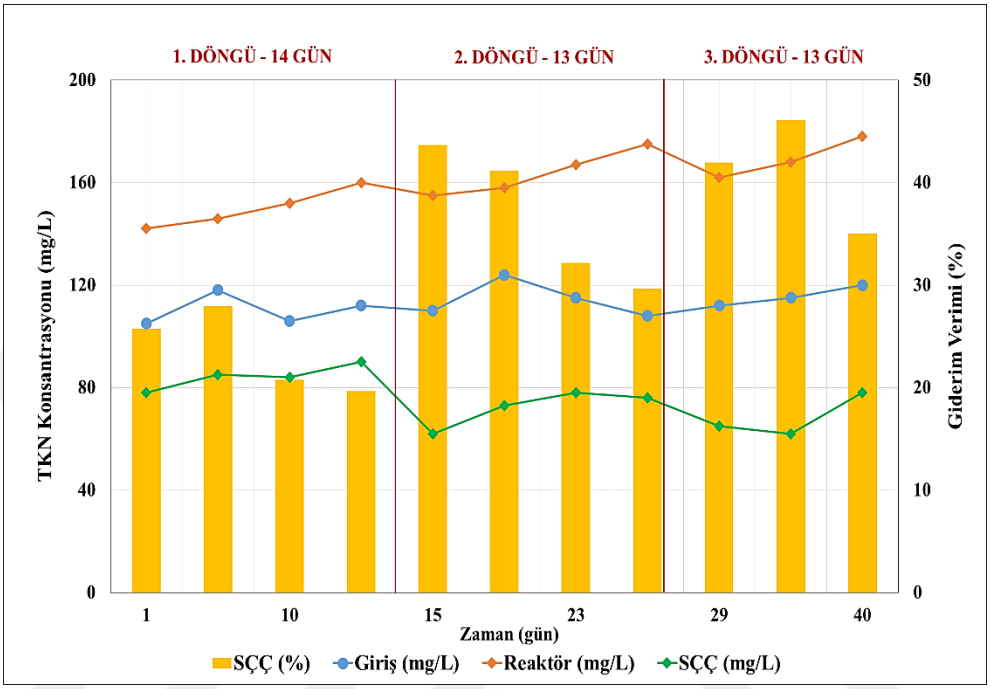
CH_4 miktarı 1. döngüde 0.06 LCH_4/gKOİ'den 0.40 LCH_4/gKOİ'ye yükselmiştir. 2. ve 3. döngü sonlarında CH_4 miktarı sırasıyla 0.12 ve 0.15 LCH_4/gKOİ olarak bulunmuştur. Bir önceki HCOONa–AnOMBR çalışmasında CH_4 miktarı 1. 2., ve 3. döngü sonlarında sırasıyla 0.04, 0.08 ve 0.03 L/gKOİ olarak elde edilmiştir. 20 mS/cm iletkenlik üst sınır değerinde işletilen AnOMBR sisteminde, 30 mS/cm üst sınır değerinde yapılan çalışmaya göre daha fazla CH_4 elde edildiği belirlenmiştir.



Şekil 4.34: AnOMBR (ÇÇ: HCOONa–20 mS/cm) sisteminde iletkenlik ve CH_4 değişimleri.

4.3.3.4. TP ve TKN değişimleri

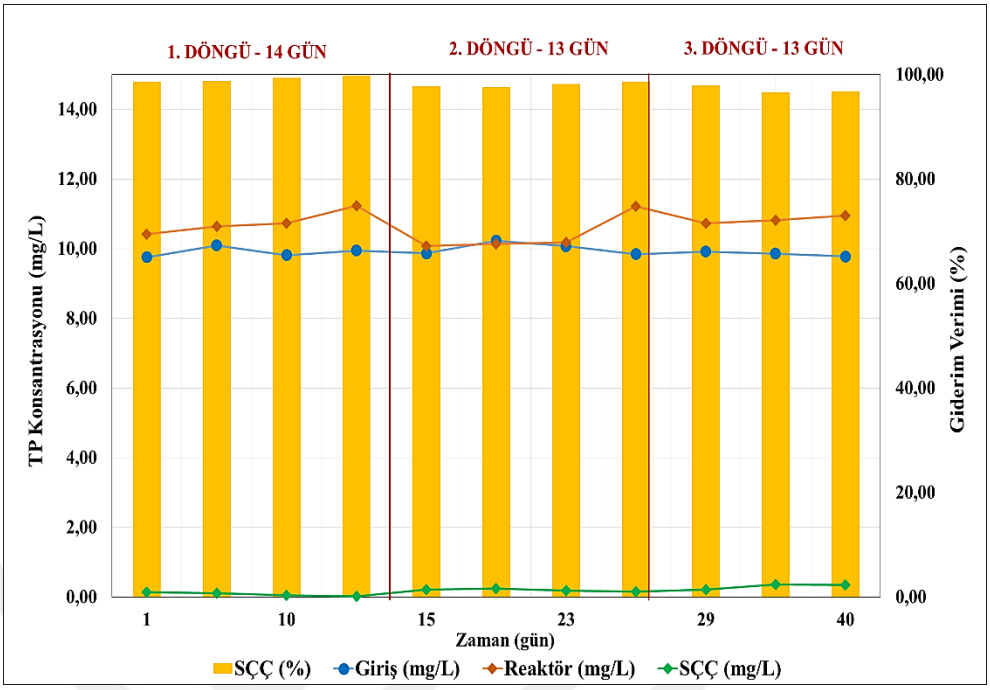
Şekil 4.35'te AnOMBR sisteminde ve ÇÇ tankında TKN konsantrasyonu değişimi ve TKN giderim verimi verilmiştir.



Şekil 4.35: AnOMBR (ÇÇ: HCOONa–20 mS/cm) sisteminde TKN değişimi.

Şekil 4.35'te görüldüğü üzere, işletme süresince TKN konsantrasyonunun reaktör içerisinde sürekli artış göstermiştir. Üst fazın alındığı her döngü sonunda ise TKN konsantrasyonu reaktör içerisinde azalmıştır. SÇÇ çıkışında TKN giderim verimi ise %20–44 aralığında değişim göstermiştir. 1. döngünün başlangıcında 142 mg/L olan reaktör içerisindeki TKN konsantrasyonu 3. döngünün sonunda 178 mg/L'ye yükselmiştir.

Şekil 4.36'da AnOMBR sisteminde ve ÇÇ tankında TP konsantrasyonu değişimi ve TP giderim verimi verilmiştir.



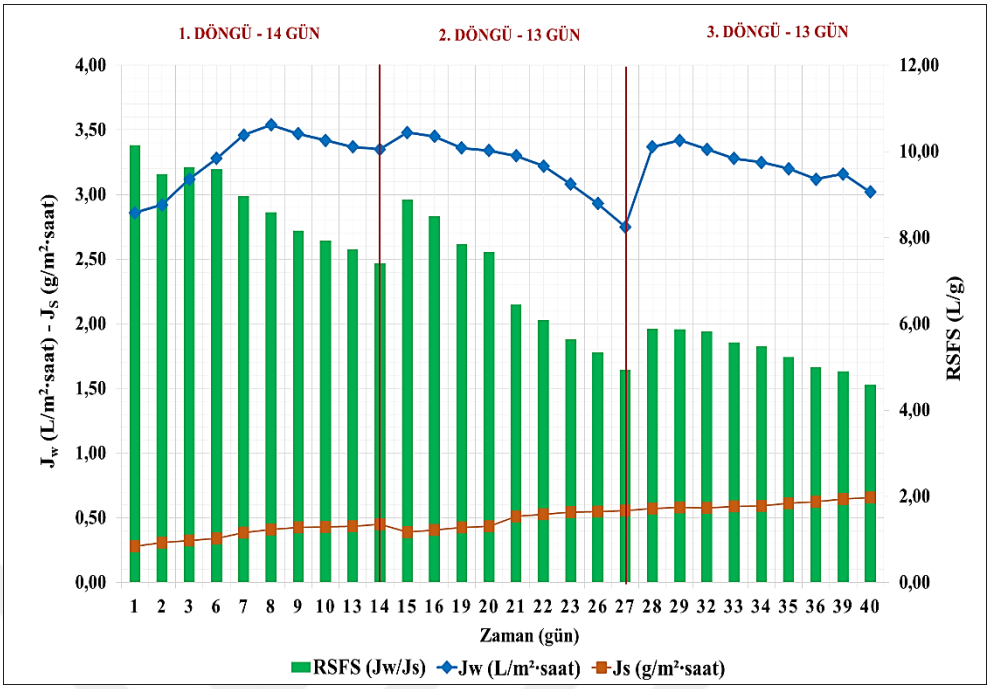
Şekil 4.36: AnOMBR (ÇÇ: HCOONa–20 mS/cm) sisteminde TP değişimi.

Şekil 4.36'da görüldüğü üzere SÇÇ çıkışında TP giderim verimi işletim süresi boyunca %98–99 aralığında değişim göstermiştir. Reaktör içerisinde TP değeri 10.08–11.24 mg/L aralığında bulunmuştur.

4.3.3.5. J_w ve J_s değişimleri

Şekil 4.37'de AnOMBR'de J_w, J_s değişimi ve RSFS değerleri verilmiştir. AnOMBR'ün işletimi süresince J_w değeri; 1. döngüde 2.86 L/m²·saat'ten 3.35 L/m²·saat'e yükselmiş, 2. döngüde 3.48 L/m²·saat'ten 2.75 L/m²·saat'e ve 3. döngüde 3.37 L/m²·saat'ten 3.02 L/m²·saat'e düşmüştür. J_s değeri; 1. döngüde 0.280 g/m²·saat'ten 0.440 g/m²·saat'e, 2. döngüde 0.450 g/m²·saat'ten 0.560 g/m²·saat'e ve 3. döngüde 0.570 g/m²·saat'ten 0.660 g/m²·saat'e yükselmiştir. RSFS değeri 1., 2. ve 3. döngü başlangıçlarında sırasıyla 10.14, 8.88 ve 5.88 olarak bulunmuştur.

AnOMBR–HCOONa sisteminde 30 mS/cm üst sınır değerinde yapılan çalışmada elde edilen en yüksek ve ortalama RSFS değerleri 9.34 ve 6.66 olarak bulunmuştur. 20 mS/cm iletkenlik üst sınır değerinde, en yüksek RSFS değeri 10.14 ve işletim süresince ortalama RSFS değeri 9.22 olarak belirlenmiştir.

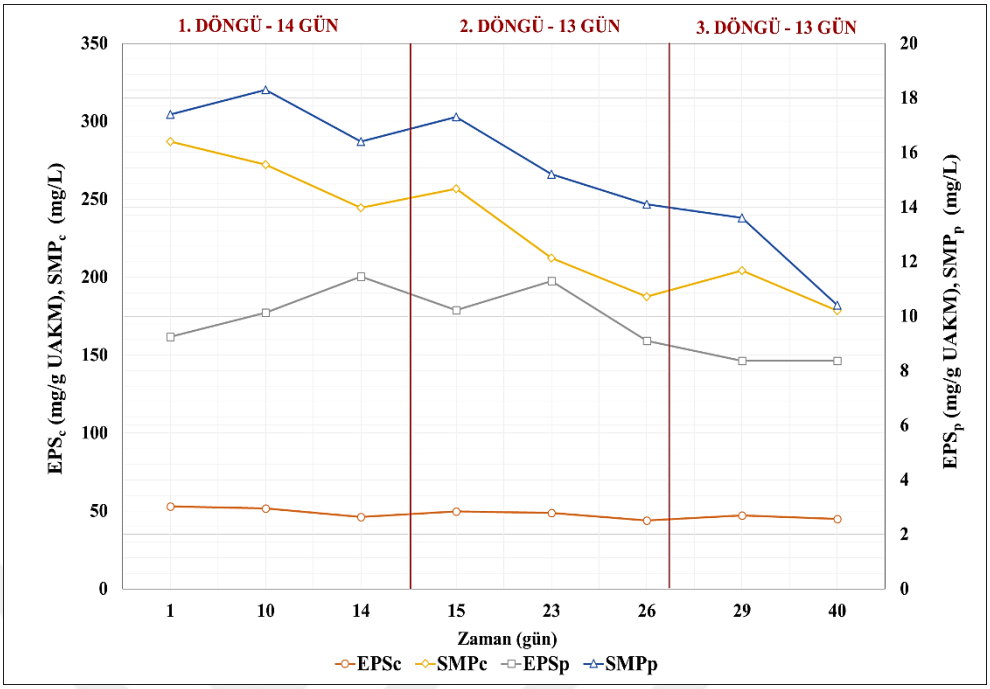


Şekil 4.37: AnOMBR (ÇÇ: HCOONa–20 mS/cm) sisteminde J_w ve J_s değişimleri.

4.3.3.6. EPS ve SMP değişimleri

AnOMBR'de EPS ve SMP değişimi Şekil 4.38'de verilmiştir. 1. döngü süresince EPS_c değerinin 53 mg/gUAKM'den 46 mg/gUAKM'ye düştüğü görülmektedir. EPS_c değeri 2. döngüde 50 mg/gUAKM'den 44 mg/gUAKM'ye düşmüştür. EPS_c değeri 3. döngüde ise 47 mg/gUAKM'den 44 mg/gUAKM'ye düşmüştür. EPS_p değeri ise 8.3–9 mg/gUAKM aralığında değişim göstermiştir. SMP_c değeri 1., 2., ve 3. döngüde sırasıyla 287, 257 ve 204 mg/L olarak bulunmuştur. SMP_p değeri işletim süresince 10–17 mg/L aralığında değişim göstermiştir.

20 mS/cm iletkenlik üst sınır değerinde yapılan AnOMBR çalışmasında SMP_c, SMP_p ve EPS_p değerlerinin AnOMBR–HCOONa sisteminde 30 mS/cm üst sınır değerinde yapılan çalışmaya göre işletme süresince daha yüksek değerlerde bulunmuştur. Her iki çalışmada da EPS_c değerleri işletme süresince benzer değişim göstermiştir.



Şekil 4.38: AnOMBR (ÇÇ: HCOONa–20 mS/cm) sisteminde EPS ve SMP değişimleri.

4.4. İLERİ ARITMA ÇALIŞMALARI

AnOMBR sisteminde $CaCl_2$ ve HCOONa ile uzun süreli işletime ait (30 mS/cm iletkenlik üst sınır değerinde) ilk 3 döngüden elde edilen kompozit SÇÇ çıkışları ve üst fazlar ile ileri arıtma çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Tablo 4.4'te ve Tablo 4.5'te HCOONa ve $CaCl_2$ ile yapılan çalışmalara ait SÇÇ çıkışları ve üst fazlara ait karakterizasyon değerleri verilmiştir.

Tablo 4.4: AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) sisteminde SÇÇ ve üst faz çıkışı karakterizasyonu.

Parametre	Giriş Atıksuyu	AnOMBR – ÇÇ: HCOONa				
		SÇÇ	Giderim Verimi (%)	SÇÇ (×5 kat seyreltilmiş)	SÇÇ (×11 kat seyreltilmiş)	Üst Faz Kompozit
pH	5.40	7.84	–	7.84	7.84	7.36
İletkenlik (µS/cm)	4100.0	23720.0	–	4744.00	2.156.36	29080.0
TÇM (mg/L)	2740.0	15892.4	–	3178.48	1.444.76	19483.6
Bulanıklık (NTU)	93.5	0.39	99.58	0.08	0.04	930.0
Alkalinite (mg $CaCO_3$/L)	1700.0	1550.0	8.82	310.00	140.91	2270.0
KOİ (mg/L)	3000.0	640.0	78.67	128.00	58.18	1240.0
$BOİ_5$ (mg/L)	1780.0	25.0	98.60	5.00	2.27	125.0
Klorür (mg/L)	300.0	170.0	43.33	34.00	15.45	380.0
Sülfat (mg/L)	68.9	28.24	59.01	5.65	2.57	57.4
TP (mg/L)	9.7	0.36	96.29	0.07	0.03	14.8
Orto–P (mg/L)	8.86	0.22	97.52	0.04	0.02	10.6
TKN (mg/L)	72.0	84.0	–	16.80	7.64	218.0
NH_4–N (mg/L)	58.0	72.0	–	14.40	6.55	187.0
NO_3–N (mg/L)	11.4	0.72	93.68	0.14	0.07	2.5
RES_{436} (m^{-1})	124.3	8.2	93.4	1.64	0.75	146.0
SAK_{254} (m^{-1})	366.0	50.14	86.3	10.03	4.56	224.0
AKM (mg/L)	800.0	<0.05	100.0	<0.05	<0.05	950.0
UAKM (mg/L)	660.0	<0.05	100.0	<0.05	<0.05	300.0
TKM (mg/L)	3100.0	<0.05	100.0	<0.05	<0.05	–
TUKM (mg/L)	1600.0	<0.05	100.0	<0.05	<0.05	–
Toplam Sertlik (mg $CaCO_3$/L)	500.0	220.0	56.0	44.00	20.0	750.0
Fekal Koliform (EMS/100 mL)	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	–
SAR_{tad}	10.04	215.56	–	43.1	19.6	–
Na^+ (mg/L)	491.40	1185.4	–	1185.4	538.82	–
Bor (B) (mg/L)	0.11	1.11	–	0.22	0.10	–

Tablo 4.5: AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) sisteminde SÇÇ ve üst faz çıkışı karakterizasyonu.

Parametre	Giriş Atıksuyu	AnOMBR – ÇÇ: $CaCl_2$				
		SÇÇ	Giderim Verimi (%)	SÇÇ (×5 kat seyreltilmiş)	SÇÇ (×11 kat seyreltilmiş)	Üst Faz Kompozit
pH	5.40	7.12	–	7.12	7.12	7.32
İletkenlik (µS/cm)	4100.0	38420.0	–	7.684.00	3.492.73	29080.00
TÇM (mg/L)	2740.0	25741.2	–	5.148.24	2.340.11	19483.60
Bulanıklık (NTU)	93.5	0.44	99.53	0.088	0.04	970.00
Alkalinite (mg $CaCO_3$/L)	1700.0	1470.0	13.53	294.00	133.64	2450.0
KOİ (mg/L)	3000.0	700.0	76.67	140.00	63.64	1650.0
$BOİ_5$ (mg/L)	1780.0	20.0	98.88	4.00	1.82	145.0
Klorür (mg/L)	300.0	1880.0	-	376.00	170.91	550.0
Sülfat (mg/L)	68.9	26.50	61.54	5.30	2.41	62.3
TP (mg/L)	9.7	0.15	98.45	0.03	0.01	9.54
Orto–P (mg/L)	8.8	0.10	98.87	0.02	0.01	8.76
TKN (mg/L)	72.0	76.0	–	15.20	6.91	160.0
NH_4–N (mg/L)	58.0	68.0	–	13.60	6.18	187.0
NO_3–N (mg/L)	11.4	0.62	94.56	0.12	0.06	1.62
RES_{436} (m^{-1})	124.3	7.4	94.05	1.48	0.67	235.0
SAK_{254} (m^{-1})	366.0	56.3	84.62	11.26	5.12	310.0
AKM (mg/L)	800.0	<0.05	100.0	<0.05	<0.05	1060.0
UAKM (mg/L)	660.0	<0.05	100.0	<0.05	<0.05	245.0
TKM (mg/L)	3100.0	<0.05	100.0	<0.05	<0.05	–
TUKM (mg/L)	1600.0	<0.05	100.0	<0.05	<0.05	–
Toplam Sertlik (mg $CaCO_3$/L)	500.0	340.0	32.0	68.00	30.91	670.0
Fekal Koliform (EMS/100 mL)	0.0	0.0	100.0	0.00	0.00	–
SAR_{tad}	10.04	0.16	–	0.07	0.05	–
Na^+ (mg/L)	491.40	44.87	–	8.97	4.08	–
Bor (B) (mg/L)	0.11	<0.0001	–	<0.0001	<0.0001	–

İleri arıtma çalışmaları kapsamında her iki işletim süresince elde edilen kompozit SÇÇ çıkışları NF ve TO membranlarından geçirilmiştir. NF ve TO çalışmalarına ait sonuçlar aşağıda değerlendirilmiştir.

4.4.1. NF Çalışması Sonuçları

NF çalışması sonuçları AAT–TUT, (2010)'ne göre EK 7'de yer alan '*Arıtılmış Atıksuların Sulama Suyu Olarak Geri Kullanım Kriterleri'* başlığı altında incelenmiştir. Tablo 4.6'da HCOONa–SÇÇ çıkışının, Tablo 4.7'de $CaCl_2$–SÇÇ çıkışının kullanıldığı NF çalışmalarına ait deney sonuçları verilmiştir. AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) SÇÇ çıkışının beslemede kullanıldığı NF çalışması 'çalışma (1)' ve AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) SÇÇ çıkışının beslemede kullanıldığı NF çalışması 'çalışma (2)' olarak adlandırılmıştır. Her iki çalışmaya ait SÇÇ çıkışları farklı oranlarda (5 ve 11 kat) seyreltilerek tarımsal sulama amaçlı kullanımı değerlendirilmiştir. Ayrıca, NF çalışması (1) süzüntüsü istenilen sulama suyu kriterlerini sağlamadığı için farklı oranlarda seyreltilmiş (4 ve 8 kat) ve tarımsal sulama suyu olarak kullanımı değerlendirilmiştir.

Tablo 4.6: NF çalışması (1) deney sonuçları.

Parametre	NF Çalışması (1)				
	Besleme	Süzüntü			Konsantre
		Kompozit	Süzüntü (×4 kat seyreltilmiş)	Süzüntü (×8 kat seyreltilmiş)	
pH	7.84	8.45	8.45	8.45	9.30
İletkenlik (µS/cm)	23720.00	10520.00	2630.00	1315.00	33100.00
TÇM (mg/L)	15892.40	7050.00	1762.50	881.25	22170.00
Bulanıklık (NTU)	0.39	0.17	0.04	0.02	10.40
Alkalinite (mg $CaCO_3$/L)	1550.00	840.00	210.00	105.00	3450.00
KOİ (mg/L)	640.00	152.00	38.00	19.00	790.00
$BOİ_5$ (mg/L)	25.00	6.00	0.75	0.38	55.00
Klorür (mg/L)	170.00	95.00	23.75	11.88	225.00
Sülfat (mg/L)	28.24	1.68	0.42	0.21	38.80
TP (mg/L)	0.36	<0.01	<0.01	<0.01	1.52
Orto–P (mg/L)	0.22	<0.01	<0.01	<0.01	0.98
TKN (mg/L)	84.00	<0.01	<0.01	<0.01	100.80
NH_4–N (mg/L)	72.00	<0.01	<0.01	<0.01	89.60
NO_3–N (mg/L)	0.72	<0.01	<0.01	<0.01	0.25
RES_{436} (m^{-1})	8.20	0.80	0.20	0.10	26.28
SAK_{254} (m^{-1})	50.14	7.42	1.86	0.93	116.40
AKM (mg/L)	0.00	<0.05	<0.05	<0.05	12.00
UAKM (mg/L)	0.00	<0.05	<0.05	<0.05	0.50
TKM (mg/L)	0.00	<0.05	<0.05	<0.05	–
TUKM (mg/L)	0.00	<0.05	<0.05	<0.05	–
Toplam Sertlik (mg $CaCO_3$/L)	220.00	48.00	12.00	6.00	740.00
Fekal Koliform (EMS/100 Ml)	0.00	0.00	0.00	0.00	–
SAR_{tad}	215.56	159.9	39.99	20.00	–
Na^+(mg/L)	5927.0	2248.0	562.00	281.00	–
Bor (B) (mg/L)	1.11	0.76	0.19	0.10	–

Tablo 4.7: NF çalışması (2) deney sonuçları.

Parametre	NF Çalışması (2)		
	Besleme	**NF - Süzüntü**	**Konsantre**
pH	7.12	8.38	9.14
İletkenlik (µS/cm)	38420.00	15150.00	42330.00
TÇM (mg/L)	25741.20	10100.00	28361.10
Bulanıklık (NTU)	0.44	0.23	12.40
Alkalinite (mg $CaCO_3$/L)	1470.00	850.00	2840.00
KOİ (mg/L)	700.00	145.00	840.00
$BOİ_5$ (mg/L)	20.00	5.40	65.00
Klorür (mg/L)	1880.00	830.00	2550.00
Sülfat (mg/L)	26.50	1.25	42.50
TP (mg/L)	0.15	<0.01	0.85
Orto-P (mg/L)	0.10	<0.01	0.30
TKN (mg/L)	76.00	<0.01	98.00
NH_4–N (mg/L)	68.00	<0.01	75.00
NO_3–N (mg/L)	0.62	<0.01	1.35
RES_{436} (m^{-1})	7.40	1.05	24.60
SAK_{254} (m^{-1})	56.30	8.48	145.00
AKM (mg/L)	<0.05	<0.05	14.35
UAKM (mg/L)	<0.05	<0.05	0.72
TKM (mg/L)	<0.05	<0.05	–
TUKM (mg/L)	<0.05	<0.05	–
Toplam Sertlik (mg $CaCO_3$/L)	340.00	70.00	1120.00
Fekal Koliform (EMS/100 Ml)	0.00	0.00	–
SAR_{tad}	0.16	0.39	–
Na^+ (mg/L)	44.87	51.52	–
Bor (B) (mg/L)	<0.0001	<0.0001	–

Tablo 4.6 ve 4.7'de verilen değerler ile AAT–TUT, (2010)'da yer alan Tablo 2.12., 2.13. ve 2.14'te verilen değerler aşağıda özetlenmiştir.

NF çalışmalarının ***1. adımında*** SÇÇ çıkışları ve NF süzüntüleri, AAT–TUT, (2010)'da yer alan *Sınıf A ve B kapsamında* (Tablo 2.12) değerlendirilmiştir. ***2. adımda*** SÇÇ çıkışları ve NF süzüntüleri, AAT–TUT, (2010)'da yer alan *'Sulama Suyunun Kimyasal Kalitesinin Değerlendirilmesi'* kriterlerine (Tablo 2.13) göre değerlendirilmiştir. ***3. adımda*** NF çalışmaları konsantre çıkışlarının nihai berterafı değerlendirilmiştir.

1. adım: AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) sistemi SÇÇ çıkışlarında; pH, bulanıklık, $BOİ_5$, AKM ve fekal koliform değerleri sırasıyla 7.84 (Sınıf A: 6–9), 0.39 NTU (Sınıf A < 2 NTU), 25 mg/L (Sınıf B <30 mg/L), 0 mg/L (Sınıf A 0 mg/L) ve 0 EMS/100 mL (Sınıf A 0/100 mL) olarak bulunmuştur. Bu değerlere göre SÇÇ çıkışının **B Sınıfı** kapsamında değerlendirilebileceği belirlenmiştir. AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) sistemi SÇÇ çıkışlarında; pH, bulanıklık, $BOİ_5$, AKM ve fekal koliform değerleri sırasıyla; 7.12 (Sınıf A: 6–9), 0.44 NTU (Sınıf A < 2 NTU), 20 mg/L (Sınıf A <20 mg/L), 0 mg/L (Sınıf A 0 mg/L) ve (Sınıf A 0/100 mL)'dir. AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) sistemi SÇÇ çıkışının **A Sınıfı** kapsamında değerlendirilebileceği belirlenmiştir.

AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) sistemi SÇÇ çıkışları (Tablo 4.2) 5 kat seyretildiğinde pH, bulanıklık, $BOİ_5$, AKM ve fekal koliform değerleri sırasıyla; 7.84 (Sınıf A: 6–9), 0.08 NTU (Sınıf A <2 NTU), 5 mg/L (Sınıf A <20 mg/L), 0 mg/L (Sınıf A <5 mg/L) ve 0 EMS/100 mL (Sınıf A: 0 EMS/100 mL) olarak bulunmuştur. Bu değerlere göre SÇÇ çıkışının (5 kat seyreltilmiş) **A Sınıfı** kapsamında değerlendirilebileceği belirlenmiştir. AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) sistemi SÇÇ çıkışları 11 kat seyretildiğinde pH, bulanıklık, $BOİ_5$, AKM ve fekal koliform değerleri sırasıyla; 7.84 (Sınıf A: 6–9), 0.04 NTU (Sınıf A <2 NTU), 2.27 mg/L (Sınıf A <20 mg/L), 0 mg/L (Sınıf A <5 mg/L) ve 0 EMS/100 mL (Sınıf A: 0 EMS/100 mL) olarak bulunmuştur. Bu değerlere göre SÇÇ çıkışının (11 kat seyreltilmiş) **A Sınıfı** kapsamında değerlendirilebileceği belirlenmiştir.

AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) sistemi SÇÇ çıkışları (Tablo 4.3) 5 kat seyretildiğinde pH, bulanıklık, $BOİ_5$, AKM ve fekal koliform değerleri sırasıyla; 7.12 (Sınıf A: 6–9), 0.08 NTU (Sınıf A <2 NTU), 4 mg/L (Sınıf A <20 mg/L), 0 mg/L (Sınıf A <5 mg/L) ve 0 EMS/100 mL (Sınıf A: 0 EMS/100 mL) olarak bulunmuştur. Bu değerlere göre SÇÇ çıkışının (5 kat seyreltilmiş) **A Sınıf ı**kapsamında değerlendirilebileceği belirlenmiştir. AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) sistemi SÇÇ çıkışları 11 kat seyretildiğinde pH, bulanıklık, $BOİ_5$, AKM ve fekal koliform değerleri sırasıyla; 7.12 (Sınıf A: 6–9), 0.04 NTU (Sınıf A <2 NTU), 1.82 mg/L (Sınıf A <20 mg/L), 0 mg/L (Sınıf A <5 mg/L) ve 0 EMS/100 mL (Sınıf A: 0 EMS/100 mL) olarak bulunmuştur. Bu değerlere göre SÇÇ çıkışının (11 kat seyreltilmiş) **A Sınıfı** kapsamında değerlendirilebileceği belirlenmiştir.

NF çalışması (1) süzüntüsünün (Tablo 4.4), pH, bulanıklık, $BOİ_5$, AKM ve fekal koliform değerleri sırasıyla; 8.45 (Sınıf A: 6–9), 0.17 NTU (Sınıf A <2 NTU), 6 mg/L (Sınıf A <20 mg/L), 0 mg/L (Sınıf A <5 mg/L) ve 0 EMS/100 mL (Sınıf A: 0 EMS/100 mL) olarak belirlenmiştir. NF çalışması (1) süzüntüsü Sınıf A değerlerini sağlamasına rağmen '*Sulama Suyunun Kimyasal Kalitesinin Değerlendirilmesi*' kapsamında ilgili kriterleri sağlamaması sebebiyle 4 kat ve 8 kat seyreltilmiştir. NF çalışması (1) süzüntüsü 4 kat seyretildiğinde pH, bulanıklık, $BOİ_5$, AKM ve fekal koliform değerleri sırasıyla; 8.45 (Sınıf A: 6–9), 0.04 NTU (Sınıf A <2 NTU), 0.75 mg/L (Sınıf A <20 mg/L), 0 mg/L (Sınıf A <5 mg/L) ve 0 EMS/100 mL (Sınıf A: 0 EMS/100 mL) olarak bulunmuştur. Bu değerlere göre NF çalışması (1) süzüntüsünün (4 kat seyreltilmiş) **A Sınıfı** kapsamında değerlendirilebileceği belirlenmiştir. NF çalışması (1) süzüntüsü 8 kat seyretildiğinde pH, bulanıklık, $BOİ_5$, AKM ve fekal koliform değerleri sırasıyla; 8.45 (Sınıf A: 6–9), 0.02 NTU (Sınıf A <2 NTU), 0.38 mg/L (Sınıf A <20

mg/L), 0 mg/L (Sınıf A <5 mg/L) ve 0 EMS/100 mL (Sınıf A: 0 EMS/100 mL) olarak bulunmuştur. Bu değerlere göre NF çalışması (1) süzüntüsünün (8 kat seyreltilmiş) **A Sınıfı** kapsamında değerlendirilebileceği belirlenmiştir. NF çalışması (2) süzüntüsünün, pH, bulanıklık, $BOİ_5$, AKM ve fekal koliform değerleri ise sırasıyla; 8.38 (Sınıf A: 6–9), 0.23 NTU (Sınıf A <2 NTU), 5.40 mg/L (Sınıf A <20 mg/L), 0 mg/L (Sınıf A <5 mg/L) ve 0 mg/L (Sınıf A: 0 EMS/100 mL) olarak belirlenmiştir. Her iki NF çalışması süzüntü değerlerinin AAT–TUT (2010)'da yer alan *'Sulamada Geri Kullanılacak Arıtılmış Atıksuların Sınıflandırılması'* kriterlerine göre **A Sınıfı** kapsamında olduğu belirlenmiştir. NF çalışması (2) süzüntüsü **A Sınıfı** kapsamında olması ve '*Sulama Suyunun Kimyasal Kalitesinin Değerlendirilmesi*' kriterlerine uygun çıkışta olması sebebiyle seyreltme yapılmadan değerlendirilmiştir.

2. adım: AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) sistemi SÇÇ çıkışlarının karakteristik değerleri incelendiğinde yüksek Na^+ konsantrasyonu (5927 mg/L) ve SAR_{tad} oranı (215.56) sebebiyle seyreltme uygulanmadan herhangi bir sınıfa uygun olmadığı belirlenmiştir. AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) sistemi SÇÇ çıkışlarına 5 kat seyreltme uygulandığında **III. kalitede** ve 11 kat uygulandığında ise **II. kalitede** sulama suyu elde edilmiştir. AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) sistemi SÇÇ çıkışının Cl^- 1880 mg/L (III. Sınıf >350), Na^+ 44.87 mg/L (III. Sınıf >9) ve iletkenlik 38.42 mS/cm (>3 mS/cm) olması sebebiyle **III. kalitede** sulama suyu kalitesinde olduğu belirlenmiştir. AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) sistemi SÇÇ çıkışına 5 kat seyreltme uygulandığında **III. kalitede** ve 11 kat uygulandığında ise **II. kalitede** sulama suyu elde edilmiştir.

NF çalışması (1)'de yüksek SAR_{tad} 159.97 oranı sebebiyle herhangi bir sınıfa uygun olmadığı belirlenmiştir. NF Çalışması (1) süzüntüsü 4 kat seyreltildiğinde **III. kalitede** ve 8 kat seyreltildiğinde **II. kalitede** sulama suyu eldesinin mümkün olduğu belirlenmiştir.

NF çalışması (2) süzüntü çıkışının yüksek iletkenlik (15.1 mS/cm), Na^+ (51.52 mg/L) ve Cl^- (830 mg/L) konsantrasyonlarına sahip olması sebebiyle **III. kalite** sulama suyu kapsamında değerlendirilebileceği belirlenmiştir. NF Çalışması (2) süzüntüsü 'Sulama Suyunun Kimyasal Kalitesinin Değerlendirilmesi' kriterlerine uygun olması nedeniyle seyreltme yapılmamıştır.

3. adım: NF çalışmalarında elde edilen konsantrelerinin AnOMBR sisteminde ÇÇ olarak geri kullanımı değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, iletkenlik değerinin AnOMBR sisteminde ÇÇ tankında kullanılabilecek konsantrasyonda olması ve KOİ değerinin AnOMBR sistemine beslenen giriş atıksuyundan daha düşük konsantrasyonda olması hedeflenmiştir.

NF çalışması (1)'e ait konsantre değerleri incelendiğinde iletkenlik değerinin 33.10 mS/cm ve KOİ konsantrasyonunun 790 mg/L olduğu belirlenmiştir. İletkenliğin %40 oranında ve KOİ konsantrasyonunun %23 oranında konsantre edildiği belirlenmiştir. AnOMBR sisteminde HCOONa ÇÇ tankı iletkenlik değeri çalışma süresince 65.5 mS/cm olarak sabit tutulmuştur.

NF çalışması (2)'ye ait konsantre değerleri incelendiğinde ise iletkenlik değerinin 42.33 mS/cm ve KOİ konsantrasyonunun 840 mg/L olduğu belirlenmiştir. İletkenliğin %11 oranında ve KOİ konsantrasyonunun %20 oranında konsantre edildiği belirlenmiştir. AnOMBR sisteminde $CaCl_2$ ÇÇ tankı iletkenlik değeri çalışma süresince 99.5 mS/cm olarak sabit tutulmuştur. Her iki çalışmadan elde edilen sonuçlara göre NF konsantrelerinin ÇÇ tankında tekrar kullanılmasının uygun olmadığı belirlenmiştir.

4.4.2. TO Çalışması Sonuçları

TO çalışmasında AnOMBR SÇÇ çıkışları besleme olarak kullanılmıştır. HCOONa-SÇÇ ve $CaCl_2$-SÇÇ çıkışlarının kullanıldığı TO çalışmaları sırasıyla 'çalışma (1)' ve 'çalışma (2)' olarak adlandırılmıştır. Tablo 4.8'de HCOONa–SÇÇ çıkışı ile beslenen TO çalışmasına ait karakterizasyon değerleri verilmiştir.

Tablo 4.8: TO çalışması (1) deney sonuçları.

Parametre	TO Çalışması (1)		
	Besleme	TO - Süzüntü Kompozit	Konsantre
pH	7.84	8.92	9.94
İletkenlik (µS/cm)	23720.00	868.00	57200.00
TÇM (mg/L)	15892.40	581.56	38324.00
Bulanıklık (NTU)	0.39	0.14	11.50
Alkalinite (mg $CaCO_3$/L)	1550.00	310.00	4280.00
KOİ (mg/L)	640.00	13.80	2150.00
$BOİ_5$ (mg/L)	25.00	0.00	85.00
Klorür (mg/L)	170.00	32.00	280.00
Sülfat (mg/L)	28.24	0.56	54.75
TP (mg/L)	0.36	<0.01	1.58
Orto–P (mg/L)	0.22	<0.01	1.16
TKN (mg/L)	84.00	<0.01	112.00
NH_4–N (mg/L)	72.00	<0.01	95.20
NO_3–N (mg/L)	0.72	<0.01	0.48
RES_{436} (m^{-1})	8.20	<0.5	31.93
SAK_{254} (m^{-1})	50.14	<0.5	190.00
AKM (mg/L)	<0.05	<0.05	0.00
UAKM (mg/L)	<0.05	<0.05	0.00
TKM (mg/L)	<0.05	<0.05	0.00
TUKM (mg/L)	<0.05	<0.05	0.00
Toplam Sertlik (mg $CaCO_3$/L)	220.00	7.80	850.00
Fekal Koliform (EMS/100 mL)	0.00	0.00	–
SAR_{tad}	215.56	19.3	–
Na^+(mg/L)	5927.0	186.5	–
Bor (B) (mg/L)	1.11	0.707	–

Aşağıda Tablo 4.9'da $CaCl_2$–SÇÇ çıkışı ile beslenen TO çalışmasına ait karakterizasyon değerleri verilmiştir.

Tablo 4.9: TO çalışması (2) deney sonuçları.

Parametre	TO Çalışması (2)		
	Besleme	TO - Süzüntü Kompozit	Konsantre
pH	7.12	8.62	9.20
İletkenlik (µS/cm)	38420.00	1450.00	72323.00
TÇM (mg/L)	25741.20	971.50	48456.41
Bulanıklık (NTU)	0.44	0.18	7.48
Alkalinite (mg $CaCO_3$/L)	1470.00	320.00	4560.00
KOİ (mg/L)	700.00	20.00	2450.00
$BOİ_5$ (mg/L)	20.00	2.00	72.00
Klorür (mg/L)	1880.00	465.00	2950.00
Sülfat (mg/L)	26.50	4.52	63.50
TP (mg/L)	0.15	<0.01	1.12
Orto–P (mg/L)	0.10	<0.01	0.55
TKN (mg/L)	76.00	<0.01	108.00
NH_4–N (mg/L)	68.00	<0.01	92.00
NO_3–N (mg/L)	0.62	<0.01	1.55
RES_{436} (m^{-1})	7.40	<0.05	24.20
SAK_{254} (m^{-1})	56.30	<0.05	216.00
AKM (mg/L)	<0.05	<0.05	0.00
UAKM (mg/L)	<0.05	<0.05	0.00
TKM (mg/L)	<0.05	<0.05	0.00
TUKM (mg/L)	<0.05	<0.05	0.00
Toplam Sertlik (mg $CaCO_3$/L)	340.00	38.00	930.00
Fekal Koliform (EMS/100 mL)	0.00	0.00	0.00
SAR_{tad}	0.16	0.20	–
Na^+ (mg/L)	44.87	7.49	–
Bor (B) (mg/L)	<0.0001	<0.0001	–

Her iki TO çalışmasına ait süzüntü karakterizasyon değerleri incelendiğinde, süzüntülerin **A Sınıfı** kapsamında olduğu belirlenmiştir. Her iki süzüntüde $BOİ_5$, AKM değerleri yaklaşık 0 mg/L ve fekal koliform değerleri 0 EMS/100 mL olarak bulunmuştur. pH değeri TO çalışması (1) ve (2) için sırasıyla, 8.92 ve 8.62 olarak belirlenmiştir. TO çalışması (1) ve (2) için bulanıklık değerleri sırasıyla, 0.14 NTU ve 0.18 NTU olarak ölçülmüştür.

TO çalışmalarının süzüntüleri, AAT–TUT, (2010)'da yer alan *'Sulama Suyunun Kimyasal Kalitesinin Değerlendirilmesi'* için geliştirilmiş iletkenlik, TÇM, Na^+, Cl^-, B ve SAR_{tad} değerleri kapsamında değerlendirilmiştir.

TO çalışması (1) süzüntüsünde Cl^- 32 mg/L (I. Kalite: <140 mg/L), TÇM 582 mg/L (II. Kalite: 500–2000 mg/L), iletkenlik 0.86 mS/cm (II. Kalite: 0.7–3), Bor 0.71 mg/L (II. Kalite 0.7–3 mg/L) ve SAR_{tad} 19.3 (III. Kalite: EC <1.3 mS/cm) olarak bulunmuştur. Bu değerlere göre TO çalışması (1) süzüntüsünün **III. Kalite** sulama suyu kapsamında değerlendirilebileceği belirlenmiştir.

TO çalışması (2) süzüntüsünde Cl^- 320 mg/L (II. Kalite: 140–350 mg/L), TÇM 972 mg/L (II. Kalite: 500–2000 mg/L), iletkenlik 1.45 mS/cm (II. Kalite: 0.7–3 mS/cm), SAR_{tad} 0.20 (II. Kalite: EC 5–2.9 mS/cm), ve Na^+ 7.49 mg/L (II. Kalite: 3–9 mg/L) olarak bulunmuştur. Bu değerlere göre TO çalışması (2) süzüntüsünün **II. Kalite** sulama suyu kapsamında değerlendirilebileceği belirlenmiştir.

Ayrıca, TO çalışmalarından elde edilen konsantre çıkışlarının ÇÇ olarak geri kazanımı hedeflenmiştir. TO çalışması (1) konsantresinin karakteristik değerlerine bakıldığında iletkenlik değerinin 57.20 mS/cm olduğu belirlenmiştir (Tablo 4.6). TO çalışmasına (1) ait konsantrenin iletkenlik değerinin (57.20 mS/cm), ÇÇ tankı iletkenliğine (65.50 mS/cm) yakın olduğu görülmektedir. TO çalışması (2)'ye ait konsantre değerleri incelendiğinde iletkenlik değeri 72.32 mS/cm olarak belirlenmiştir (Tablo 4.7). TO çalışmasına (2) ait konsantrenin iletkenlik değerinin (72.32 mS/cm) ÇÇ tankındaki iletkenlik değerine (99.50 mS/cm) yakın olduğu belirlenmiştir.

4.4.3. NF ve TO Çalışması Sonuçlarının Değerlendirmesi

AnOMBR sistemi SÇÇ çıkışları ile NF ve TO süzüntülerinin tarımsal sulama suyu olarak kullanımına yönelik olarak sonuçların değerlendirmesi Tablo 4.10'da özetlenmiştir.

Tablo 4.10: SÇÇ çıkışları, NF süzüntüsü ve TO süzüntüsünün su kalite değerlendirmesi.

		Sulamada geri kullanılacak arıtılmış atıksuların sınıflandırılması		**Sulama suyunun kimyasal kalitesinin değerlendirilmesi**			**Ağır metal ve toksik elementlerin konsantrasyonlarının değerlendirilmesi**
		A SINIF	**B SINIF**	**I. SINIF**	**II. SINIF**	**III. SINIF**	
AnOMBR (ÇÇ: HCOONa)	SÇÇ	×	✓	×	×	×	✓
	SÇÇ (×5 kat)	✓	×	×	×	×	✓
	SÇÇ (×11 kat)	✓	×	×	✓	×	✓
	NF Süzüntüsü	✓	×	×	×	×	✓
	NF Süzüntüsü (×4 kat)	✓	×	×	×	✓	✓
	NF Süzüntüsü (×8 kat)	✓	×	×	✓	×	✓
	TO Süzüntüsü	✓	×	×	×	✓	✓
AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$)	SÇÇ	✓	×	×	×	✓	✓
	SÇÇ (×5 kat)	✓	×	×	×	✓	✓
	SÇÇ (×11 kat)	✓	×	×	✓	×	✓
	NF Süzüntüsü	✓	×	×	×	✓	✓
	TO Süzüntüsü	✓	×	×	✓	×	✓

Tablo 4.10'da görüldüğü üzere sadece AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) işletiminden elde edilen SÇÇ çıkışının seyreltme yapılmaksızın tarımsal sulama amaçlı kullanıma uygun (A Sınıf–III. Kalite) olduğu belirlenmiştir. AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) işletiminden elde edilen SÇÇ çıkışı ise Sınıf A kapsamında yer almış fakat herhangi bir kalite sınıfına uygun bulunmamıştır.

AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) işletiminden elde edilen SÇÇ çıkışı 5 kat ve 11 kat seyreltildiğinde ise sırasıyla, **A Sınıfı–III. Kalite** ve **A Sınıfı–II. Kalitede** su elde edilmiştir. AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) işletiminden elde edilen SÇÇ çıkışı 11 kat seyreltiğinde hallerinde **A Sınıfı–II. Kalitede** su elde edilmiştir. Besleme atıksuyunda (bira atıksuyu) Al, As, Be, B, Cd, Cr, Co, Cu, F, Fe ve Pb'nin değeri sırasıyla, 1.02 (<5), 0.0085 (<0.1), 0.049 (<0.1), 0.118 (<0.7), 0.000061 (<0.01), 0.223 (<0.1), 0.003 (<0.05), 1.968 (<0.2), 1.5 (<1), 37.57 (<5) ve 0.0019 mg/L (<5) olarak bulunmuştur. AAT–TUT (2010)'da 'Tablo E7.7' de yer alan '*Sulama sularında izin verilebilen maksimum ağır metal ve toksik elementlerin konsantrasyonları*' kapsamında elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Arıtılmamış bira atıksuyunda B 0.118 (<0.7), Cr 0.223 (<0.1), Cu 1.968 (<0.2), F 1.5 (<1) ve Fe 37.57 mg/L (<5) hariç tüm elementlerin konsantrasyonları 'Her türlü zeminde sürekli sulama yapılması' kapsamında ağır metal limit değerlerin altındadır. NF ve TO prosesleri ile B, Cr, Cu, F ve Fe konsantrasyonları da <0.01 mg/L'nin altına düşürülmüştür.

AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) işletiminden elde edilen SÇÇ çıkışlarının ve NF çalışması (1) süzüntüsünün seyreltilmeden tarımsal uygulamalarda kullanıma uygun olmadığı belirlenmiştir. NF çalışması (1) süzüntüsünün 4 kat ve 8 kat seyretilmesi sonucunda sırasıyla, **A Sınıfı–II. Kalitede** ve **A Sınıfı –II. Kalitede** olduğu belirlenmiştir. TO çalışması (1) süzüntüsü ise **A Sınıfı–III. Kalitede** olduğu belirlenmiştir.

AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) işletiminden elde edilen SÇÇ çıkışlarının ve NF çalışması (2) süzüntüsünün her ikisinin de **A Sınıfı–III. Kalitede** olduğu belirlenmiştir. TO çalışması (2) süzüntüsü ile **A Sınıfı–II. Kalitede** su çıkışı elde edilmiştir.

4.4.4. UF Çalışması Sonuçları

HCOONa ve $CaCl_2$'nin ÇÇ olarak kullanıldığı çalışmaların ilk 3 döngüsünde alınan üst fazlar birleştirilmiş ve kompozit olarak UF çalışmasında besleme atıksuyu olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada yapılan değerlendirmeler 2 adımda incelenmiştir. **Birinci adımda**, kompozit üst fazın karakterizasyonu yapılmış ve AnOMBR'ye geri devrinin mümkün olup/olmayacağı araştırılmıştır. **İkinci adımda**, *(i)* UF çalışmasından elde edilen süzüntünün İSKİ kanala deşarj standartlarına uygun olup/olmadığı *(ii)* UF konsantresinin AnOMBR sistemine geri devrinin uygun olup/olmadığı *(iii)* AnOMBR sisteminin 10, 20 ve 30 mS/cm iletkenlik üst değerinde işletilmesi durumunda, UF konsantresinin AnOMBR'ye geri devrinin uygun olup/olmadığı *(iv)* UF konsantresinin çamur susuzlaştırma ünitelerinde berterafının mümkün olup/olmadığı Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliğinde yer alan Tablo E6.2'de *'Ham Çamurun ve Çürütülmüş Arıtma Çamurlarının Kimyasal Bileşimi'* başlığı altında verilen karakteristik değerler ile kıyaslanarak belirlenmiştir. AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) sisteminin üst faz çıkışı kullanılarak yapılan UF çalışması, UF çalışması (1) ve AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) sisteminin üst faz çıkışı kullanılarak yapılan UF çalışması, UF çalışması (2) olarak adlandırılmıştır. AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) sistemi ve AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) sistemi üst faz çıkışları sırasıyla üst faz çıkışı (1) ve üst faz çıkışı (2) olarak adlandırılmıştır. Tablo 4.11'de UF çalışması (1) ve Tablo 4.12'de UF çalışmas (2)'ye ait sonuçlar verilmiştir.

Tablo 4.11: UF çalışması (1) deney sonuçları.

Parametre	UF Çalışması (1)			
	Besleme	SÜZÜNTÜ		Konsantre
		Kompozit	Giderim Verimi (%)	
pH	7.36	8.35	-	8.71
İletkenlik (µS/cm)	29080.00	17560.00	39.61	34240.00
TÇM (mg/L)	19483.60	11765.20	39.61	22940.80
Bulanıklık (NTU)	930.00	1.08	99.88	>1000
Alkalinite (mg $CaCO_3$/L)	2270.00	1430.00	37.00	2860.00
KOİ (mg/L)	1240.00	220.00	82.26	1850.00
$BOİ_5$ (mg/L)	125.00	5.00	96.00	75.00
Klorür (mg/L)	380.00	280.00	26.32	460.00
Sülfat (mg/L)	57.40	45.20	21.25	68.30
TP (mg/L)	14.80	12.10	18.24	18.70
Orto-P (mg/L)	10.60	8.60	18.87	14.80
TKN (mg/L)	218.00	80.00	63.30	614.00
NH_3-N (mg/L)	187.00	65.00	65.24	448.00
NO_3-N (mg/L)	2.50	0.40	84.00	3.80
RES_{436} (m^{-1})	146.00	12.70	91.30	170.60
SAK_{254} (m^{-1})	224.00	22.40	90.00	300.00
AKM (mg/L)	950.00	185.00	80.53	1670.00
UAKM (mg/L)	300.00	60.00	80.00	495.00
TKM (mg/L)	-	-	-	3250.00
TUKM (mg/L)	-	-	-	1250.00
Toplam Sertlik (mg $CaCO_3$/L)	750.00	660.00	12.00	870.00
Fekal Koliform, EMS / 100 mL	-	0.00	100.00	0.00

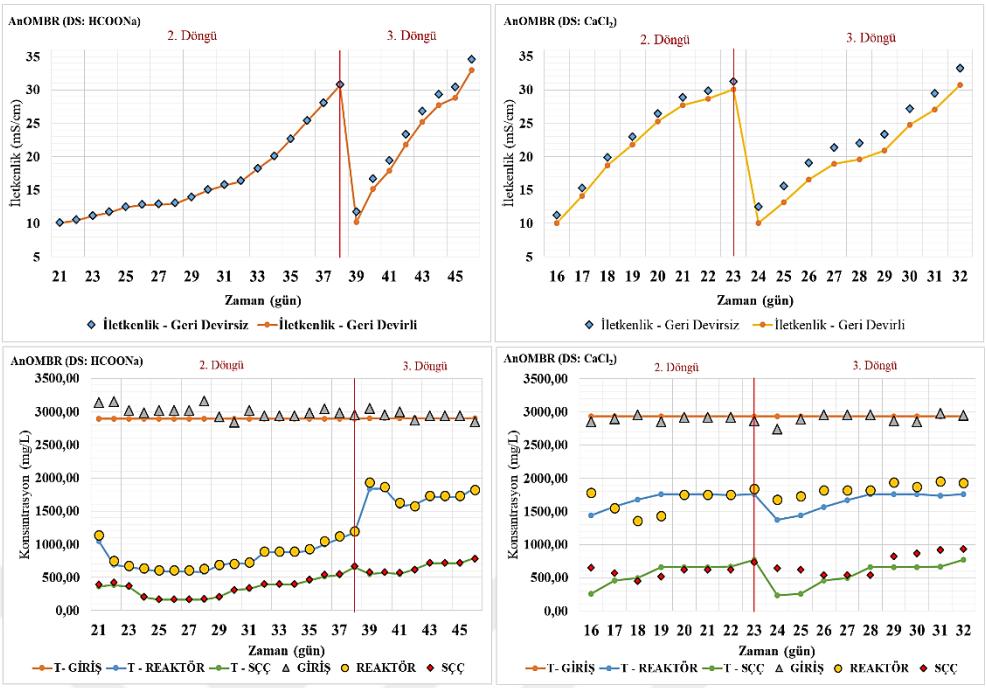
Tablo 4.12: UF çalışması (2) deney sonuçları.

Parametre	UF Çalışması (2)			
	Besleme	SÜZÜNTÜ		Konsantre
		Kompozit	Giderim Verimi (%)	
pH	7.32	8.47	-	8.92
İletkenlik (µS/cm)	29080.00	19580.00	32.67	33470.00
TÇM (mg/L)	19483.60	13118.60	32.67	22424.90
Bulanıklık (NTU)	970.00	1.20	99.88	>1000
Alkalinite (mg $CaCO_3$/L)	2450.00	1550.00	36.73	3220.00
KOİ (mg/L)	1650.00	120.00	92.73	2650.00
$BOİ_5$ (mg/L)	145.00	15.00	89.66	115.00
Klorür (mg/L)	550.00	385.00	30.00	720.00
Sülfat (mg/L)	62.30	48.00	22.95	85.00
TP (mg/L)	9.54	7.24	24.11	23.10
Orto-P (mg/L)	8.76	6.85	21.80	16.42
TKN (mg/L)	160.00	47.00	70.63	428.00
NH_3-N (mg/L)	187.00	48.00	74.33	246.00
NO_3-N (mg/L)	1.62	0.25	84.57	2.65
RES_{436} (m^{-1})	235.00	35.60	84.85	316.30
SAK_{254} (m^{-1})	310.00	37.12	88.03	415.10
AKM (mg/L)	1060.00	170.00	83.96	1820.00
UAKM (mg/L)	245.00	42.00	82.86	420.00
TKM (mg/L)	-	-	-	3740.00
TUKM (mg/L)	-	-	-	850.00
Toplam Sertlik (mg $CaCO_3$/L)	670.00	520.00	22.39	840.65
Fekal Koliform, EMS / 100 mL	-	0.00	100.00	-

4.4.4.1. AnOMBR Üst Fazının Reaktöre Geri Devrettirilmesi Sonuçları

AnOMBR sistemi üst fazının besleme atıksuyu ile karıştırılıp sisteme beslenmesi durumunda reaktör içerisindeki iletkenlik ve KOİ konsantrasyonu değişimi belirlenmiştir. Üst faz çıkışının maksimum %5 ve atıksuyun %95 oranında karıştırılabileceği kurulan kütle dengesi ile belirlenmiştir. Kurulan kütle denklemi EK 2 (denklem 1)' de yer almaktadır. Kütle dengesi kurularak hesaplanan değerler (Şekil 4.39) 'T' olarak ifade edilmiştir. AnOMBR sisteminin iletkenlik değeri; çöken çamurun iletkenliği, üst fazın iletkenliği ve atıksuyun iletkenliği ile kütle dengesi kurularak hesaplanmıştır. Ayrıca, reaktördeki iletkenlik ve KOİ konsantrasyonu değerleri arasında korelasyon kurulmuştur.

Üst faz çıkışının %5'in üzerinde geri devrettirilmesi durumunda reaktördeki iletkenlik değerinin, mevcut işletmede elde edilen AnOMBR reaktör içi iletkenlik değerinden yüksek olacağı belirlenmiştir. Şekil 4.39'da AnOMBR üst faz çıkışı (%5) ile bira atıksuyunun (%95) oranında karıştırılarak işletilmesi durumunda KOİ konsantrasyonunda ve iletkenlik değerinde gerçekleşeceği konsantrasyon değişimleri yer almaktadır.



Şekil 4.39: Üst fazlarının reaktörde geri devrettirilmesi durumunda iletkenlik ve KOİ konsantrasyonu değişimi.

Şekil 4.39'da elde edilen sonuçlar her iki sistemin 1. döngülerinde elde edilen veriler ile kütle dengesi kurularak hesaplanmıştır. Bu sebeple üst faz çıkışının geri devrettirilmesi ile gerçekleşecek konsantrasyon değişimleri 2. döngüden itibaren hesaplanmıştır.

Üst faz çıkışı (1)'in reaktöre geri devrettirilmesi ile 2. ve 3. döngülerde reaktör içerisindeki iletkenlik seviyesinin düşeceği belirlenmiştir. Reaktörün 2. döngüsünde reaktör içi iletkenlik değerinin, üst faz geri devrettirilmeden (mevcut işletme sonuçlarına göre) 10.18 mS/cm ve üst faz geri devrettirildiğinde 10.05 mS/cm olacağı belirlenmiştir. 3. döngüde ise reaktör içi iletkenlik değerinin, üst faz geri devrettirilmeden (mevcut işletme sonuçlarına göre) 11.8 mS/cm ve üst faz geri devrettirildiğinde 10.22 mS/cm olacağı belirlenmiştir.

Üst faz çıkışı (2)'nin reaktöre geri devrettirilerek ve geri devrettirilemeden işletilmesi durumunda iletkenlik seviyelerindeki oluşacak farkın üst faz çıkışı (1)'in reaktöre geri devrettirilmesine göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Reaktör içerisindeki iletkenlik değeri 2. döngüde, üst faz geri devrettirilmeden 11.27 mS/cm ve üst faz üst faz geri devrettirildiğinde 10.09 mS/cm olacağı belirlenmiştir. 3. döngüde ise reaktör içi iletkenlik değerinin, üst faz geri devrettirilmeden 12.51 mS/cm ve üst faz üst faz geri devrettirildiğinde 10.06 mS/cm olacağı belirlenmiştir.

Üst faz çıkışı (1)'in reaktöre geri devrettirilmesi durumunda, giriş KOİ konsantrasyonunun 2578 mg/L'ye düşeceği belirlenmiştir. Üst faz çıkışı (2)'nin reaktöre geri devrettirilmesi durumunda giriş KOİ konsantrasyonunun 2936 mg/L'ye düşeceği belirlenmiştir. Elde edilen bu verilere göre üst fazın reaktöre %5 oranında geri devrettirilmesi sonucunda, her iki ÇÇ türü ile yapılan çalışma için reaktör içerisinde iletkenlik ve KOİ değerlerinin düşüceği görülmektedir. Fakat üst faz çıkışının (4 L) tamamının reaktöre geri devrettirilmesi işlemi (%5 oranında) 152 günde tamamlanabilmektedir. Bu sebeple üst faz çıkışlarının AnOMBR sistemine geri devrettirilmesinin **uygun olmayacağı** belirlenmiştir. AnOMBR sisteminin, kıyı şeridinde yer alması durumunda membran konsantreleri bertarafı yönetmeliği kapsamında üst faz çıkışlarının derin deniz deşarjı yapılarak (bkz. Tablo 2.19) bertaraf edilmesinin **uygun olacağı** belirlenmiştir.

4.4.4.2. UF Süzüntüsünün Kanal Deşarj Standartlarına Göre Değerlendirilmesi

AnOMBR sistemi üst fazının UF çalışmasında besleme olarak kullanılması durumunda elde edilen süzüntünün kanala deşarj standartlarına uygunluğu araştırılmıştır. Tablo 4.13'te UF çalışmaları sonucunda elde edilen süzüntü değerlerinin İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi (İSKİ)'nin '*Atıksuların Kanalizasyona Deşarj Yönetmeliği (2013)–Madde 14: Tablo 1*' kapsamında değerlendirilmesi yer almaktadır.

Tablo 4.13: UF çalışması süzüntü karakteristik değerleri ve İSKİ kanala deşarj standartları.

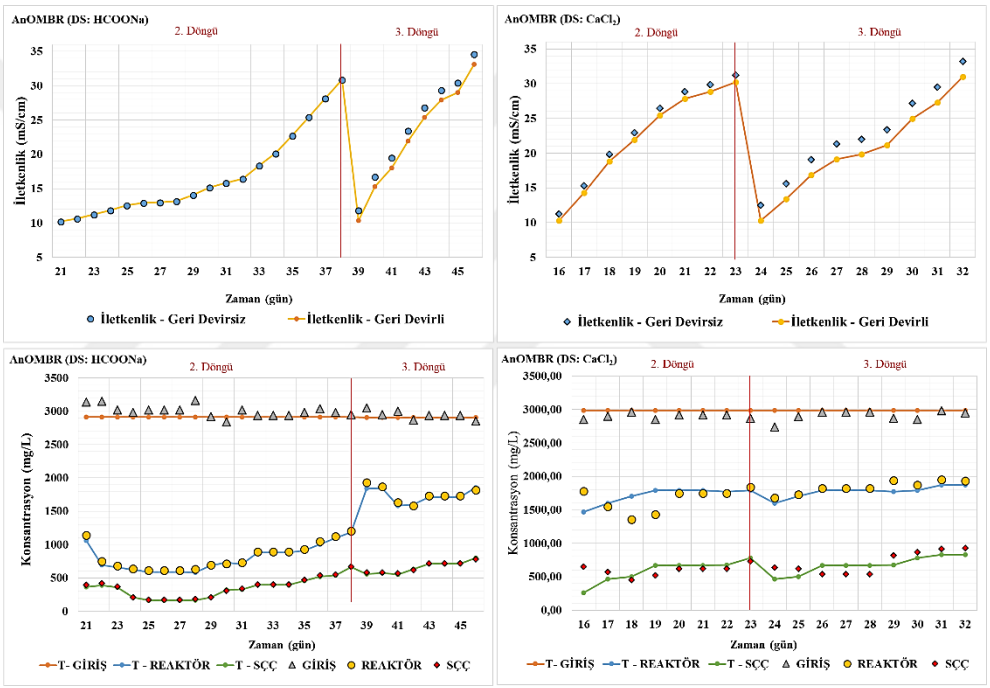
Parametreler	**UF Çalışması Süzüntüsü (1)**	**UF Çalışması Süzüntüsü (2)**	**ATIKSULARIN ATIKSU ALTYAPI TESİSLERİNE DEŞARJINDA ÖNGÖRÜLEN ATIKSU STANDARTLARI**	
			Kanalizasyon Sistemleri Tam Arıtma İle Sonuçlanan Atıksu Altyapı Tesislerinde	Kanalizasyon Sistemleri Ön Arıtma + Derin Deniz Deşarjı İle Sonuçlanan Atıksu Altyapı Tesislerinde
pH	8.35	8.47	6.00-12.00	6.00-12.00
KOİ (mg/L)	220.00	120.00	1000.00	600.00
Klorür (mg/L)	280.00	385.00	15000.00	-
Sülfat (mg/L)	45.20	48.00	1700.00	1700.00
AKM (mg/L)	185.00	170.00	500.00	350.00
TP (mg/L)	12.10	7.24	–	10
Yağ ve gres (mg/L)	–	–	150	50
Toplam sülfür (S) (mg/L)	–	–	2	2
Fenol (mg/L)	–	–	10	10

* As, Pb, Cd, Cr, Hg, Cu, Ni ve Zn elementleri UF süzüntülerinde 0 değerine yakın olması nedeniyle tablo da verilmemiştir.

Tablo 4.13 incelendiğinde UF çalışması (1) ve UF çalışması (2)'de elde edilen pH, KOİ, Klorür, Sülfat ve AKM konsantrasyonlarının tümünün *'İSKİ kanala deşarj standartlarına'* göre kanalizasyon sistemleri ön arıtma + derin deniz deşarjı ile sonuçlanan atıksu altyapı tesislerine deşarj edilmesinin **uygun olacağı** belirlenmiştir.

4.4.4.3. UF Konsantresinin AnOMBR Sistemine Geri Devrettirilmesi

AnOMBR sistemlerinden her döngü sonunda 4 L üst faz elde edilmiştir. Üst faz çıkışının besleme olarak kullanıldığı UF prosesinden 1 L konsantre hacim elde edilmiştir. t anındaki iletkenlik değeri değişimi EK 2'de yer alan denklem 2 ile hesaplanmıştır. Bu kütle denkleminde 't' anı toplam iletkenlik değeri; reaktörde çöken sulu çamurun iletkenlik değeri, alınan üst fazın iletkenlik değeri ve UF konsantresinin iletkenlik değeri ile hesaplanmıştır. Şekil 4.40'ta, UF konsantresinin AnOMBR sistemine geri devrettirilerek ve geri devrettirilmeden elde edilen iletkenlik değeri ve KOİ konsantrasyonu değişimleri yer almaktadır.



Şekil 4.40: UF konsantresinin reaktörde geri devrettirilmesi durumunda iletkenlik ve KOİ konsantrasyonu değişimleri.

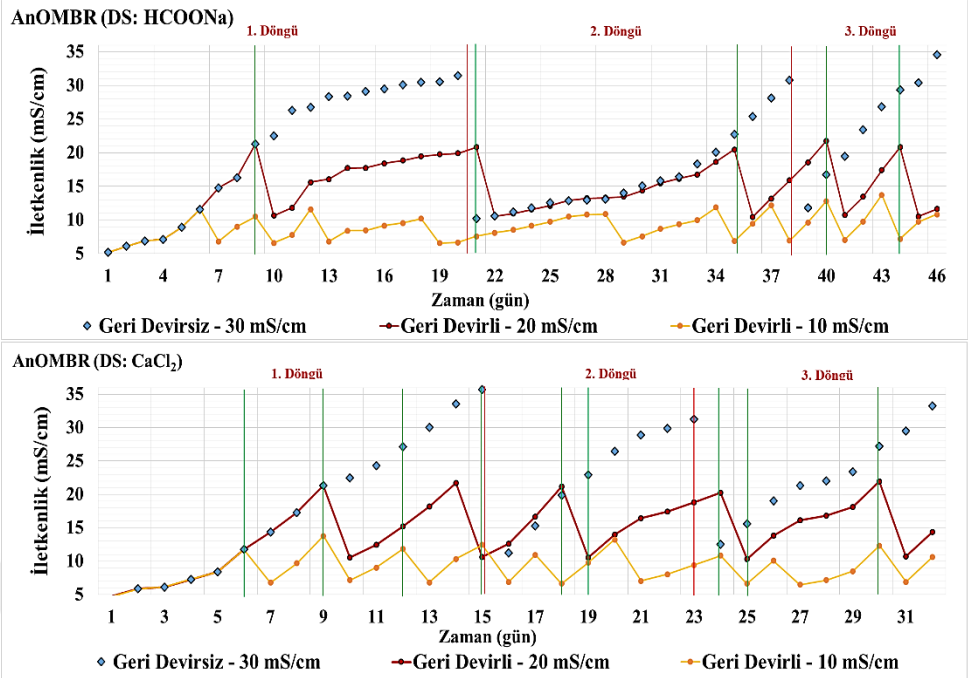
AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) sisteminde reaktörün 2. döngüsünde reaktör içi iletkenlik değerinin, UF çalışması (1) konsantresi geri devrettirilmeden (mevcut işletme sonuçlarına göre) 10.18 mS/cm ve UF çalışması (1) konsantresi devrettirildiğinde 10.25 mS/cm olacağı ve giriş KOİ konsantrasyonunun 2908 mg/L'ye düşeceği belirlenmiştir. Reaktörün 3. döngüsünde reaktör içi iletkenlik değerinin, UF çalışması (1) konsantresi geri devrettirilmeden (mevcut işletme sonuçlarına göre) 11.8 mS/cm ve UF çalışması (1) konsantresi devrettirildiğinde 10.37 mS/cm olacağı ve giriş KOİ konsantrasyonunun 2909 mg/L'ye düşeceği belirlenmiştir.

AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) sisteminde reaktörün 2. döngüsünde reaktör içi iletkenlik değerinin, UF çalışması (2) konsantresi geri devrettirilmeden (mevcut işletme sonuçlarına göre) 11.27 mS/cm ve UF çalışması (2) konsantresi devrettirildiğinde 10.27 mS/cm olacağı ve giriş KOİ konsantrasyonunun 2988 mg/L'ye düşeceği belirlenmiştir. Reaktörün 3. döngüsünde reaktör içi iletkenlik değerinin, UF çalışması (2) konsantresi geri devrettirilmeden (mevcut işletme sonuçlarına göre) 12.51 mS/cm ve UF çalışması (2) konsantresi geri devrettirildiğinde 10.31 mS/cm olacağı ve giriş KOİ konsantrasyonunun 2987 mg/L'ye düşeceği belirlenmiştir.

UF konsantrelerinin %5 oranında besleme atıksuyu ile karıştırılması, beslenen konsantrenin toplamda 32 günde sisteme geri devrettirilmesine neden olacağı hesaplanmıştır. 32 günlük işletim süresinin, AnOMBR sisteminde 4 döngüye denk geleceği hesaplanmıştır. Bu sebeple AnOMBR sisteminin 30 mS/cm'de iletkenlik üst sınır değerinde işletilmesi durumunda, UF konsantresinin reaktöre geri devrettirilmesinin **uygun olmayacağı** belirlenmiştir. Bu sebeple daha düşük iletkenlik değerine sahip bir üst faz çıkışının ve/veya daha düşük bir iletkenliğe sahip UF konsantresinin sisteme geri devrettirilmesinin uygun olacağı tespit edilmiştir. AnOMBR sisteminin farklı iletkenlik değerinde işletilmesi durumunda, UF konsantrelerinin geri devrettirilmesi ile oluşabilecek iletkenlik değişimleri bir sonraki başlıkta detaylı anlatılmıştır.

4.4.4.4. UF Konsantresinin Farklı İletkenlik Değerlerinde İşletilen AnOMBR'ye Geri Devrettirilmesi

Şekil 4.41'de UF konsantresinin AnOMBR sistemine (10 mS/cm ve 20 mS/cm iletkenlik üst sınır değerinde) geri devrettirilmesi durumunda reaktör içerisindeki iletkenlik değerlerinin değişimi verilmiştir. 10 mS/cm ve 20 mS/cm iletkenlik üst sınır değerinde işletilen AnOMBR'de iletkenliğin 't' anındaki değişimi, EK 2'de yer alan denklem 3 ile hesaplanmıştır. Kurulan kütle denkleminde UF konsantrelerinin %20 ve bira atıksuyu %80 oranında karıştırılabileciği belirlenmiştir.



Şekil 4.41: AnOMBR + UF, 10 mS/cm ve 20 mS/cm'te - iletkenlik değişimi.

UF çalışması (1) konsantresinin (10 mS/cm ve 20 mS/cm iletkenlik üst sınır değerinde) en az %20 ve en çok %76 oranında bira atıksuyu ile karıştırılarak reaktöre verilebileceği belirlenmiştir (EK 2-denklem 3). UF çalışması (1) konsantresi %20 ve bira atıksuyu %80 oranında karıştırılarak reaktöre geri devrettirilmesi durumunda, beslenen konsantrenin toplamda 2 günde sisteme geri devrettirilmesinin mümkün olacağı belirlenmiştir. UF çalışması (1) konsantresi %76 ve bira atıksuyu %24 oranında karıştırılarak reaktöre geri devrettirilmesi durumunda ise konsantrenin 1 günden kısa bir sürede sisteme geri devrettirilmesinin mümkün olacağı belirlenmiştir.

UF çalışması (1) konsantresinin (iletkenlik üst sınır değeri: 10 mS/cm) reaktöre geri devrettirilmesi durumuda; 1., 2. ve 3. döngülerde reaktör içerisindeki iletkenlik değerinin, 5.20–10.88 mS/cm aralığında değişim göstereceği hesaplanmıştır (EK 2-denklem 3). Reaktör, UF çalışması (1) konsantresinin geri devrettirilmeden işletildiğinde 45 günlük süreç toplamda 3 döngüde, UF çalışması (1) konsantresinin geri devrettirilerek işletildiğinde toplamda 9 döngüde işletilebilecektir. UF çalışması (1) konsantresinin (iletkenlik üst sınır değeri: 20 mS/cm) reaktöre geri devrettirilmesi durumunda; 1., 2., ve 3. döngülerde reaktör içerisindeki iletkenlik değerinin 5.20–13.33 mS/cm aralığında değişim göstereceği hesaplanmıştır.

UF çalışması (2) konsantresinin (10 mS/cm ve 20 mS/cm iletkenlik üst sınır değerinde) en az **%20** ve en fazla **%60** oranında bira atıksuyu ile karıştırılarak reaktöre verilebileceği belirlenmiştir. UF çalışması (2) konsantresinin %20 ve bira atıksuyu %80 oranında karıştırılarak reaktöre geri devrettirilmesi durumunda, konsantrenin toplamda 2 günde sisteme geri devrettirilmesinin mümkün olacağı belirlenmiştir.

UF çalışması (2) konsantresinin (iletkenlik üst sınır değeri: 10 mS/cm) reaktöre geri devrettirilmesi durumuda; 1., 2., ve 3. döngülerde reaktör içerisindeki iletkenlik değerinin 6.48–7.16 mS/cm aralığında değişim göstereceği hesaplanmıştır. Reaktör, UF çalışması (2) konsantresi geri devrettirilmeden işletildiğinde 32 günlük sürecin toplamda 3 döngüde, UF çalışması (2) konsantresi geri devrettirilerek işletildiğinde toplamda 10 döngüde tamamlanacağı hesaplanmıştır. UF çalışması (2) konsantresinin (iletkenlik üst sınır değeri: 20 mS/cm) reaktöre geri devrettirilmesi durumuda; 1., 2., ve 3. döngülerde reaktör içerisindeki iletkenlik değerinin 5.85–10.62 mS/cm aralığında değişim göstereceği hesaplanmıştır.

AnOMBR sisteminde 10 mS/cm ve 20 mS/cm iletkenlik üst sınır değerine işletilmesi durumunda; reaktör içerisinde iletkenlik artışının ve çamurda iletkenlik birikiminin yavaşlatılabileceği belirlenmiştir.

4.4.4.5. UF Konsantresinin Çamur Susuzlaştırma Ünitelerinde Bertarafı

Tablo 4.14'te UF çalışması (1) ve (2) konsantrelerinin çamur susuzlaştırma ünitelerinde berterafının mümkün olup/olmadığı; AAT–T.U.T., (2010) EK 6– Tablo E6.2'de yer alan *'ham çamurun ve çürütülmüş arıtma çamurlarının kimyasal bileşimi'* başlığı altında verilen ön çökeltim çamuru karakteristik değerleri ile kıyaslanarak değerlendirilmiştir.

Tablo 4.14: UF çalışması konsantresinin ön çökeltim çamuru olarak değerlendirilmesi.

Ön Çöktürme Çamuru Karakteristiği		UF Çalışması Konsantresi (1)	UF Çalışması Konsantresi (2)
Parametreler	**Aralık**		
TKM (%)	5–9	0.31	0.35
Uçucu katı (% TKM)	60–80	38.46	22.72
Yağ ve gres (% TKM)		–	–
Eterde çözünebilen	6–30	–	–
Eterde ekstrakte olan	7–35	–	–
Protein (% TKM)	20–30	–	–
Azot (% TKM)	1.5–4	6.70	11.45
Fosfor (% TKM)	0.8–2.8	0.45	0.62
Potasyum (% TKM)	0–1	–	–
Selüloz (% TKM)	8–15	–	–
Demir (KM %)	2–4	–	–
Silika (% TKM)	15–20	–	–
pH	5–8	8.71	8.92
Alkalinite ($mgCaCO_3$/L olarak)	500–1.500	2860.00	3220.00
Organik asitler (mg/l, HAc)	200–2.000	–	–
Enerji içeriği, kj TS/kg	23000–29000	–	–

UF çalışmalarına ait konsantre çıkışının TKM, TUKM, TKN, TP, pH ve alkalinite değerleri incelendiğinde, ön çöktürme çamuru olarak kullanıma uygun olmadığı belirlenmiştir.

4.5. SIVI GÜBRE UYGULAMASI SONUÇLARI

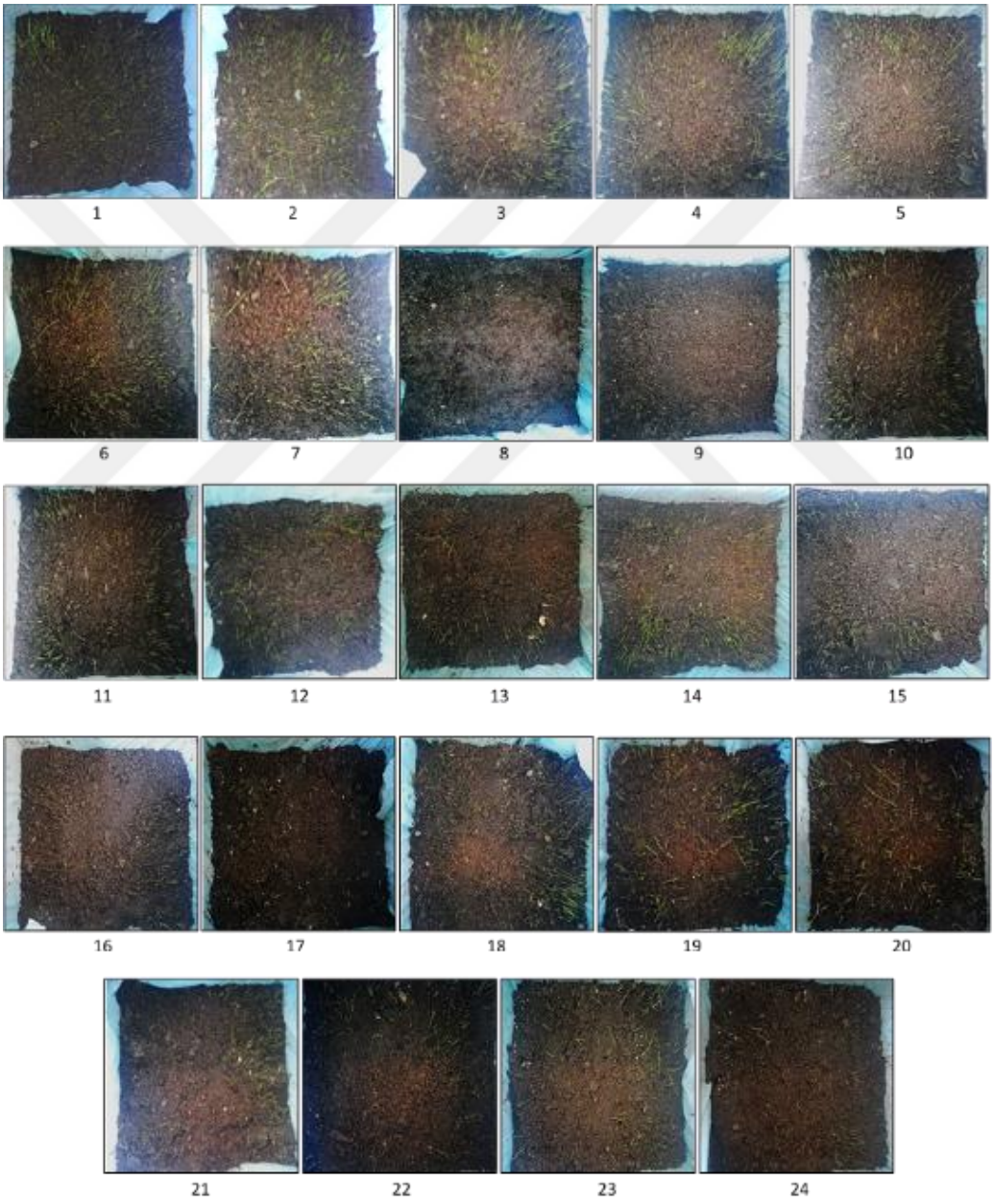
Bu bölümde, AnOMBR sisteminden elde edilen SÇÇ çıkışlarının ve ticari gübrelerin çimlenmeye etkisi incelenmiştir. Azot, fosfor ve potasyum konsantrasyonu yüksek olan ticari gübre türleri seçilmiştir. SÇÇ çıkışları ham olarak 5 kat ve 11 kat seyreltme oranlarında kullanılmıştır. SÇÇ çıkışları, yüksek iletkenlik değeri ve TÇM konsantrasyonları nedeniyle farklı seyreltme oranlarında (5 kat ve 11 kat) hazırlanmıştır. SÇÇ çıkışları ticari gübre olarak değerlendirilmek istendiğinden dolayı hem seyreltilerek hem de diğer ticari gübreler ile karıştırılarak kullanılmıştır. SSÇ çıkışlarına iz element ilavesi yapılarak çimlenmeye etkisi incelenmiştir. Her gün sabah ve akşam toplamda 0.555 L sıvı gübre karışımları ile sulama yapılmıştır. Toprağın ilk gün nemli kalması için, ilk sulamadan sonra toprak 12 saat süresince terlemeye bırakılmıştır. Sıvı gübre uygulaması 30 gün süre boyunca devam etmiştir. Denemelerde kullanılan tüm numunelerin içerik ve sulama miktarları Tablo 4.15'te verilmiştir.

Tablo 4.15: Sıvı gübre numuneleri ve sulama miktarları.

Num.	Örnek Açıklaması	Su (L/gün)	Gübre (L/gün)	Karışım (L/gün)	Toplam (L/30 gün)
1	Çeşme Suyu pH: 5.50	0.055	-	0.555	16.65
2	Çeşme Suyu pH: 6.50	0.055	-	0.555	16.65
3	Çeşme Suyu pH: 7.50	0.055	-	0.555	16.65
4	Çeşme Suyu pH: 8.50	0.055	-	0.555	16.65
5	Çeşme Suyu pH: 9.50	0.055	-	0.555	16.65
6	AnOMBR SÇÇ. $CaCl_2$ ×11	0.055	-	0.555	16.65
7	AnOMBR SÇÇ. $CaCl_2$ ×5	0.055	-	0.555	16.65
8	AnOMBR SÇÇ. $CaCl_2$ ×11 + 1A iz element	0.50	0.055	0.555	16.65
9	AnOMBR SÇÇ. $CaCl_2$ ×11 + 2A iz element	0.50	0.055	0.555	16.65
10	AnOMBR SÇÇ. $CaCl_2$ ×11 + 3A iz element	0.50	0.055	0.555	16.65
11	AnOMBR SÇÇ. $CaCl_2$ ×11 + 1A sıvı gübre	0.50	0.055	0.555	16.65
12	AnOMBR SÇÇ. $CaCl_2$ ×11 + 2A sıvı gübre	0.50	0.055	0.555	16.65
13	AnOMBR SÇÇ. $CaCl_2$ ×11 + 3A sıvı gübre	0.50	0.055	0.555	16.65
14	AnOMBR SÇÇ. HCOONa ×11	0.055	-	0.555	16.65
15	AnOMBR SÇÇ. HCOONa ×5	0.055	-	0.555	16.65
16	AnOMBR SÇÇ. HCOONa ×11 + 1A iz element	0.50	0.055	0.555	16.65
17	AnOMBR SÇÇ. HCOONa ×11 + 2A iz element	0.50	0.055	0.555	16.65
18	AnOMBR SÇÇ. HCOONa ×11 + 3A iz element	0.50	0.055	0.555	16.65
19	AnOMBR SÇÇ. HCOONa ×11 + 1A sıvı gübre	0.50	0.055	0.555	16.65
20	AnOMBR SÇÇ. HCOONa ×11 + 2A sıvı gübre	0.50	0.055	0.555	16.65
21	AnOMBR SÇÇ. HCOONa ×11 + 3A sıvı gübre	0.50	0.055	0.555	16.65
22	1A - Ticari Gübre 11.40.07	-	0.555	0.555	16.65
23	2A - Ticari Gübre 11.05.40	-	0.555	0.555	16.65
24	3A - Ticari Gübre 25.0.0	-	0.555	0.555	16.65

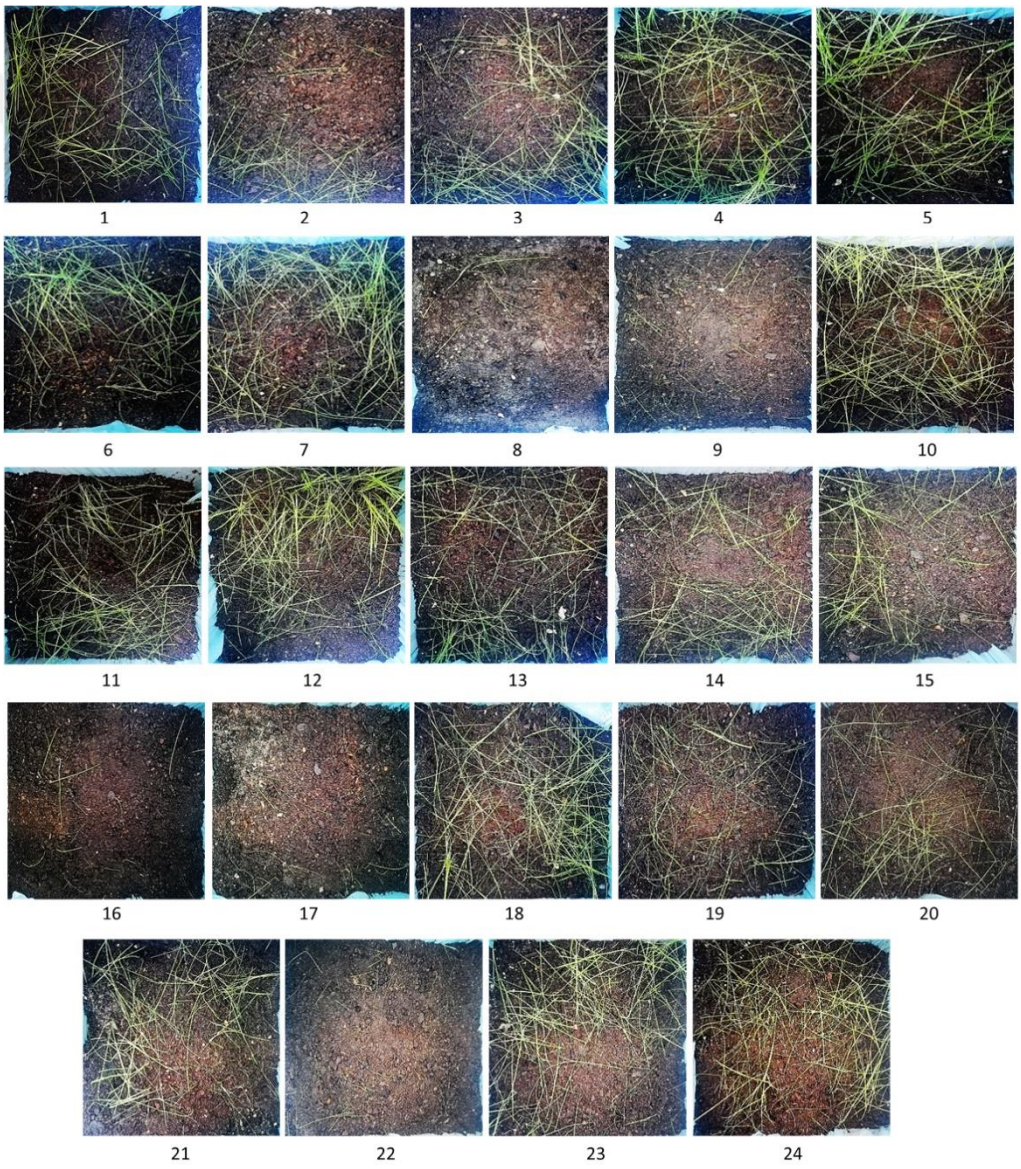
4.5.1. Görsel İnceleme Sonuçları

Çimlenme süreci toplamda 5–10 gün aralığında gerçekleşmektedir. Şekil 4.42'de çimlenmenin gözlemlendiği 6. gündeki her bir numunenin görseli yer almaktadır. Yağmur suyunun farklı pH değerlerini temsil eden 1–5 numaraları çim kaplarında, çalışmanın 6. günü itibariyle çim renklerinin koyu yeşil olduğu ve filizlenmenin başladığı görüntülenmiştir. 6, 7, 14 ve 15 numaralı deney kaplarında çimlenmenin kabın tüm alanında başladığı görüntülenmiştir.



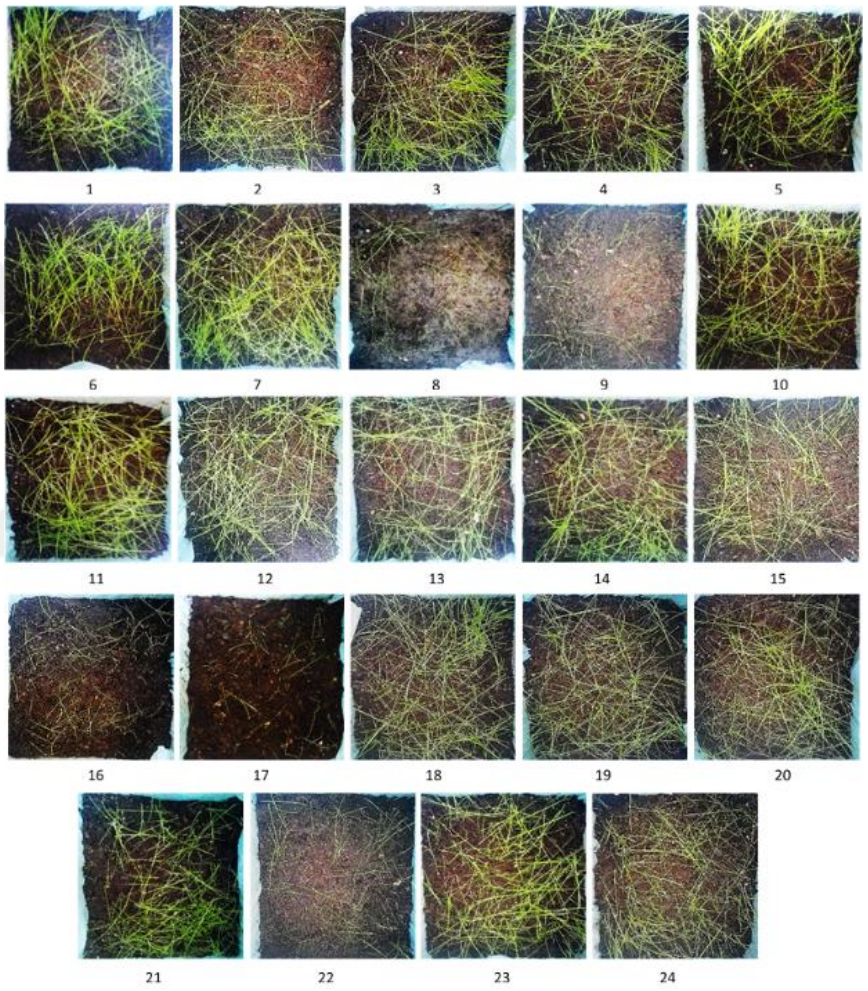
Şekil 4.42: Çim tohumlarının filizlenmesinin 6. günü, çim filizlerinin dağılımı.

Şekil 4.43'te her bir numunenin 15. gününe ait çimlenme görüntüleri verilmiştir. 8–13 ve 16–21 aralığındaki numunelerde çimlenmenin zayıf olduğu gözlemlenmiştir. 22, 23 ve 24 numaralı numunelerde de benzer yapıda çimlenme görüntülenmiştir. En az çimlenme 8 numaralı numunede gözlemlenmiştir. Çimlenmenin ilk günlerinde 8 ve 9 numaralı kaplarda görülen zayıf çim yapısı 15. gün itibariyle devam etmiştir. Ticari gübre türlerinden potasyum içerikli (23) ve azot içerikli (24) gübrelerin, fosfor içeren (22) gübreye göre çok daha fazla çimlenmeye neden olduğu görülmüştür. 16 ve 17 numaralı kaplarda çim yapılarının çok zayıf olduğu ve kap alanın çok az bir kısmını kapladığı görülmektedir.



Şekil 4.43: Çim tohumlarının filizlenmesinin 15. günü, çim filizlerinin dağılımı.

Şekil 4.44'te her bir numunenin 30. gününe ait çimlenme görüntüleri verilmiştir. 30. gün itibariyle ile 2 numaralı numunedeki çim yapısının, 1, 3, 4 ve 5 numaralı numunelere göre daha seyrek yapıda olduğu belirlenmiştir. 8 ve 9 numaralı numunelerde çimlerin filizlenmesinin neredeyse hiç gerçekleşmediği, kabın kenarlarında az miktarda bir filizlenmenin olduğu görülmüştür. 16 ve 17 numaralı numunelerde çimlerin az miktarda ve oldukça seyrek filizlendiği belirlenmiştir.

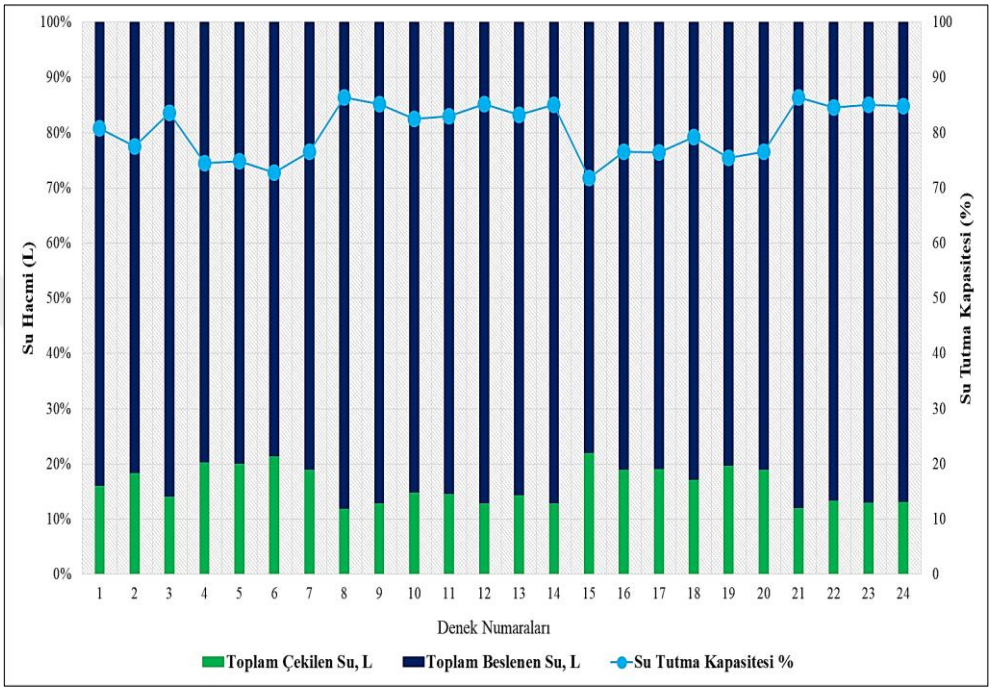


Şekil 4.44: Çim tohumlarının filizlenmesinin 30. günü, çim filizlerinin dağılımı.

30 gün sonunda elde edilen görüntülere göre, HCOONa ve $CaCl_2$'ye ait 5 kat ve 11 kat seyreltilmiş SÇÇ çıkışları (6, 7, 14 ve 15) ile çimlerin sulanmasının büyüme üzerinde olumsuz bir etki yaratmadığı söylenebilir. Benzer durum çeşme suyu (1, 2, 3, 4 ve 5) ve azot içerikli gübre/iz element ilaveli karışımlar (13 ve 21) ile sulanan çimlerde de görülmüştür. Azot içerikli (24) ve potasyum içerikli (23) ticari gübre ile sulanan çimlerin fosfor içerikli gübre (22) ile sulanan çimlere göre daha sık filizlendiği belirlenmiştir.

4.5.2. Toprak Su Tutma Kapsitesi Sonuçları

Çim kaplarının altında yer alan su tutma hazneleri ile günlük beslenen suyun toprakta kalma ve su tutma kaplarında birikme miktarı belirlenmiştir. Şekil 4.45'te her bir çim kabının toplam su tutma kapasitesi verilmiştir.



Şekil 4.45: Çim numunelerinin su tutma kapasiteleri.

30 günlük ölçüm sonuçlarına göre, en yüksek su tutma kapasitesi 11 kat seyreltilmiş $CaCl_2$–SÇÇ çıkışının fosfor içerikli ticari gübre ile karıştırıldığı numunede (8) %86.42 olarak belirlenmiştir. En düşük su tutma kapasitesi ise 5 kat seyreltilmiş HCOONa–SÇÇ çıkışına ait numunede (15) %71.80 olarak belirlenmiştir. Ticari gübrelerin ham kullanıldığı fosfor içerikli (22), potasyum içerikli (23) ve azot içerikli (24) numunelerinin su tutma kapasiteleri sırasıyla %84.59, %85.04 ve %84.83 olarak belirlenmiştir. Farklı pH değerlerinde çeşme suyu ile beslenen numunelerde (1, 2, 3, 4 ve 5) ise su tutma kapasitesi %74.47–83.60 aralığında değişim göstermiştir.

11 kat seyreltilmiş HCOONa–SÇÇ çıkışına ait numunenin (14) hem 5 kat hem de 11 kat seyreltilmiş $CaCl_2$–SÇÇ numunelerine (6 ve 7) göre daha yüksek (%85.10) su tutma kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir.

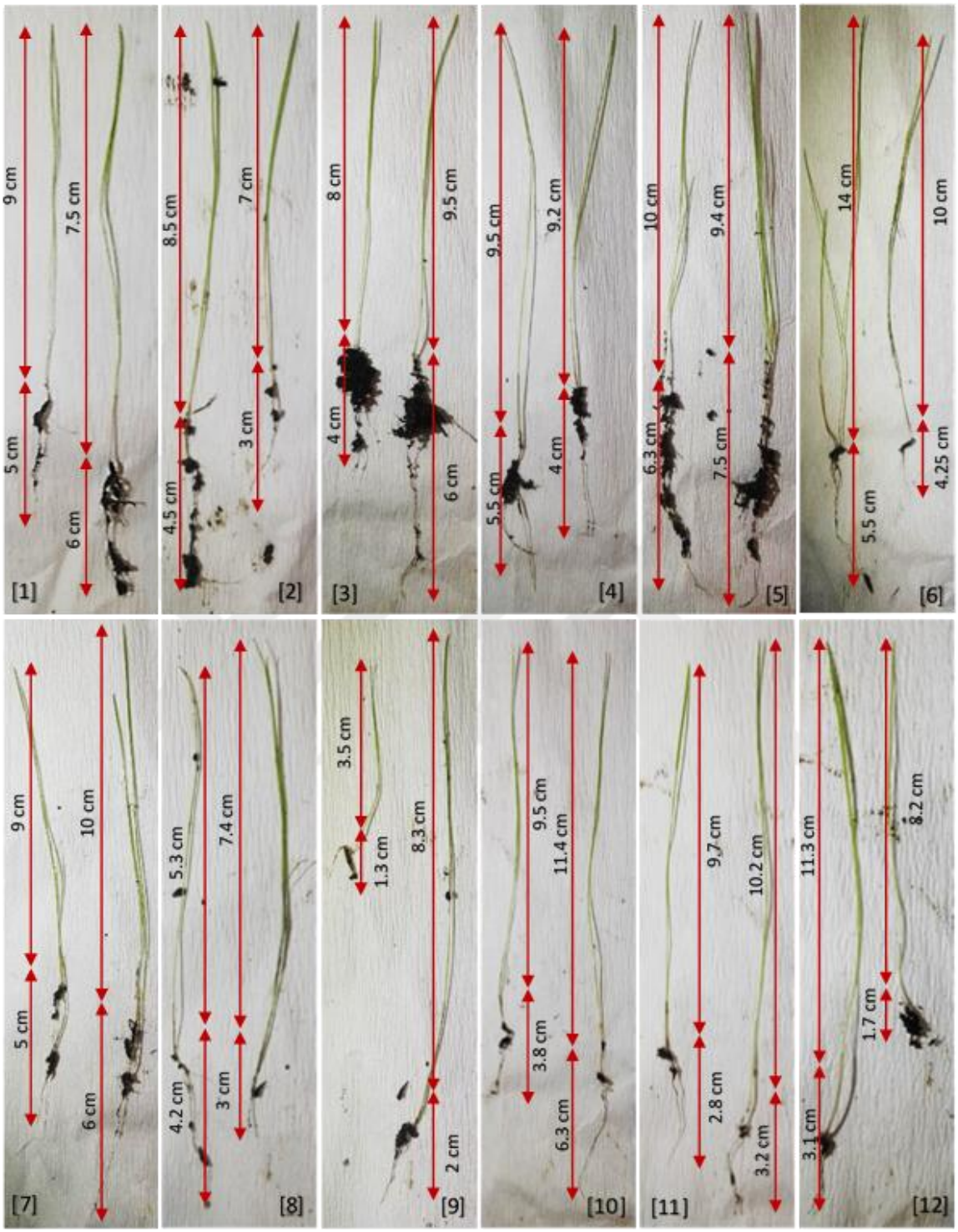
4.5.3. Çim ve Kök Boy Uzunlukları

Tablo 4.16'da her bir çim numunesinden alınan 2 adet çim örneğinin kök ve boy uzunlukları verilmiştir. Örnekler, kabın genelini temsil etmesi amacıyla 2 farklı noktadan alınmış ve ortalama değerler kullanılmıştır.

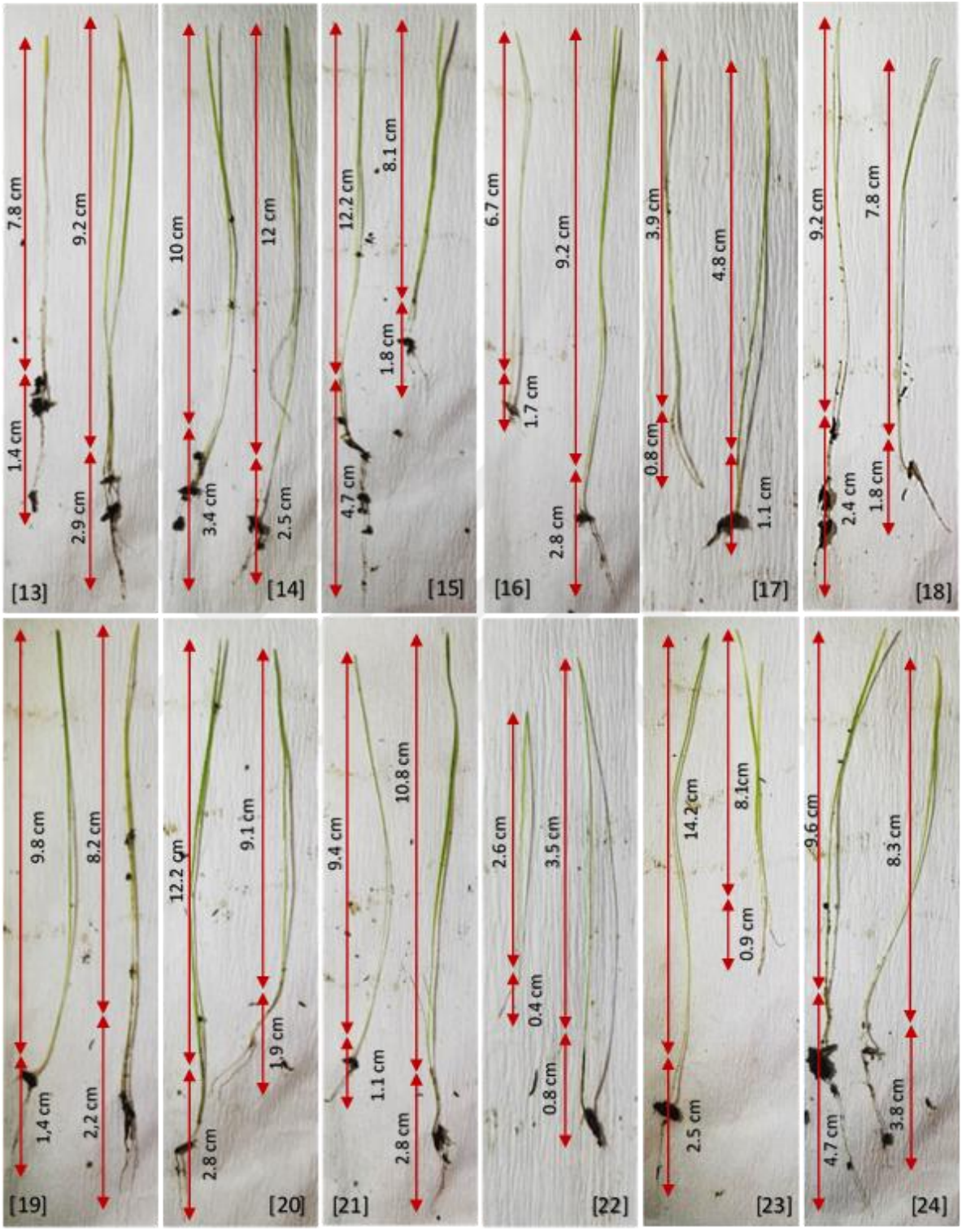
Tablo 4.16: Çim örneklerinin kök ve çim boyu uzunlukları.

Örnek Num.	Örnek Açıklaması	Çim Boyu, cm			Kök Boyu, cm		
		1	2	Ortalama Değer	1	2	Ortalama Değer
1	Çeşme Suyu pH: 5.50	9.0	7.5	8.25	5.0	6.0	5.50
2	Çeşme Suyu pH: 6.50	8.5	7.0	7.75	4.5	3.0	3.75
3	Çeşme Suyu pH: 7.50	8.0	9.5	8.75	4.0	5.0	4.50
4	Çeşme Suyu pH: 8.50	9.5	9.2	9.35	5.5	4.0	4.75
5	Çeşme Suyu pH: 9.50	10.0	9.4	9.7	6.3	7.5	6.90
6	AnOMBR SÇÇ. $CaCl_2$ ×11	14.0	10.0	12.0	5.5	4.0	4.75
7	AnOMBR SÇÇ. $CaCl_2$ ×5	10.0	9.0	9.5	6.0	5.0	5.50
8	AnOMBR SÇÇ. $CaCl_2$ ×11 + 1A iz element	7.4	5.3	6.35	3.0	4.2	3.60
9	AnOMBR SÇÇ. $CaCl_2$ ×11 + 2A iz element	8.3	3.5	5.9	2.0	1.3	1.65
10	AnOMBR SÇÇ. $CaCl_2$ ×11 + 3A iz element	11.4	9.5	10.45	6.3	3.8	5.05
11	AnOMBR SÇÇ. $CaCl_2$ ×11 + 1A sıvı gübre	10.2	9.7	9.95	3.2	2.8	3.00
12	AnOMBR SÇÇ. $CaCl_2$ ×11 + 2A sıvı gübre	11.3	8.2	9.75	3.1	1.7	2.40
13	AnOMBR SÇÇ. $CaCl_2$ ×11 + 3A sıvı gübre	9.2	7.8	8.5	2.9	1.4	2.15
14	AnOMBR SÇÇ. HCOONa ×11	10.0	12.0	11.0	3.4	2.5	2.95
15	AnOMBR SÇÇ. HCOONa ×5	12.2	8.1	10.15	4.7	1.8	3.25
16	AnOMBR SÇÇ. HCOONa ×11 + 1A iz element	9.2	6.7	7.95	2.8	1.4	2.10
17	AnOMBR SÇÇ. HCOONa ×11 + 2A iz element	4.8	3.9	4.35	1.1	0.8	0.95
18	AnOMBR SÇÇ. HCOONa ×11 + 3A iz element	9.2	7.8	8.5	2.4	1.8	2.10
19	AnOMBR SÇÇ. HCOONa ×11 + 1A sıvı gübre	9.8	8.2	9.0	1.4	2.2	1.80
20	AnOMBR SÇÇ. HCOONa ×11 + 2A sıvı gübre	12.2	9.1	10.65	2.8	1.9	2.35
21	AnOMBR SÇÇ. HCOONa ×11 + 3A sıvı gübre	10.8	9.4	10.1	2.8	1.1	1.95
22	1A - Ticari Gübre 11.40.07	3.5	2.6	3.05	0.8	0.4	0.60
23	2A - Ticari Gübre 11.05.40	14.2	8.1	11.15	2.5	0.9	1.70
24	3A - Ticari Gübre 25.0.0	9.6	8.3	8.95	4.7	3.8	4.25

Her bir hazneden alınan çim örneklerine ait görüntüler Şekil 4.46 ve 4.47'de verilmiştir.



Şekil 4.46: Çimlerin ve köklerin boy uzunlukları (1–12).



Şekil 4.47: Çimlerin ve köklerin boy uzunlukları (13–24).

Her bir çim örneği uzunluk ölçümleri esnasında net boy uzunluklarını belirlemek amacıyla çim taneleri gerdirilerek ölçülmüştür. En uzun çim boyu (12 cm) 6 numaralı numunede elde edilmiştir. En yüksek kök boyu (6.9 cm) 5 numaralı numunede elde edilmiştir.

Hem kök (0.6 cm) hemde çim boyu (3.05) olarak en düşük uzunluğu 22 numaralı numunede elde edilmiştir. Tüm haznelerdeki ortalama çim boyu uzunluğunun 8.79 cm olduğu belirlenmiştir. HCOONa–SÇÇ çıkışına ait 11 kat ve 5 kat seyreltilmiş (14 ve 15 numaralı) numunelerde sırasıyla 11.00 cm ve 10.15 cm çim boyu elde edilmiştir. $CaCl_2$–SÇÇ çıkışına ait 11 kat ve 5 kat seyreltilmiş (6 ve 7 numaralı) numunelerde sırasıyla 12.0 cm ve 9.5 cm çim boyu elde edilmiştir. Tüm AnOMBR SÇÇ çıkışlarının sıvı gübre olarak kullanılması durumunda diğer sıvı gübre çeşitleri ile yapılan kıyaslamada ortalamanın üzerinde bir çim boyu elde edebileceği belirlenmiştir. Tüm haznelerdeki ortalama kök boyu uzunluğunun 3.22 cm olduğu belirlenmiştir. HCOONa–SÇÇ çıkışına ait 11 kat ve 5 kat seyreltilmiş (14 ve 15 numaralı) numunelerde sırasıyla 2.95 cm ve 3.25 cm kök boyu elde edilmiştir. $CaCl_2$–SÇÇ çıkışına ait 11 kat ve 5 kat seyreltilmiş (6 ve 7 numaralı) numunelerde sırasıyla 4.75 cm ve 5.5 cm kök boyu elde edilmiştir. $CaCl_2$–SÇÇ çıkışına ait 11 kat ve 5 kat seyreltilmiş (6 ve 7 numaralı) numunelerde ise tüm numunelerin kök boyu ortalamasına (3.22 cm) kıyasla daha yüksek kök boyu elde edildiği belirlenmiştir.

4.5.4. Çimlerin Kuru ve Yaş Ağırlıkları

Tablo 4.17'de çim numunelerinin yaş ve kuru kök ağırlıkları verilmiştir. Çimlerin yaş ve kuru kök ağırlıkları ile bitki su tutma miktarı hesaplanmıştır. Her bir örnekte yapılan ölçümlere göre ortalama bitki su tuma oranının %74.69 olduğu belirlenmiştir. En yüksek bitki su tutma oranı %96.30 ile 11 kat seyreltilmiş HCOONa–SÇÇ çıkışının azot içerikli iz element karışımlı (18 numaralı) numunede elde edilmiştir. En düşük bitki su tutma oranı (%52.93) pH: 5.5'e ayarlanmış çeşme suyu (1 numaralı) numunesinde elde edilmiştir.

Ticari gübrelerin ham kullanıldığı fosfor içerikli (22), potasyum içerikli (23) ve azot içerikli (24) numaralı numunelerde bitki su tutma oranı sırasıyla %67.31, %82.79 ve %81.64 olarak belirlenmiştir. HCOONa–SÇÇ çıkışına ait 11 kat ve 5 kat seyreltilmiş (14 ve 15 numaralı) numunelerde bitki su tutma oranı sırasıyla %75.0 ve %62.46 olarak hesaplanmıştır. $CaCl_2$–SÇÇ çıkışına ait 11 kat ve 5 kat seyreltilmiş (6 ve 7 numaralı) numunelerde ise sırasıyla %67.24 ve %68.81 bitki su tutma oranı bulunmuştur.

Tablo 4.17: Çimlerin yaş ve kuru kök ağırlıkları.

Örnek Num.	Örnek Açıklaması	Kuru Kök Ağırlığı			Yaş Kök Ağırlığı			Bitki Su Tutma Oranı, %
		1	2	Ortalama Değer	1	2	Ortalama Değer	
1	Çeşme Suyu pH: 5.50	0.0719	0.0324	0.0521	0.1579	0.0637	0.1108	52.93
2	Çeşme Suyu pH: 6.50	0.0011	0.0195	0.0103	0.079	0.0662	0.0726	85.81
3	Çeşme Suyu pH: 7.50	0.0253	0.0403	0.0328	0.0989	0.0518	0.07535	56.47
4	Çeşme Suyu pH: 8.50	0.0058	0.0123	0.0090	0.0404	0.0241	0.03225	71.94
5	Çeşme Suyu pH: 9.50	0.0069	0.0048	0.0058	0.0296	0.0187	0.02415	75.78
6	AnOMBR SÇÇ. $CaCl_2$ ×11	0.0226	0.0153	0.0189	0.056	0.0597	0.05785	67.24
7	AnOMBR SÇÇ. $CaCl_2$ ×5	0.0226	0.0143	0.0184	0.0659	0.0524	0.05915	68.81
8	AnOMBR SÇÇ. $CaCl_2$ ×11 + 1A iz element	0.0014	0.0041	0.0027	0.0113	0.0217	0.0165	83.33
9	AnOMBR SÇÇ. $CaCl_2$ ×11 + 2A iz element	0.0182	0.0089	0.0135	0.0426	0.0273	0.03495	61.23
10	AnOMBR SÇÇ. $CaCl_2$ ×11 + 3A iz element	0.0062	0.0046	0.0054	0.0171	0.0223	0.0197	72.59
11	AnOMBR SÇÇ. $CaCl_2$ ×11 + 1A sıvı gübre	0.0029	0.0038	0.0033	0.0166	0.0161	0.01635	79.51
12	AnOMBR SÇÇ. $CaCl_2$ ×11 + 2A sıvı gübre	0.0108	0.0031	0.0069	0.0195	0.0305	0.025	72.20
13	AnOMBR SÇÇ. $CaCl_2$ ×11 + 3A sıvı gübre	0.0049	0.0173	0.0111	0.0273	0.0322	0.02975	62.69
14	AnOMBR SÇÇ. HCOONa ×11	0.0062	0.0044	0.0053	0.022	0.0204	0.0212	75.00
15	AnOMBR SÇÇ. HCOONa ×5	0.0034	0.0097	0.0065	0.0115	0.0234	0.01745	62.46
16	AnOMBR SÇÇ. HCOONa ×11 + 1A iz element	0.0018	0.0028	0.0023	0.0089	0.0100	0.00945	75.66
17	AnOMBR SÇÇ. HCOONa ×11 + 2A iz element	0.0032	0.0021	0.0026	0.0104	0.0960	0.0532	95.02
18	AnOMBR SÇÇ. HCOONa ×11 + 3A iz element	0.0017	0.0021	0.0019	0.0128	0.0900	0.0514	96.30
19	AnOMBR SÇÇ. HCOONa ×11 + 1A sıvı gübre	0.0037	0.0127	0.0082	0.0496	0.0444	0.0470	82.55
20	AnOMBR SÇÇ. HCOONa ×11 + 2A sıvı gübre	0.0041	0.0007	0.0024	0.0132	0.0092	0.0112	78.57
21	AnOMBR SÇÇ. HCOONa ×11 + 3A sıvı gübre	0.0006	0.0031	0.0018	0.0142	0.0100	0.0121	84.71
22	1A - Ticari Gübre 11.40.07	0.0009	0.0008	0.0008	0.003	0.0022	0.0026	67.31
23	2A - Ticari Gübre 11.05.40	0.0056	0.0065	0.0060	0.0361	0.0342	0.03515	82.79
24	3A - Ticari Gübre 25.0.0	0.0073	0.0090	0.0081	0.0436	0.0452	0.0444	81.64

4.5.5. Çimlerin Yüzey Kaplama Yüzdesi

Tablo 4.18'de her bir çim kabında yer alan çim sayısı ve çim kaplama yüzdesi verilmiştir. Tüm çim kaplarının ortalama kaplama yüzdesinin %43.29 olduğu belirlenmiştir. En yüksek kaplama yüzdesi 4 numaralı kapta (%74.57) ve en düşük kaplama yüzdesi (%7.71) 17 numaralı kapta elde edilmiştir. Ticari gübrelerin ham kullanıldığı fosfor içerikli (22), potasyum içerikli (23) ve azot içerikli (24) numaralı kaplarda sırasıyla %17.14, %36.86 ve %54.86 kaplama yüzdesi elde edilmiştir. HCOONa–SÇÇ çıkışına ait 11 kat ve 5 kat seyreltilmiş (14 ve 15 numaralı) kaplarda kaplama yüzdeleri sırasıyla %60.86 ve %45.43 olarak belirlenmiştir. $CaCl_2$–SÇÇ çıkışına ait 11 kat ve 5 kat seyreltilmiş (6 ve 7 numaralı) kaplarda kaplama yüzdeleri sırasıyla %52.29 ve %51.43 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 4.18: Çim örneklerinin çim alanı kaplama yüzdeleri.

Örnek Num.	Örnek Açıklaması	1	2	Parsel Ortalaması	Parsel Toplamı	Kaplama, %
1	Çeşme Suyu pH: 5.50	28	21	24.50	147.00	42.00
2	Çeşme Suyu pH: 6.50	19	24	21.50	129.00	36.86
3	Çeşme Suyu pH: 7.50	34	32	33.00	198.00	56.57
4	Çeşme Suyu pH: 8.50	46	41	43.50	261.00	74.57
5	Çeşme Suyu pH: 9.50	48	34	41.00	246.00	70.29
6	AnOMBR SÇÇ. $CaCl_2$ ×11	34	27	30.50	183.00	52.29
7	AnOMBR SÇÇ. $CaCl_2$ ×5	28	32	30.00	180.00	51.43
8	AnOMBR SÇÇ. $CaCl_2$ ×11 + 1A iz element	4	8	6.00	36.00	10.29
9	AnOMBR SÇÇ. $CaCl_2$ ×11 + 2A iz element	15	12	13.50	81.00	23.14
10	AnOMBR SÇÇ. $CaCl_2$ ×11 + 3A iz element	37	42	39.50	237.00	67.71
11	AnOMBR SÇÇ. $CaCl_2$ ×11 + 1A sıvı gübre	29	33	31.00	186.00	53.14
12	AnOMBR SÇÇ. $CaCl_2$ ×11 + 2A sıvı gübre	28	34	31.00	186.00	53.14
13	AnOMBR SÇÇ. $CaCl_2$ ×11 + 3A sıvı gübre	22	29	25.50	153.00	43.71
14	AnOMBR SÇÇ. HCOONa ×11	33	38	35.50	213.00	60.86
15	AnOMBR SÇÇ. HCOONa ×5	24	29	26.50	159.00	45.43
16	AnOMBR SÇÇ. HCOONa ×11 + 1A iz element	4	8	6.00	36.00	10.29
17	AnOMBR SÇÇ. HCOONa ×11 + 2A iz element	6	3	4.50	27.00	7.71
18	AnOMBR SÇÇ. HCOONa ×11 + 3A iz element	32	24	28.00	168.00	48.00
19	AnOMBR SÇÇ. HCOONa ×11 + 1A sıvı gübre	26	22	24.00	144.00	41.14
20	AnOMBR SÇÇ. HCOONa ×11 + 2A sıvı gübre	22	18	20.00	120.00	34.29
21	AnOMBR SÇÇ. HCOONa ×11 + 3A sıvı gübre	29	26	27.50	165.00	47.14
22	1A - Ticari Gübre 11.40.07	8	12	10.00	60.00	17.14
23	2A - Ticari Gübre 11.05.40	19	24	21.50	129.00	36.86
24	3A - Ticari Gübre 25.0.0	35	29	32.00	192.00	54.86

4.5.6. Çim Örneklerinin Renk Değişimi

Tablo 4.19'da çim numunelerinin renk skalasında okunan değerleri verilmiştir. Renk skalasında değerler 0–6 aralığında değişmektedir. Çim numunelerinin ortalama renk değerinin 3.37 olduğu belirlenmiştir. En yüksek renk değeri (5.55) $CaCl_2$–SÇÇ çıkışına ait 11 kat seyreltilmiş (6 numaralı) çim numunesinde elde edilmiştir. En düşük renk değeri (0.75) 11 kat seyreltilmiş HCOONa–SÇÇ çıkışının azot içerikli ticari gübre karışımı (21 numaralı) çim numunesinde elde edilmiştir. Ticari gübrelerin ham kullanıldığı fosfor içerikli (22), potasyum içerikli (23) ve azot içerikli (24) numaralı çim numunelerinde renk değerleri sırasıyla 1.95, 2.03 ve 4.13 olarak belirlenmiştir. $CaCl_2$–SÇÇ çıkışına ait 11 kat ve 5 kat seyreltilmiş (6 ve 7 numaralı) çim numunelerinde renk değerleri sırasıyla 5.55 ve 5.18'dir. HCOONa–SÇÇ çıkışına ait 11 kat ve 5 kat seyreltilmiş (14 ve 15 numaralı) çim numunelerinde renk değerleri sırasıyla 3.68 ve 3.0 olarak belirlenmiştir. pH 6.5'te hazırlanan çeşme suyun numunesinin (2) 2.48 renk değeri ile çeşme suyu numuneleri arasında en düşük renk değerine sahip örnek olduğu belirlenmiştir.

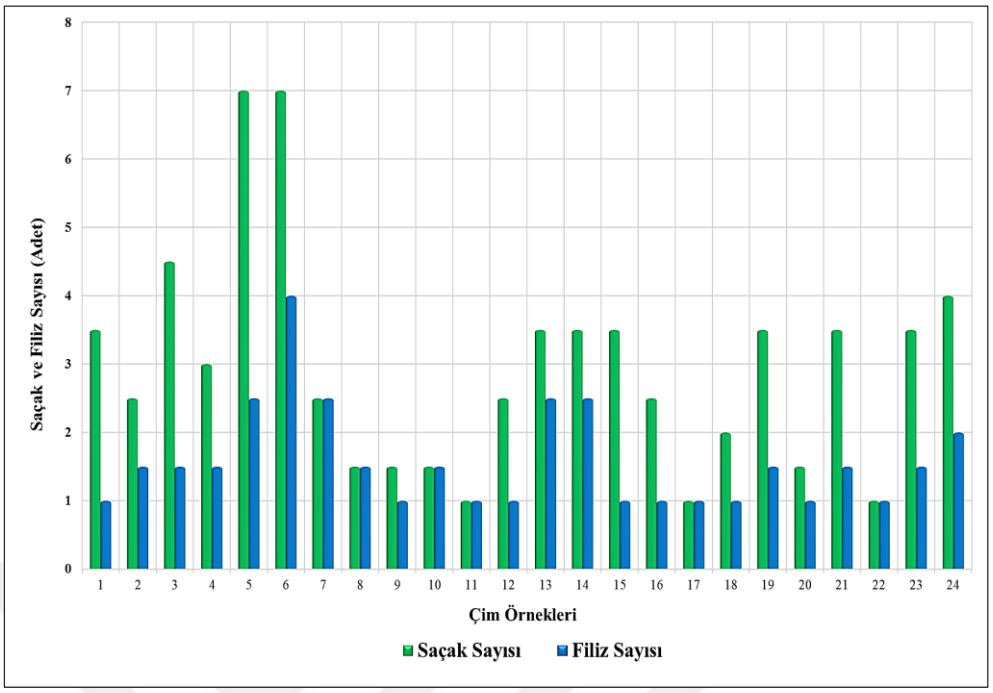
Diğer çeşme suyu numunelerinin (1, 3, 4 ve 5) renk değerleri 4.28–5.33 aralığında değişim göstermiştir.

Tablo 4.19: Çim örneklerinin renk değerleri.

Örnek Num.	Örnek Açıklaması	Çim Rengi		
		1	2	Ortalama Değer
1	Çeşme Suyu pH: 5.50	4.2	4.35	4,28
2	Çeşme Suyu pH: 6.50	2.25	2.7	2,48
3	Çeşme Suyu pH: 7.50	4.8	5.1	4,95
4	Çeşme Suyu pH: 8.50	5.25	5.4	5,33
5	Çeşme Suyu pH: 9.50	5.1	4.8	4,95
6	AnOMBR SÇÇ. $CaCl_2$ ×11	5.4	5.7	5,55
7	AnOMBR SÇÇ. $CaCl_2$ ×5	5.1	5.25	5,18
8	AnOMBR SÇÇ. $CaCl_2$ ×11 + 1A iz element	1.2	2.25	1,73
9	AnOMBR SÇÇ. $CaCl_2$ ×11 + 2A iz element	2.1	2.25	2,18
10	AnOMBR SÇÇ. $CaCl_2$ ×11 + 3A iz element	4.5	4.2	4,35
11	AnOMBR SÇÇ. $CaCl_2$ ×11 + 1A sıvı gübre	4.35	4.5	4,43
12	AnOMBR SÇÇ. $CaCl_2$ ×11 + 2A sıvı gübre	3.75	4.5	4,13
13	AnOMBR SÇÇ. $CaCl_2$ ×11 + 3A sıvı gübre	2.1	2.7	2,40
14	AnOMBR SÇÇ. HCOONa ×11	4.8	2.55	3,68
15	AnOMBR SÇÇ. HCOONa ×5	3.3	2.7	3,00
16	AnOMBR SÇÇ. HCOONa ×11 + 1A iz element	3.3	4.2	3,75
17	AnOMBR SÇÇ. HCOONa ×11 + 2A iz element	0.75	1.2	0,98
18	AnOMBR SÇÇ. HCOONa ×11 + 3A iz element	1.2	1.8	1,50
19	AnOMBR SÇÇ. HCOONa ×11 + 1A sıvı gübre	3.15	3.9	3,53
20	AnOMBR SÇÇ. HCOONa ×11 + 2A sıvı gübre	3.45	3.9	3,68
21	AnOMBR SÇÇ. HCOONa ×11 + 3A sıvı gübre	0.6	0.9	0,75
22	1A - Ticari Gübre 11.40.07	1.8	2.1	1,95
23	2A - Ticari Gübre 11.05.40	1.8	2.25	2,03
24	3A - Ticari Gübre 25.0.0	3.9	4.35	4,13

4.5.7. Çim Örneklerinin Filiz ve Saçak Miktarları

Şekil 4.48'de çim numunelerinin filiz ve saçak sayısı verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre en çok kök saçağı (7 adet saçak/kök) çeşme suyu–pH: 9.5 (5 numaralı) numunesinde elde edilmiştir. En çok filiz (4 adet filiz/çim) HCOONa–SÇÇ çıkışına ait 11 kat seyreltilmiş (14 numaralı) numunede elde edilmiştir. Çim başına elde edilen filiz sayısının ortalama 1.58 olduğu belirlenmiştir. 1, 6, 7, 11, 12, 15, 16, 17, 18, 20 ve 22 numaralı numunelerde ortalama filiz sayısının 1 olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.48: Çim örneklerinin saçak ve filiz sayıları.

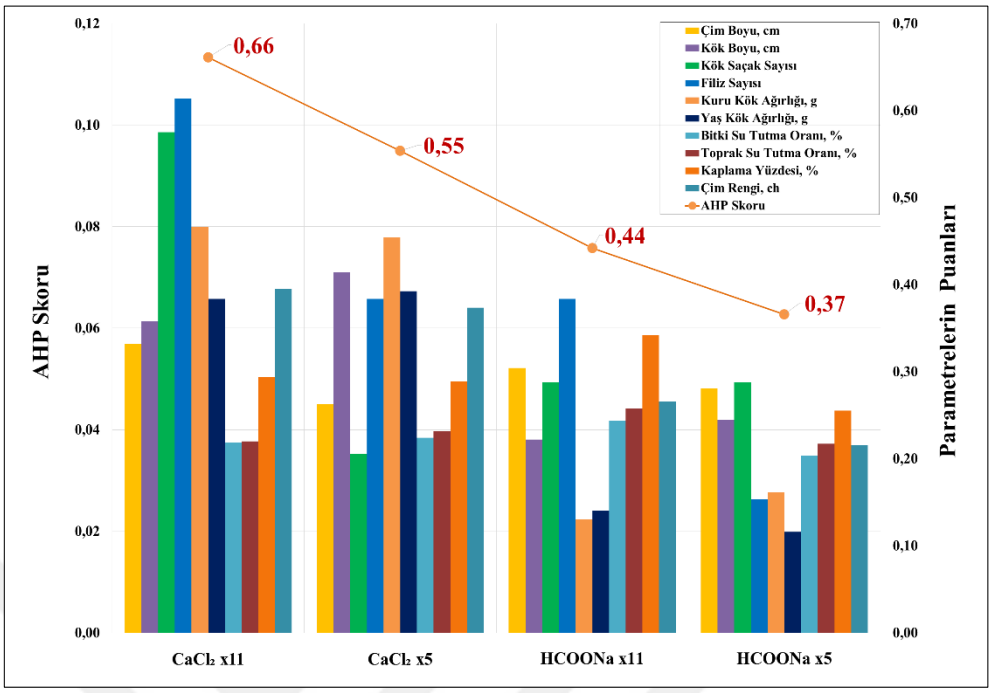
4.5.8. Sıvı Gübre Uygulaması Sonuçlarının AHP Analizi ile Değerlendirilmesi

Sıvı gübre uygulamasında elde edilen sonuçlara göre en iyi ürünün belirlenmesinde AHP analizi kullanılmıştır. Bu kapsamda 'Malzeme ve Yöntem' başlığı altında belirlenen önem seviyeleri Tablo 3.22'de, ağırlık katsayılarının matris üzerindeki korelasyonları Tablo 3.23'te, hesaplamalarda kullanılan normalize edilmiş katsayılarıları Tablo 3.24'te ve öz vektörleri Tablo 3.25'te yer almaktadır. AHP analizi değerlendirmesi yapılırken ilk adımda, AnOMBR SÇÇ çıkışlarının (HCOONa ve $CaCl_2$) 5 ve 11 kat seyreltilerek kullanıldığı sıvı gübre uygulaması sonuçları kendi aralarında kıyaslanmıştır.

İkinci adımda ise tüm sıvı gübre numunelerinden elde edilen çim boyu, kök boyu, çim yaş ağırlığı, çim kuru ağırlığı, kök saçak sayısı, filiz sayısı, kaplama yüzdesi, bitki su tutma oranı, toprak su tutma oranı ve çim rengi parametreleri AHP analizi ile değerlendirilmiştir.

4.5.8.1. AnOMBR SÇÇ çıkışlarının kıyaslanması

Çim uygulamasında 2 farklı işletim sürecinden elde edilen AnOMBR SÇÇ çıkışları (HCOONa ve $CaCl_2$) 5 kat ve 11 kat seyreltilerek sıvı gübre olarak kullanılmıştır. Şekil 4.49'da AnOMBR SÇÇ çıkışları ile beslenen çimlerin AHP skorları verilmiştir.

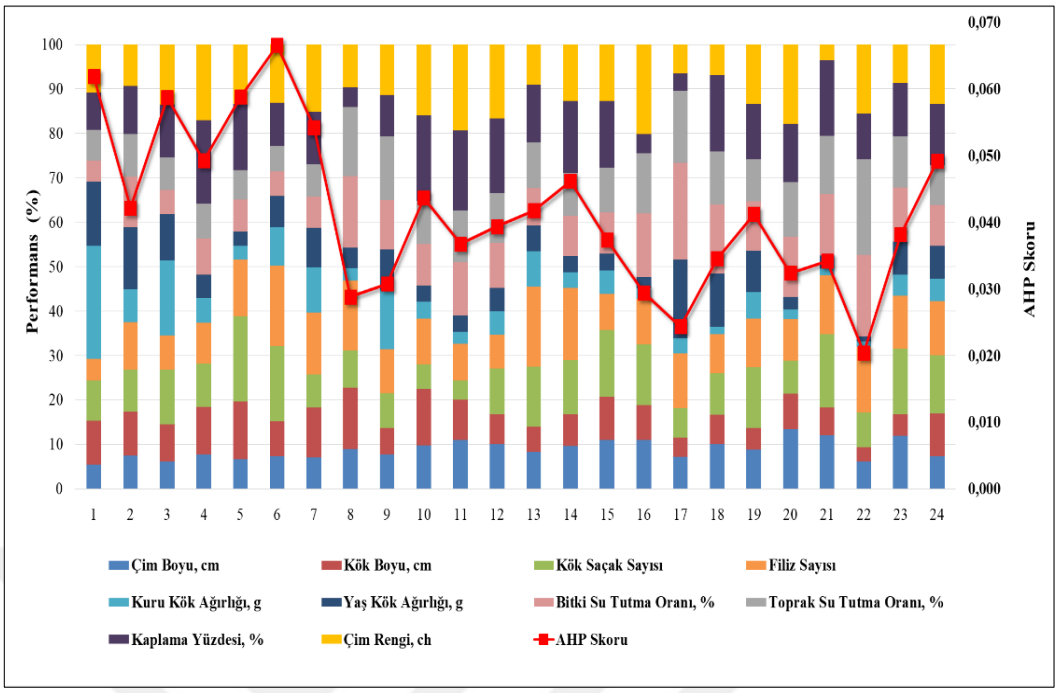


Şekil 4.49: SÇÇ çıkışlarının sıvı gübre olarak kullanımının kıyaslanması.

Elde edilen sonuçlara göre 11 kat seyreltilmiş AnOMBR $CaCl_2$–SÇÇ numunesinin (6) 0.66 AHP skoru ile SÇÇ numuneleri arasında en iyi ürün olduğu belirlenmiştir. Diğer SÇÇ çıkışlarının AHP skorları; 5 kat seyreltilmiş $CaCl_2$–SÇÇ numunesinde (7): 0.55, 11 kat seyreltilmiş HCOONa–SÇÇ numunesinde (14): 0.44 ve 5 kat seyreltilmiş HCOONa–SÇÇ numunesinde (15): 0.37 olarak bulunmuştur.

4.5.8.2. Denemede kullanılan tüm sıvı gübrelerin kıyaslanması

Çim uygulamasında kullanılan tüm gübre türlerinin, çim yetiştirme performansını belirlemek amacıyla 2. AHP analizi yapılmıştır. Şekil 4.50'de tüm gübrelerin AHP skorları ve parametrelerin AHP skoruna katkı derecesi verilmiştir. Yapılan değerlendirme sonucuna göre 24 farklı gübre türü arasından en iyi ürünün 0.066 puan ile 11 kat seyreltilmiş AnOMBR $CaCl_2$–SÇÇ numunesi (6) olduğu belirlenmiştir. En düşük AHP skoru ise 0.020 ile azot içerikli ticari gübre (24) numunesinde elde edilmiştir.



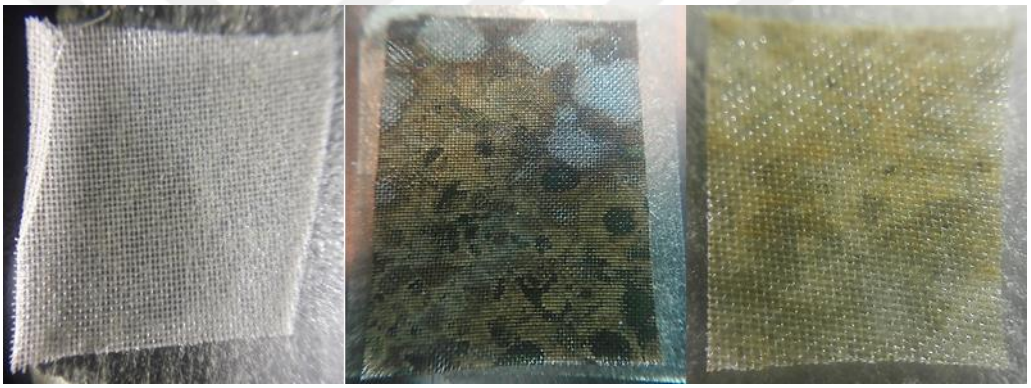
Şekil 4.50: Tüm gübre çeşitlerinin AHP skorları.

11 ve 5 kat seyreltilmiş HCOONa–SÇÇ numunelerinde (14 ve 15) AHP skorları ve sıralaması sırasıyla 0.046–8. ve 0.037–15. olarak elde edilmiştir. 11 ve 5 kat seyreltilmiş $CaCl_2$–SÇÇ numunelerinde (6 ve 7) AHP skorları ve sıralamasının sırasıyla 0.066–1. ve 0.054–5. olduğu belirlenmiştir. Sadece ticari gübrelerin ham olarak kullanıldığı azot içerikli (22), fosfor içerikli (23) ve potasyum içerikli (24) sıvı gübre numunelerinde AHP skorları sırasıyla 0.020, 0.038 ve 0.049 olarak belirlenmiştir. Potasyum içerikli gübrenin (24) çim yetiştiriciliğine daha uygun olduğu özellikle çim rengi ve kök boy uzunluğu açısından tercih edilebilir olduğu belirlenmiştir.

Farklı pH'larda hazırlanan çeşme suyu numuneleri (1, 2, 3, 4 ve 5) AHP skoru sıralamasında ilk 10'nun içerisinde yer almaktadır. Sadece 2 numaralı numunenin daha düşük performans sağladığı belirlenmiştir. Çeşme suyu numuneleri arasında en yüksek AHP skoru (0.061) pH 5.5'te hazırlanan numunede (1) belirlenmiştir. İz element ilaveli SÇÇ çıkışlarının (8, 9, 10, 16, 17 ve 18) tüm sıvı gübre türlerine göre daha düşük performans sergilediği belirlenmiştir.

4.6. MEMBRAN OTOPSİ ANALİZİ SONUÇLARI

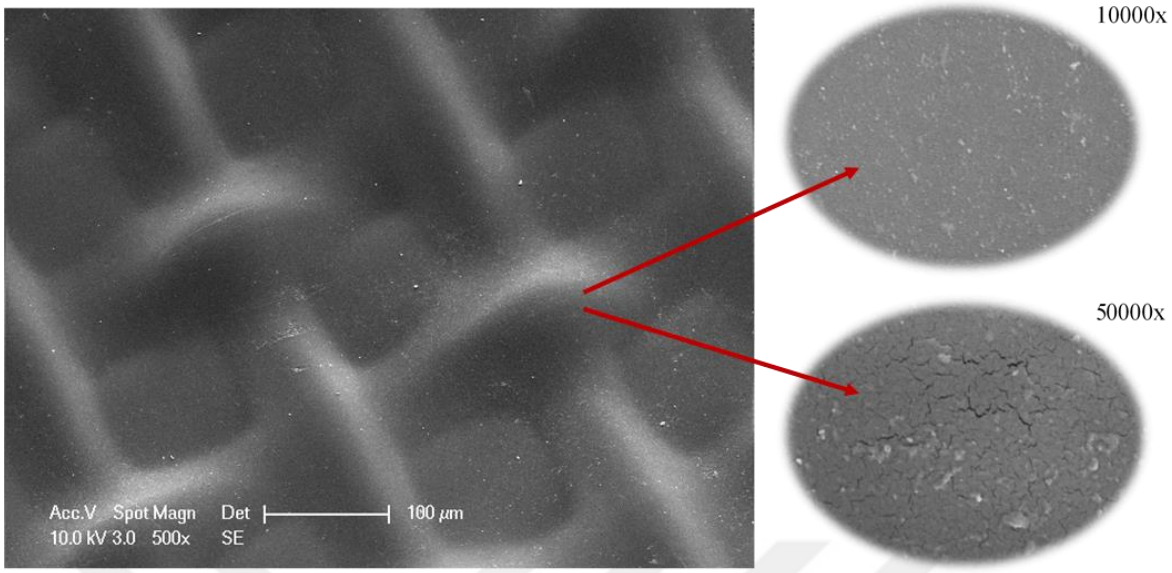
Membranlarda kirlenmenin yorumlanması amacıyla temiz ve kirli İO membranlarında otopsi çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda membranlarda, SEM–EDS ile porlardaki kirlenmeyi ve membran yüzeyinde biriken kirleticileri, Optikprofilometre ile yüzey pürüzlülüğünü, Konfokal Mikroskop Görüntüleme ile biyofilm kalınlığı ve canlı hücre aktivitesini, FT–IR ile membran yüzeyindeki kimyasal bağları, Zeta Potansiyeli ile membran yüzey yüklerini ve Temas Açısı ile membranların hidrofobik/hidrofilik özelliklerini belirlemek amacıyla ölçümler yapılmıştır. Membran yüzeyinde biriken çamurda EPS analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.51'de temiz ve kirli İO membranlarına ait görüntüler yer almaktadır.



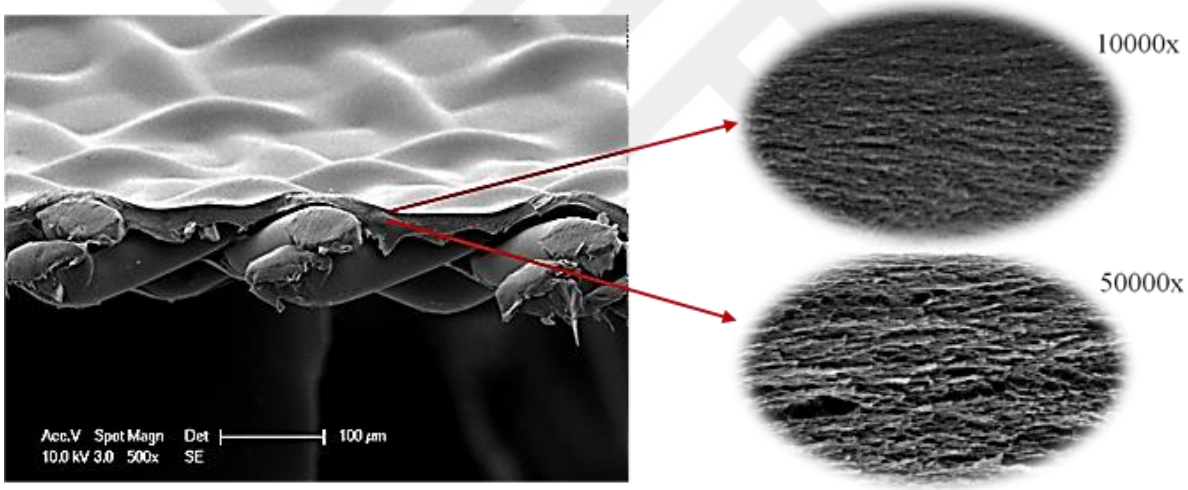
Şekil 4.51: Temiz ve kirli İO membranlarının görüntüleri.

4.6.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM-EDS) Analizi

İO membranlarının yüzeyinden 200× ile 50000× aralığında büyütme değerlerinde hem yüzeyde hem de membran kesitinde SEM görüntüleri elde edilmiştir. Temiz İO membranına ait yüzey ve kesit görüntüleri aşağıda verilmiştir (Şekil 4.52 ve 4.53). SEM görüntülerinden görüldüğü üzere temiz İO membranı sarmal yapıdadır ve herhangi bir kirlilik bulunmamaktadır.

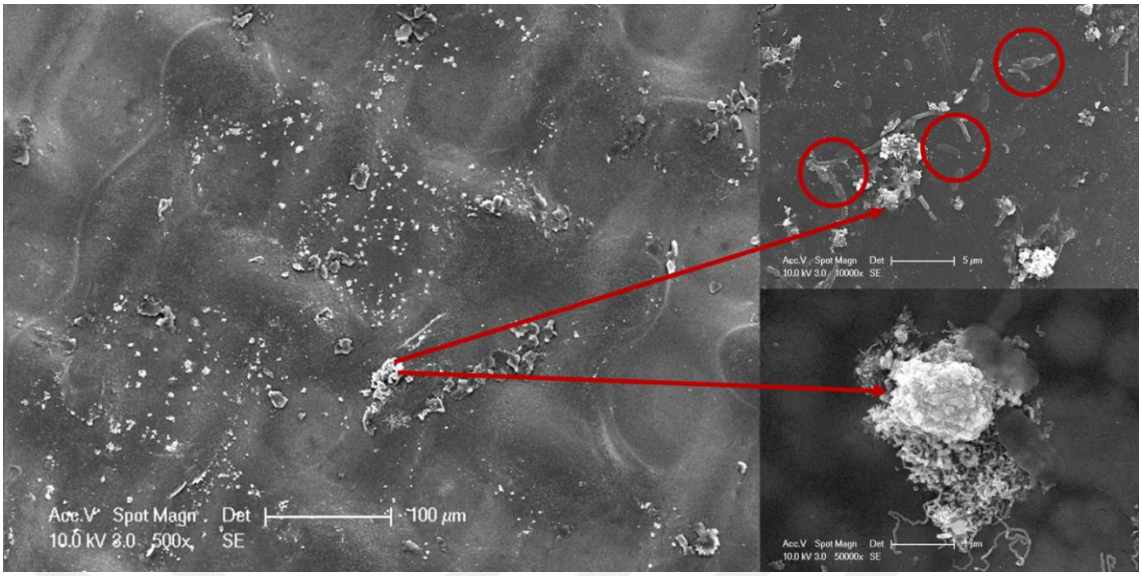


Şekil 4.52: Temiz İO membranının yüzey görüntüleri.



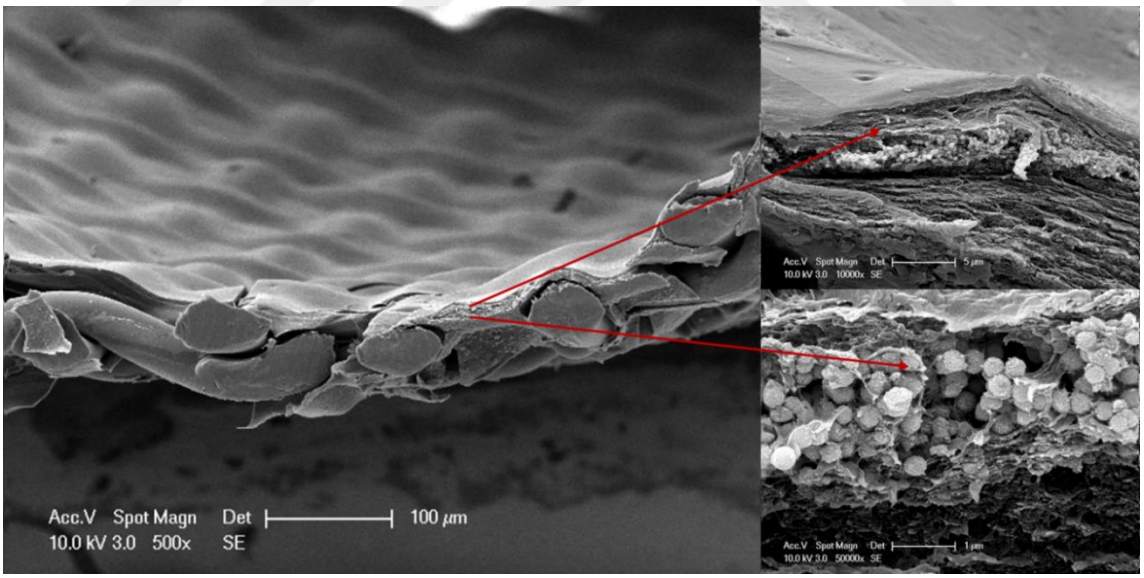
Şekil 4.53: Temiz İO membranının kesit görüntüleri.

Şekil 4.54'te AnOMBR (ÇÇ: HCOONa)'de kullanılan kirli İO membranına ait yüzey görüntüleri verilmiştir. Kirli membran yüzeyinin biyofilm tabakası ve tuz çökeltileri ile kaplandığı gözlemlenmiştir.



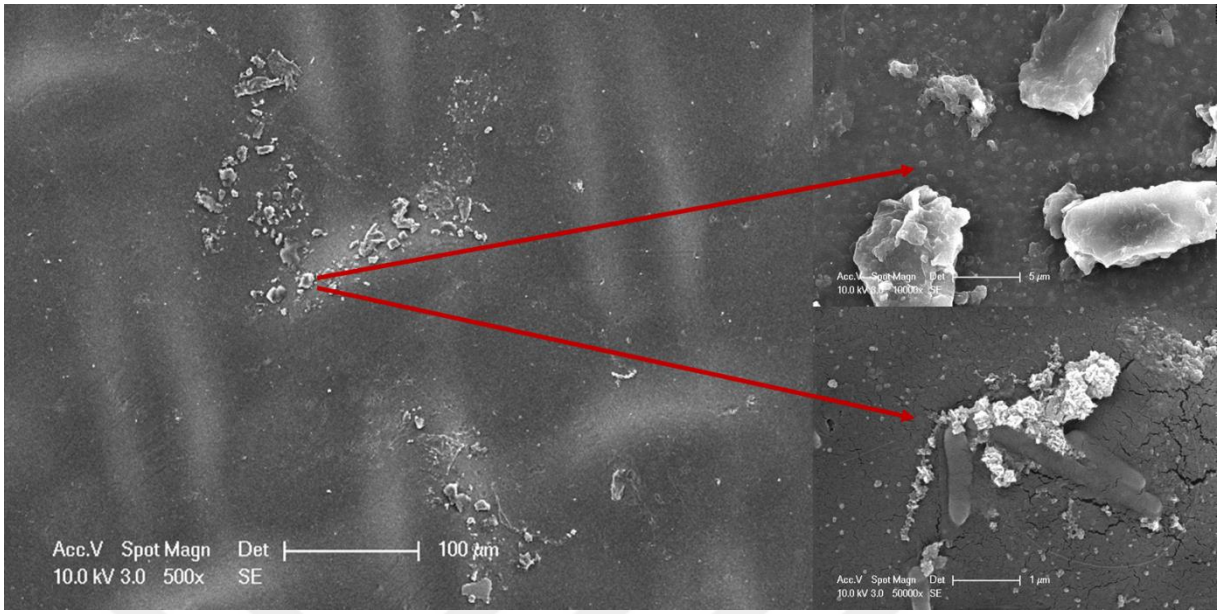
Şekil 4.54: Kirli İO membranının yüzey görüntüleri (ÇÇ: HCOONa).

Şekil 4.55'te AnOMBR (ÇÇ: HCOONa)'de kullanılan kirli İO membranına ait kesit görüntüleri verilmiştir. Kesit görüntülerine bakıldığında, biyofilm tabakasının ve bu tabakanın aralarında yuvarlak şekillerde çökeleklerin oluştuğu görülmektedir.



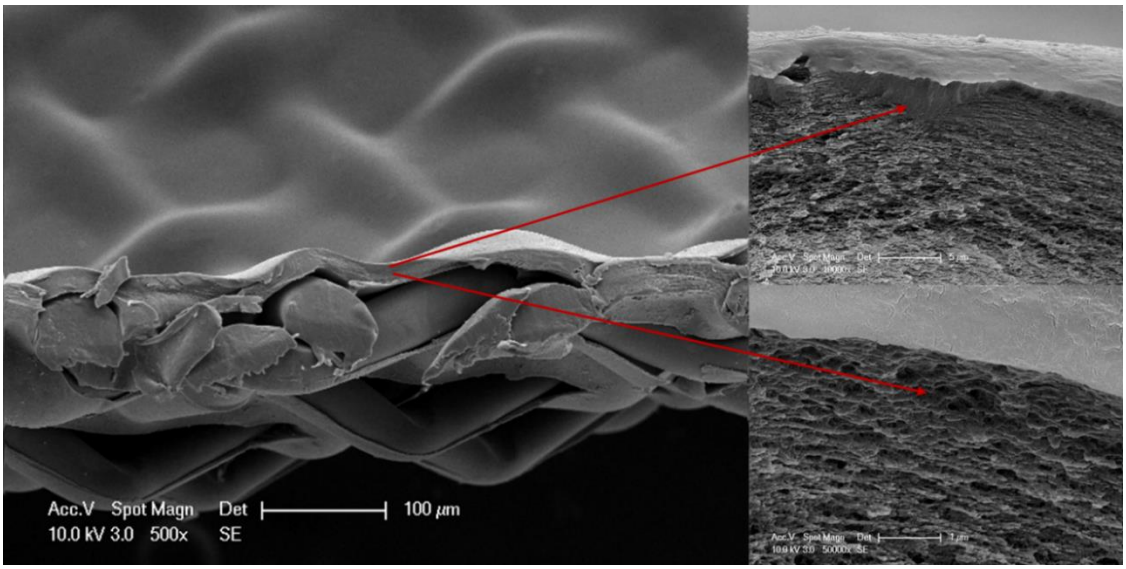
Şekil 4.55: Kirli İO membranının kesit görüntüleri (ÇÇ: HCOONa).

Şekil 4.56'da AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$)'de kullanılan kirli İO membranına ait yüzey görüntüleri verilmiştir. Kirli membranın yüzey görüntülerinden görüldüğü üzere, biyofilm tabakası ve tuz çökeltileri membran yüzeyinin belirli bir kısmını kaplamış ve membranın sarmal yapısının tamamen kaybolmadığı görülmüştür.



Şekil 4.56: Kirli İO membranının yüzey görüntüleri (ÇÇ: $CaCl_2$).

Şekil 4.57'de AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$)'de kullanılan kirli İO membrana ait kesit görüntüleri verilmiştir. AnOMBR (ÇÇ: HCOONa)'de kullanılan membranın kesit görüntülerinde rastlanılan biyofilm ve tuz çökeltilerine, AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$)'de kullanılan İO membranında rastlanmamıştır.



Şekil 4.57: Kirli İO membranının kesit görüntüleri (ÇÇ: $CaCl_2$).

SEM numunelerinin yüzeylerinde EDS analizi gerçekleştirilmiştir. Temiz ve kirli İO membranlarının EDS spektrumlarından elde edilen elementlerin ağırlıkça yüzdeleri Tablo 4.20'de yer almaktadır.

Tablo 4.20: EDS analizinden elde edilen elementlerin ağırlık yüzdeleri.

Ağırlık Yüzdesi (%)	C	N	O	Na	K	Cl	Al	P	S	Ca	Fe
Temiz İO Membranı	17.16	–	82.84	–	–	–	–	–	–	–	–
Kirli İO Membranı (ÇÇ: HCOONa)	0.74	0.11	15.71	4.51	3.60	1.34	0.53	2.37	34.67	–	36.43
Kirli İO Membranı (ÇÇ: $CaCl_2$)	0.09	0.16	20.70	0.86	7.51	2.61	0.32	4.04	8.10	30.59	25.01

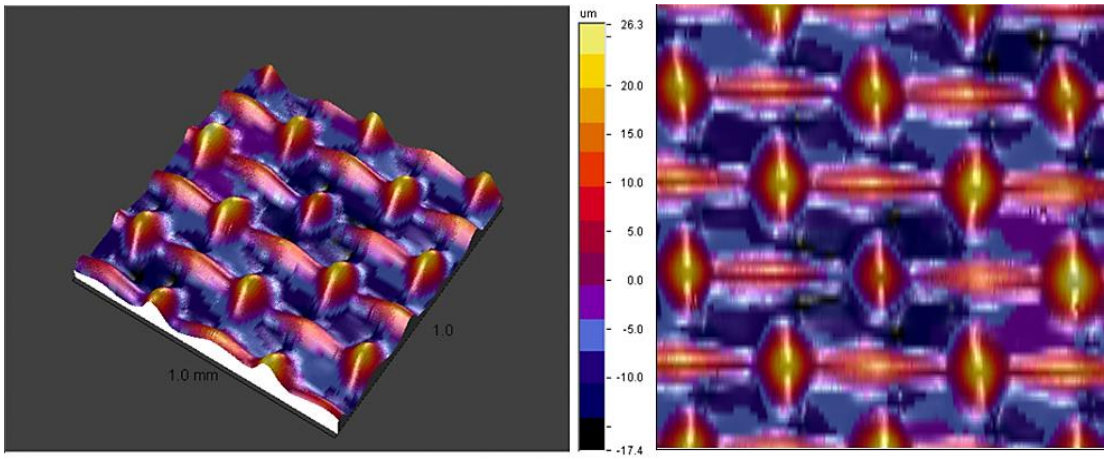
Her bir numunede taranan alan yaklaşık olarak 2.50 mm^2'dir. EDS taraması sonuçlarına göre; AnOMBR (ÇÇ: HCOONa)'de kullanılan kirli İO membranının yüzeyinin ağırlıkça demir (Fe^{2+}), kükürt (S^{-2}), oksijen (O^{-2}) ve sodyum (Na^{+}) elementlerinden oluştuğu görülmektedir. AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$)'de kullanılan kirli İO membranının EDS tarama sonuçlarında membran yüzeyinde en yüksek demir (Fe^{2+}), kalsiyum (Ca^{2+}) ve oksijen (O)'e rastlanılmıştır.

4.6.2. Optikprofilometre ile Yüzey Pürüzlülüğü Tayini

Temiz ve kirli İO membranlarına ait yüzey pürüzlülüğü sonuçları Tablo 4.21'de ve elde edilen yüzey görüntüleri Şekil 4.58, Şekil 4.59 ve Şekil 4.60'da verilmiştir. Optik profilometre ile yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde, 1x1 mm^2'lik bir membran yüzeyinde ölçüm yapılmıştır.

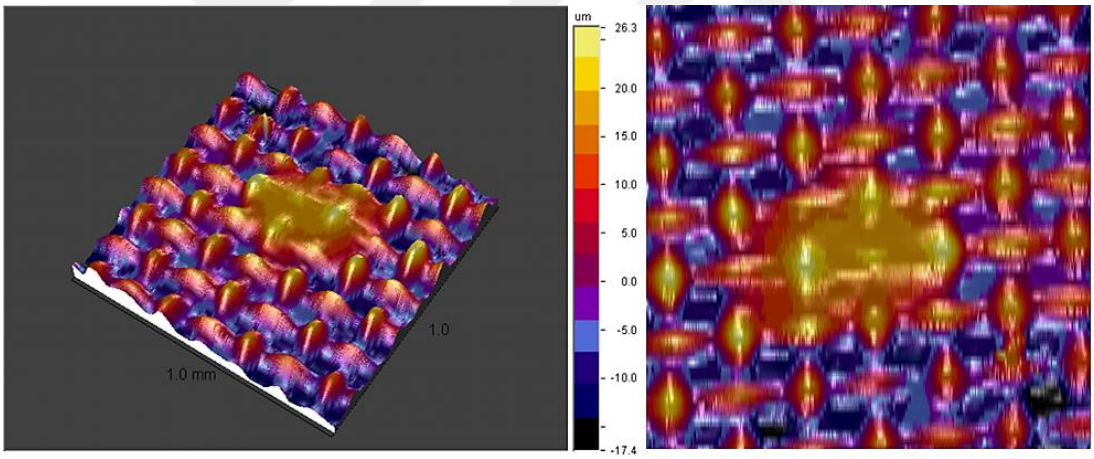
Tablo 4.21: İO membranlarının yüzey pürüzlülüğü sonuçları.

Membran	Temiz İO	Kirli İO (ÇÇ: HCOONa)	Kirli İO (ÇÇ: $CaCl_2$)
Tepe Değer (µm)	27.16	40.64	43.70
R_{rms} (µm)	5.57	7.60	7.62
R_a (µm)	4.73	6.27	6.22



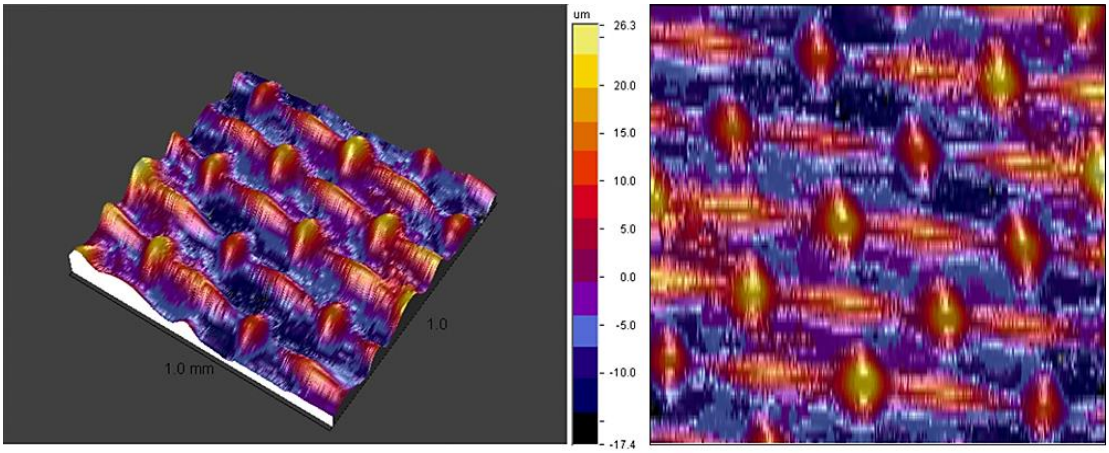
Şekil 4.58: Temiz İO membranının optikprofilometre görüntüleri.

Temiz İO membranına optikprofilometre görüntülerinde, İO membranının sarmal yapısından kaynaklı yükseltiler görülmüştür. Temiz İO membranın tepe değeri 27.16 µm ve R_{rms} değeri 5.57 µm olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.59: Kirli İO membranının optikprofilometre görüntüleri (ÇÇ: HCOONa).

Kirli İO membranına (AnOMBR–ÇÇ: HCOONa) ait optikprofilometre görüntüleri incelendiğinde, membran yüzeyinin büyük bir bölümü kirlilik tabakası ile kaplanmıştır (Şekil 4.59). Kirli İO membranının tepe değeri 40.64 µm ve R_{rms} değeri 7.60 µm olarak ölçülmüştür.

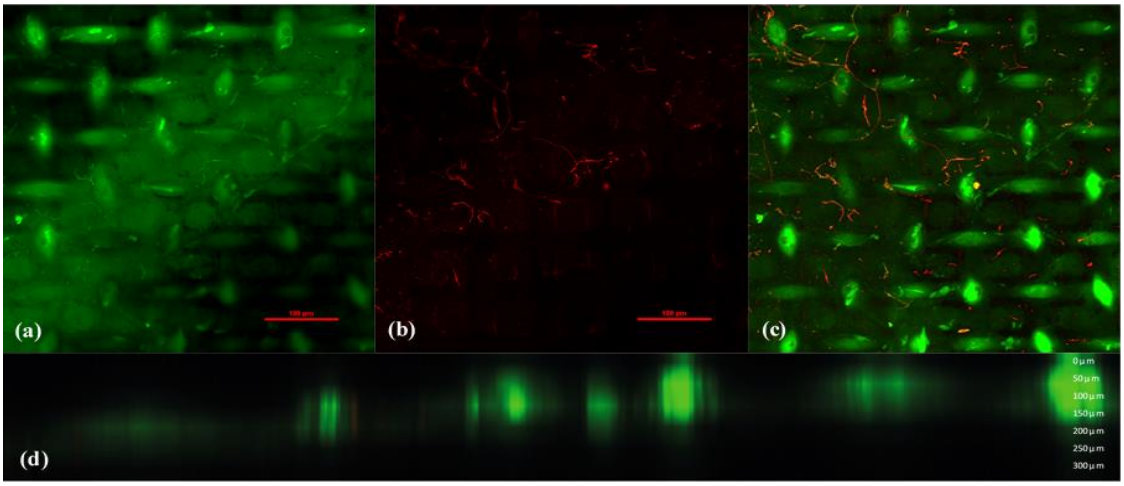


Şekil 4.60: Kirli İO membranının optikprofilometre görüntüleri (ÇÇ: $CaCl_2$).

Kirli İO membranının (AnOMBR–ÇÇ: $CaCl_2$) optikprofilometre görüntüleri incelendiğinde, İO membranının sarmal yapısının özellikle üst kısımlarında kirlilik tabakası görülmüştür (Şekil 4.60). Kirli İO membranının tepe değeri 43.70 µm ve R_{rms} değeri 7.62 µm olarak ölçülmüştür.

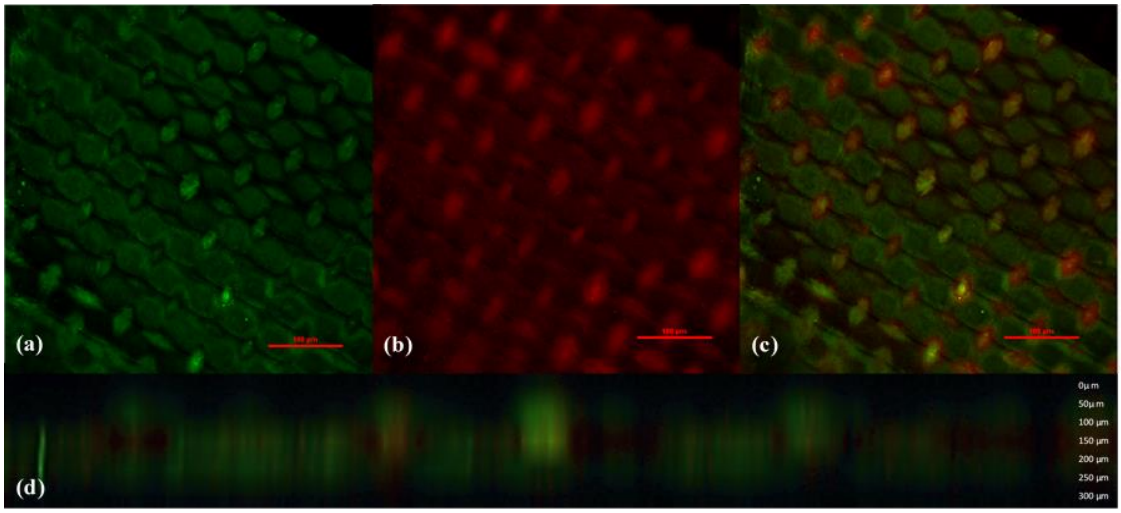
4.6.3. Konfokal Mikroskop Görüntüleme

Konfokal mikroskop ile İO membranlarının yüzeyinde oluşan biyofilmin kalınlığı belirlenmiş ve canlı hücre aktivitesi görüntülenmiştir. Elde edilen görüntüler Şekil 4.61, Şekil 4.62 ve Şekil 4.63'te verilmiştir. Şekillerde 'yeşil' renk ile kaplı bölgeler temiz İO membranını ve 'kırmızı' renk ile kaplı bölgeler ise hücre aktivitesini temsil etmektedir.



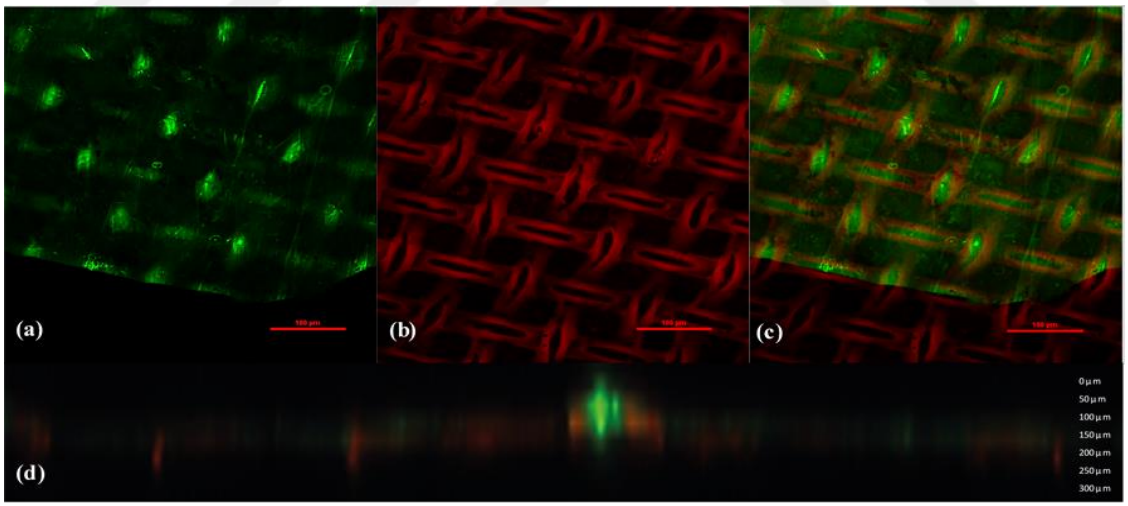
Şekil 4.61: a) Temiz İO membranının yüzeyi b) kirli yüzey c) birleşik yüzey d) yatay kesit Görüntüsü.

Şekil 4.61'de görüldüğü üzere temiz İO membranının yüzeyinin büyük bir bölümünün 'yeşil' renkte olduğu görüntülenmiştir. Temiz İO membran yüzeyinde yer yer kontaminasyon kaynaklı olarak 'kırmızı' renkte çizgiler olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.62: a) Kirli İO membranının yüzeyi b) kirli yüzey c) birleşik yüzey d) yatay kesit görüntüsü (ÇÇ: HCOONa).

Şekil 4.62'de görüldüğü üzere kirli İO membranının (AnOMBR–ÇÇ: HCOONa) yüzeyinin büyük bir kısmı 'yeşil' renkten 'kırmızı' renge dönmüştür. Kirli membran üzerindeki biyofilm tabakasının membran kesiti boyunca değişkenlik gösterdiği ve ortalama 250 µm olduğu belirlenmiştir.

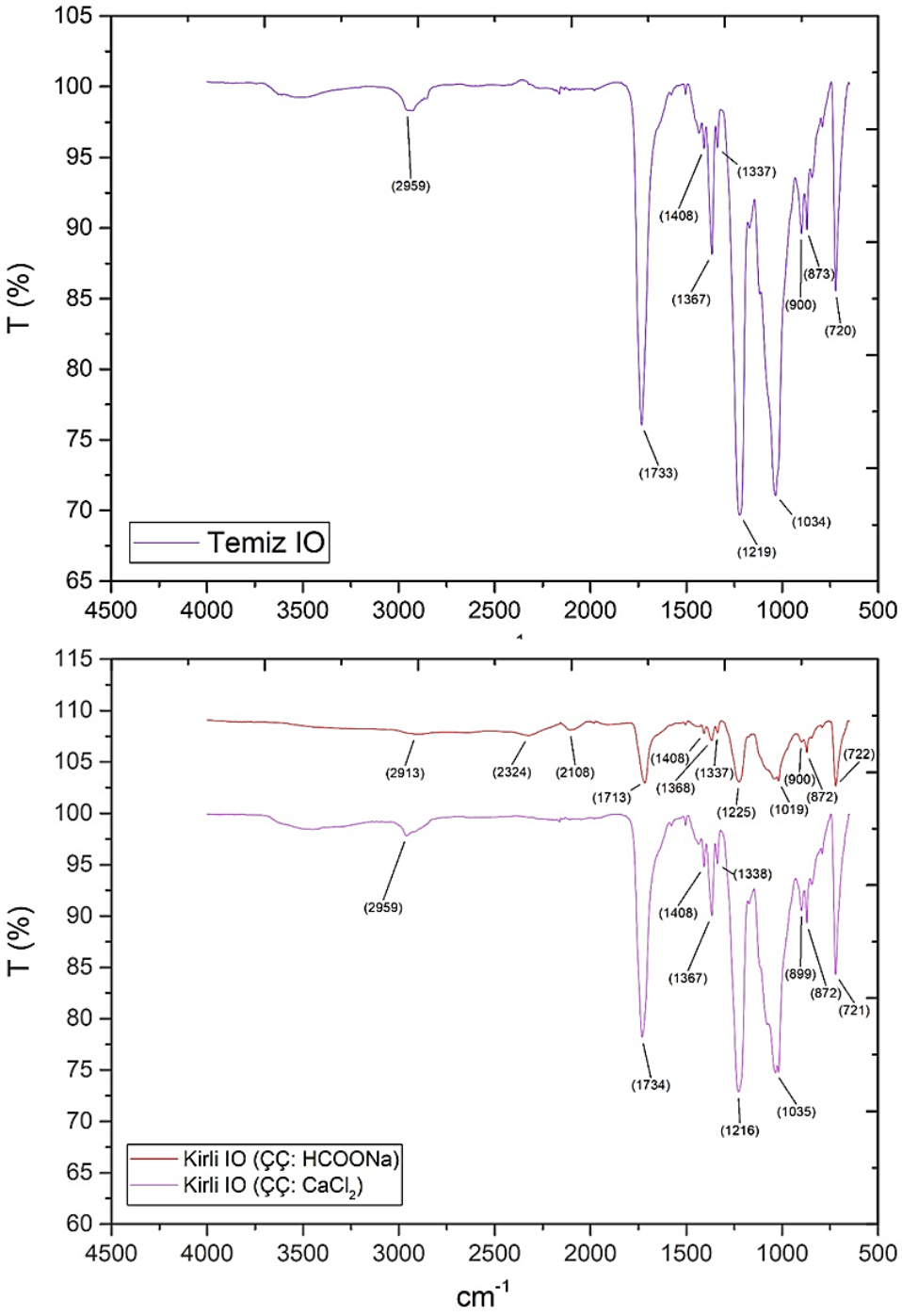


Şekil 4.63: a) Kirli İO membranının yüzeyi b) kirli yüzey c) birleşik yüzey d) yatay kesit görüntüsü (ÇÇ: $CaCl_2$).

Şekil 4.63'te görüldüğü üzere kirli İO membranının (AnOMBR–ÇÇ: $CaCl_2$) sarmal yapısı 'kırmızı' renk ile kaplanmıştır. Kirli membran üzerindeki biyofilm tabakasının membran kesiti boyunca değişkenlik gösterdiği ve ortalama 150 µm olduğu belirlenmiştir.

4.6.4. Fourier Infrared Spektroskopisi (FT–IR) Analizi

Temiz ve kirli İO membranlarına ait FT–IR spektrumları Şekil 4.64'te verilmiştir. Temiz ve kirli İO membranlarından elde edilen bantların fonksiyonel grupları Tablo 4.22'de verilmiştir.



Şekil 4.64: Temiz ve kirli İO membranlarının FT–IR spektrumları.

Tablo 4.22: Temiz ve kirli İO membranlarının FT–IR spektrumlarına ait fonksiyonel gruplar.

Temiz İO Membranı	ÇÇ: HCOONa	ÇÇ: $CaCl_2$	Aralık (Dalga Boyu, cm^{-1})	Fonksiyonel Gruplar	Kaynak Bu sütünü silersin
2959	2913	2959	2800–3000	C–CH_3, C–H gerilimi	Stuart, 2004–sf. 11
–	2324	–	2320	Kükürt (S) iyonu gerilimi	Stuart, 2004–sf. 203
–	2108	–	2100	C≡N gerilimi	Stuart, 2004–sf. 203
1733	1713	1734	1650–1800	C=O gerilimi	Stuart, 2004–sf. 203
1408	1408	1408	1400–1500	C–H bükülme bandı C–O–H bükülme bandı	Stuart, 2004–sf. 86
1367	1368	1367	1250–1360	Simetrik C–CH_3 bükülmesi	Stuart, 2004–sf. 202
1337	1337	1338	1290–1390	C–CH_3, C–H gerilimi	Stuart, 2004–sf. 114
1219	1225	1216	1100–1225	İkili C–O gerilimi (C–O–H)	Stuart, 2004–sf. 86
1034	1019	1035	950–1100	C-O eter gerilme bandı	Stuart, 2004–sf. 179
900	900	899	600–900	C–H düzlem dışı gerilimi	Stuart, 2004–sf. 198
873	872	872	873	C=CH bükülmesi	Stuart, 2004–sf. 202
720	722	721	720	Etilen CH_2 titreşimi	Stuart, 2004–sf. 72

Temiz İO membranının FT–IR spektrumundan elde edilen 1733 cm^{-1}, 1367 cm^{-1}, 1219 cm^{-1} ve 1034 cm^{-1} bantları CTA–İO membranına ait karakteristik bantlardır (Sun ve diğ., 2016). Bu bantlar CTA yapısındaki C–H, C=CH, C–CH_2, C–CH_3, C=O, C–O ve C–O–H bağlarına aittir (Tablo 4.20). 3000–2900 cm^{-1} bölgesindeki (2959 cm^{-1}) C–H gerilim bandı, 1500–1300 cm^{-1} bölgesindeki C–H eğilme bantları (1337 cm^{-1} ve 1367 cm^{-1}) ve 1034 cm^{-1} deki C–O eter gerilme bandı membranın yapısındaki selülozdan kaynaklanan bantlardır (Stuart, 2004). Membranın yapısındaki asetata ait yapılar ise 1700 cm^{-1} civarında (1733 cm^{-1}) C=O gerilim bandı ve karboksilik asit karaktersitik bandı olan 1219 cm^{-1} deki C–O gerilimidir. Temiz İO membranı spektrumundaki 900 cm^{-1}, 873 cm^{-1} ve 720 cm^{-1} bantları ise sırasıyla C–H düzlem dışı bükülme gerilimine, C=CH bükülmesine ve CH_2 titreşimine karşılık gelmektedir.

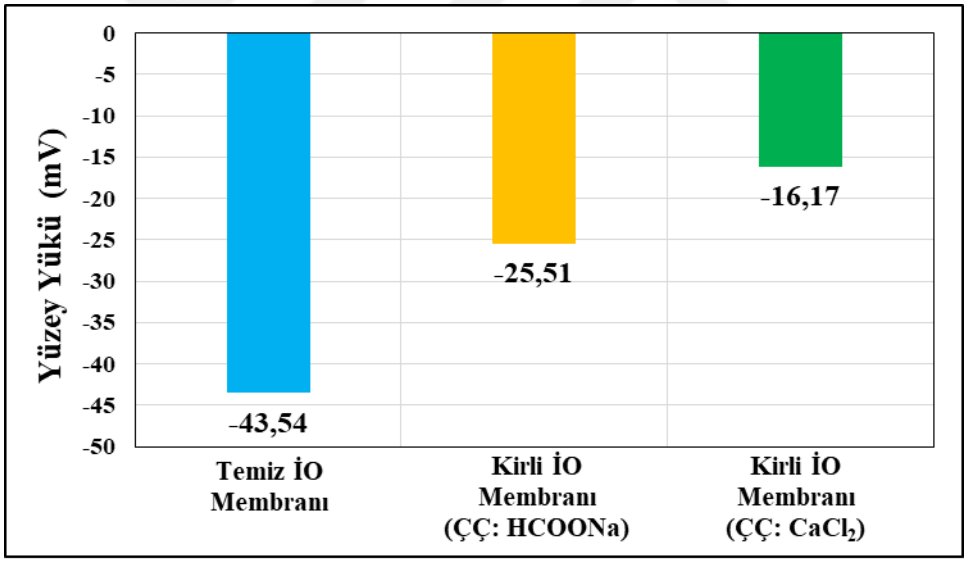
Kirli İO membranının (ÇÇ: HCOONa) FT–IR spektrumunda temiz İO membranından farklı olarak 2324 cm^{-1} ve 2108 cm^{-1} bantları elde edilmiştir. 2108 cm^{-1} bandı, C≡N gerilimine karşılık gelmektedir. Bu bantta elde edilen spektrumun $[Fe(C=N)_6]^{3-}$ iyon gerilimi moduna karşılık geldiği belirlenmiştir. Kirli İO membranında (ÇÇ: HCOONa) yapılan EDS ölçümlerinde de membran yüzeyinde ağırlıkça %36.43'nün demir (Fe) iyonlarının oluşturduğu görülmüş ve membran yüzeyinde demir (Fe) birikimi 2108 cm^{-1} bandı ile de doğrulanmıştır. Kirli İO membranının (ÇÇ: HCOONa) yüzeyinden görülen demir (Fe) birikiminin bira atıksuyundan kaynaklandığı düşünülmektedir. 2324 cm^{-1} bandı, kükürt (S) iyonu gerilimi bandıdır. EDS ölçümlerinde kirli İO membranı (ÇÇ: HCOONa) yüzeyinde birikimin ağırlıkça %34.67'nin kükürt (S) iyonlarının oluşturduğu görülmüş, kükürt (S) iyonları birikimi 2324 cm^{-1} bandı ile de doğrulanmıştır. Kirli İO membranındaki (ÇÇ: HCOONa) diğer bantlar temiz İO membranı FT–IR spektrumda elde edilen bantlar ile aynıdır. Ancak bu bantların şiddetlerinin belirgin bir şekilde azaldığı belirlenmiştir. Bu azalmanın kirleticilerin membran yüzeyinde oluşturdukları

reaksiyonlardan ve İO membranının yüzeyinde oluşan kirlenmeden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Kirli İO membranı (ÇÇ: $CaCl_2$) FT–IR spektrumunda elde edilen bantlar ile temiz İO membranı FT–IR spektrumunda elde edilen bantların hemen hemen aynı olduğu görülmüştür. Ancak kirli İO membranında (ÇÇ: $CaCl_2$) oluşan bantlarının derinliklerinin azaldığı görülmüştür. Membran yüzeyinde biriken kirleticilerin bant şiddetlerini azalttığı düşünülmektedir.

4.6.5. Zeta Potansiyeli Analizi

İO membranlarının yüzey yükü ölçümleri pH 7'de yapılmıştır. CTA–İO membranlarının negatif yüklü olduğu bilinmektedir (Holloway ve diğ. 2007). Bu sebeple temiz İO mebranlarının mümkün olduğu düzeyde düşük (negatif yönde) yüzey yüküne sahip olması beklenir. Şekil 4.65'te temiz ve kirli İO membranlarının yüzey yükü değerleri verilmiştir.



Şekil 4.65: Membranlarının pH 7'deki yüzey yükü değerleri.

Şekil 4.65'te en düşük yüzey yükünün (-43.54 mV) temiz İO membranına ait olduğu görülmektedir. Membran yüzeylerinde biriken kirliliğin artması yüzey yüklerinin pozitif yönde hareket etmesini sağlamıştır. Kirli İO membranlarının yüzey yükleri ÇÇ: HCOONa ve ÇÇ: $CaCl_2$ için sırasıyla –25.51 mV ve –16.17 mV olarak ölçülmüştür.

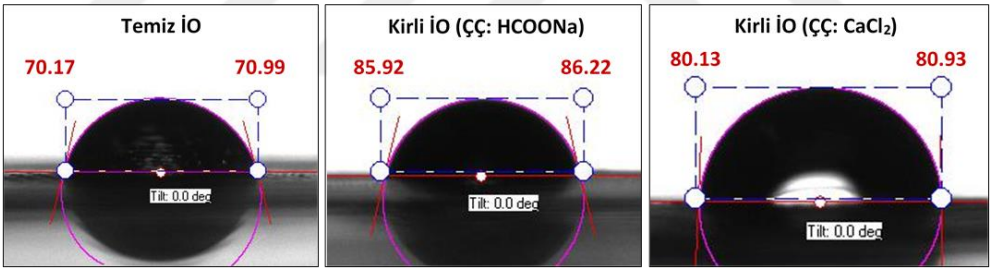
4.6.6. Temas Açısı Analizi

Temiz ve kirli İO membranlarına ait temas açısı değerleri Tablo 4.23'te verilmiştir. Temas açısı ölçümleri, membran yüzeyinin hidrofobik/hidrofilik özelliklerinin değerlendirilmesi amacıyla yapılmıştır.

Tablo 4.23: İO membranlarının temas açısı sonuçları.

Membran	Temiz İO Membranı	Kirli İO Membranı (ÇÇ: HCOONa)	Kirli İO Membranı (ÇÇ: $CaCl_2$)
Temas açısı (θ^0)	70.58	86.07	80.53

Temiz İO membranında temas açısı 70.58^0, kirli membranlarda (ÇÇ: HCOONa) 86.07^0 ve (ÇÇ: $CaCl_2$) 80.53^0 olarak belirlenmiştir. Literatürde temiz CTA–İO membranlarının temas açısı değerinin 66.5^0 ile 72.7^0 aralığında olduğu belirtilmiştir (Qin ve diğ., 2015; Ding ve diğ., 2017; Xue ve diğ., 2018; Rastgar ve diğ., 2019; Shakeri ve diğ., 2019). Şekil 4.66'da temas açısı ölçümlerinin görsel gösterimi verilmiştir. Temas açısı ölçümlerinde membran yüzeyine damlatılan saf su taneciğinin sağındaki ve solundaki açıların ortalaması alınmıştır.



Şekil 4.66: İO membranlarının temas açısı ölçümlerinin gösterimi.

4.6.7. Membran Yüzeyinden Ekstrakte Edilen Çamurda EPS Analizi

Kirli İO membranlarının yüzeyinden sıyrılan çamurda EPS analizi gerçekleşmiştir. Tablo 4.24'te EPSc ve EPSp sonuçları verilmiştir.

Tablo 4.24: Membran yüzeyindeki çamura ait EPS değerleri.

Analiz	EPS_c (mg/gUAKM)	EPS_p (mg/gUAKM)
AnOMBR (ÇÇ: HCOONa)	77.3	18.8
AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$)	80.3	28.3

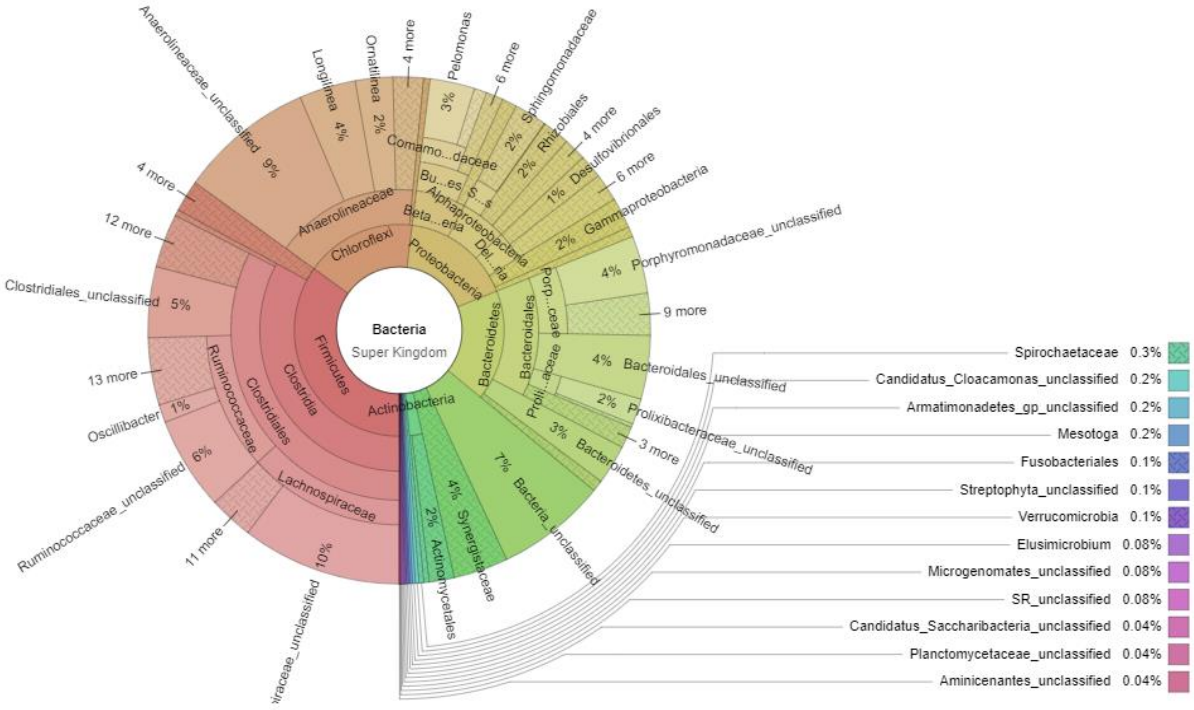
Elde edilen sonuçlara göre membran yüzeyinden ekstrakte edilen çamurda AnOMBR ÇÇ: HCOONa ve ÇÇ: $CaCl_2$ sistemlerinde EPS_c değeri sırasıyla 77.3 ve 80.3 mg/gUAKM olarak belirlenmiştir. EPS_p değeri ise sırasıyla; 18.8 ve 28.3 mg/gUAKM olarak belirlenmiştir.

4.7. ANOMBR'DE ARKEAL VE BAKTERİAL İNCELEME ANALİZİ SONUÇLARI

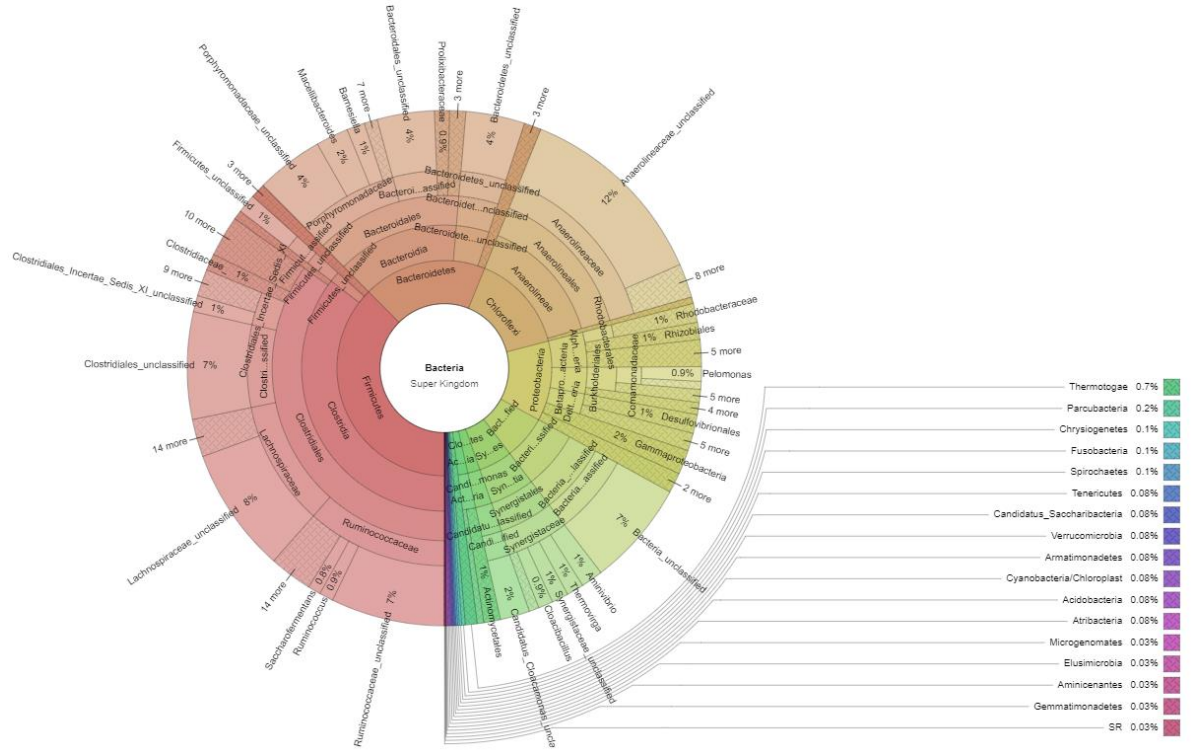
AnOMBR sistemlerinin aşı çamurunda yapılan arkeal incelemede; toplam 3 şube, 5 sınıf, 7 takım, 14 aile ve 21 cins tespit edilmiştir. Aynı numunede yapılan bakteriyel inceleme sonucunda; toplam 20 şube, 35 sınıf, 63 takım, 128 aile ve 267 cins tespit edilmiştir. AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) sistemine ait çamur numunesinde yapılan arkeal incelemede; toplam 3 şube, 7 sınıf, 13 takım, 20 aile ve 27 cins tespit edilmiştir. Aynı numunede yürütülen bakteriyel analiz sonucuna göre; toplam 28 şube, 47 sınıf, 81 takım, 154 aile ve 299 cins tespit edilmiştir. Aşı çamuru ile kıyaslandığında bakteri ve arke'ya ait yüzdelik değerlerin değiştiği, arkeal türlerin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu değişime bağlı olarak hem bakteriyel hem de arkeal türler ve bu türlere ait alt grupların değişim gösterdiği tespit edilmiştir. AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) sistemine ait çamur numunesinde yapılan arkeal incelemede; toplam 3 şube, 5 sınıf, 9 takım, 16 aile ve 23 cins tespit edilmiştir. Aynı numunede yürütülen bakteriyel analiz sonucuna göre; toplam 25 şube, 44 sınıf, 78 takım, 143 aile ve 316 cins tespit edilmiştir. Aşı çamuru numunesi ile kıyaslandığında bakteri ve arkeye ait yüzdelik değerlerin değişmediği fakat detaylı incelemede takım, aile ve cins sınıflandırılmasında değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir. Her iki sisteme ait metagenomik analiz verileri alt başlıklarda detaylandırılmıştır.

4.7.1. AnOMBR Sistemleri Bakteriyel Komünite Sonuçları

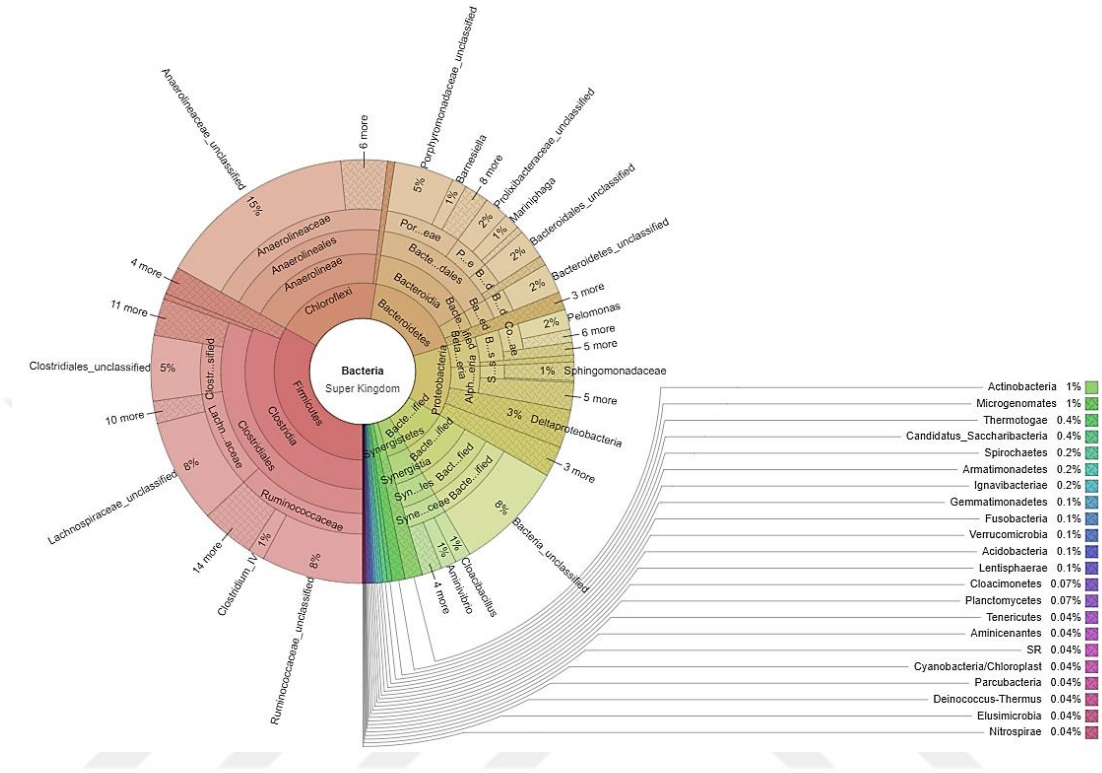
Şekil 4.67'de aşı çamuru numunesinin, Şekil 4.68'de AnOMBR (ÇÇ:HCOONa) sisteminin 4. döngüsü sonundan alınan çamur numunesinin ve Şekil 4.69'da AnOMBR (ÇÇ:$CaCl_2$) sisteminin 4. döngüsü sonundan alınan çamur numunesinin bakteriyel komünite profilleri verilmiştir. Her iki AnOMBR işletiminden elde edilen sonuçlar aşı çamuru numunesi ile kıyaslanmıştır. AnOMBR sisteminde en baskın bakteri şubelerinin *Firmicutes, Chloroflexi, Proteobacteria* ve *Bacteroidetes* olduğu belirlenmiştir. Bakteriyel popülasyonlarda, *Bacteroidetes, Firmicutes* ve *Proteobacteria'*nın literatürde anaerobik sistemlerin çoğunda baskın şube olduğu, *Clostridia* (*Firmicutes'e* ait) ve *β-Proteobacteria* (*Proteobacteria'ya* ait) türlerinin ise tüm biyolojik proseslerde yaygın olarak görülen ve fermantasyon sürecinde hayati rol oynayan baskın şubeler olduğu belirtilmiştir (Shi ve diğ., 2017). Ayrıca *Firmicutes* şubesine bağlı bakteri türlerinin bira atıksuyunun besleme olarak kullanıldığı anaerobik arıtma sistemlerinde en yoğun karşılaşılan tür olduğu belirtilmiştir (Pachiega ve diğ., 2019).



Şekil 4.67: Aşı çamuru numunesinin bakteriyel komünite profili.



Şekil 4.68: AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) sisteminin bakteriyel komünite profili.



Şekil 4.69: AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) sisteminin bakteriyel komünite profili.

Aşı çamuru ve AnOMBR sistemlerinden alınan çamur numunelerinde yapılan bakteriyel incelemede 'Şube' içerisindeki tür değişiminin yeterli seviyede olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle bakteriyel değerlendirmede AnOMBR sistemlerinden alınan numunelerin, aşı çamuruna göre 'Şube' değişimlerinin kıyaslanması yapılmıştır.

Tablo 4.25'te AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) sistemine ait çamur numunesinde ve aşı çamurunda yer alan şubeler verilmiştir. Bakteriyel incelemede *Firmicutes'in* %34.9'dan %37.55'e yükseldiği, *Chloroflexi'nin* %17.07'den, %14.84'e düştüğü, *Proteobacteria'nın* %16.99'dan, %12.02'ye düştüğü ve *Bacteroidetes'in* %16.91'den, %18.57'ye yükseldiği belirlenmiştir. Bakteriyel ölçümlerde baskın tür olarak belirlenen *Firmicutes, Chloroflexi, Proteobacteria* ve *Bacteroidetes* yüksek iletkenlik seviyesinde ve yüksek tuzlulukta inaktif olan ve mikroorganizma faaliyetlerine yürütemeyen bakteri şubeleridir (Chen ve diğ., 2019). AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) sisteminden alınan numunede baskın bakteriyel şubelerin artan tuzlulukla bir kısmının inhibe olduğu (Chloroflexi), aşı çamuru numunesine göre yüzdesi artan *Firmicutes,*

Proteobacteria ve *Bacteroidetes* şubelerinin ise biyogaz üretimini desteklediği düşünülmektedir.

Tablo 4.25: Bakteriyel komünite şube karşılaştırması (ÇÇ: HCOONa).

	Aşı Çamuru	ÇÇ: HCOONa
Şubeler	**%**	**%**
Firmicutes	34.90	37.55
Chloroflexi	17.07	14.84
Proteobacteria	16.99	12.02
Bacteroidetes	16.91	18.57
Bacteria_unclassified	7.08	6.60
Synergistetes	3.52	5.05

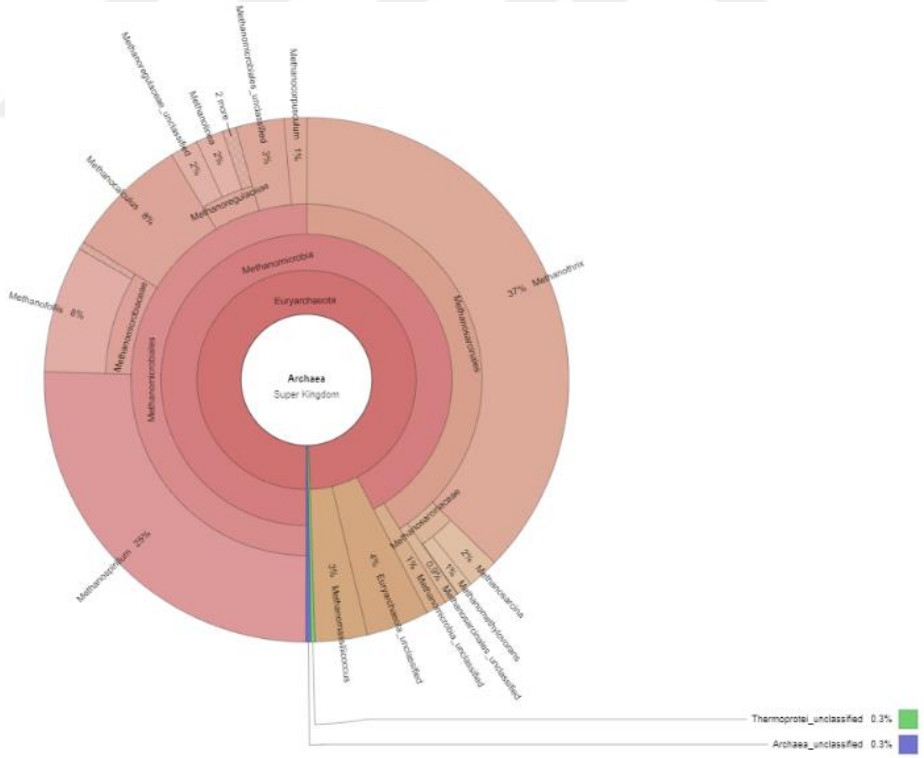
Tablo 4.26'da AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) sistemine ait çamur numunesinde ve aşı çamurunda yer alan şubeler verilmiştir. AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) sisteminde bakteriyel değişim daha net gözlemlenmiştir. AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) sisteminde en çok değişim *Firmicutes* ve *Fusobacteria* şubelerinde gerçekleşmiştir. Aşı çamurunda %34.9 olan *Firmicutes*, AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) sistemine ait çamurda %0.03'e düşmüştür. *Firmicutes*, anaerobik ortamda organik asitlerden asetik asit üreten bir bakteri şubesidir fakat ortamdaki tuzluluğun zamanla arttığı çevre koşullarında kolayca inhibe olabilmektedir (Chen ve diğ., 2019). *Firmicutes* şubesinin neredeyse %0'a düşmesi, anaerobik ortamda arke türlerin besin kaynağı olan uçucu yağ asitlerinin (UYA) üretilmemesine neden olmuştur. Yetersiz besi kaynağı ve artan tuzluluğun, arke türleri üzerinde toksik etki oluşturduğu düşünülmektedir. Aşı çamurunda %0.11 olan *Fusobacteria*, AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) sistemine ait çamurda %33.13'e yükselmiştir. *Fusobacteria* şubesine bağlı fermantatift bakteri türleri gram negatif çubuk şeklinde bakterilerdir. Zorlu anoksik koşullar altında karbonhidratlar üzerinde çoğaldıklarında farklı çeşitte organik asitler (amino asitler, peptitler) üretmektedirler (Gharbia ve diğ., 1992). *Fusobacteria* şubesi %33.13'e ulaşmasına rağmen anaerobik ortamda organik asit üretimine katkı sağladığı ancak arke türlerinin ihtiyacı olan nihai besi maddelerini (UYA) üretememesi nedeniyle anaerobik ortamda arke etkinliğini olumsuz yönde etkilediği düşünülmektedir. Diğer türlerdeki değişim %0.3–4 aralığında gerçekleşmiştir.

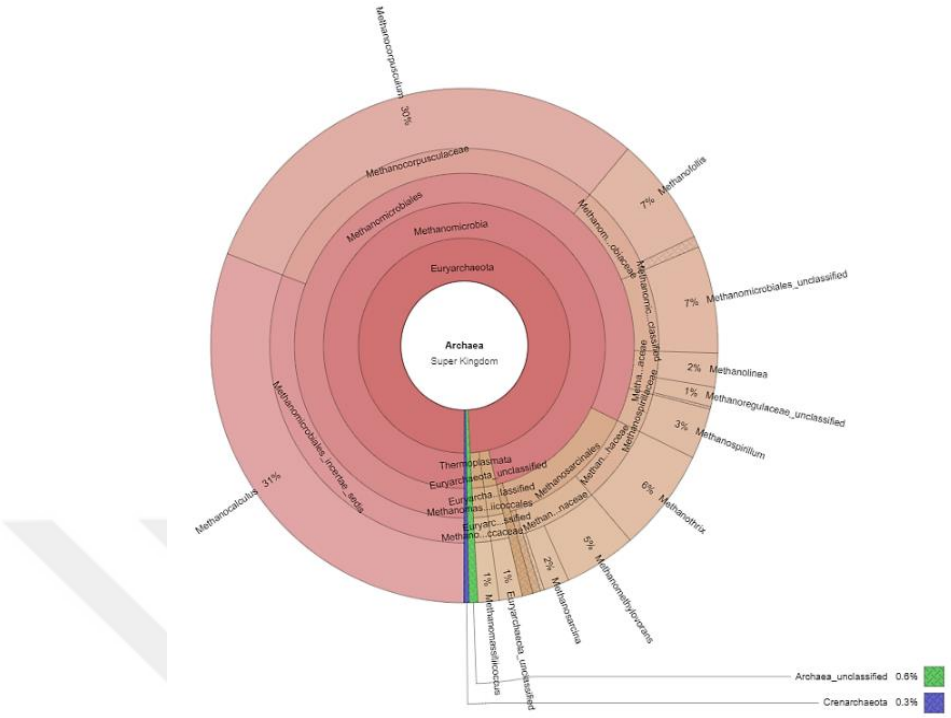
Tablo 4.26: Bakteriyel komünite şube karşılaştırması (ÇÇ: $CaCl_2$).

	Aşı Çamuru	ÇÇ: $CaCl_2$
Takımlar	**%**	**%**
Firmicutes	34.90	0.03
Chloroflexi	17.07	19.31
Proteobacteria	16.99	12.89
Bacteroidetes	16.91	17.82
Bacteria_unclassified	7.08	8.36
Synergistetes	3.52	3.89
Fusobacteria	0.11	33.13

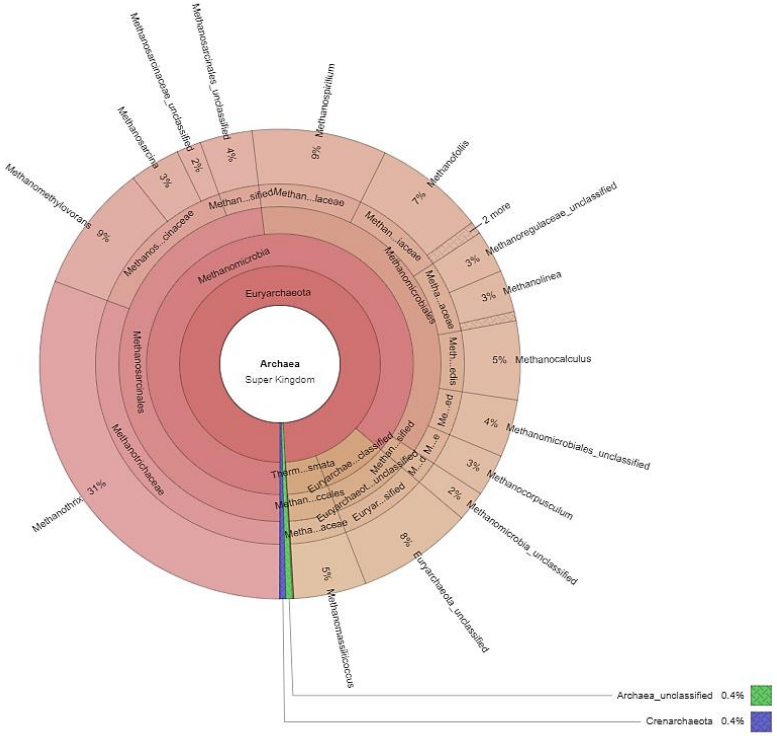
4.7.2. AnOMBR Sistemleri Arkeal Komünite Sonuçları

Şekil 4.70'te aşı çamur numunesinin, Şekil 4.71'de AnOMBR (ÇÇ:HCOONa) sisteminde 4. döngü sonundan alınan çamur numunesinin ve Şekil 4.72'de AnOMBR (ÇÇ:$CaCl_2$) sisteminde 4. döngü sonundan alınan çamur numunesinin arkeal komünite profilleri verilmiştir. Her iki AnOMBR işletiminden elde edilen sonuçlar aşı çamur numunesi ile kıyaslanmıştır.


Archaea
Super Kingdom
Euryarchaeota
Methanomicrobia
Methanomicrobiales
Methanomicrobiales_unclassified
Methanocorpusculum 1%
Methanosarcinales
Methanosaeta
Methanoregulaceae
Methanoregulaceae_unclassified 2%
Methanolinea 2%
2 more
Methanomicrobiales_unclassified 3%
Methanocella 6%
Methanofollis 6%
Methanomicrobiaceae
Methanomicrobiales
Methanoculleus 25%
Methanosarcinales
Methanosarcinaceae
Methanosaeta
Methanothrix 37%
Methanosarcinaceae
Methanosarcinales_unclassified
Methanosarcina 2%
Methanomethylovorans
Methanosarcinales_unclassified
Methanosarcinales_unclassified
Methanosarcinales_unclassified



Şekil 4.71: AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) sisteminin arkeal komünite profili.



Şekil 4.72: AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) sisteminin arkeal komünite profili.

Tüm çamur numunelerinde en baskın arkeal şubenin *Euryarchaeota* olduğu belirlenmiştir. *Euryarchaeota,* aşı çamuru, AnOMBR (ÇÇ:HCOONa) ve AnOMBR (ÇÇ:$CaCl_2$) sistemlerine ait çamur numunlerinde sırasıyla %99.48, %99.14 ve %99.17 olarak belirlenmiştir. *Euryarchaeota* arkeal mikroorganizmaların bağlı olduğu arke grubunun en baskın şubesidir (Sakai ve diğ., 2008). Literatürde arkelerin 5 farklı filogenetik takımı (Methanosarcinales, Methanobacteriales, Methanomicrobiales, Methanococcales ve Methanopyrales) olduğu belirlenmiştir (Angelidaki ve diğ., 2011). Aşı çamuru ve AnOMBR sistemlerine ait çamurlarda arke ölçümü yapıldığında 'Şube' ve 'Sınıf' kapsamında yapılan incelemelerde %'lik değişimlerin düşük olduğu belirlenmiştir. En belirgin değişimin takımlarda olması nedeniyle arkeal değişimler takım kapsamında incelenmiştir.

Arkelerin hücre morfolojisi bakımından çok çeşitli olduğu bilinmektedir (Thauer ve diğ., 2008). *Methanosarcinales* ve *Methanomicrobiales* gibi bazı arkeal takımların kullanılan karbon kaynakları konusunda çok yönlü olduğu bilinmektedir (Kurr ve diğ., 1991). *Methanosarcinales'in* genellikle yüksek amonyak ve organik asit içeriği olan ortamlarda baskın olduğu bilinmektedir. *Methanomicrobiales* türlerine ait mikroorganizmalar enerjiyi hem organik bileşiklerin "organotrofik" oksidasyonu ile hem de indirgenmiş inorganik bileşiklerin (özellikle kükürtlü bileşikler) "kemolithotrofik" oksidasyonu ile elde etmektedir (Dianou ve diğ. 2001). Tablo 4.27'de arkeal komünitelerin takımlarındaki değişim (ÇÇ: HCOONa) verilmiştir.

Tablo 4.27: Arkeal komünite takım karşılaştırması (ÇÇ: HCOONa).

	Aşı Çamuru	**ÇÇ:HCOONa**
Takımlar	**%**	**%**
Methanomicrobiales	50.04	82.16
Methanosarcinales	41.05	13.47
Euryarchaeota_unclassified	3.87	1.47
Methanomassiliicoccales	3.22	1.35
Methanomicrobia_unclassified	1.29	0.69
Archaea_unclassified	0.26	0.57
Thermoprotei_unclassified	0.26	0.21

AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) sistemine ait çamurda takımlar arasında en büyük değişimin *Methanosarcinales* ve *Methanomicrobiales'te* gerçekleştiği belirlenmiştir. Aşı çamurunda %50.04 oranında bulunan *Methanomicrobiales'in* AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) sisteminde %82.16'ya çıktığı belirlenmiştir. *Methanosarcinales* ise aşı çamurunda %41.05 ve AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) sisteminde %13.47 olarak bulunmuştur. *Methanosarcinales'in* asetat,

H_2+CO_2, CO, metanol, metilamin, metil–merkaptopropiyonat ve dimetil sülfit'i karbon kaynağı olarak kullandığı bilinmektedir (Kendall ve Boone, 2006). AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) sisteminde artan tuzluluk miktarına bağlı olarak *Methanosarcinales'in* azaldığı düşünülmektedir. *Methanomicrobiales* ise karbon kaynağı olarak H_2+CO_2, format, etanol, 2–propanol, 2–bütanol ve siklopentanol kullanmaktadır (Garcia ve diğ., 2006). AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) sisteminde ÇÇ'nin içeriğindeki format bileşeninin artan ters tuz akımı ile reaktör içerisindeki çamurda birikiminin karbon kaynağı olarak format kullanan *Methanomicrobiales* türlerinin artmasına neden olduğu düşünülmektedir.

Tablo 4.28'de arkeal komünitelerin takımlarındaki değişim (ÇÇ: $CaCl_2$) verilmiştir.

Tablo 4.28: Arkeal komünite takım karşılaştırması (ÇÇ:$CaCl_2$).

	Aşı Çamuru	**ÇÇ:$CaCl_2$**
Takımlar	**%**	**%**
Methanomicrobiales	50.04	48.14
Methanosarcinales	41.05	36.15
Euryarchaeota_unclassified	3.87	7.82
Methanomassiliicoccales	3.22	4.88
Methanomicrobia_unclassified	1.29	2.07
Archaea_unclassified	0.26	0.44
Thermoprotei_unclassified	0.26	0.29

AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) sisteminden alınan numunelerde de takımlar arasında en baskın türlerin *Methanosarcinales* ve *Methanomicrobiales* olduğu belirlenmiştir. *Methanosarcinales* ve *Methanomicrobiales'in* AnOMBR sisteminde, aşı çamuruna göre azaldığı (sırasıyla %36.15 ve %48.14) belirlenmiştir. AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) sisteminde tuzluluk artışı sebebiyle arkeal mikroorganizmaların inhibe olduğu düşünülmektedir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında AnOMBR sistemi için uygun ÇÇ türleri belirlenerek, seçilen organik (HCOONa) ve inorganik ($CaCl_2$) ÇÇ türleri ile bir bira fabrikasından temin edilen bira endüstrisi atıksuyunun AnOMBR sisteminde arıtılabilirliği araştırılmıştır. AnOMBR'nin uzun süreli işletiminden elde edilen SSÇ çıkışlarının ve üst fazın ileri arıtma kademelerinde arıtılabilirliği incelenmiştir. Temiz ve kirli İO membranlarında gerçekleştirilen otopsi çalışmaları ile membran kirlenmesi detaylı incelenmiştir. AnOMBR'lerde kullanılan aşı çamuru ve reaktörlerden işletim süreci sonunda alınan çamur numunelerinde bakteri türleri ve değişimi belirlenmiştir. Çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

ÇÇ Seçimi ve Kesikli Çalışmalar:

- 29 farklı ÇÇ türünün maliyeti, osmotik basıncı, maksimum çözünürlüğü ve İO performansı değerleri ile AHP analizi yapılmıştır. Yüksek İO performansı elde etmek için ÇÇ'lerin yüksek çözünürlüğe, yüksek osmotik basınca ve düşük moleküler ağırlığa (yüksek difüzyon katsayısı) sahip olması istenmektedir (Chekli ve diğ., 2012). AHP analizi sonucunda elde edilen skorlara göre, inorganik ÇÇ'lerden $NaNO_3$ (4.92), NaCl (4.69), $MgCl_2$ (4.61), $CaCl_2$ (4.58), $NH_4H_2PO_4$ (4.55) ve organik ÇÇ'lerden HCOONa (4.78) ve CH_3COONa (4.55)'ın kesikli denemelerde test edilmesine karar verilmiştir.
- ✓ Harici kesikli çalışmalarda 7 farklı organik ve inorganik ÇÇ türü ve Deniz Suyu, 30 bar sabit osmotik basınç altında ve 25°C'de test edilmiş ve İO performansları (su akısı (J_w) ve ters tuz akısı (J_s)) izlenmiştir. Dahili kesikli sistemlerde ÇÇ'ler ve Deniz Suyu 30 bar sabit basınçta, farklı sıcaklıklarda (25°C ve 35°C) ve farklı konsantrasyonlarda (0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1 ve 2 M) test edilmiş ve İO performansları (su akısı (J_w) ve ters tuz akısı (J_s)) izlenmiştir. ÇÇ türleri ile 3 farklı alkalinite konsantrasyonunda (1260, 2500 ve 4000 mg $CaCO_3$/L) ve farklı ÇÇ konsantrasyonlarında (0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1 ve 2 M) BMP testi gerçekleştirilmiştir.
- Kesikli çalışmalardan elde edilen sonuçlar AHP analizi ile değerlendirilmiştir. AHP analizinde ÇÇ'lerin J_w ve J_s değerleri, maliyeti ve BMP deneylerinden elde edilen CH_4 miktarı esas alınmıştır. AHP analizlerinde ÇÇ'lerin AnOMBR sisteminde kullanılması amaçlandığı için ÇÇ'lerin anaerobik performansına daha yüksek ağırlık katsayısı verilmiştir. Yapılan ilk AHP analizinde ÇÇ'lerin harici ve dahili sistemlerdeki AHP

skorları karşılaştırılmıştır. $CaCl_2$, CH_3COONa ve $MgCl_2$'nin harici sistemlerde elde edilen AHP skorlarının dahili sistemlere göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Diğer ÇÇ türlerinin dahili sistemlerdeki AHP skorları harici sistemlere göre daha yüksek bulunmuştur. Harici ve dahili sistemler arasında ÇÇ türlerini etkileyen en belirgin kriterin J_w değeri olduğu belirlenmiştir. Harici sistemlerde J_w hesabında besleme çözeltisi sirkülasyonu ile oluşan ECP'nin etkili olmadığı kabul edilmekte ve kütle transfer katsayısının teorik olarak sonsuz olduğu kabul edilmektedir (Kim ve diğ., 2016). Dahili sistemlerde ECP ve ICP'nin artması, İO membranının beslemeye bakan aktif yüzeyindeki osmotik basınç gradyanını azaltmakta ve J_w'ninde azalmasına sebep olmaktadır. ICP'nin, J_w değerini %80'den daha fazla azaltabilen bir etkisi olduğu bilinmektedir (Gray ve diğ., 2006). Bu nedenle tüm ÇÇ türleri ile harici sistemlerde elde edilen J_w değerleri, dahili sistemler elde edilen J_w değerlerinden daha yüksek bulunmuştur.

- Kesikli çalışmalardan elde edilen tüm veriler ile yapılan ikinci AHP analizinden elde edilen toplam AHP skorlarına göre, $CaCl_2$ en yüksek AHP skoruna (0.148) sahip inorganik ÇÇ türü olarak bulunmuştur. Ancak, 0.148'lik AHP skorunun %50.59'unu ÇÇ maliyeti (€/mol), %30.20'sini İO performansı (J_w ve J_s değerleri) ve %19.21'ini anaerobik performans (CH_4 miktarı) oluşturmaktadır. $CaCl_2$'nin inorganik ÇÇ türleri arasında yüksek konsantre edilebilme özelliği (%95) ve yüksek J_w değeri sebebiyle en yüksek İO performansı sağlayan bir ÇÇ türü olduğu bilinmektedir (Achilli ve diğ. (2010). Çalışmamızda yapılan AHP analizinde $CaCl_2$'nin birim maliyeti de hesaba katılmış ve en uygun inorganik ÇÇ türü olarak belirlenmiştir.
- Toplam AHP skorlarına göre organik ÇÇ türleri arasından en yüksek AHP skoru (0.138) HCOONa ile elde edilmiştir. Bununla birlikte, 0.138'lik AHP skorunun %27.04'ünü ÇÇ maliyeti (€/mol), %27.50'sini İO performansı (J_w ve J_s değerleri) ve %45.46'sını anaerobik performans (CH_4 miktarı) oluşturmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre inorganik ÇÇ türlerinin İO performanslarının (J_w ve J_s değerleri) organik ÇÇ türlerine göre daha yüksek olduğu fakat anaerobik performanslarının (CH_4 miktarı) daha düşük olduğu belirlenmiştir. HCOONa'nın BMP testi sonuçlarına göre en stabil CH_4 üretimine sahip ÇÇ türü olduğu, NaCl'den sonra en yüksek J_w değerini (3.8 $L/m^2 \cdot saat$) sağladığı fakat CH_3COONa'nın HCOONa'ya göre daha yüksek CH_4 miktarı elde edilebileceği görülmüştür (Ansari ve diğ. 2015). Ancak çalışmamızda yapılan AHP analizinde ÇÇ

türlerinin tek bir parametre üzerinden değerlendirilmesi yapılmamış, her bir ÇÇ türü toplam AHP skoru üzerinden kıyaslanmıştır. AHP analizine göre, CH_3COONa HCOONa'ya göre ÇÇ maliyeti ve İO performansı açısından daha düşük performans göstermiştir. Bu nedenle en uygun organik ÇÇ türü olarak HCOONa seçilmiştir.

AnOMBR (ÇÇ: HCOONa)'de Arıtılabilirlik Çalışmaları:

- Sistem 70 gün boyunca, 5 döngüde 30 mS/cm iletkenlik üst sınır değerinde işletilmiştir. İşletim sürecinin başında 0.64 olan UAKM/AKM oranının 4. döngü sonunda 0.43'e düştüğü belirlenmiştir. Reaktör içerisinde KOİ giderim verimi 1. döngüde %90'dan %64'e, 2. döngüde %80'den %60'a, 3 döngüde %46'dan %41'e ve 4. döngüde %48'den %28'e düşmüştür. SÇÇ çıkışlarında işletim süresince KOİ giderim verimi %76 ile %94 aralığında değişim göstermiştir. Reaktörde üst faz her döngüde değiştirilmesine rağmen, artan J_s değeri ile birlikte reaktör içi iletkenlik değerinin 2. döngü başlangıcında 10.08 mS/cm, 3. döngü başlangıcında 11.8 mS/cm ve 4. döngü başlangıcında 12.47 mS/cm olduğu belirlenmiştir. İşletim süresince CH_4 miktarı 1. döngüde 0.30 L CH_4/gKOİ'den 0.04 LCH_4/gKOİ'e, 2. döngüde 0.33 LCH_4/gKOİ'den 0.08 LCH_4/gKOİ'e, 3. döngüde 0.18 LCH_4/gKOİ'den 0.03 LCH_4/gKOİ'ye ve 4. döngüde 0.09 LCH_4/gKOİ'den 0.01 LCH_4/gKOİ'ye düşmüştür. Her döngü sonunda üst fazın alınmasına rağmen CH_4 değerinin düşmesinin nedeni, artan J_s değeri ile birlikte reaktör içerisinde biriken tuz konsantrasyonunun artması olarak düşünülmektedir. Reaktör içerisinde J_s akımı ile gerçekleşen tuz birikiminin mikroorganizma faaliyetlerine ve buna bağlı olarak CH_4 üretimine olumsuz yönde etkisi olduğu bilinmektedir (Chen ve diğ., 2014; Gu ve diğ., 2015; Wang ve diğ., 2017a). Reaktör içerisinde aşı çamuru eklenmesi ile 5. döngü başında AKM değeri 10 g/L'ye yükseltilmiştir. 5. döngü süresince yaklaşık 0.35 LCH_4/gKOİ elde edilmiştir. Reaktöre eklenen çamurun, mikroorganizma aktivitesi ve CH_4 üretimi üzerinde olumlu etkisi olduğu düşünülmektedir. Çamurda yapılan bakteriyel incelemede baskın tür olarak belirlenen *Firmicutes, Chloroflexi, Proteobacteria* ve *Bacteroidetes'*in yüksek iletkenlik seviyesinde ve yüksek tuzlulukta inaktif olan ve mikroorganizma faaliyetlerini yürütemeyen bakteri şubeleri olduğu bilinmektedir (Chen ve diğ., 2019). Reaktörden alınan numunede baskın bakteriyel şubelerin artan tuzlulukla bir kısmının inhibe olduğu (Chloroflexi), aşı çamuru numunesine göre yüzdesi artan *Firmicutes, Proteobacteria* ve *Bacteroidetes* şubelerinin

ise biyogaz üretimini desteklediği düşünülmektedir. Çamurda yapılan arkeal incelemede *Methanosarcinales* ve *Methanomicrobiales* gibi çok yönlü karbon kaynağı kullanılan arkeal takımların varlığı görülmüştür (Kurr ve diğ., 1991). Ancak aşı çamuru ile kıyaslandığında *Methanomicrobiales*'in AnOMBR'de daha baskın hale geldiği gözlemlenmiştir. *Methanomicrobiales*, karbon kaynağı olarak H_2+CO_2, format, etanol, 2−propanol, 2−bütanol ve siklopentanol kullanmaktadır (Garcia ve diğ., 2006). Bu sebeple arkelerin AnOMBR sisteminde artan tuzlulukta CH_4 üretimini hem bira atıksuyu içerisindeki karbon kaynağını kullanarak hem de J_s ile reaktör içerisinde biriken formatı kullanarak gerçekleştirdiği düşünülmektedir. Organik ÇÇ türlerinin, CH_4 oluşumuna pozitif etkisi olduğu aynı zamanda sodyum (Na^+) iyonunun anaerobik ortamda 3 g/L'den yüksek konsantrasyon değerlerinde arkeal aktivite üzerinde toksik etkisi olduğu bilinmektedir (Ansari ve diğ., 2015). Reaktörde artan iletkenlik değeri ile birlikte oluşan zorlu anaerobik koşulların, arke türleri üzerinde toksik etki oluşturduğu düşünülmektedir (Bowden ve diğ., 2012; Chen ve diğ., 2014). AnOMBR'lerin atıksu arıtımında uygulanmasını kısıtlayan ve düşük CH_4 üretimine neden olan en önemli nedenlerin (i) tuz birikimi, (ii) membran kirlenmesi ve (iii) dahili konsantrasyon polarizasyonu olduğu bilinmektedir (Wang ve diğ., 2016; She ve diğ., 2016; Hou ve diğ., 2017). AnOMBR işletiminde arkeal türlerin azalmasında artan tuzluluğun ve iletkenliğin etkili olduğu düşünülmektedir.

- AnOMBR sisteminde TP ve TKN değişimleri reaktör içerisinde ve SÇÇ çıkışlarında sürekli olarak izlenmiştir. İO membranının TP reddi çok yüksek olması nedeniyle SÇÇ çıkışlarında TP giderim verimi %90 ile %99 aralığında değişmiştir. SÇÇ çıkışlarında TKN giderim verimi ise %16 ile %54 aralığında bulunmuştur. AnOMBR sisteminde ölçülen TKN konsantrasyonunun %90'ı NH_4^+–N'den oluşmaktadır. AnOMBR sistemi SÇÇ çıkışlarında TP %95−99 aralığında ve NH_4^+–N %28−96 aralığında giderilmektedir (Chen ve diğ., 2014; Gu ve diğ., 2015; Hou ve diğ., 2017; Wang ve diğ., 2018; Wang ve diğ., 2019). CTA−İO membranları negatif yüzey yüklü olması sayesinde bazı pozitif yüklü iyonların kolay difüze olmasına olanak sağlamakta, ancak negatif yüklü anyonlara karşı yüksek seçicilik göstermektedirler. Bununla birlikte çift değerlikli iyonlara karşı seçicilikleri yüksek, tek değerlikli iyonlara karşı seçicilikleri de düşüktür (Hou ve diğ., 2017). Bu nedenlerden dolayı, İO membranı ile NH_4^+–N'nin giderim

veriminin düşük olması (%16–54) ve TP'nin ise neredeyse tamamının (%90–99) tutulduğu söylenebilir.

- Reaktör içerisinde artan J_s değeri ve buna bağlı reaktör içi iletkenlik değerinin artmasıyla başlangıçta 20 gün süren döngü süresinin, 5. döngü itibariyle 9 güne düştüğü görülmüştür. İşletim süresince J_s değeri 1. döngüde 0.33 g/m²·saat'ten 0.72 g/m²·saat'e, 2. döngüde 0.42 g/m²·saat'ten 0.69 g/m²·saat'e, 3. döngüde 0.52 g/m²·saat'ten 0.72 g/m²·saat'e ve 4. döngüde 0.43 g/m²·saat'ten 0.74 g/m²·saat'e yükselmiştir. J_s değerinin İO membranının değiştirildiği 3. döngüye kadar sürekli arttığı (0.330 g/m²·saat'ten, 0.720 g/m²·saat'e) belirlenmiştir. Başlangıçta 3.44 L/m²·saat olan J_w değeri işletme sürecinin sonunda 2.17 L/m²·saat'e düşmüştür. Günlük yapılan osmotik geri yıkama ile akı kayıpları %90–95 oranında geri kazanılmıştır. Osmotik geri yıkama ile İO membranı temizlendiğinde %75–98 aralığında akı kayıplarının geri kazanıldığı bilinmektedir (Chen ve diğ., 2014; Hou ve diğ., 2017; Wang ve diğ., 2017a; Wu ve diğ., 2017; Zhang ve diğ., 2017). Ancak AnOMBR sisteminde tuz birikimine ve çamur floklarının boyutunun azalmasına bağlı olarak membranda ECP kirlenmesinin oluştuğu ve buna bağlı olarak J_w değerinin sürekli azaldığı düşünülmektedir.
- Reaktör içerisinden belirli aralıklarla alınan çamur numunelerinde EPS ve SMP analizleri yapılmıştır. EPS_c değeri 49 mg/gUAKM'den 27.24 mg/gUAKM'ye, EPS_p değeri 7.8 mg/gUAKM'den 0.6 mg/gUAKM'ye düşmüştür. SMP_c değeri 245 mg/L'den 186 mg/L'ye, SMP_p değeri ise işletme süresince 14.5 mg/L'den 8.6 mg/L'ye düşmüştür. İletkenlik değeri ile birlikte artan osmotik basıncın hücre yıkımına sebep olduğu ve bu sebeple EPS'in salınmasına neden olduğu bilinmektedir (Chen ve diğ., 2014).
- AnOMBR sisteminde başlangıçta ve 4. döngünün sonunda alınan çamur numunelerinde zeta potansiyeli ve boyut dağılımı analizlerine göre; başlangıçta –30.5 mV olan zeta potansiyeli değeri 4. döngü sonunda –21.6 mV'ye yükselmiştir. Boyut dağılımında ise d10, d50 ve d90'da sırasıyla 21.9 µm'dan 10.7 µm'ye, 72.9 µm'dan 32.5 µm'ye ve 398.6 µm'dan 114.7 µm'ye düşmüştür. AnMBR sisteminde Na^+ iyonun konsantrasyonunun artması, çamurun partikül boyutunda azalmaya ve mikroorganizmaların stres koşullarına girerek yapılarının bozulmasına neden olmaktadır (Sierra ve diğ., 2018). HCOONa'ın yapısındaki Na^+ iyonunun çamur floklarının elektrostatik stabilizasyonunu bozduğu ve partikül boyutunda azalmaya neden olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, Na^+ iyonunun EPS yapısındaki (egg box teorisi)

Ca^{2+} iyonları ile yer değiştirerek EPS yapısındaki çözülme sonucunda da flok yapısının küçüldüğü düşünülmektedir (Ding ve diğ., 2015).

AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$)'de Arıtılabilirlik Çalışmaları:

- Sistem 57 gün boyunca, 5 döngüde 30 mS/cm iletkenlik üst sınır değerinde işletilmiştir. $CaCl_2$ ile yapılan işletmede döngü sürelerinin HCOONa'ya göre daha kısa sürdüğü (15 gün) görülmüştür. Reaktör içerisinde artan iletkenlik ile birlikte başlangıçta 0.68 olan UAKM/AKM oranının, 4. döngü sonunda 0.43'e düştüğü belirlenmiştir. Reaktör içerisinde KOİ giderim verimi 1. döngüde %54'ten %36'ya, 2. döngüde %54'ten %40'a, 3 döngüde %41'den %35'e ve 4. döngüde %38'den %31'e düşmüştür. SÇÇ çıkışlarında ise %66 ile %92 aralığında değişim göstermiştir. Reaktörde üst faz her döngüde değiştirilmesine rağmen, artan J_s değeri ile birlikte reaktör içi iletkenlik değerinin 2. döngü başlangıcında 11.26 mS/cm, 3. döngü başlangıcında 13.51 mS/cm ve 4. döngü başlangıcında 18.23 mS/cm olduğu belirlenmiştir. İşletim süresince CH_4 miktarı 1. döngüde 0.25 LCH_4/gKOİ'den 0.002 LCH_4/gKOİ'e, 2. döngüde 0.19 LCH_4/gKOİ'den 0.03 LCH_4/gKOİ'e, 3. döngüde 0.16 LCH_4/gKOİ'den 0.01 LCH_4/gKOİ'e ve 4. döngüde 0.10 LCH_4/gKOİ'den 0.02 LCH_4/gKOİ'e düşmüştür. 5. döngüde reaktöre aşı çamuru eklenmiş ve AKM konsantrasyonu 10 g/L'ye yükseltilmiştir. Reaktöre eklenen çamurun mikroorganizma aktivitesi ve CH_4 üretimi üzerinde çok fazla bir değişikliğe neden olmadığı, KOİ giderim veriminin %54'e ve CH_4 miktarının 0.20 LCH_4/gKOİ'ye yükseldiği belirlenmiştir. Çamurda yapılan bakteriyel incelemede baskın tür olarak belirlenen *Firmicutes* şubesi %34.9'dan %0'a düşmüştür. *Firmicutes* şubesinin arke türlerin besin kaynağı olan organik asitlerden UYA'nın üretilmesini sağladığı bilinmektedir (Gharbia ve diğ., 1992). Bu sebeple $CaCl_2$ ile yapılan AnOMBR işletiminde *Firmicutes* şubesinin yok olması ile anaerobik ortamda arke türlerinin besin kaynağı olan UYA'nın üretiminin de azaldığı düşünülmektedir. Ayrıca aşı çamurunda %0.11 olan *Fusobacteria*'nın %33.13'e yükseldiği belirlenmiştir. *Fusobacteria* şubesine bağlı fermantatift bakteri türleri zorlu anoksik koşullar altında karbonhidratlar üzerinde çoğaldıklarak farklı çeşitlilikte organik asit (amino asitler, peptitler) ürettiğini bilinmektedir (Gharbia ve diğ., 1992). Yapılan çalışmada *Fusobacteria* şubesi popülasyonu %0.11'den %33.13'e yükselmiş olmasına rağmen anaerobik ortamda sadece amino asit ve peptit üretimine katkı

sağlaması nedeniyle arke türlerinin ihtiyacı olan nihai besi maddelerini (UYA) üretilmemesi nedeniyle, anaerobik koşullarda arkeler üzerinde ilave bir inhibisyona yol açığı düşünülmektedir.

- AnOMBR sisteminde TP ve TKN değişimleri reaktör içerisinde ve SÇÇ çıkışlarında sürekli izlenmiştir. SÇÇ çıkışında TP giderim verimi %96 ile %99 aralığında, TKN giderim verimi ise %26 ile %41 aralığında değişmiştir. AnOMBR sisteminde ölçülen TKN konsantrasyonunun yaklaşık %90–92'si NH_4^+–N, TP konsantrasyonunun yaklaşık %87–90'u PO_4^{3-}–P formundadır. Her döngü sonunda üst faz değişimini takiben KOİ, TP ve TKN giderim verimlerinin %5–10 aralığında artış gösterdiği belirlenmiştir. İO membranının düşük NH_4^+–N seçiciliği sebebiyle TKN'nin bir kısmının (%26–41) giderilebildiği, fakat yüksek TP reddi sebebiyle neredeyse tamamının (%96–99) İO membranı tarafından tutulduğu belirlenmiştir.
- Reaktör içerisinde artan J_s değeri ve buna bağlı reaktör içi iletkenlik değerinin artmasıyla başlangıçta 10 gün süren döngü süresinin, 5. döngü itibariyle 8 güne düştüğü görülmüştür. İşletim süresince J_s değerin 1. döngüde 0.54 g/m²·saat'ten 0.81 g/m²·saat'e, 2. döngüde 0.63 g/m²·saat'ten 0.86 g/m²·saat'e, 3. döngüde 0.77 g/m²·saat'ten 0.89 g/m²·saat'e ve 4. döngüde 0.74 g/m²·saat'ten 0.84 g/m²·saat'e yükselmiştir. Başlangıçta 3.46 L/m²·saat olan J_w değeri işletme sürecinin sonunda 1.85 L/m²·saat'e düşmüştür. Günlük yapılan osmotik geri yıkama ile akı kayıpları %87–92 oranında geri kazanılmıştır. Ancak AnOMBR sisteminde İO membranının Ca^{2+} gibi iki değerlik iyonlara karşı yüksek reddi olması nedeniyle, Ca^{2+} iyonlarının reaktör içerisinde konsantre hale geldiği ve yüksek J_s değeri ile ICP kirlenmesine neden olarak işletme süresince J_w değerinin azalmasına sebep olduğu düşünülmektedir.
- Reaktör içerisinden belirli aralıklarla alınan çamur numunelerinde, EPS'e ve SMP'ye bağlı karbonhidrat değerlerinin işletme sürecinin sonuna doğru azaldığı görülmüştür. EPS_c değeri işletme süresince 53 mg/gUAKM'den 29 mg/gUAKM'ye düşmüştür. EPS_p değeri ise işletme süresince 8.3 mg/gUAKM'den 5.93 mg/gUAKM'ye düşmüştür. SMP_c değeri 263 mg/L'den 204 mg/L'ye düşmüştür. SMP_p değeri ise işletme süresince 21 mg/L'den 11 mg/L'ye düşmüştür.
- AnOMBR sisteminde başlangıçta ve 4. döngünün sonunda alınan çamur numunelerinde zeta potansiyeli ve boyut dağılımı ölçülmüştür. İşletim sürecinin başlangıcında –30.5 mV olan zeta potansiyeli değeri 4. döngü sonunda –13.2 mV'ye yükselmiştir. Boyut

dağılımı ise d10, d50 ve d90'da sırasıyla 21.9 µm'dan 10.4 µm'ye, 72.9 µm'dan 35.3 µm'ye ve 398.6 µm'den 268.5 µm'ye düşmüştür. Ca^{2+} gibi iki değerlik iyonların İO membranında tuz reddinin yüksek olduğu bilinmektedir (Achilli ve diğ., 2010). Anaerobik çamurda Ca^{2+} iyonlarının partikül boyutlarını arttırarak granüler boyutta çamur oluşumunu desteklediğini ve çamurun şarj yükünü düşürdüğü bilinmektedir (Sanjeevi ve diğ., 2013). $CaCl_2$'nin ÇÇ olarak kullanıldığı bu sistemde de Ca^{2+} iyonları büyük ölçüde İO membranından geçemeyerek reaktörde birikmiştir. Sistemde biriken Ca^{2+} iyonlarının, çamur yükünü arttırdığı ve partikül boyutunu azalttığı düşünülmektedir. Ca^{2+} iyonunun, Na^{+} iyonu kadar partikül boyutunda küçülmeye sebep olmadığı görülmektedir. Ca^{2+} iyonu konsantrasyonunun anaerobik sistemlerde 500 mg/L kadar granülleşmeye pozitif etkisinin olduğu bilinmektedir (Sanjeevi ve diğ., 2013). Ancak, bu çalışmadaki granül boyutundaki %32'lik azalma tuz konsantrasyonundaki artışa bağlı olarak bakteriyel/arkeal inhibisyonla ilişkili olarak gerçekleşmiş olduğu düşünülmektedir.

AnOMBR Sisteminin Farklı İletkenlik Üst Sınır Değerinde Çalıştırılması:

- AnOMBR sisteminde döngü sürelerini optimize etmek ve sistemi yüksek giderim veriminde çalıştırılabilmek amacıyla; iletkenlik üst sınır değeri 10 mS/cm ve 20 mS/cm olduğu durumlarda reaktör içerisindeki KOİ değişimi ve iletkenlik değeri değişimi kütle dengesi kurularak simüle edilmiştir. Kurulan kütle dengesi sonucuna göre 20 mS/cm üst sınır değerinde çamur içerisinde biriken iletkenlik yükünün %45 oranında azaltılabileceği belirlenmiştir.
- AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) sistemi 20 mS/cm üst iletkenlik değerinde 40 gün süre ile toplamda 3 döngüde işletilmiştir. KOİ giderim verimi ve CH_4 üretiminin 30 mS/cm üst sınır değerinde yapılan diğer çalışmalara göre çok daha yüksek olduğu belirlenmiştir. İşletim süresince UAKM/AKM oranı 0.67'den 0.60'a düşmüş ve reaktörde KOİ giderim verimi ortalama %87 olarak belirlenmiştir. İşletim süresince CH_4 miktarı 1. döngüde 0.40 LCH_4/gKOİ, 2. döngüde 0.37 LCH_4/gKOİ ve 3. döngüde 0.34 LCH_4/gKOİ olarak belirlenmiştir. TP ve TKN giderim verimleri sırasıyla %19.64–%43.6 ve %98–%99.9 aralığında bulunmuştur. İşletim sürecinin başında 3.54 L/m²·saat olan J_w değeri, işletim sonunda 3.35 L/m²·saat'e düşmüştür. J_s değeri ise 0.28 g/m²·saat'ten 0.66 g/m²·saat'e yükselmiştir. İletkenlik üst sınır değerinin 20 mS/cm

düşürülmesi ile İO performansında iyileşme sağlanacağı, reaktörün işletme süresinin uzatılabileceği ve anaerobik aktivitenin iyileştirebileceği belirlenmiştir. Literatürde AnOMBR sistemlerinde tuzluluğun kontrolü amacı ile yapılan: üst faz değişimi ve reaktöre aşı çamuru eklenmesi (Chen ve diğ., 2014; Gu ve diğ., 2015; Wu ve diğ., 2017; Li ve diğ., 2017; Wang ve diğ., 2018) veya reaktörde İO modülü ile birlikte batık MF membranı kullanılması (Hou ve diğ., 2017; Hu ve diğ., 2017; Wang ve diğ., 2017a; Wang ve diğ., 2019; Chang ve diğ., baskıda) gibi uygulamalara alternatif bir işletme yöntemi ortaya çıkarılmıştır.

Yukarıda özetlenen sonuçlara göre, AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) sisteminde döngü süresinin, CH_4 miktarının, RSFS oranının, KOİ giderim veriminin ve UAKM/AKM oranının işletim süresince AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) sistemine göre yüksek olduğu belirlenmiştir. Bunun ile birlikte AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) sisteminde tuz birikimi, J_s değeri, partikül boyutu ve zeta potansiyeli daha düşüktür. Bunun yanı sıra her iki sistemde de SÇÇ çıkışlarında TP ve TKN giderim verimleri sırasıyla %30–54 ve %90–99 aralığında bulunmuştur. Her iki sistemde de EPS ve SMP miktarının reaktördeki iletkenlik artışına bağlı olarak azaldığı görülmüştür. Organik ÇÇ türlerinin anaerobik İO proseslerinde daha yüksek performansta işletilebileceği bilinmektedir (Ansari ve diğ., 2015). $CaCl_2$ ile yapılan işletim süresince iletkenlik değeri reaktör içerisinde (yüksek J_s değeri sebebiyle) HCOONa'ya göre daha yüksek bulunmuştur. AnOMBR sistemlerinde 20 mS/cm iletkenlik üst sınır değerinde yapılan işletimin, 30 mS/cm'de yapılan işletmeye göre anaerobik veriminin daha yüksek olduğu ve daha uzun döngü sürelerinde çalışılabildiği belirlenmiştir.

Membran Otopsi Analizi Çalışmaları:

- AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) sisteminde kullanılan İO membranının SEM görüntülerinde İO membran yüzeyinde ve kesitinde bakteri ve tuz çökelekleri belirlenmiştir. AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) sisteminde kullanılan İO membranının ise yüzeyinin belirli bir kısmının tuz çökelekleri ile kaplandığı ve membranın sarmal yapısının tamamen kaybolmadığı görülmüştür. İnorganik ÇÇ kullanılan İO çalışmalarında, İO membranı yüzeyinde ters tuz difüzyonundan kaynaklanan tuz kristallerinin membran yüzeyinin kapladığını bilinmektedir (Xiao ve diğ. 2016). EDS analizlerinde membran yüzeyinde ÇÇ: HCOONa'da Na^+ iyonu birikimi (%4.51) ve ÇÇ: $CaCl_2$'de Ca^{2+} iyonu birikimi (%30.59) görülmüştür. İO membranın Na^+ iyonunu düşük reddetme kapasitesi (Ansari

ve diğ., 2015) nedeniyle Na^{+}'nın membran yüzeyinde birikiminin az olduğu daha çok membran içerisine difüze olduğu düşünülmektedir. İO membranın +2 değerlikli iyonlara karşı yüksek reddinin olması (Achilli ve diğ., 2010) nedeniyle de ÇÇ: $CaCl_2$ sisteminde İO membranı yüzeyinde yüksek Ca^{2+} birikimi oluştuğu düşünülmektedir. Ayrıca, iki kirli membranın yüzeyinde Fe ve S iyonlarının birikimine de rastlanılmıştır. Bu durumun bira atıksuyunun içeriğinde yer alan yüksek Fe ve S konsantrasyonunundan kaynaklandığı düşünülmektedir.

- Kirli membranların optikprofilometre ile yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde ÇÇ: HCOONa ve ÇÇ: $CaCl_2$'de tepe değerleri sırasıyla; 40.64 µm ve 43.7 µm olarak bulunmuştur. Temiz İO membranın kirlenmesiyle birlikte kirli İO membranlarının yüzey pürüzlülüklerinin arttığı görülmüştür. Kirli İO membranına (AnOMBR–ÇÇ: HCOONa) ait optikprofilometre görüntüleri incelendiğinde, membran yüzeyinin büyük bir bölümünün kirlilik tabakası ile kaplandığı görülmüştür. Kirli İO membranının (AnOMBR–ÇÇ:$CaCl_2$) optikprofilometre görüntülerinden de membranının sarmal yapısının özellikle üst kısımlarında kirlilik tabakası görülmüştür. Konfokal mikroskop görüntülerinden edilen sonuçlara göre, ÇÇ: HCOONa ve ÇÇ: $CaCl_2$'de biyofilm tabakası kalınlığı sırasıyla 250 µm ve 150 µm olarak belirlenmiştir. Bu iki analiz sonucuna göre ÇÇ: HCOONa kirli İO membranının yüzeyinin büyük bir bölümünün kirlendiği, ÇÇ: $CaCl_2$ İO membranında ise kirlilik birikiminin sadece İO membranının sarmal yapıları üzerinde gerçekleştiği belirlenmiştir.
- Kirli İO membranlarının yüzeyinde gerçekleşen değişim FT–IR spektrumları ile de desteklenmiştir. FT–IR spektrumlarından elde edilen sonuçlarda: ÇÇ: HCOONa kirli İO membranında yüksek S ve Fe iyonlarını birikimine ait 2 yeni fonksiyonel grubun (2324 cm^{-1} ve 2108 cm^{-1} bantları) ortaya çıktığı belirlenmiştir. Temiz İO membranına ait karakteristik bantların ise dirençlerinin azaldığı görülmüştür. ÇÇ: $CaCl_2$ kirli İO membranında ise gerçekleşen kirlenme yeni bantların oluşumuna neden olmamış fakat İO membranı karakteristik piklerinin dirençlerinin azalmasına neden olmuştur.
- ÇÇ: HCOONa kirli İO membranı ve ÇÇ: $CaCl_2$ kirli İO membranında zeta potansiyeli sırasıyla –25.51 mV ve –16.17 mV olarak belirlenmiştir. İO membranlarının +2 değerlikli iyonlara karşı yüksek tuz reddinin yüksek olmasından dolayı ÇÇ: $CaCl_2$ kirli İO membranında yüzey yükünün daha fazla pozitif yönde arttığı düşünülmektedir.

- Temas açısı ölçümlerinde ÇÇ: HCOONa kirli İO membranın, ÇÇ: $CaCl_2$ kirli İO membranına göre daha hidrofobik hale geldiği belirlenmiştir. Kirli İO membranlarının yüzeyinden ekstrakte edilen çamur numunelerinin EPS_p ve EPS_c konsantrasyonlarının birbirlerine yakın olduğu belirlenmiştir. Membran yüzeyinde EPS_c'nin daha yüksek konsantrasyonda elde edilmesinin sebebinin, besleme atıksuyundaki protein konsantrasyonunun düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Zeta Potansiyeli, Konfokal Mikroskop ile Görüntüleme, Optikprofilometre, Temas Açısı ve FT−IR analizleri sonuçlarına göre AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) sisteminde kullanılan İO membranının daha çok kirlendiğini söyleyebiliriz. Bunun başlıca nedeni olarak, Na^+ iyonlarının reaktör içerisinde birikimi ile çamur flok yapısının dağıldığı ve membran yüzeyinin tamamen kaplayan biyofilm tabakası oluşumunu desteklediği düşünülmektedir. AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) sisteminde ise kirlenmenin membran yüzeyinin belirli bir kısmında etkili olduğu ve İO membranının sarmal yapısının üst kısımlarında kirlilik biriktiği gözlenmiştir. Bunun nedeninin, Ca^{2+} iyonunun çamurun flok yapısını çok fazla etkilememesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

İleri Arıtma (UF, NF, TO) Çalışmaları:

- AnOMBR sisteminde $CaCl_2$ ve HCOONa ile uzun süreli işletime ait (30 mS/cm iletkenlik üst sınır değerinde) ilk 3 döngüden elde edilen kompozit SÇÇ çıkışları ve üst fazlar ile ileri arıtma çalışmaları gerçekleştirilmiştir. NF ve TO çalışması sonuçları AAT−TUT, (2010)'ne göre EK 7'de yer alan '*Arıtılmış Atıksuların Sulama Suyu Olarak Geri Kullanım Kriterleri'* başlığı altında incelenmiştir.
- AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$) işletiminden elde edilen SÇÇ çıkışının seyreltme yapılmaksızın tarımsal sulama amaçlı kullanıma uygun (A Sınıf−III. Kalite) olduğu belirlenmiştir. AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) işletiminden elde edilen SÇÇ çıkışı ise Sınıf A kapsamında yer almış fakat herhangi bir kalite sınıfına uygun bulunmamıştır. AnOMBR (ÇÇ: $CaCl_2$)'den elde edilen SÇÇ çıkışı 5 kat ve 11 kat seyreltildiğinde ise sırasıyla A Sınıfı−III. Kalite ve A Sınıfı−II. Kalitede su elde edilmiştir. AnOMBR (ÇÇ: HCOONa) işletiminden elde edilen SÇÇ çıkışı 11 kat seyreltiğinde hallerinde A Sınıfı−II. Kalitede su elde edilmiştir.

- NF süzüntüsünün (ÇÇ: HCOONa) seyreltilmeden tarımsal uygulamalarda kullanıma uygun olmadığı belirlenmiştir NF süzüntüsü (ÇÇ: HCOONa) 4 kat ve 8 kat seyretilmesi sonucunda sırasıyla, A Sınıfı−II. Kalitede ve A Sınıfı −II. Kalitede su elde edilmiştir. TO süzüntüsünün (ÇÇ: HCOONa) ise A Sınıfı−III. Kalitede olduğu belirlenmiştir. NF süzüntüsünün (ÇÇ: $CaCl_2$) A Sınıfı−III. Kalitede olduğu belirlenmiştir. TO süzüntüsü (ÇÇ: $CaCl_2$) ile A Sınıfı−II. Kalitede su çıkışı elde edilmiştir. NF ve TO çalışmalarına ait konsantreler incelendiğinde, TO konsantrelerinin stok ÇÇ olarak kullanımının uygun olduğu ancak NF konsantrelerinin stok ÇÇ olarak kullanımının mümkün olmadığı belirlenmiştir.
- AnOMBR üst fazları ile gerçekleştirilen UF çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre, UF konsantrelerinin TKM içeriğinin %8'den küçük olması sebebiyle ön çökeltim çamuru olarak kullanımının mümkün olmadığı fakat her iki UF süzüntüsünün kanala deşarj standartlarına uygun olduğu belirlenmiştir. UF konsantresinin AnOMBR sistemine geri devrettirilmesi durumunda kurulan kütle dengesi simülasyonunda reaktör içerisinde iletkenlik seviyesinin yükseleceği ve çamurda iletkenlik birikimini arttıracağı belirlenmiştir. AnOMBR sisteminin farklı iletkenlik üst sınır değerlerinde işletilmesi durumunda üst fazın daha seyreltik olarak elde edilebileceği ve yeterli sürede sisteme geri devrettirilebileceği belirlenmiştir. UF konsantresinin %20 ve bira atıksuyunun %80 oranında karıştırılarak reaktöre verilmesi durumunda; beslenen konsantrenin toplamda 2 günde sisteme geri devrettirilmesinin mümkün olacağı, reaktörde döngü süresinin en az 4 gün ve en çok 14 gün süreceği belirlenmiştir.

Sıvı Gübre Çalışması:

- Sıvı gübre uygulamalarında farklı gübre türleri çim yetiştirmede kullanılmış ve elde edilen ölçüm değerleri AHP analizi ile değerlendirilmiştir. AnOMBR SÇÇ çıkışlarından 11 kat seyreltilmiş $CaCl_2$−SÇÇ numunesinin 0.66'lık AHP skoru ile tüm gübre çeşitleri arasında en iyi ürün olduğu belirlenmiştir. En düşük AHP skoru ise 0.020 ile azot içerikli ticari gübrede elde edilmiştir.
- Toplu AHP skorlarına göre 5 ve 11 kat seyreltilmiş HCOONa−SÇÇ numunelerinin AHP skorları sırasıyla 0.037 ve 0.046 olarak bulunmuştur. HCOONa−SÇÇ numuneleri özellikle filiz sayısının ve kaplama yüzdesinin diğer numunelere göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ca^{2+}'nin bitkide hücre duvarlarının ve bitki dokularının sertleşip

güçlenmesinde temel görevi üstlendiği ve bu özelliği ile bitki dokularını ve meyveleri mantar ve bakteri enfeksiyonlarından koruduğu belirtilmiştir (Oral ve Açıkgöz, 2001). Bu sebeple çim yetiştiriciliğinde Ca^{2+} içerikli SÇÇ türlerinin kullanımının daha etkili olacağı düşünülmektedir.

Bu Tez Çalışmasında Elde Edilen Sonuçlar Neticesinde;

- HCOONa ve $CaCl_2$ ile yapılan 30 mS/cm reaktör içi üst iletkenlik değerinde yürütülen AnOMBR çalışmalarında, iletkenlik artışına bağlı olarak arıtma verimliliği düşmüştür. Bu sebeple AnOMBR sistemi daha düşük reaktör içi iletkenlik üst sınır değerinde (20 mS/cm) işletilmiş, yüksek anaerobik performans ve arıtma verimliliği sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre AnOMBR sistemleri, bira endüstrisi gibi yüksek su tüketimine sahip endüstriyel atıksuların arıtımında yenilikçi bir teknoloji olarak kullanılabilecektir.
- AnOMBR sisteminden elde edilen SÇÇ çıkışlarının sıvı gübre olarak kullanımı ve faydalı bir son ürüne dönüşümü mümkün olacaktır. SÇÇ'lerin çim yetiştiriciliğinde sıvı gübre olarak kullanılması durumunda belediyelerin peyzaj yatırımlarında ve %90'i ithal olan sıvı gübre tüketiminde ülke ekonomisine katkı sağlanacaktır. Böylece, ülkemizde yeni teknolojiler üreten ülkeler arasında yer alacak ve sınırlı kaynakların sürdürülebilirliğine önemli katkılarda bulunulacaktır.
- AnOMBR sistemi SÇÇ çıkışlarının NF ve TO membranlarında arıtılması durumunda, tarımsal sulama amaçlı su ve stok ÇÇ eldesi mümkün olacaktır.
- AnOMBR sisteminde organik içerikli ÇÇ türlerinin tercih edilmesi, reaktör içerisinde arkeal mikroorganizmaların çoğalmasını destekleyecek ve uzun döngü sürelerinde çalışmaya fayda sağlayabilecektir.

Gelecekte Yapılacak Çalışmalarda;

- AnOMBR sisteminde artan tuzluluğun giderilmesi amacıyla üst faz alınmadan, reaktör içerisine yerleştirilecek tuz geçirgenliği yüksek bir membran (MF vb.) ile uzun süreli işletimi tavsiye edilmektedir. AnOMBR'lerde membran kirlenmesinin önüne geçmek için, membran ile çamurun ayırımının sağlandığı farklı reaktör tiplerinin kullanımı da (örn. UASB) önerilmektedir.
- AnOMBR sürücü kuvveti olan ÇÇ'nin reakör içerisinde birikimi özellikle inorganik ÇÇ türleri için dezavantaj oluşturmaktadır. Bu alanda yapılacak çalışmalarda özellikle

organik ÇÇ türlerinin kullanılması önerilmektedir. Ancak, inorganik ÇÇ türlerinin yüksek osmotik gücünden faydalanabilmek amacıyla organik ve inorganik bileşiklerin 2'li, 3'lü vb., karışımlarda hazırlanarak AnOMBR sisteminde denenmesi tavsiye edilmektedir.

- AnOMBR sisteminde osmotik geri yıkama hem J_w kayıplarının engellenmesinde kilit rol oynamaktadır. Bu sebeple membran kirlenmesinin engellenmesi ve yüzeyde gerçekleşen birikimin azaltılması amacıyla osmotik geri yıkama ile birlikte diğer (kimyasal temizleme, biyogaz ve/veya azot gazı ile membran yüzeyinin periyodik sıyrılması vb.) temizleme yöntemlerinin kullanımı tavsiye edilmektedir.

KAYNAKLAR

Aaberg, R.J., 2003, Osmotic power—a new and powerful renewable energy source, *ReFocus*, 4, 48–50.

AAT–TUT, 2010, Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği, *Çevre ve Orman Bakanlığı*, Ankara–Türkiye.

Achilli, A., Cath, T.Y., Marchand, E.A., Childress, A.E., 2009. The forward osmosis membrane bioreactor: a low fouling alternative to MBR processes, *Desalination*, 239, 10–21.

Achilli, A., Cath, T.Y., 2010, Selection of inorganic–based draw solutions for forward osmosis applications, *Journal of Membrane Science*, 364, 233–241.

Açıkgöz, E., 1994, *Çim alanlar yapım ve bakım tekniği*, Çevre Peyzaj Mimarlığı Yayınları, 4, 204.

Adham, S., Oppenheimer, J., Liu, L., Kumar, M., 2007, Dewatering reverse osmosis concentrate from water resuse applications using forward osmosis, Water Use Foundation, Research Report.

Alnaizy, R., Aidan, A., Qasim, M., 2013, Copper sulfate as draw solute in forward osmosis desalination, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1, 424–430.

Aftab, B., Khana, S.J., Maqbool, T., Hankins, N.P., 2017, Heavy metals removal by osmotic membrane bioreactor (OMBR) and their effect on sludge properties, *Desalination*, 403, 117–127.

Akunna J.C., 2015, Anaerobic treatment of brewery wastes, *Food Science, Technology and Nutrition*, 19, 407–424.

Alloway, B., Jackson, P., 1991, The Behaviour of Heavy Metals in Sewage Sludge Avended Soils, *Elsevier Science publishers*, 100, 151–176.

Alturki, A.A., Tadkaew, N., McDonald, J.A., Khan, S.J., Price, W.E., Nghiem, L.D., 2010, Combining MBR and NF/RO membrane filtration for the removal of trace organics in indirect potable water reuse applications, *Journal of Membrane Science*, 365, 206–215.

Angelidaki, I., Karakashev, D., Batstone, D.J., Plugge, C.M., Stams, A.J.M., 2011, Biomethanation and Its Potential, *Methods in Enzymology*, 494, 327–351, ISSN 0076–6879.

Ansari, A.J., Faisal, I.H., Wenshan, G., Hao, H., William, E.P., Long, D., 2015, Selection of forward osmosis draw solutes for subsequent integration with anaerobic treatment to facilitate resource recovery from wastewater, *Bioresource Technology*, 191, 30–36.

Alturki, A.A., McDonald, J.A., Khan, S.J., Price, W.E., Nghiem, L.D., Elimelech, M., 2012, Removal of trace organic contaminants by the forward osmosis process, *Seperation and Purification Technology*, 103, 258–266.

APHA–AWWA–WEF, 1995, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, American Public Health Association, Washington, ABD, 19 (5), 27–28.

APHA, 1998, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association, Washington, ABD.

Avcıoğlu, R. 1997, *Çim tekniği yeşil alanların ekimi dikimi ve bakımı*, Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, İzmir.

Baloch, M. I., Akunna, J. C., Collier P. J., 2007, The performance of a phase separated granular bed bioreactor treating brewery wastewater, *Bioresource Technology*, 98, 1849–1855.

Başkan, T., 2006, Arıtılmış Evsel Atıksuların Tarımda Sulama Amaçlı Yeniden Kullanilmasi, (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Batchelder, G.W., 1965, Process for the demineralization of water, *US Patent*, 3, 171–799.

Beard, J.B., 1973, *Turfgrass: science and culture*. Prentice-Hall, Inc., USA, 658.

Beaudry, E.G., Lampi, K.A., 1990, Membrane technology for direct osmosis concentration of fruit juices, *Food Technology*, 44, 121.

Beaudry, E.G., Herron, J.R., 1997. *Direct osmosis for concentrating wastewater*, Lake Tahoe, Nevada, 1–7.

Beaudry, E.G., Herron, J.R., Peterson, S.W., 1999, *Direct osmosis concentration of waste water: Final report*, Osmotek Inc., Corvallis, OR.

Belfer, S., Purinson, Y., Kedem, O., 1998, Surface modification of commercial polyamide reverse osmosis membranes by radical grafting: An ATR–FTIR study, *Acta Polymerica*, 49, 574–582.

Berkessaa, Y.W., Yan, B., Li, T., Tan, M., She, Z., Jegatheesan, V., Jiang, H., Zhang, Y., 2018, Novel anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) design for wastewater treatment at long HRT and high solid concentration, *Bioresource Technology*, 250, 281–289.

Bhatt, P.P., 2004, *Osmotic drug delivery systems for poorly soluble drugs*, PharmaVentures Ltd., Oxford, UK.

Biase, A.D., Devlin, T.R., Oleszkiewicz, J.A., 2016, Start-Up of an Anaerobic Moving Bed–Biofilm Reactor and Transition to Brewery Wastewater Treatment, *Journal of Environmental Engineering*, 142, 1–5.

Blandin, G., Verliefde, A.R., Tang, C.Y., Childress, A.E., Clech, P.L., 2013, Validation of assisted forward osmosis (AFO) process: impact of hydraulic pressure, *Journal of Membrane Science*, 447, 1–11.

Bowden, K.S., Achilli, A., Childress, A.E., 2012, Organic ionic salt draw solutions for osmotic membrane bioreactors, *Bioresource Technology*, 122, 207–216.

Braeken, L., Bruggen, B.V., Vandecasteele, C., 2004, Regeneration of brewery waste water using nanofiltration, *Water Research*, 38, 3075–3082.

Bulgurlu, S., Ergül, M., 1978, *Yemlerin Fiziksel, Kimyasal ve Biyolojik Analiz Metodları*, Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, 127, 58–76.

Büyükkamacı, N., 2009, *Su yönetiminin etkin bileşeni: Yeniden Kullanım*, İzmir Kent Sorunları Sempozyumu 2009, İzmir, 363–377.

Büyüksarı, E., 2013, NH_3/CO_2 *İleri Osmoz Prosesi Kullanılarak Peynir Altı Suyunun Konsantre Edilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Gebze–Kocaeli.

Cai, Y., Hu, X.M., 2016, A critical review on draw solutes development for forward osmosis *Desalination*, 391, 16–29.

Cai, L.X., Chung, T., 2014, Anti–fouling behavior of hyper–branched polyglycerol grafted polyethersulfone hollow fiber membranes for osmotic power generation, *Environmental Science Technology*, 48, 9898–9907.

Carmignani, G., Sitkiewitz, S., Webley, J.W., 2012, Recovery of of retrograde soluble solute for forward osmosis water treatment, *US Patent*, 13, 454–062.

Carrow, R.N., Duncan, R.R., 2012, Best management practices for saline and sodic turfgrass soils: assessment and reclamation, *CRC Press*, Florida, ISBN: 978–1–4398–1474–1: 108–109.

Cath, T.Y., Childress, A.E., Elimelech, M., 2006, Forward osmosis: Principles, applications, and recent developments, *Journal of Membrane Science*, 281, 70–87.

Cath, T.Y., Drewes, J.E., Lundin, C.D., 2009, *A Novel Hybrid Forward Osmosis Process for Drinking Water Augmentation Using Impaired Water and Saline Water Sources*, Water Research Foundation, Denver, CO., ISBN: 802–353–098.

Chakrabarti, C., 1995, Residual effects of long–term land application of domestic wastewater, Environment international, 21, 333–339.

Chang, H.M., Chen, S.S., Lu, M.Y., Duong, C.C., Nguyen, N.C., Chang, W.C., Ray, S.S., 2019, Mesophilic microfiltration–anaerobic osmotic membrane bioreactor–membrane distillation hybrid system for phosphorus recovery, *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 94 (4), 1230–1239.

Chen, L., Gu, Y., Cao, C., Zhang, J., Ngb, J. W., Tang, C., 2014, Performance of a submerged anaerobic membrane bioreactor with forward osmosis membrane for low–strength wastewater treatment, *Water Research*, 50, 114–123.

Chen, H., Changa, S., Guoa, Q., Hong, Y., Wu, P., 2016, Brewery wastewater treatment using an anaerobic membrane bioreactor, *Biochemical Engineering Journal*, 105, 321–331.

Chen, L., Hua, Q., Zhang, X., Chen, Z., Wang, Y., Liu, S., 2019, Effects of salinity on the biological performance of anaerobic membrane bioreactor, *Journal of Environmental Management*, 238, 263–273.

Cheng, Z.L., Lib, X., Chung, T.S., 2018, The forward osmosis-pressure retarded osmosis (FO-PRO) hybrid system: A new process to mitigate membrane fouling for sustainable osmotic power generation, *Journal of Membrane Science*, 559, 63–74.

Chekli, L., Phuntsho, S., Shon, H.K., Vigneswaran, S., Kandasamy, J., Chanan, A., 2012, A review of draw solutes in forward osmosis process and their use in modern applications, *Desalination and Water Treatment*, 43, (1-3), 167−184.

Chekli, L., Kim, Y., Phuntsho, S., Li, S., Ghaffour, N., Leiknes, T.O., Shon, H.K., 2017, Evaluation of fertilizer–drawn forward osmosis for sustainable agriculture and water reuse in arid regions, *Journal of Environmental Management*, 187, 137–145.

Chun Y., Mulcahy, D., Zou, L., Kim, I.S., 2017, A Short Review of Membrane Fouling in Forward Osmosis Processes, *Membranes*, 7(2), 3−23.

Choi, H.J., 2015, Effect of Mg–sericite flocculant for treatment of brewery wastewater, *Applied Clay Science*, 115,145–149.

Choi, Y.J., Choi, J.S., Oh H.J., Lee, S., Yang, D.R., Kim, J.H., 2009, Toward a combined system of forward osmosis and reverse osmosis for seawater desalination, *Desalination*, 247, 239–246.

Chun, Y., Qing, L., Sun, G., Bilad, M.R., Fanea, A.G., Chong, T.H., 2018, Prototype aquaporin-based forward osmosis membrane: Filtration properties and fouling resistance, *Desalination*, 445, 75–84.

Chung, T.S., Luo, L., Wan, C.F., Cui, Y., Amy, G., 2015, What is next for forward osmosis (FO) and pressure retarded osmosis (PRO), *Separation and Purification Technology*, 156, 856–860.

Cimdina, L.B., Borodajenko, N., 2012, *Research of Calcium Phosphates Using Fourier Transform Infrared Spectroscopy*, Infrared Spectroscopy – Materials Science, Engineering and Technology, Institute of General Chemical Engineering, Latvia.

Cohen, D., 2004, Mixing moves osmosis technology forward, *Chemical Processing Magazine*, 28, 1–20.

Cornelissen, E.R., Harmsena, D., Korteb, K.F., Ruikenb, C.J., Qinc, J.J., 2008, Membrane fouling and process performance of forward osmosis membranes on activated sludge, *Journal of Membrane Science*, 319, 158–168.

Cornelissen, E.R., Harmsen, D.J.H., Beerendonk, E.F., Qin, J.J., Kappelhof, J.W.M.N., 2011, Effect of draw solution type and operational mode of forward osmosis with lab-scale membranes and a spiral wound membrane module, *Journal of Water Reuse and Desalination*, 1 (3), 133–140.

Cronin, C., Lo, K.V., 1998, Anaerobic treatment of brewery wastewater using UASB reactors seeded with activated sludge, *Bioresource Technology*, 64, 33–38.

Çakmak, Ş., 2014, *İleri Osmoz/Membran Distilasyon Sisteminde Deniz Suyunun Seyreltilmesi ve Temiz Su Eldesi*, Yüksek Lisans Tezi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Gebze –Kocaeli.

Çığ, F. 2010, Mikrobiyolojik ve inorganik gübrelemenin bazı arpa (Hordeum vulgare L.) çeşitlerinde verim ve verim ile ilgili karakterlere etkilerinin araştırılması (Doktora Tezi), Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarla Bitkileri Anabilim Dalı, Van.

Çimrin, K.M., Bozkurt, M.A., Erdal, İ., 2000, *Kentsel Arıtma Çamurunun Tarımda Fosfor Kaynağı Olarak Kullanılması*, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Tarım Bilimleri Dergisi.

Dianou, D., Miyaki, T., Asakawa, S., Morii, H., Nagaoka, K., Oyaizu, H., Matsumoto, S., 2001, Methanoculleus chikugoensis sp. nov., a novel methanogenic archaeon isolated from paddy field soil in Japan, and DNA-DNA hybridization among Methanoculleus species, *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 51, 1663–1669.

Ding, Z., Bourven, I., Guibaud, G., Hullebusch, E.D., Panico, A., Pirozzi, F., Esposito, G., 2015, Role of extracellular polymeric substances (EPS) production in bioaggregation: application to wastewater treatment, Applied Microbiology and Biotechnology, 99, 883–905.

Ding, W., Li, Y., Bao, M., Zhang, J., Zhang, C., Lu, J., 2017, Highly permeable and stable forward osmosis (FO) membrane based on the incorporation of Al_2O_3 nanoparticles into both substrate and polyamide active layer, *The Royal Society of Chemistry*, 7, 40311–40320.

DPT, 2013, IX. Kalkınma Planı, Ankara.

Dubois, M.J., Gills, K.A., Hamilton, J.K., Reber, P.A., Smith, F., 1956, Colorimetric method for determination of sugars and related substances, *Analytical Chemistry*, 28, 350–356.

Duncan, l., Foster, E.M., 1968, *Effect of Sodium Nitrite, Sodium Chloride, and Sodium Nitrate on Germination and Outgrowth of Anaerobic Spores,* American Society for Microbiology, 16–2, 406–411.

Düring, R.A., Gäth, S., 2002, Utilization of Municipal Organic Wastes in Agriculture Where Do we Stand, Where will we go?, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 165, 544–556.

Doulia, D., Xiarchos, I., 2007, Ultrafiltration of micellar solutions of nonionic surfactants with or without alachlor pesticide, *Journal of Membrane Science*, 296, 58–64.

Edgar, R.C., 2011, UCHIME improves sensitivity and speed of chimera detection, *Bioinformatics*, 27 (16), 2194–2200.

EPA, 1992, *United States Environmental Protection Agency, Manual guidelines for water reuse*. U.S. Agency for International Development, EPA/625/R–92/004.

EPA, 2004, *United States Environmental Protection Agency, Guidelines for water reuse*, U.S. Agency for International Development, EPA/625/R-04/108.

EPA, 2012, *United States Environmental Protection Agency, Guidelines for water reuse*, U.S. Agency for International Development, EPA/600/R−12/618.

Elimelech, C., Baoxiami, M., 2010, Gypsum Scaling and Cleaning in Forward Osmosis: Measurements and Mechanisms, *Environmental Science and Technology*, 44, 2022–2028.

Eyvaz, M., 2016, Treatment of Brewery Wastewater with Electrocoagulation: Improving the Process Performance by Using Alternating Pulse Current, *International Journal of Electrochemical Science*, 11, 4988−5008.

Fakoya, M.B., Poll, M.M., 2013, Integrating ERP and MFCA systems for improved waste-reduction decisions in a brewery in South Africa, *Journal of Cleaner Production,* 40, 136−140.

Feachem, D.G., Bradley, D.J., Garelick, H., Mara, D.D., 1983, *Sanitation and Disease: Health Aspects of Excreta and Wastewater Management*, John Wiley and Sons, New York, 0-471, 90-94.

Flynn, M., Fisher, J., Borchers, B., 1998, *An Evaluation of Potential Mars Transit Vehicle Water Treatment Systems*, NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA.

Frank, B.S., 1972, Desalination of sea water, *US Patent*, 3, 670–897.

Fuchs, W., Binder, H., Mavrias, G., Braun R., 2003, Anaerobic treatment of wastewater with high organic content using a stirred tank reactor coupled with a membrane filtration unit, *Water Research*, 37, 902–908.

Gajaraj, S., 2017, Methane production improvement and associated methanogenic assemblages in bioelectrochemically assisted anaerobic digestion, *Biochemical Engineering Journal*, 117, 105–112.

Gadelha, G., Nawaz, M.S., Hankins, N.P., Khan, S.J., Wang, R., Tang, C.Y., 2014, Assessment of micellar solutions as draw solutions for forward osmosis, *Desalination*, 354, 97–106.

Garcia, H., Barros, A.S., Gonçalves, C., Gama, F.M., Gil, A.M., 2008, Characterization of dextrin hydrogels by FTIR spectroscopy and solid state NMR spectroscopy, *European Polymer Journal*, 44, 2318–2329.

Garcia, J.L., Ollivier, B., Whitman, W.B., 2006, The order methanomicrobiales. In "The Prokaryotes, *Springer*, 3, 208–230.

Gharbia, S.E., Lawson, P.A., Shah, H.N., Clark, D.R., Collins, M.D., 1992, Intrageneric relationships of members of the genus Fusobacterium as determined by reverse transcriptase sequencing of smallsubunit rRNA, *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology,* 41, 347–354.

Ge, Q., Su, J., Amy, G.L., Chung, T.S., 2012, Exploration of polyelectrolytes as draw solutes in forward osmosis processes, *Water Research* , 46, 1318–1326.

Ge, Q., Ling, M., Chung, T.S., 2013, Draw solutions for forward osmosis processes: Developments, challenges,and prospects for the future, *Journal of Membrane Science*, 442, 225–237.

Ge, Q., Chung, T.S., 2014, Oxalic acid complexes: Promising draw solutes for forward osmosis (FO) in protein enrichment, *Chemical Communications*, 51, 4854–4857.

Goatley, J.M., Maddox, V., Lang, D.V., Crouse, K.K., 1994, Tifgreen Bermudagrass Response to Late Season Application of Nitrogen and Potassium, *Agronomy Journal*, 86, 7–10.

Gu, Y., Chen, L., Ng, J.W., Lee, C., Chang, V.W., Tang, C.T., 2015, Development of anaerobic osmotic membrane bioreactor for low-strength wastewater treatment at mesophilic condition, *Journal of Membrane Science*, 490, 197–208.

Gürbüz, E., 2010, Antalya bölgesinde bazı sıcak iklim türlerinde renk kaybının önlenmesine sonbahar azot (N) gübrelemesinin etkisi (Yüksek Lisans Tezi), Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Peyzaj Mimarlığı Anabilim Dalı.

Gray, G.T., McCutcheon, J.R., Elimelech, M., 2006, Internal concentration polarization in forward osmosis" role of membrane orientation, *Desalination*, 197, 1–8.

Hamdan, M., Sharif, A.O., Derwish, G., Al–aibi, S., 2015, Draw solutions for Forward Osmosis process: Osmotic pressure of binary and ternary aqueous solutions of magnesium chloride, sodium chloride, sucrose and maltose, *Journal of Food Engineering*, 155, 10–15.

Hancock, N.T., Xu, P., Heil, D.M., Bellona, C., Cath, T.Y., 2011, Comprehensive bench–and pilot–scale investigation of trace organic compounds rejection by forward osmosis, *Environmental Science and Technology*, 45(19), 8483–8490.

Hau, N.T., Chen, S.S., Nguyen, N.C., Huang, K.Z., Ngo, H.H., Guo, W., 2014, Exploration of EDTA sodium salt as novel draw solution in forward osmosis process for dewatering of high nutrient sludge, *Journal of Membrane Science*, 455, 305–311.

He, Z., Geng, S., Wang, L., Cai, C., Wang, J., 2016, Improvement of mineral nutrient concentrations and pH control for the nitrite–dependent anaerobic methane oxidation process, *Separation and Purification Technology*, 162, 148–153.

Heo J., Boateng L.K., Flora J.R., Lee H., Her N., Park Y.G., Yoon Y., 2013, Comparison of flux behavior and synthetic organic compound removal by forward osmosis and reverse osmosis membranes, *Journal of Membrane Science*, 443, 69–82.

Heo, J., Chu, K.H., Her, N., Im, J., 2016, Organic fouling and reverse solute selectivity in forward osmosis: Role of working temperature and inorganic draw solutions, *Desalination*, 389, 162–170.

Hishinuma, F., 1969, Effects of Glycine and d–Amino Acids on Growth of Various Microorganisms, *Journal of Agricultural and Biological Chemistry*, 11, 1577–1586.

Hope, F. 1983, Rasen. VerlagEugenUlmer, Stuttgart, Germany, 216.

Holloway, R. W., Childress, A. E., Dennett, K. E., Cath, T. Y., 2007, Forward osmosis for concentration of anaerobic digester centrate, *Water Research*, 41, 4005–4014.

Holloway, R.W., Maltos, R., Vanneste, J., Cath, T. Y., 2015, Mixed draw solutions for improved forward osmosis performance, *Journal of Membrane Science*, 491, 121–131.

Hou, D., Lu, L., Sun, D., Ge, Z., Huang, X., Cath, T.Y., Ren, Z.J., 2017, Microbial electrochemical nutrient recovery in anaerobic osmotic membrane bioreactors, *Water Research*, 114, 181–188.

Hough, W.T., 1970, Process for Extracting Solvent from a Solution, *US Patent*, 3, 532–621.

Hu, T., Wang, X., Wang, C., Li, X., Ren, Y., 2017, Impacts of inorganic draw solutes on the performance of thin-film composite forward osmosis membrane in a microfiltration assisted anaerobic osmotic membrane bioreactor, *The Royal Society of Chemistry*, 7, 16057–16063.

Huang, Z., Ong, S.L., How, N.G., 2011, Submerged anaerobic membrane bioreactor for low-strength wastewater treatment: Effect of HRT and SRT on treatment performance and membrane fouling, *Water Research*, 45, 705–713.

Huang, H., 2012, Treatment of anaerobic digester effluents of nylon wastewater through chemical precipitation and a sequencing batch reactor process, *Journal of Environmental Management*, 101, 68–74.

Huang, L.Y., Lee, D.J., Lai, J.Y., 2015, Forward osmosis membrane bioreactor for wastewater treatment with phosphorus recovery, *Bioresource Technology*, 198, 418–423.

Huang, J., Long, Q., Xiong, S., Shen, L., Wang, Y., 2017, Application of poly (4-styrenesulfonic acid-co-maleic acid) sodium salt as novel draw solute in forward osmosis for dye-containing wastewater treatment, *Desalination*, 421, 40–46.

İnce, B.K., İnce, O., Anderson, G.K., Arayıcı, S., 2000, Assessment of biogas use as an energy source from anaerobic digestıon of brewerywastewater, *Water, Air, and Soil Pollution*, 126, 239–251.

Jacc Report, 1993, Polycarboxylate polymers as used in detergents, *Joint Assesment of Commodity Chemicals ECETOC*, 23, 1–58.

Janhom, T., Wattanachira, S., Pavasant, P., 2009, Characterization of brewery wastewater with spectrofluorometry analysis, *Journal of Environmental Management*, 90, 1184–1190.

Jamil, S., Jeong, S., Vigneswaran, S., 2016, Application of pressure assisted forward osmosis for water purification and reuse of reverse osmosis concentrate from a water reclamation plant, *Separation and Purification Technology*, 171, 182–190.

Jellinek, H.H.G., Masuda, H., 1981, Osmo-power: theory and performance of an osmo–power pilot plant, *Ocean Engineering*, 8, 103–128.

Jin, X., She, Q., Ang, X., Tang, C.Y., 2012, Removal of boron and arsenic by forward osmosis membrane: Influence of membrane orientation and organic fouling, *Journal of Membrane Science*, 389, 182–187.

Jin, B., Wang, S., Xing, L., Li, B., Peng, Y., 2016, Effect of salinity on enhancing waste activated sludge alkaline fermentation at different temperatures, *Water Resources*, 45, 18–27.

Junyou, Z., 2011, *Forward Osmosis Membrane Bioreactor for Water Reuse*, Thesis (Ms.C), Department of Civil And Environmental Engineering–National University Of Singapore.

Kang, I.J., Yoon, S.H., Lee, C.H., 2002, Comparison of the filtration characteristics of organic and inorganic membranes in a membrane-coupled anaerobic bioreactor, *Water Research*, 36, 1803–1813.

Kendall, M.M., Boone, D.R., 2006, The order Methanosarcinales. In "The Prokaryotes. A Handbook on the Biology of Bacteria, *Springer*, 3, 244–256.

Kim, S., 2014, Scale-up of osmotic membrane bioreactors by modeling salt accumulation and draw solution dilution using hollow−fiber membrane characteristics and operation conditions, *Bioresource Technology*, 165, 88–95.

Kim, Y., Chekli, L., Shim, W.G., Phuntsho S., Li., Ghaffour, N., Leiknes, T.O., Shon, H.K., 2016, Selection of suitable fertilizer draw solute for a novel fertilizer–drawn forward osmosis–anaerobic membrane bioreactor hybrid system, *Bioresource Technology*, 210, 26–34.

Kim, Y., Li, S., Chekli, L., Phuntsho, S., Ghaffour, N., Leiknes, T.O., Shon, H.K., 2017, Influence of fertilizer draw solution properties on the process performance and microbial community structure in a side-stream anaerobic fertilizer-drawn forward osmosis–ultrafiltration bioreactor, *Bioresource Technology*, 240, 149–156.

Klindworth, A., Pruesse, E., Schweer, T., Peplles, J., Quast, C., 2013, Evaluation of general 16S ribosomal RNA gene PCR primers for classical and next−generation sequencing−based diversity studies, *Nucleic Acids Resource*, 41, 1–8.

Kong, Y., Zheng, X., Chen, G.E., Xu, Z., Wu, H., Wang, Y., 2019, Effects of Organic Acids on the Performance of Cellulose Triacetate Forward Osmosis Membrane, *Polymer Engıneerıng And Scıence*, 59, 138−145.

Korenak, J., Nielsen, C.H., Buksek, H., Petrinic, I., 2019, Efficiency and economic feasibility of forward osmosis in textile wastewater treatment, *Journal of Cleaner Production*, 210 1483−1495.

Kurr, M., Huber, R.K., Konig, H., Jannasch, H.W., Fricke, H., Trincone, A., Kristjansson, J. K., Stetter, K.O., 1991, Methanopyrus kandleri, gen. and sp. nov. represents a novel group of hyperthermophilic methanogens, growing at 110^{O}C, *Archives of Microbiology*, 156, 239–247.

Kutbay, I., Akfırat, F.Ş., 2015, Mapping of Biochemical Constituents in Platanus acerifolia Leaves By Analytical Techniques, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*,195, 1719 – 1727.

Kütük, C.A., Çaycı, G., Baran, A., 1995, Çay Atıklarının Bitki Yetistirme Ortamı Olarak Kullanılabilme Olanakları, *Tarım Bilimleri Dergisi*, 1(1), 35-40.

Lee, K.L., Baker, R.W., Lonsdale, H.K., 1981, Membranes for power generation by pressure–retarded osmosis, *Journal of Membrane Science*, 8, 141–171.

Li, F. Xia, Q., Gao, Y., Cheng, Q., Ding, L., Yang, B., Tian, Q., Ma, C., Sand, W., Liu, Y., 2017, Anaerobic biodegradation and decolorization of a refractory acid dye by a forward osmosis membrane bioreactor, *Water Resource Technology*, 4, 272–280.

Linares, R., Li, Z., Quintanilla, V.Y., Li, Q., 2013, Cleaning protocol for a FO membrane fouled in wastewater reuse, *Desalination and Water Treatment*, 1, 3–4.

Ling, M.M., Wang, K.Y., Chung, T.S., 2010, Highly Water–Soluble Magnetic Nanoparticles as Novel Draw Solutes in Forward Osmosis for Water Reuse, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 49, 5869–5876.

Ling, M.M., Chung, T.S., Lu, X.M., Facile synthesis of thermo sensitive magnetic nanoparticles as smart draw solute in forward osmosis, *Chemical Communications*, 47, 10788–10790.

Liu, Y., Chang, S., Defersha, F.M., 2015, Characterization of the proton binding sites of extracellular polymeric substances in an anaerobic membrane bioreactor, *Water Research*, 78, 133–143.

Long, Q.W., Wang, Y., 2015, Sodium Tetraethylenepentamine Heptaacetate as Novel Draw Solute for Forward Osmosis—Synthesis, Application and Recovery, *Energies*, 8, 12917–12928.

Luo, W., Hai, F.I., Price, W.E., Elimelech, M., Nghiem, L.D., 2016, Evaluating ionic organic draw solutes in osmotic membrane bioreactors for water reuse, *Journal of Membrane Science*, 514, 636–645.

Lupti, N.A., Jahim, J.M., Mumtaz, T., Harun, S., 2016, Batch and continuous thermophilic hydrogen fermentation of sucroseusing anaerobic sludge from palm oil mill effluent via immobilisation technique, *Process Biochemistry*, 51, 297–307.

Lutchmiah, K., Verliefde, A.R.D., Roest, K., Rietveld, L.C., Cornelissen, E.R., 2014, Forward osmosis for application in wastewater treatment: a review, *Water Research*, 58,179–197.

Lowry, O.H., Rosebrough, N.J., Farr, A.L. and Randall, R.J., 1951, Protein measurement with the Folin Phenol Reagent, *The Journal of Biological Chemistry*, 193(1), 265-275.

Lv, L., Xu, J., Shan, B., Gao, C., 2017, Concentration performance and cleaning strategy for controlling membrane fouling during forward osmosis concentration of actual oily wastewater, *Journal of Membrane Science*, 523, 15–23.

Lyer, S., 2011, Systems and methods for forward osmosis fluid purification using cloud point extraction, *US Patent*, 802–1553.

Lyu, S., Chen, W., Zhang, W., Fan, Y., Jiao, W., 2016, Wastewater reclamation and reuse in China: Opportunities and challenges, *Journal of Environmental Science*, 39, 86–96.

Magesan, G.N., Williamsoni J.C., Sparlingi G.P., Schipperi L.A., Lloyd-Jonesi A., 1999, Hydraulic conductivity in soils irrigated with wastewaters of differing strengths: field and laboratory studies, *Australian Journal of Soil Research*, 37, 391–402.

Magesan, G.N., Williamson, J.C., Yeates, G.W., Lloyd-Jones, A.R.H., 2000, Wastewater C:N ratio effects on soil hydraulic conductivity and potential mechanisms for recovery, *Bioresource technology*, 71, 21–27.

Mahendran, B., Lin, H., Liao, B., Liss, S.N., 2010, Surface Properties of Biofouled Membranes from a Submerged Anaerobic Membrane Bioreactor after Cleaning, *Journal Of Environmental Engineering*, 10, 504–513.

Maintinguer, S.I., Lazaro, C.Z., Pachiega, R., Varesche, M.B.A., Oliveira, S.R.J., 2017, Hydrogen bioproduction with Enterobacter sp. isolated from brewery wastewater, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 152–160.

Mänttäri, A., Kallioinen, M., Pekkarinen, M., Nuortila-Jokinen, J., Nyström, M., 2007, Comparison of the performance of two different regenerated cellulose ultrafiltration membranes at high filtration pressure, *Journal of Membrane Science*, 294, 93–102.

Martinetti, C.R., Childressa, A.E., Cath, T.Y., 2009, High recovery of concentrated RO brines using forward osmosis and membrane distillation, *Journal of Membrane Science*, 31, 31–39.

Mazlan, N.M., Marchetti, P., Maples, H.A., Gu, B., Karan, S., Bismarck, A., Livingston, A.G., 2016, Organic Fouling Behaviour of Structurally and Chemically Different Forward Osmosis Membranes - A study of Cellulose Triacetate and Thin Film Composite Membranes, *Journal of Membrane Science*, 520, 247–261.

McCutcheon, J.R., Elimelech, M., 2006a, Influence of concentrative and dilutive internal concentration polarization on flux behavior in forward osmosis, *Journal of Membrane Science*, 284, 237–247.

McCutcheon, J.R., McGinnis, R.L., Elimelech, M., 2006b, Desalination by ammonia-carbon dioxide forward osmosis: Influence of draw and feed solution concentrations on process performance, *Journal of Membrane Science*, 278, 114–123.

McCormick, P., Pellegrino, J., Mantovani, F., Sarti, G., 2008, Water, salt, andethanol diffusion through membranes for water recovery by forward (direct) osmosis processes, *Journal of Membrane Science*, 325, 467–478.

McGinnis, R.L., 2002, Osmotic Desalination Process, US Patent, 639–1205.

McGinnis, R.L., McCutcheon, J.R., Elimelech, M., 2005, A novel ammonia–carbon dioxide forward (direct) osmosis desalination process, *Desalination*, 174, 1–11.

Mehall, B.J., Hull, R.J., Skogley, C.R. 1983, Cultivar variationin Kentucky bluegass: P and K nutritional factors, *Agronomy Journal*, 75, 767–772.

Mi, B., Elimelech, M., 2009, Gypsum Scaling and Cleaning in Forward Osmosis: Measurements and Mechanisms, *Environmental Science Technology*, 44, 2022–2028.

Mi, B., Elimelech, M., 2010, Organic fouling of forward osmosis membranes: Fouling reversibility and cleaning without chemical reagents, *Journal of Membrane Science*, 348, 337–345.

Miller, J.E., Evans, L.R., 2006, *Forward osmosis: A new approach to water purification and desalination*, Sandia Report–New Mexico, 4634, 2–52.

Mirkhalili, S.M., Mousavi, S.A., Abadi, A.R.S., Sadeghi, M., 2017, Preparation of mesh-reinforced cellulose acetate forward osmosis membrane with very low surface roughness, *Korean Journal of Chemical Engineering*, 34(12), 3170–3177.

Mussatto, S. I., Dragone, G., Roberto, I. C., 2006, Brewers spent grain: generation, characteristics and potential applications, *Journal of Cereal Science*, 43, 1–14.

Muyzer, G., De W., E.C., Utterlinden, A.G., 1993, Profiling of complex microbial populations by denaturing Gradient Gel Electrophoresis analysis of polymerase chain reaction−amplified genes coding for 16S rRNA, *Applied and Environmental Microbiology*, 59, 695–700.

Nataraj, S.K., Hosamani, K.M., Aminabhavi, T.M., 2006, Nanofiltration and reverse osmosis thin film composite membrane module for the removal of dye and salts from the simulated mixtures, *Desalination*, 249, 12–17.

Nawaz, M.S., Gadelha, G., Khan, S.J., Hankins, N., 2013, Microbial toxicity effects of reverse transported draw solute in the forward osmosis membrane bioreactor (FO-MBR), *Journal of Membrane Science*, 429, 323–329.

Nguyen, H.T., 2015, A newclass of draw solutions for minimizing reverse salt flux to improve forward osmosis desalination, *Science of the Total Environment*, 538, 129–136.

Neff, R.A, 1964, Solvent Extractor, *US Patent*, 3, 130−156.

Norton, B.D., Scherrenberg, S.M., Lier, J.B., 2013, Reclamation of used urban waters for irrigation purposes–A review of treatment technologies, *Journal of Environmental Management*, 122, 85–98.

Oral, N., Açıkgöz, E., 2001, Effects of Nitrogen Application Timing on Growth and Quality of a Turfgrass Mixture. *Journal of Plant Nutrition*, 24, 101-109.

Öztürk, İ., 2005, Atıksu arıtımının esasları, *T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı Yayınları*, 5, 1–450.

Özşafak, C., Öner, F., 2011, *Çim alan tesisi ve bakımı*, İ.B.B. Park ve Bahçeler Müdürlüğü, Çim Alan Yönetimi, 1, 479–497.

Pachiega, R., Rodrigues, M.F., Rodrigues, C.V., Sakamoto, I.K., Bernadete, M., Varesche, A., Oliveira, J.E.D., Maintinguer, S.I., 2019, Hydrogen bioproduction with anaerobic bacteria consortium from brewery wastewater, International Journal of Hydrogen Energy, 44, 155–163.

Papadopoulos, I., 1993, *Use of treated effluents for irrigation: I. Wastewater quality and quality guidelines*, Advanced Short Course on Sewage:Treatments–Practices–Management for Agriculture Use in The Mediterranean Countries, 283–320.

Parida, V., Ng, H.Y., 2013, Forward osmosis organic fouling: Effects of organic loading, calcium and membrane orientation, *Desalination*, 312, 88–98.

Petrovic ,A.M., 1990, The Fate of Nitrogeneous Fertilizers Applied to Turfgrass, *Journal of Environmental Quality*, 19, 1–14.

Phuntsho, S., 2011, A novel low energy fertilizer driven forward osmosis desalination for direct fertigation: Evaluating the performance of fertilizer draw solutions, *Journal of Membrane Science*, 375, 172–181.

Qin, D., Liu, Z., Sun, D.D., Song, X.X., Bai, H., 2015, A new nanocomposite forward osmosis membrane customdesigned for treating shale gas wastewater, *Scientific Reports – Nature*, 10, 1038–1053.

Rashed, M. N., 2011, Adsorption technique for the removal of organic pollutants from water and wastewater, *Organic pollutants–Monitoring risk and treatment*, 14, 167–194.

Rastgar, M., Bozorg, A., Shakeri, A., Sadrzadeh, M., 2019, Substantially improved antifouling properties inelectro-oxidative graphene laminate forward osmosis membrane, *Chemical Engineering Research and Design*, 141, 413–424.

Ray, S.S., Chen, S.S., Nguyen, N.C., Nguyen, H.T., Dan, N.P., Thanh, B.X., Trang, L.T., 2018, Exploration of polyelectrolyte incorporated with Triton-X 114 surfactant based osmotic agent for forward osmosis desalination, *Journal of Enviromental Management*, 209, 346–353.

Reja, V., 2010, ScreenClust: Advanced statistical software for supervised and unsupervised high resolution melting (HRM) analysis, *Methods*, 50 (4), 10–14.

Richey, D., 2012, *California Craft Brewing Industry: An Economic Impact Study*, Goldman School of Public Policy University of California, ISBN: 093–7506–117.

Rodrigues, F., 2005, *Sugar metabolism in yeasts: an overview of aerobic and anaerobic glucose catabolism*, Clinical Mycology Group, Life and Health Sciences Research Institute, 6, 101–120.

Rosenberg, M., Barki, M., Bar-Ness, R., Goldberg, S., 1991, Biofouling, *The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research*, 4 (1-3), 121-128.

Saaty, T.L., 2008, Decision making with the analytic hierarchy process, *International Journal of Services Sciences*, 1, 83–97.

Sakai, S., Imachi, H., Hanada, S., Ohashi, A., Harada, H., Kamagata, Y., 2008, Methanocella paludicola gen. nov., sp. nov., a methane-producing archaeon, the first isolate of the lineage 'Rice Cluster I', and proposal of the new archaeal order Methanocellales ord. nov., *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 58, 929–936.

Sakthivel, P.C., Kamra, D.N., 2012, Effect of sodium nitrate and nitrate reducing bacteria on in vitro methane production and fermentation with buffalo rumen liquor, *Journal of Animal Science*, 6, 812–817.

Sanjeevi, R., Abbasi, T., Abbasi, S.A., 2013, Role of calcium (II) in anaerobic sludge granulation and UASB reactor operation: A method to develop calcium–fortified sludge outside the UASB reactors, *Indian Journal of Biotechnology*, 12, 246–253.

Sato, N., Sato, Y., Yanase, S., 2017, Forward osmosis using dimethyl ether as a draw solute, *Desalination*, 349, 102–105.

Sawadogo, B., Konatéa, Y., Lesage, G., Djanni, H.M., Zaviska, P., Heran, M., Karambiri, H., 2018, Beer and soft drinks industry wastewater treatment using an anoxic-aerobic membrane bioreactor (MBR) coupling with nanofiltration in Sahelian context, *Desalination and Water Treatment*, 126, 32–39.

Shakeri, A., Salehi, H., Ghorbani, F., Amini, M., Naslhajian, H., 2019, Polyoxometalate based thin film nanocomposite forward osmosis membrane: Superhydrophilic, anti-fouling, and high water permeable, *Journal of Colloid and Interface Science*, 536, 328–338.

She, Q., Wang, R., Fane, A.G., Tang, C.Y., 2016, Membrane fouling in osmotically driven membrane processes: A review, *Journal of Membrane Science*, 499, 201–233.

Shi, X., Leong, K.Y., Ng, H.Y., 2017, Anaerobic treatment of pharmaceutical wastewater: A critical review, *Bioresource Technology*, 245, 1238–1244.

Sierra, J.D.M., Oosterkamp, M.M., Wang, W., Spanjers, H., Lier, J.B.V., 2018, Impact of long-term salinity exposure in anaerobic membrane bioreactors treating phenolic wastewater: Performance robustness and endured microbial community, *Water Research*, 141, 172–184.

Simate, G.S., 2011, The treatment of brewery wastewater for reuse: State of the art, *Desalination*, 273, 235–247.

Simate, G.S., 2015, *The Brewing Microbiology*, Woodhead Publishing, ISBN: 978-1-78242-331-7.

Sincik, M. 2004, Ak üçgül ile bazı buğdaygil çim türleri karışımlarında farklı azot dozlarının kompozisyon ve çim kalite kriterlerine etkileri (Doktora Tezi), Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarla Bitkileri Anabilim Dalı, Bursa.

Sills, M.J., Carrow, R.N,. 1983, Turfgrass growth, N use and water use under soil compaction and N fertilization, *Agron Journal*, 75, 488-492.

Smith, A., 2008, Effect of Glycine Propionyl–L–Carnitine on Aerobic and Anaerobic Exercise Performance, *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 18, 19–36.

Su, J., Chung, T.S., Helmer, B.J., Wit, J.S., 2012, Enhanced double–skinned FO membranes with inner dense layer for wastewater treatment and macromolecule recycle using Sucrose as draw solute, *Journal of Membrane Science*, 396, 92–100.

Sun, Y., Tian, J., Zhao, Z., Shi, W., Liu, D., Cui, F., 2016, Membrane fouling of forward osmosis (FO) membrane for municipal wastewater treatment: A comparison between direct FO and OMBR, *Water Research*, 104, 330–339.

Stone, M.L., Wilson, A.D., Harrup, M.K., Stewart, F.F., 2013, An initial study of hexavalent phosphazene salts as draw solutes in forward osmosis, *Desalination*, 312, 130–136.

Straub, A.P., Yip, N.Y., Elimelech, M., 2014, Raising the bar: increased hydraulic pressure allows unprecedented high power densities in pressure-retarded osmosis, *Environmental Science and Technology*, 1, 55–59.

Strauch, D., 1991, Survival of pathogenic micro–organisms and parasites in excreta, manure and sewage sludge, *Scientific and Technical Review of the Office International des Epizooties*, 10, 813–846.

Stuart, B., 2004, *Infared spectroscopy: fundamentals and applications*, Wiley, 4, 1–208.

Stuckey, D.C., 2012, Recent developments in anaerobic membrane reactors, *Bioresource Technology*, 122, 137–148.

Tan, C.H., Ng, H.Y., 2008, Modified models to predict flux behavior in forward osmosis in consideration of external and internal concentration polarizations, *Journal of Membrane Science*, 324, 209–219.

Thauer, R.K., Kaster, A.N., Seedorf, H., Buckel, W., Hedderich, R., 2008, Methanogenic archae: Ecologically relevant differences in energy conservation, *Nature Reviews Microbiology*, 6, 579–591.

Thomas, S., 2011, Differing effects of glycerin on anaerobic codigestion of mixed substrates in bench–scale assays and sub pilot–scale reactors, *Agricultural and Biosystems Engineering*, 519, 1–13.

Tinggang, L.,Renbi, B.,, Junxin, L., 2008, Distribution and composition of extracellular polymeric substances in membrane–aerated biofilm, *Journal of Biotechnology*, 135, 52–57.

Topçuoğlu, B., Önal, M.K., Arı, N., 2003, *Toprağa Uygulanan Kentsel Arıtma Çamurunun Domates Bitkisine Etkisi I. Bitki Besinleri ve Ağır Metal İçerikleri*, Akdeniz Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi.

Torres, A., Hemmelmann, A., Vergara, C., Jeison D., 2011, Application of two–phase slug–flow regime to control flux reduction on anaerobic membrane bioreactors treating wastewaters with high suspended solids concentration, *Separation and Purification Technology*, 79, 20–25.

Türemis, N., Kaya, Z., Özgüven, A., 1996, *Bazı Tarımsal Atıkların Kompost Yapmak Suretiyle Tekrar Kullanılma Olanakları*, Tarım - Çevre İliskileri Sempozyumu. Mersin–Türkiye.

Ünal, M., Katkat, A.V. 2003, *Bisküvi ve Şekerleme Sanayii Arıtma Çamurunun Toprak Özelliklerine ve Mısır Bitkisinin Kimi Mineral Madde İçeriği Üzerine Etkileri*, Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi.

Vázquez, S.G., Flynn, M., Mangado, J.R., Parodi, J., 2016, Flux recovery of a forward osmosis membrane after a fouling process, *Journal of NASA Ames Research Center*, 1, 19–33.

Votta, F., Barnett, S.M., Anderson, D.K., 1974, *Concentration of Industrial Waste by Direct Osmosis: Completion Report*; Providence, Rhode Island.

Vyrides I., 2009, Adaptation of anaerobic biomass to saline conditions: Role of compatible solutes and extracellular polysaccharides, *Enzyme and Microbial Technology*, 44, 46–51.

Wang, X., Wang, C., Tang, C.Y., Hu, T., Li, X., Ren, Y., 2017(a), Development of a novel anaerobic membrane bioreactor simultaneously integrating microfiltration and forward osmosis membranes for low strength wastewater treatment, *Journal of Membrane Science*, 527, 1–7.

Wang, X., Hu, T., Wang, Z., Li, X., Ren, Y., 2017(b), Permeability recovery of fouled forward osmosis membranes by chemical cleaning during a long–term operation of anaerobic osmotic membrane bioreactors treating low–strength wastewater, *Water Research*, 123, 505–512.

Wang, X., Zhang, J., Chang, W.C., She, Q., Tang, C.Y., 2018, Removal of cytostatic drugs from wastewater by an anaerobic osmotic membrane bioreactor, *Chemical Engineering Journal*, 339, 153–161.

Wang, H., Wang, X., Meng, F., Li, X., Ren Y., She, Q., 2019, Effect of driving force on the performance of anaerobic osmotic membrane bioreactors: New insight into enhancing water flux of FO membrane via controlling driving force in a two-stage pattern, *Journal of Membrane Science*, 569, 41–47.

Wang, Y., Fang, Z., Zhao, S., Ng, D., Zhang, J., Xie, Z., 2018, Dopamine incorporating forward osmosis membranes with enhanced selectivity and antifouling properties, *RSC Advances*, 8, 22469–22481.

Wehner, D.J., Martin, D.L., 1989, Melamine/Urea and Oxamide Fertilization of Kentucky Bluegrass, *Communications in The Soil Science and Plant Analysis*, 20, 1659–1673.

Williams, C.C., Ekerdt, J.G., 1993, Infared spectroscopic characterization of molydenum carbonyl species formed by ultraviolet photoreduction of silica–supported Mo (VI) in carbon monoxide, *Journal of Physical Chemistry*, 97, 6843–6852.

Wright, A.D.G., Pimm, C., 2003, Improved strategy for presumptive identification of methanogens using 16S riboprinting, *Journal of Microbiology Methods*, 55, 337–349.

Wrolstad, R.E., McDaniel, M.R., Durst, R.W., Micheals, N., Lampi, K.A., Beaudry, E.G., 1993, Composition and sensory characterization of red raspberry juice concentrated by direct-osmosis or evaporation, *Journal of Food Science*, 58, 633–637.

Wu, Y., Wang, X., Tay, M.Q.X., Oha, S., Yang, L., Tang, C., Cao, B., 2017, Metagenomic insights into the influence of salinity and cytostatic drugs on the composition and functional genes of microbial community in forward osmosis anaerobic membrane bioreactors, *Chemical Engineering Journal*, 326, 462–469.

Xia, S.,, Ruilin, Y., Zhang, X., Muzi, N., Yukun, W., Lijuan Y., Naiyun, G., 2015, Removal of Natural Organic Matter by Forward Osmosis Membrane: Flux Behaviour and Foulant Characterization, *Chemical Research in Chinese Universities*, 31(2), 308―314.

Xiangwen, S., Dangcong, P., Zhaohua, T., Xinghua, J., 2008, Treatment of brewery wastewater using anaerobic sequencing batch reactor (ASBR), *Bioresource Technology*, 99, 3182–3186.

Xiao, D., Tang, C.Y., Zhang, J., Lay, W.C.L., Wang, R., Fane, A.G., 2011, Modeling salt accumulation in osmotic membrane bioreactors: Implications for FO membrane selection and system operation, *Journal of Membrane Science*, 366 (1–2), 314–324.

Xiao, P., Li, J., Ren, Y., Wang, X., 2016, A comprehensive study of factors affecting fouling behavior inforward osmosis, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 499, 163–172.

Xue, W., Yamamoto, K., Tobino, T., 2016, Membrane fouling and long-term performance of seawater−driven forward osmosis for enrichment of nutrients in treated municipal wastewater, *Journal of Membrane Science*, 499, 555–562.

Xue, W., Ko, W.K., Chavalit, S., Praserthdam, P., Yamamoto, K., 2018, Binding TiO_2 nanoparticles to forward osmosis membranes via MEMO–PMMA–Br monomer chains for enhanced filtration and antifouling performance, *The Royal Society of Chemistry*, 8, 19024–19033.

Yaeli, J., 1992, Method and Apparatus for Processing Liquid Solutions of Suspensions articularly Useful in the Desalination of Saline Water, *US Patent*, 50, 98−575.

Yang, Q., Wang, K.Y., Chung, T.S., 2009, A novel dual-layer forward osmosis membrane for protein enrichment and concentration, *Separation and Purification Technology*, 69, 269–74.

Yazgan, M.E., 1991, *Peysaj Mimarlığında Çim Alanların Önemi ve Yapım Yöntemleri*, A.Ü.Z.F. Peysaj Mimarlığı Bölümü, Peysaj Mimarlığı Derneği Yayınları, 21, 29.

Yen, S.K., Haja, N.F.M., Su, M., Wang, K.Y., Chung, T.S., 2010, Study of draw solutes using 2–methylimidazole–based compoundsin forward osmosis, *Journal of Membrane Science*, 364, 242–252.

Yılmaz, M., Demiroğlu, G., Salman, A., Avcıoğlu, R. 2011, *Farklı dozlarda gübre uygulanan bir yeşil alanın bazı özelliklerinin belirlenmesi,* Türkiye IX. Tarla Bitkileri Kongresi, Bursa.

Yong, J.S., 2012, Coupled reverse draw solute permeation and water flux in forward osmosis with neutral draw solutes, *Journal of Membrane Science,* 392–393, 9–17.

Zhang, J., Loong, W.L.C., Chou, S., Tang, C., Wang, R., Fane, A.G., 2012, Membrane biofouling and scaling in forward osmosis membrane bioreactor, *Journal of Membrane Science*, 403–404, 8–14.

Zhang, Q., Jie, Y.W., Loong, W.L.C., Zhang, J., Fane, A.G., Kjelleberg, S., Rice, S.A., McDougald, D., 2014, Characterization of biofouling in a lab-scale forward osmosis membrane bioreactor (FOMBR), *Water Research*, 58, 141–151.

Zhang, X., Ning, Z., Wang, D.K., Costa, J.D.C., 2014, Processing municipal wastewaters by forward osmosis using CTA membrane, *Journal of Membrane Science*, 468, 269–275.

Zhang, H., Jiang, W., Cui, H., 2017, Performance of anaerobic forward osmosis membrane bioreactor coupled with microbial electrolysis cell (AnOMEBR) for energy recovery and membrane fouling alleviation, *Chemical Engineering Journal*,321, 375–383.

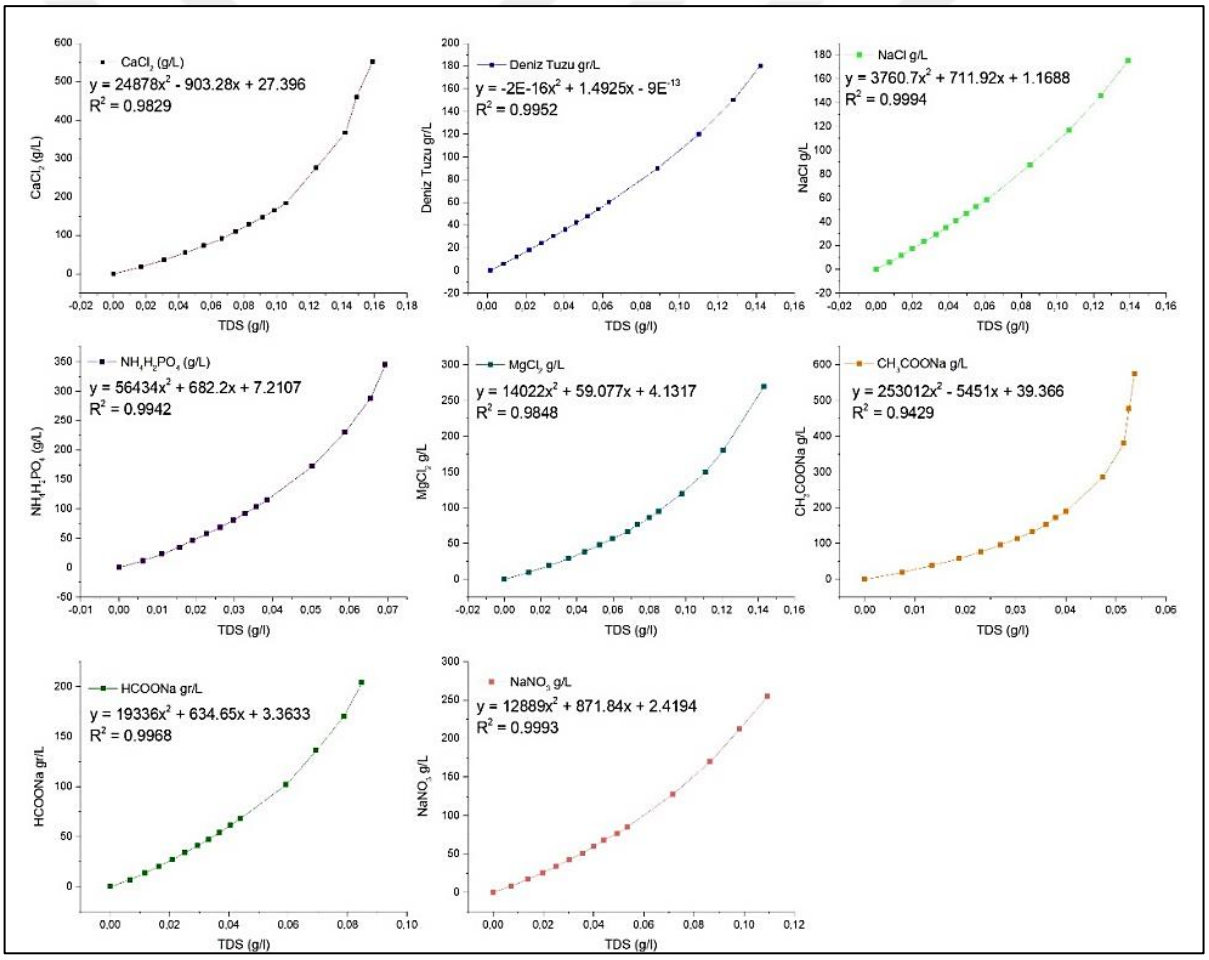
Zou, S., He, Z., 2016, Enhancing wastewater reuse by forward osmosis with self–diluted commercial fertilizers as draw solutes, *Water Research*, 99, 235–243.

Zupančič, G.D., Straqinbar, M., Ron, M., 2007, Treatment of brewery slurry in thermophilic anaerobic sequencing batch reactor, *Bioresource Technology*, 98, 2714–2722.

EKLER

EK1 – ÇÇ'lerin molarite ve TÇM kolerasyonları

Kesikli ve uzun süreli çalışmalarda İO prosesindeki J_w ve J_s değişimleri çalışma düzeneğimizde yer alan iletkenlik probları ve pompalar ile sağlanmaktadır. Pompaların dakika başına sirküle ettiği debi hacmi ve bu hacimde barındırdığı TÇM konsantrasyonu ve bunun ile birlikte ÇÇ'lerin akımdaki g/L ilişkisi her bir ÇÇ için yapılan yukarıdaki iletkenlik ve TÇM ölçümlerinin birbirleri ile ilişkilendirilmesi sonucu belirlenmiştir. Şekil EK1'de her bir ÇÇ türü için elde edilen TÇM –ÇÇ(g/L) korelasyonu ve formülü yer almaktadır.



Şekil EK1: ÇÇ'lerin TÇM (mg/L)–ÇÇ(g/L) kolerasyonları

EK2–AnOMBR sistemi için kurulan kütle denklikleri

Denklem 1:

AnOMBR sisteminde üst fazın sisteme geri devrettirilmesi kapsamında aşağıda yer alan kütle denkliği kullanılmıştır.

$$Reaktör\ iletkenlik\ değeri_{\ t} = \frac{\left(\text{üst } faz\ (L) \times \text{üst } faz\ iletkenlik\ değeri\ \left(\frac{mS}{cm}\right)\right) + (atıksu\ hacmi\ (L) \times besleme\ atıksuyu\ iletkenlik\ değeri\ (\frac{mS}{cm}))}{toplam\ hacim\ (L)}$$

Reaktör içerisinde 't' anında gerçekleşen iletkenlik değişimi yukarıda yer alan denklem ile hesaplanmıştır. Karışımdaki üst faz miktarı (%) reaktör iletkenlik değeri reaktör içerisindeki mevcut iletkenlik değerinden daha düşük olacak şekilde hesaplanmıştır. Aynı 't' anıda reaktör içerisindeki KOİ konsantrasyonu değişimi aşağıda yer alan kütle denkliği ile hesaplanmıştır.

$$Reaktör\ KOİ\ konsantrasyonu_{\ t} = \frac{\left(\text{üst } faz\ (L) \times \text{üst } faz\ KOİ\ kons.\ (mg/L)\right) + (atıksu\ hacmi\ (L) \times\ atıksuyu\ KOİ\ kons.\ (mg/L))}{toplam\ hacim\ (L)}$$

Denklem 2:

AnOMBR sisteminden alınan üst faz besleme olarak UF sistemine verilmiştir. UF sisteminden elde edilen konsantrenin AnOMBR sistemine geri devrettirilmesi durumunda aşağıda yer alan kütle denkliği kullanılmıştır.

$$Reaktör\ iletkenlik\ değeri_{\ t} = \frac{\left(konsantre\ (L) \times konsantre\ iletkenlik\ değeri\ \left(\frac{mS}{cm}\right)\right) + (atıksu\ hacmi\ (L) \times atıksu\ iletkenlik\ değeri\ \left(\frac{mS}{cm}\right) + çöken\ çamur\ hacmi\ (L)\ x\ çöken\ çamur\ iletkenlik\ değeri\ \left(\frac{mS}{cm}\right))}{toplam\ hacim\ (L)}$$

't' anında reaktör içerisindeki KOİ konsantrasyonu değişimi aşağıda yer alan kütle denkliği ile hesaplanmıştır.

$$Reaktör\ KOİ\ konsantrasyonu_{\ t} = \frac{\left(konsantre\ (L) \times konsantre\ KOİ\ kons.\ (mg/L)\right) + (atıksu\ hacmi\ (L) \times\ atıksu\ KOİ\ kons.\ \left(\frac{mg}{L}\right))}{toplam\ hacim\ (L)}$$

Denklem 3:

AnOMBR sisteminin reaktör 10 mS/cm ve 20 mS/cm iletkenlik üst sınır değerine kadar işletildiği düşünülerek, UF konsantresinin reaktöre geri devrettirilmesi durumunda aşağıda yer alan kütle denklemi kullanılarak 't' anındaki iletkenlik değeri değişimleri hesaplanmıştır.

$$Reaktör\ iletkenlik\ değeri_{\ t} = \frac{\left(konsantre\ (L) \times konsantre\ iletkenlik\ değeri\ \left(\frac{mS}{cm}\right)\right) + (atıksu\ hacmi\ (L) \times atıksu\ iletkenlik\ değeri\ \left(\frac{mS}{cm}\right) + çöken\ çamur\ hacmi\ (L)\ x\ çöken\ çamur\ iletkenlik\ değeri\ \left(\frac{mS}{cm}\right))}{toplam\ hacim\ (L)}$$

Konsantre (L): 1 L
Konsantre İletkenlik değeri (mS/cm): döngü sonunda elde edilen iletkenlik değeri (mS/cm) x UF konsantre etme yüzdesi (%)
Çöken Çamur hacmi (L) : 1 L
Atıksu Hacmi (L) : 4 L
Atıksu İletkenlik Değeri (mS/cm) : 5 mS/cm
Çöken Çamur iletkenlik değeri (mS/cm) x çöken çamur hacmi (L): (karışım iletkenlik değeri x toplam hacim) - (her döngü sonunda ölçülen üst faz iletkenlik değeri (mS/cm) x üst faz hacmi (L))

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	AHMET MURAT BACAKSIZ
Doğum Yeri	ŞAHİNBEY, GAZİANTEP
Doğum Tarihi	26.02.1989
Uyruğu	☑ T.C. ❒ Diğer:
Telefon	05057588444
E-Posta Adresi	ahmet.bacaksiz@ogr.edu.tr
Web Adresi	www.lbtec.com.tr



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ (ISPARTA
Fakülte	MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ
Bölümü	ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ
Mezuniyet Yılı	21.06.2011

Yüksek Lisans	
Üniversite	İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
Enstitü Adı	FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Anabilim Dalı	ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ
Programı	YÜKSEK LİSANS
Mezuniyet Yılı	09.06.2014

Doktora	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Enstitü Adı	Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Anabilim Dalı	Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Programı	Çevre Mühendisliği Programı

Makale ve Bildiriler

SCI, SSCI, AHCI İndekslerine Giren Dergilerde Yayınlanan Makaleler

Kaya Y., Bacaksız A.M., Bayrak H., Vergili I., Gönder Z.B., Hasar H., Yilmaz G., 2019, Investigation of membrane fouling in an anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) treating pharmaceutical wastewater, *Journal of Water Process Engineering*, 31, 100822.

Kaya Y., Bacaksız A.M., Gölebatmaz U. , Vergili İ., Özçelep Z.B., Yilmaz G., 2016, Improving the performance of an aerobic membrane bioreactor (MBR) treating pharmaceutical wastewater with powdered activated carbon (PAC) addition, *Bioprocess And Biosystems Engineering*, 39, 661–676.

Kaya Y., Bacaksız A.M., Bayrak H., Özçelep Z.B., Vergili İ., Hasar H., 2017, Treatment of chemical synthesis-based pharmaceutical wastewater in an ozonation-anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) system an ozonation-anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) system, *Chemical Engineering Journal*, 293–301.

Hakemli Kongre / Sempozyumların Bildiri Kitaplarında Yer Alan Yayınlar

Kaya Y., Bacaksız A.M., Gölebatmaz U. , Bayrak H., Vergili İ., Özçelep Z.B., 2016, The performance comparison of an anaerobic sequencing batch reactor and an anaerobic membrane reactor treating chemical synthesis-based pharmaceutical wastewater, 3rd International Congress on Water, Waste and Energy Management, Roma, ITALYA, 18-20 Temmuz 2016, syf. 48–49 (Poster sunum).

Kaya Y., Bacaksız A.M., Yilmaz G., Vergili İ., Özçelep Z.B., Hasar H., 2016, Characterization of microbial communities in AnMBR treating pharmaceutical wastewater, CITEM 2016–IX Ibero-American Congress on Membrane Science and Technology, Mexico City, MEKSİKA, 22–25 Mayıs 2016, syf. 22–25 (Sözlü Sunum) .

Kaya Y., Bacaksız A.M., Bayrak H., Gölebatmaz U. , Vergili İ., Özçelep Z.B., 2015, Anaerobik Membran Biyoreaktör (AnMBR) ile İlaç Endüstrisi Kimyasal Sentez Atıksularının Arıtılması ve Membran Kirlenmesinin Araştırılması, 4. Ulusal Membran Teknolojileri ve Uygulamalari Sempozyumu (MEMTEK 2015), Isparta, TÜRKİYE, 4–8 Ekim 2015, syf. 81–84(Sözlü Sunum) .

Kaya Y., Bayrak H., Bacaksız A.M., Gölebatmaz U. , Yilmaz G., Vergili İ., 2015, Membrane Fouling In An Anaerobic Membrane Bioreactor (AnMBR): A Comprasion Between Flat–Sheet And Hollow–Fiber Membranes, 1st International Conference on Environmental Science and Technology–ICOEST, Saraybosna, BOSNA HERSEK, 9–13 Eylül 2015, syf.20 (Sözlü Sunum).

Kaya Y., Bacaksız A.M., Bayrak H., Vergili İ., Gölebatmaz U. , Özçelep Z.B., 2015, Effect Of Pre–Ozonatıon On The Treatment Of Pharmaceutical Industry Wastewater In An Anaerobic Membrane Bioreactor (AnMBR), 1st International Conference on Environmental Science and Technology–ICOEST, Saraybosna, BOSNA HERSEK, 9–13 Eylül 2015, syf. 18 (Poster sunum) .

Vergili İ., Gölebatmaz U. , Bacaksız A.M., Kaya Y., Yilmaz G., Özçelep Z.B., 2015, Acidification Of Pharmaceutical Industry Wastewater in An Anaerobic Sequencing Batch Reactor (AnSBR), 1st International Conference on Environmental Science and Technology–ICOEST, Saraybosna, BOSNA HERSEK, 9–13 Eylül 2015, syf.17 (Poster sunum) .

Kaya Y., Gölebatmaz U. , Vergili İ., Yilmaz G., Bacaksız A.M., Özçelep Z.B., Hasar H., 2014, Treatment Of Pharmaceutical Industry Wastewater in An Anaerobic Membrane Bioreactor, CITEM 2014–IX Ibero–American Congress on Membrane Science and Technology, Santander, İSPANYA, 25-28 Mayıs 2014, syf. 118–119 (Poster sunum) .

Kaya Y., Yilmaz G., Bacaksız A.M., Gölebatmaz U. , Özçelep Z.B., Vergili İ., 2014, Improving The Performance Of An Aerobic Membrane Bioreactor (AMBR)

With Powdered Activated Carbon (PAC) Addition in The Treatment Of Pharmaceutical Wastewater, CITEM 2014–IX Ibero-American Congress on Membrane Science and Technology, Santander, İSPANYA, 25-28 Mayıs 2014, syf. 120–121(Poster sunum) .

Kaya Y., Gölebatmaz U. , Bacaksız A.M., Yilmaz G., Özçelep Z.B., Vergili İ., 2013, İlaç Atıksularının Membran Biyoreaktör Prosesi İle Arıtımında Toz Aktif Karbon (TAK) İlavesinin Sistem Performansına Etkisi, 3. Ulusal Membran Teknolojileri ve Uygulamaları Sempozyumu, Elazığ, TÜRKİYE, 26–27 Eylül 2013, syf. 68–71 (Sözlü Sunum).

Patentler

Kaya, Y., Aydıner, C., Bacaksız, A.M., Yılmaz, G., Vergili, İ., Özçelep, Z.B., "Anaerobik osmotik membran biyoreaktör", Başvuru Sahibi: İstanbul Üniversitesi, Türk Patent ve Marka Kurumu, Başvuru No: 2017/22848, Başvuru Tarihi: Aralık 2017.