

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**MEMBRAN TEKNOLOJİLER KULLANILARAK ARITILMIŞ  
KENTSEL ATIKSULARDAN SULAMA SUYU GERİ KAZANIMI**

**AYNUR YAŞAR**

**KOCAELİ 2016**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**MEMBRAN TEKNOLOJİLER KULLANILARAK ARITILMIŞ**  
**KENTSEL ATIKSULARDAN SULAMA SUYU GERİ KAZANIMI**

**AYNUR YAŞAR**

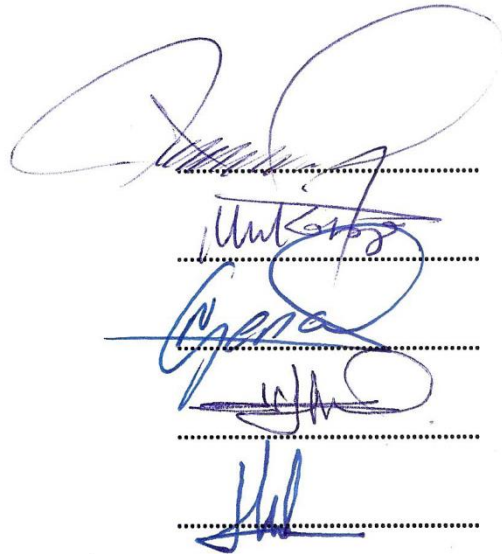
**Prof.Dr. H. Savaş AYBERK**  
Danışman, Okan Üniv.

**Prof.Dr. Mehmet KOBYA**  
Jüri Üyesi, Gebze Teknik Üniv.

**Doç.Dr. Nevim GENÇ**  
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

**Doç.Dr. Coşkun AYDINER**  
Jüri Üyesi, Gebze Teknik Üniv.

**Yrd.Doç.Dr. Esra CAN DOĞAN**  
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.



.....  
.....  
.....  
.....  
.....

**Tezin Savunulduğu Tarih: 17.02.2016**

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Lisans ve lisansüstü eğitimim boyunca ayrıca tez çalışmam süresince her türlü ilgi, destek ve yardımlarından dolayı değerli hocam ve danışmanım Prof. Dr. Hamza Savaş AYBERK'e en içten saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım. Doktora tezimle ilgili çalışma altyapısının teşkilinde, deneysel tasarım uygulamalarında ve çalışmamın başından sonuna kadar membran prosesler konusundakiengin bilgi birikimiyle katkılarını esirgemeyen, zorlukları aşmamda her daim destek olan, doktora ders aşamasında membran prosesleri bana sevdiren, ayrıca tez izleme komitesi üyesi olarak tez çalışmamı yakından izleyen, değerli hocam Doç. Dr. Coşkun AYDINER'e en içten saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım. Yüksek lisansımdan sonra uzun bir ara vermeme rağmen beni cesaretlendirerek her zaman yanımda olduğunu hissettiğim, çalışmam süresince her türlü zorluğun üstesinden gelmem için beni destekleyen, ayrıca tez izleme komitesi üyesi olarak tez çalışmamı yakından izleyen değerli dostum ve hocam Yrd. Doç. Dr. Esra Can DOĞAN'a en içten sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

Doktora eğitimim sırasında her türlü desteğinden ötürü değerli hocam Prof. Dr. Aykan KARADEMİR başta olmak üzere tüm KOÜ- Çevre Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine teşekkür ederim. Çalışmamda ICP-MS ve iyon kromatografi analizleri için gösterdiği özveri ve destekten ötürü değerli hocam Prof. Dr. İrfan YOLCUBAL'a çok teşekkür ederim. Ön deneysel çalışmalarda membran prosesler konusundaki önerileriyle katkı sunan değerli hocam Doç. Dr. Derya KÖSEOĞLU İMER'e, ayrıca deneysel tasarım ve ANOVA analizleri ile ilgili destek ve yardımlarından ötürü değerli hocam Doç. Dr. Zeren Beril ÖZÇELEP'e çok teşekkür ederim. Mikrobiyolojik analizler için Pakmaya Pbio-Pak Biyoteknoloji Merkezi imkanlarını sağlayan değerli hocam Doç. Dr. Mustafa TÜRKER'e, sevgili arkadaşım Kimya Mühendisi Gültaç BÜLBÜL ÇALIŞKAN'a, sevgili arkadaşım Uzman Biyolog Filiz YELKENCİ ALEMDAR'a ve tüm Pakmaya AR-GE ekibine de ayrı ayrı çok teşekkür ederim. Doktora eğitimim süresince tüm yardımları için sevgili arkadaşım Yrd. Doç. Dr. Demet ARSLANBAŞ' a çok teşekkür ederim. İnşaat Mühendisi Günay TANYERİ ve Jeofizik Yüksek Mühendisi Hasan ENDEŞ başta olmak üzere, doktora eğitimim süresince her türlü sıkıntımdaya desteğini esirgemeyen, KOÜ-Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı'nda görev yapan tüm çalışma arkadaşlarıma ayrı ayrı çok teşekkür ederim.

Laboratuvar ölçekli deneysel çalışmalarımdaya ve analizlerimde her türlü laboratuvar olanağı ve teknik destek için Gebze Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü'ne, çalışmamın bir ucundan tutup yardımlarını esirgemeyen sevgili arkadaşlarım Çevre Mühendisi Emine BİCAN ve Çiçek Püren AKBULUT'a, KOÜ-Çevre Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi Ali Oğuzhan NARCI'ya; GTÜ-Çevre Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi Yasemin Melek TİLKİ'ye çok teşekkür ederim. Ayrıca GTÜ-proje asistanları Tuba Nur YILMAZ'a, Şerif ÇAKMAK'a, Şeyda AKSU'ya, Yağmur GÖREN'e ve Esin BALCI'ya çok teşekkür ederim. Çalışma süresince gerekli olan kentsel atıksuyun temini konusunda yardım

ve desteğini esirgemeyen çalışma arkadaşlarım Aslıhan YİĞİT BAYLAN ve Msamettin AYDIN'a da çok teşekkür ederim.

Bu alışma finansal olarak Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir (n Deneysel çalışmanın desteklendiği Proje No: 2011/071-“Membran Prosesler ile Kentsel Atıksu Arıtma Tesisi ıkış Suyundan Ağır Metallerin Giderimi” başlıklı proje, Proje No: BAP 2013/30 - Doktora Tezi Destekleme Projesi). Doktora tezi destekleme projesinin süre uzatımı ile ilgili desteklerinden ötürü değerli hocalarım Prof. Dr. Bekir ÇAKIR, Prof. Dr. Sevil VELİ ve Prof. Dr. Elşen VELİ' ye çok teşekkür ederim.

Doktora eğitimim süresince beni destekleyen ve zorluklarla karşılaştığım her anda yardımlarını esirgemeyen ve burada ismini yazamadığım herkese ayrıca çok teşekkürler ederim.

Beni büyüten, yetiştiren, güvenleriyle her zaman yanımda olan ve bu eserin var olmasında beni destekleyen olmazsa olmazım canım annem ve babam Faika ve Hüseyin FİŞ'e, çalışmam sırasında yaşadığım her türlü sıkıntıda manevi destekleri için sevgili eşim Bülent YAŞAR'a, ablam Melahat FİŞ'e ve tüm aileme sonsuz minnet ve şükranlarımı sunarım. Doktora eğitimimin yeterlik sürecinde ailemize katılarak hayatıma anlam kazandıran, tez çalışmam sırasında kimi zaman ihmal ettiğim, yorucu günlerin ardından özlemle sarıldığım canım oğlum Ege Tuna YAŞAR, katkı o kadar büyük ki, bu eser seninle birlikte büyüdü, iyi ki varsın bitanem...

Şubat-2016

Aynur YAŞAR

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
TABLolar DİZİNİ .....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	ix
ÖZET.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
GİRİŞ .....	1
1. GENEL BİLGİLER .....	5
1.1. Kentsel Atıksular .....	5
1.2. Kentsel Atıksuların Geri Kazanımı/Yeniden Kullanımı .....	6
1.2.1. Kentsel atıksuların sulama suyu geri kazanımı ve yeniden kullanımı için arıtma seçenekleri .....	8
1.2.2. Sulama suyu geri kazanımı ve yeniden kullanımı ile ilgili ulusal ve uluslararası mevzuat.....	10
1.2.2.1. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği .....	10
1.2.2.2. Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı rehberi .....	15
1.2.2.3. Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü rehberi .....	17
1.2.2.4. Dünya Sağlık Örgütü rehberi .....	19
1.3. Membran Teknolojiler.....	21
1.3.1. Tarihçe.....	21
1.3.2. Membran filtrasyonu ve filtrasyon teknikleri.....	23
1.3.3. Membran seçimini ve performansını etkileyen faktörler .....	25
1.3.4. Basınç sürücülü membran teknolojiler.....	28
1.3.4.1. Mikrofiltrasyon (MF).....	30
1.3.4.2. Ultrafiltrasyon (UF) .....	32
1.3.4.3. Nanofiltrasyon (NF).....	33
1.3.4.4. Ters ozmoz (TO).....	35
1.3.5. Membran kirlenmesi ve modelleri .....	36
1.3.5.1. Membranlarda akı azalması .....	39
1.3.5.2. Kütle taşınımı ve kirlenme dirençleri .....	40
1.3.5.3. Konsantrasyon polarizasyonu ve tıkanma .....	41
1.3.5.4. Gözenek tıkanma modelleri .....	42
1.4. Kentsel Atıksuların Geri Kazanımı, Yeniden Kullanımı ve Membran Teknoloji Uygulamaları.....	44
1.5. Deneysel Tasarım (Design of Experiment-DoE) ve ANOVA (Analysis of Variance) Analizi.....	60
1.5.1. Taguchi deneysel tasarım yöntemi .....	62
1.5.2. Yüzey yanıt yöntemi .....	66
1.5.3. ANOVA (analysis of variance) analizi .....	68
2. MALZEME VE YÖNTEM.....	69

2.1. Malzeme .....	69
2.1.1. Membranlar .....	69
2.1.2. Çapraz akış membran ünitesi .....	70
2.1.3. Kentsel arıtılmış atıksu ve su tüketimi .....	70
2.2. Yöntem .....	72
2.2.1. Kentsel ham ve arıtılmış atıksu karakterizasyonu .....	72
2.2.2. Analitik yöntemler.....	75
2.2.3. Proses performans analizleri .....	75
2.2.4. Deneysel tasarım çözümlenmeleri .....	76
2.2.4.1. Taguchi deneysel tasarım çözümlenmeleri.....	76
2.2.4.2. Yüzey yanıt yöntemi ve ANOVA hesaplamaları .....	79
2.2.5. Akı kayıpları ve membran kirlenme direnci ile ilgili hesaplamalar.....	83
3. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	84
3.1. Ön Deneysel Çalışmalara Ait Bulgular .....	84
3.2. UF ve NF Proseslerinde En İyi Filtrasyon Şartlarının Belirlenmesi .....	92
3.2.1. UF ve NF deneylerinde akı-zaman değişimleri.....	94
3.2.2. Taguchi sonuçları .....	95
3.2.3. Değişkenlerin proses performansı üzerindeki etkisi .....	98
3.2.3.1. UF deneylerinde değişkenlerin etkisi .....	98
3.2.3.2. NF deneylerinde değişkenlerin etkisi .....	99
3.2.4. UF ve NF deneylerinde yüzey yanıt yöntemi-ANOVA analizleri .....	100
3.2.4.1. UF deneylerinde yüzey yanıt yöntemi -ANOVA analizleri.....	101
3.2.4.2. NF deneylerinde yüzey yanıt yöntemi -ANOVA analizleri.....	106
3.2.5. Doğrulama deneyleri .....	111
3.2.6. UF ve NF proseslerinin değerlendirilmesi .....	114
3.3. Bütünleşik Membran Sistemleri Deneyleri .....	121
3.3.1. UF/TO bütünleşik membran sistemleri deneyleri .....	121
3.3.2. NF <sub>gevşek</sub> /TO bütünleşik membran sistemleri deneyleri.....	129
3.3.3. UF/ NF <sub>gevşek</sub> ve UF/ NF <sub>sıkı</sub> bütünleşik membran sistemleri deneyleri .....	136
3.3.4. Bütünleşik membran sistemlerinin karşılaştırılması .....	142
3.4. Akı Kayıpları ve Membran Kirlenme Dirençlerinin Belirlenmesi.....	148
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	151
KAYNAKLAR .....	162
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER .....	171
ÖZGEÇMİŞ .....	172

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Membran ayırma mekanizmasının şematik gösterimi .....	23
Şekil 1.2.	Basınç sürücülü filtrasyon teknikleri arasındaki fark .....	24
Şekil 1.3.	Membran yüzeyinde tutulan parçacıklara etki eden kuvvetler .....	25
Şekil 1.4.	Basınç sürücülü membran teknolojilerdeki fonksiyon dağılımı .....	30
Şekil 1.5.	Ozmoz ve ters ozmoz teknolojileri .....	35
Şekil 1.6.	Akı azalmasının şematik gösterimi .....	39
Şekil 1.7.	Membran kesitinde meydana gelen direnç türleri.....	40
Şekil 1.8.	Konsantrasyon polarizasyonunun şematik gösterimi .....	41
Şekil 1.9.	Gözenek tıkanma modellerine ait kirlenme mekanizmalarının şematik gösterimi .....	43
Şekil 1.10.	Taguchi deneysel tasarım yönteminin (DoE) aşamalarını içeren şematik gösterim .....	65
Şekil 2.1.	Deney düzeneği-çapraz akış membran ünitesi.....	70
Şekil 2.2.	Kocaeli Üniversitesi Umuttepe Yerleşkesi Atıksu Arıtma Tesisi (AAT) akım şeması .....	71
Şekil 3.1.	Ön deneysel çalışmalarda UF membranlarında ve LFC3 TO membranında saf su için zamana karşı akı değişimleri .....	85
Şekil 3.2.	Kentsel atıksu arıtma tesisi ikincil arıtma çıkış suları için zamana karşı akı değişimleri, (a) UF membranları, b) SI, SII ve SIII bütünleşik membran sistemleri .....	86
Şekil 3.3.	LFC3 membranı ile farklı basınçlarda yapılan deneylerde elde edilen J-ΔP değişimleri .....	87
Şekil 3.4.	UF ve NF deneylerinde akı-zaman değişimleri (a) UF Deneyleri, (b) NF Deneyleri.....	94
Şekil 3.5.	UF deneylerinde süzüntü akıları (J) ve kirlenici madde konsantrasyonlarına ilişkin değişken seviyelerinin ana etkileri .....	97
Şekil 3.6.	NF deneylerinde süzüntü akıları ile kirlenici madde giderim verimlerine ilişkin değişken seviyelerinin ana etkileri .....	98
Şekil 3.7.	UF deneylerinde değişkenler ve iç etkileşimlerinin rölatif etkileri .....	107
Şekil 3.8.	NF deneylerinde değişkenler ve iç etkileşimlerinin rölatif etkileri .....	112
Şekil 3.9.	UP150, NF90 ve NP010 membranları doğrulama deneylerine ait akı-zaman değişimleri.....	113
Şekil 3.10.	UF/TO bütünleşik membran sistemleri deneylerinde akı-zaman değişimleri (a) UP150/LFC3, (b) UP150/CPA3, (c) UP150/TFC .....	123
Şekil 3.11.	NFgevşek/TO bütünleşik membran sistemleri deneylerinde akı-zaman değişimleri (a) NP010/LFC3, (b) NP010/CPA3, (c) NP010/TFC .....	130
Şekil 3.12.	UF/NF <sub>gevşek</sub> ve UF/NF <sub>sıkı</sub> bütünleşik membran sistemleri deneylerinde akı-zaman değişimleri (a) UP150/NP010, (b) UP150/NF90 .....	137

Şekil 3.13.	Bütünleşik membran sistemlerinde KOİ ve TÇM giderim verimleri .....	144
Şekil 3.14.	Bütünleşik membran sistemlerinde AKM ve bulanıklık giderim verimleri .....	145
Şekil 3.15.	Bütünleşik membran sistemlerinde TN ve TP giderim verimleri .....	145
Şekil 3.16.	Bütünleşik membran sistemlerinde iletkenlik giderim verimleri ve SAR değerleri .....	146
Şekil 3.17.	Bütünleşik membran sistemlerinde sodyum ve kalsiyum giderim verimleri .....	147
Şekil 3.18.	Bütünleşik membran sistemlerinde potasyum ve magnezyum giderim verimleri .....	147
Şekil 3.19.	Bütünleşik membran sistemlerinde sülfat ve fosfat giderim verimleri .....	147
Şekil 3.20.	Bütünleşik membran sistemlerinde nitrat azotu ve nitrit giderim verimleri .....	148
Şekil 3.21.	Bütünleşik membran sistemlerinde klorür ve civa giderim verimleri .....	148



## TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1.1.	Sulama suyu üretimi için uygulanan arıtma teknolojileri.....	9
Tablo 1.2.	Sulama suyu amaçlı yeniden kullanım için ulusal standart değerler özeti.....	12
Tablo 1.3.	(USEPA, 2004) rehberine göre suyun kentsel ve tarımsal yeniden kullanımını için yönergeler (Tablo 4-13).....	18
Tablo 1.4.	(WHO, 1989) rehberine göre tarımda kullanılacak atıksuyun mikrobiyolojik kalitesi .....	20
Tablo 1.5.	Sulama suyu amaçlı yeniden kullanım için uluslararası standart değerler özeti .....	22
Tablo 1.6.	Membran teknolojilerin sürücü kuvvetlere göre sınıflandırılması .....	29
Tablo 1.7.	Gözenek tıkanması modellerine ait denklemler.....	43
Tablo 1.8.	Taguchi deneysel tasarımı L <sub>9</sub> ortogonal dizini .....	64
Tablo 2.1.	Membranlara ilişkin teknik bilgiler .....	69
Tablo 2.2.	Kocaeli Üniversitesi Umuttepe Yerleşke' sinde su tüketimleri, 2013 .....	71
Tablo 2.3.	Kentsel arıtılmış atıksu karakterizasyonu .....	73
Tablo 2.4.	Kentsel atıksu arıtma tesisi giriş ve çıkış suyunda ağır metal ve toksik element konsantrasyonları, 2012.....	74
Tablo 2.5.	UF ve NF prosesleri için proses değişken seviyeleri.....	77
Tablo 2.6.	UF ve NF proseslerinde uygulanan L <sub>9</sub> Taguchi deneysel tasarım tablosu .....	77
Tablo 2.7.	%95 güven seviyesi için F tablosu ( $\alpha=0,05$ ).....	82
Tablo 3.1.	Konvansiyonel parametreler için SI, SII ve SIII sistemleri sonrasında elde edilen analiz sonuçları ve giderim verimi değerleri .....	89
Tablo 3.2.	Ağır metal ve toksik elementler için SI, SII ve SIII sistemleri sonrasında elde edilen analiz sonuçları ve giderim verimleri .....	93
Tablo 3.3.	UF ve NF deneylerinde elde edilen sonuçlar.....	96
Tablo 3.4.	UF ve NF deneylerinde proses performans parametrelerine göre S/N oranları.....	96
Tablo 3.5.	UF deneylerinde akı (J) değerleri için ANOVA analizi sonuçları.....	101
Tablo 3.6.	UF deneylerinde iletkenlik için ANOVA analizi sonuçları.....	102
Tablo 3.7.	UF deneylerinde SAR için ANOVA analizi sonuçları .....	103
Tablo 3.8.	UF deneylerinde bulanıklık için ANOVA analizi sonuçları.....	103
Tablo 3.9.	UF deneylerinde TN için ANOVA analizi sonuçları.....	104
Tablo 3.10.	UF deneylerinde TP için ANOVA analizi sonuçları .....	105
Tablo 3.11.	UF deneylerinde nitrat için ANOVA analizi sonuçları .....	105
Tablo 3.12.	NF deneylerinde akı (J) değerleri için ANOVA analizi sonuçları.....	108

Tablo 3.13.	NF deneylerinde iletkenlik giderim verimi için ANOVA analizi sonuçları .....	108
Tablo 3.14.	NF deneylerinde bulanıklık giderim verimi için ANOVA analizi sonuçları .....	109
Tablo 3.15.	NF deneylerinde TN giderim verimi için ANOVA analizi sonuçları .....	110
Tablo 3.16.	NF deneylerinde TP giderim verimi için ANOVA analizi sonuçları .....	110
Tablo 3.17.	Doğrulama deneyi sonuçları, hesaplanan değerler ve güven aralıkları .....	114
Tablo 3.18.	UF ve NF proseslerinin ulusal standartlara göre konvansiyonel parametreler bakımından karşılaştırılması .....	115
Tablo 3.19.	UF ve NF proseslerinin ulusal ve uluslararası standartlara göre ağır metal ve toksik elementler bakımından karşılaştırılması .....	120
Tablo 3.20.	UF/TO bütünlük membran sistemlerinde deney başı ( $t_0$ ) ve deney sonu ( $t_{son}$ ) elde edilen analiz sonuçları ve giderim verimleri .....	124
Tablo 3.21.	NF <sub>gevşek</sub> /TO bütünlük membran sistemlerinde deney başı ( $t_0$ ) ve deney sonu ( $t_{son}$ ) elde edilen analiz sonuçları ve giderim verimleri .....	132
Tablo 3.22.	UF/NF <sub>gevşek</sub> ve UF/NF <sub>sıkı</sub> bütünlük membran sistemlerinde deney başı ( $t_0$ ) ve deney sonu ( $t_{son}$ ) elde edilen analiz sonuçları ve giderim verimleri .....	138
Tablo 3.23.	Bütünlük membran sistemlerinin performans bakımından karşılaştırılması .....	143
Tablo 3.24.	UF ve NF prosesleri ile bütünlük membran sistemlerinde en iyi filtrasyon koşullarındaki akı kayıpları ve membran kirlenme dirençleri .....	149
Tablo 4.1.	Tek kademe ve bütünlük membran sistemlerinin AATTUT sulama suyu kriterleri açısından değerlendirilmesi .....	158

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

% p	: Rölatif etki değeri
% p <sub>(X1)</sub>	: X1 değişkeninin rölatif etki değeri
(X1) <sub>a</sub>	: X1 değişkeninin a seviyesindeki deney sonuçlarının toplamı
$\overline{(X1)}_a$	: X1 değişkeninin a seviyesindeki deney sonuçlarının ortalaması
$\overline{(X2)}_b$	: X2 değişkeninin b seviyesindeki deney sonuçlarının ortalaması
$\overline{(X3)}_c$	: X3 değişkeninin c seviyesindeki deney sonuçlarının ortalaması
$\overline{(X4)}_d$	: X4 değişkeninin d seviyesindeki deney sonuçlarının ortalaması
[Ca <sup>+2</sup> ]	: Kalsiyum konsantrasyonu, (meq/L)
[Mg <sup>+2</sup> ]	: Magnezyum konsantrasyonu, (meq/L)
[Na <sup>+</sup> ]	: Sodyum konsantrasyonu, (meq/L)
μ	: Süzütünün (akışkanın) viskozitesi, (Pa.sn)
A	: Etkili membran alanı
a,b,c,d	: X1, X2, X3, X4 değişkenleri için optimum seviyeler
C <sub>b</sub>	: Besleme çözeltisindeki kirletici madde konsantrasyonu
C <sub>s</sub>	: Süzüntüdeki kirletici madde konsantrasyonu
dV/dt	: Süzüntü akış hızı
F	: İstenen güvenilirlik düzeyi için F tablosundaki değer
F <sub>(X1)</sub>	: X1 değişkeninin F oranı
G.A	: Güven aralığı
J	: Süzüntü akışı, (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .sn) veya (L/m <sup>2</sup> .sa)
J <sub>0</sub>	: Temiz membranın saf su akışı veya ilk süzüntü akışı, (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .sn) veya (L/m <sup>2</sup> .sa)
k	: Kütle transfer katsayısı
k <sub>(X1)</sub>	: X1 değişkeninin seviye sayısı
m	: Tüm faktörlerin serbestlik dereceleri toplamı
MSS <sub>(X1)</sub>	: X1 değişkenine ait ortalama kareler toplamı
MSS <sub>e</sub>	: Hatanın ortalama kareler toplamı
M <sub>T</sub>	: Membran tipi
n	: i sayılı deneye ait tekrar sayısı
N	: Toplam deney sayısı
n <sub>(X1)a</sub>	: X1 değişkeninin a seviyesindeki deney sayısı
P	: Deney sonucunun yüzdellik değeri
P <sub>(X1)</sub>	: X1 değişkeninin saf toplam değeri
P-pure sum	: Saf toplam değeri
q	: Filtrasyon sabiti
Q <sub>b</sub>	: Besleme suyu debisi
Q <sub>k</sub>	: Konsantre kısmın debisi
Q <sub>s</sub>	: Süzüntü kısmın debisi
R(%)	: Kirletici madde giderim verimi
R <sub>a</sub>	: Adsorplanma direnci
R <sub>Bulanıklık</sub>	: Bulanıklık giderim verimi
R <sub>cp</sub>	: Konsantrasyon polarizasyon direnci
R <sub>EC</sub>	: İletkenlik giderim verimi

$R_g$	: Jel polarizasyon direnci
$R_k$	: Membran kirlenme direnci, ( $m^{-1}$ )
$R_m$	: Membran direnci, ( $m^{-1}$ )
$R_p$	: Por direnci
$R_T$	: Membran filtrasyonun toplam direnci, ( $m^{-1}$ )
$R_{TN}$	: Toplam azot giderim verimi
$R_{TP}$	: Toplam fosfor giderim verimi
$S$	: Doğrulama deneyindeki tekrar sayısı
$S/N$	: Signal/Noise Ratio (İşaret/Gürültü Oranı)
$sd$	: Serbestlik derecesi
$sd_{(X1)}$	: X1 değişkenine ait serbestlik derecesi
$sd_e$	: Hatanın serbestlik derecesi
$SS_{(X1)}$	: X1 değişkeninin kareler toplamı
$SS_e$	: Hataya ait kareler toplamı
$SS_T$	: Toplam kareler toplamı
$t$	: Filtrasyon süresi
$T$	: Sıcaklık
$T$	: Tüm deney sonuçlarının toplam değeri
$v$	: Çapraz akış hızı
$V$	: Toplam süzüntü hacmi, ( $m^3$ )
$V_e$	: Hataya ait varyans
$V_f$	: Başlangıçtaki besleme hacmi, (L)
$V_r$	: Filtrasyon sırasındaki konsantre hacmi, (L)
$X1, X2, X3, X4$	: Proses değişkenleri
$y$	: Membranda geri kazanım faktörü
$y_a$	: a sayılı deneye ait deney sonucu
$y_i$	: i sayılı deneye ait deney sonucu
$Y_{opt}$	: Optimum koşullarda hesaplanan performans istatistiği değeri
$\alpha$	: Güvenilirlik düzeyi
$\Delta P$	: Membran geçiş basıncı, (Pa) veya (bar)
$\Omega(\text{dB})$	: Yüzelik değerin omega dönüşümü ile bulunan desibel değeri

### Kısaltmalar

AAT	: Atıksu Arıtma Tesisi
AATTUT	: Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği
Adj SS	: Adjusted Sum of Squares (Düzeltilmiş kareler toplamı)
Adj MS	: Adjusted Mean Squares (Düzeltilmiş ortalama kareler toplamı)
AKM	: Askıda Katı Madde
ANOVA	: Analysis of Variance (Varyans Analizi)
as	: Standarttan Alt Seviyede
BOİ <sub>5</sub>	: Biyolojik Oksijen İhtiyacı
DoE	: Design of Experiment (Deneysel Tasarım)
EC	: Electrical Conductivity (Elektriksel İletkenlik)
FAO	: Food and Agriculture Organization of the United Nations (Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü)
KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı

MF	: Mikrofiltrasyon
MWCO	: Moleküler Weight Cut-Off (Moleküler Ağırlık Engelleme Sınırı)
NF	: Nanofiltrasyon
öy	: Ölçüm Yapılamamıştır
PES	: Polietersülfon
PTFC	: Poliamid İnce Film Kompozit
SAR	: Sodyum Adsorpsiyon Oranı
SS	: Sum of Squares (Kareler Toplamı)
sy	: İlgili Standartta Sınır Değer Yoktur
TAKM	: Toplam Askıda Katı Madde
TÇM	: Toplam Çözünmüş Madde
tem	: Tespit Edilemez Miktar/ Tespit Edilememiştir
TN	: Toplam Azot
TP	: Toplam Fosfor
TO	: Ters Ozmoz
UF	: Ultrafiltrasyon
us	: Standarda Uygun Seviyede
USEPA	: United States Environmental Protection Agency (Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı)
ys	: Standarttan Yüksek Seviyede
WHO	: World Health Organization (Dünya Sağlık Örgütü)

## MEMBRAN TEKNOLOJİLER KULLANILARAK ARITILMIŞ KENTSEL ATIKSULARDAN SULAMA SUYU GERİ KAZANIMI

### ÖZET

Membran proseslere dayalı ileri arıtma teknolojileri ile kentsel arıtılmış atıksulardan sulama suyu geri kazanımı ve atıksuların yeniden kullanımı yaygınlaşmaktadır. Bu çalışmada, ultrafiltrasyon (UF), nanofiltrasyon (NF) ve ters ozmoz (TO) membran teknolojileri uygulanarak, biyolojik arıtılmış kentsel atıksulardan kentsel ve tarımsal sulama için ulusal/uluslararası mevzuata uygun sulama suyu eldesi ve etkin su geri kazanımı sağlanması amaçlanmıştır. Bu bağlamda lab-ölçek çapraz akış membran ünitesinde, kentsel ikincil arıtma çıkış sularına, UF ve NF prosesleri öncelikle ayrı daha sonra TO prosesi ile bütünleşik olarak uygulanmıştır. Çalışmanın birinci aşamasında; bütünleşik sistemlerin etkinliğini belirlemeye yönelik UF/TO bütünleşik membran sistemleri ön deneysel çalışmaları yürütülmüştür. İkinci aşamada; Taguchi yöntemi deneysel tasarım şartlarında üç farklı UF ve NF membranı ile ikincil arıtma çıkış suları ayrı ayrı filtrasyona tabi tutularak, dört farklı proses değişkeninin proses performans parametrelerine etkileri incelenmiştir. UF ve NF prosesleri için optimum filtrasyon koşullarının belirlendiği bu aşamada yüzey yanıt yöntemi aracılığıyla ANOVA analizleri yapılmıştır. Üçüncü aşamada; optimum filtrasyon koşullarına göre UF/TO,  $NF_{\text{gevşek}}/TO$ ,  $UF/NF_{\text{gevşek}}$  ve  $UF/NF_{\text{sıkı}}$  bütünleşik membran sistemleri deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca ikinci ve üçüncü aşamada elde edilen tüm membran süzöntülerinin ilgili mevzuatlara göre kentsel ve tarımsal sulamada yeniden kullanılabilirliği de değerlendirilmiştir. Son aşamada, optimum filtrasyon şartlarında gerçekleştirilen UF ve NF prosesleri doğrulama deneyleri ve en iyi performansa sahip bütünleşik membran sistemleri deneylerinde kullanılan membranlar için akı kayıpları ve kirlenme direnci hesapları yapılmıştır. Kentsel arıtılmış atıksulara UF, NF ve TO teknolojileri ayrı ayrı ve bütünleşik olarak uygulandığında elde edilen sonuçlar; iyi kalitede su geri kazanıldığını, ulusal/uluslararası mevzuata göre kentsel ve tarımsal sulama için farklı sınıflarda sulama suyu üretilebildiğini göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Geri Kazanım, Kentsel Arıtılmış Atıksu, Kentsel ve Tarımsal Sulama Suyu, Membran Prosesler, Yeniden Kullanım.

## RECOVERY OF IRRIGATION WATER FROM TREATED URBAN WASTEWATER BY USING MEMBRANE TECHNOLOGIES

### ABSTRACT

Reuse of wastewater and recovery of irrigation water from urban treated wastewater by using advanced treatment technologies based on membrane processes are becoming widespread. In this study, it was aimed to achieve effective water recovery and obtain irrigation water that are in compliance with both the national and international regulations for urban and agricultural irrigation, from biological treated urban wastewater by utilizing of the ultrafiltration (UF), nanofiltration (NF) and reverse osmosis (RO) membrane technologies. In this context, at first the processes UF and NF were implemented separately, and then as integrated with the RO process to urban secondary treatment effluent in a lab-scale cross flow membrane unit. In the first stage of the study preliminary experiments of UF/RO integrated membrane systems were carried out in order to determine the effectiveness of integrated systems. In the second stage the effects of four different process variables on process performance parameters were investigated by filtrating secondary treatment effluent with three different UF and NF membranes under the experimental design conditions of the Taguchi method. In this stage where the optimum filtration conditions for UF and NF processes were determined, ANOVA analyses were carried out by means of the Response Surface Method. In the third stage UF/RO, NF<sub>loose</sub>/RO, UF/ NF<sub>loose</sub> and UF/NF<sub>tight</sub> integrated membrane systems experiments were carried out according to the optimum filtration conditions. It was also determined that all the membrane permeates obtained in the second and the third stages are in compliance with the relevant regulations and therefore can be reused in urban and agricultural irrigation applications. Finally, flux decline analyses and fouling resistance calculations were investigated for the membranes used in the UF and NF verification tests carried out under the optimum filtration conditions and integrated membrane systems experiments with the best performance. The results obtained with the separate and integrated application of the UF, NF and RO processes on urban treated wastewater indicated that water with good quality can be recovered and irrigation waters of varying classes can be obtained in line with national/international regulations, for urban and agricultural irrigation.

**Keywords:** Recovery, Urban Treated Wastewater, Urban and Agricultural Irrigation Water, Membrane Processes, Reuse.

## **GİRİŞ**

Günümüzde hızlı nüfus artışı, kentleşme, sulamaya açılan alanların genişlemesi, endüstrileşme ve küresel iklim değişimi gibi nedenlerle su kaynakları üzerine baskılar artmıştır. Su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımı üzerinde giderek artan tehditleri azaltabilmek için yeni yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Evsel, endüstriyel ve kentsel atıksuların geri kazanımı bu açıdan önemli bir fırsat yaratmaktadır. Atıksuların geri kazanılması küresel iklim değişikliği ile artan su kıtlığı çerçevesinde düşünüldüğünde bugün tüm dünya ülkelerinin önem vermesi gereken konu haline gelmiştir. Bu konuda dünyada sayıları hızla artan atıksuların yeniden kullanımı projesi geliştirilmekte ve uygulanmaktadır. Ülkemizde de kentsel, evsel ve endüstriyel atıksuların ileri arıtım teknikleri ile arıtıldıktan sonra yeniden kullanımı ve/veya geri kazanımının yaygın hale getirilerek, bu konudaki projelerin kısa vadede hayata geçirilmesi önem teşkil etmektedir.

Evsel atıksu ya da evsel atıksuyun endüstriyel atıksu ve/veya yağmur suyu ile karışımını ifade eden kentsel atıksuların arıtımında genellikle konvansiyonel sistemler uygulanmaktadır. Arıtılmış kentsel atıksular iyi bilinen kalite özelliklerinden dolayı en iyi sulama suyu kaynakları arasında gösterilmektedir. Konvansiyonel atıksu arıtma sistemlerinde yeterli oranda giderilemeden kanalizasyon sistemlerine ve alıcı ortamlara deşarj olan bazı kimyasallar, mikrobiyal kirleticiler, farmasotik ve kişisel bakım ürünleri ile endokrin bozucular insan ve çevre sağlığı üzerinde negatif etkilere yol açmaktadır. Bununla birlikte insanların temas halinde olduğu alanlarda kentsel atıksuların sulama amaçlı geri kazanımı için yüksek verimlerde arıtım teknolojilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle halk sağlığı bakımından sulama sularındaki mikrokirleticilerin en iyi şekilde giderilmesi gerekmektedir. Bu nedenle kentsel ve tarımsal alanların sulanması açısından bakıldığında, arıtılmış atıksulardaki olumsuz etkileri ortadan kaldıracak kabul edilebilir ileri arıtma stratejileri uygulamak gerekmektedir. Membran prosesler, arıtılmış atıksuların sulama amaçlı yeniden kullanımı ve geri kazanımı için, kentsel atıksulara uygulanabilir alternatif ileri arıtma teknikleri arasında gösterilmektedir



(Tam ve diğ., 2007; Blstakova ve diğ., 2009; Garcia-Figureruelo ve diğ., 2009; Park ve diğ., 2010; Zanetti ve diğ., 2010; Mrayed ve diğ., 2011; Guo ve diğ., 2012; Sousa ve diğ., 2012; Bunani ve diğ., 2013; Michael ve diğ., 2013; Norton-Brandao ve diğ., 2013; Yaşar ve diğ., 2013; Can Doğan ve diğ., 2015). Teknolojinin hızlı gelişimiyle ilk yatırım ve işletme maliyetlerindeki azalmalar nedeniyle de membran proseslerin bu alandaki kullanımı yaygınlaşmaktadır.

Bu prosesler, atıksuyun yeniden kullanımında özellikle inorganik ve organik mikrokirleticilerin giderimi için iyi performans gösteren teknolojilerdir. UF, şekerler, biyomoleküller, polimerler ve kolloidal partiküllerin ayrıca 20 nm' ye kadar olan organik makromoleküller ve virüslerin giderimi için, NF ise daha çok bakteriler, proteinler, partiküller, küçük organikler ve çok değerlikli iyonların giderimi için uygulanan membran proseslerdir (Chen ve diğ., 2006; Bunani ve diğ., 2015). Suyun yeniden kullanımında güvenilir kaynak sağlamak bakımından etkili membran prosesleri arasında olmasına rağmen, NF ile atıksuyun geri kazanımı uygulamaları hala laboratuvar araştırmaları ile sınırlı kalmaktadır. NF, farmasotik aktif bileşikler gibi organik birçok kirleticinin giderimi için de alternatif bir teknik olarak ifade edilmektedir (Chon ve diğ., 2011; Azais ve diğ., 2014). TO, daha çok tuzsuzlaştırma için kullanılan, yüksek partikül giderimi sağlayan, kanalizasyon arıtma proseslerinde ilave aşama olarak kullanılan bir prosestir. Bazı araştırma grupları TO' yu organik mikrokirleticilerin gideriminde mutlak bir bariyer olarak ifade etmektedirler (Sahar ve diğ., 2011, Bunani ve diğ., 2015). TO prosesi, kentsel atıksuların yeniden kullanımında ileri arıtma için potansiyel bir alternatif olarak ifade edilmektedir. TO prosesi UF ve NF' e göre daha yüksek verimde mikrokirletici giderimi sağlamaktadır (Can Doğan ve diğ., 2015). Tüm çözünmüş türdeki kirleticilerin ve tek değerlikli iyonların giderimi için TO uygun bir tekniktir (Bunani ve diğ., 2015).

Bu doktora tezinde; membran teknolojiler uygulanarak biyolojik olarak arıtılmış kentsel atıksulardan sulama suyu elde edilmesi ve etkin su geri kazanımı sağlanması amaçlanmıştır. Ayrıca biyolojik olarak arıtılmış kentsel atıksuların, basınç sürücülü membran proseslerden UF, NF ve TO uygulanarak, ulusal ve uluslararası mevzuat ve/veya rehberlere göre sulama suyu olarak kullanılabilirliğinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

Bu amaç ve hedef doğrultusunda; laboratuvar ölçekli deneysel çalışmalar, çapraz akış filtrasyon esasına göre çalışan membran ünitesinde gerçekleştirilmiştir.

Buna göre çalışmanın ilk aşamasında bütünleşik sistemlerin de etkinliğini belirlemek amacıyla UF/TO bütünleşik membran sistemleri ön deneysel çalışmaları yürütülmüştür. Bu çalışmalarda, 3 farklı düz plaka ticari UF membranı (UC010, UC030 ve UP150) ile 1 adet düz plaka ticari TO membranının (LFC3) arıtılmış kentsel atıksuların sulama suyu amacıyla geri kazanımı açısından performansı araştırılmıştır. UF ve sonrasında TO prosesini içeren UF/TO bütünleşik membran sistemleri ile iyi kalitede su geri kazanıldığı ve bu suyun sulama amacıyla kullanılabileceği belirlenmiştir.

İkinci aşamada; Minitab 16 yazılımı kullanılarak Taguchi deneysel tasarım yöntemi çerçevesinde üçer tip UF ve NF membranı ile deneysel çalışma sürdürülmüştür.  $L_9$  ( $3^4$ ) ortogonal dizinine göre belirlenen Taguchi deneysel tasarımında, 4 farklı değişkenin (membran tipi, çapraz akış hızı, sıcaklık ve membran geçiş basıncı) ve değişken seviyelerinin, UF ve NF proseslerinin teknik performansları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Proses performans parametreleri olarak, deneylerde elde edilen süzüntü akıları, süzüntüdeki kirletici madde konsantrasyonları ve kirletici madde giderim verimleri esas alınmıştır. UF ve NF prosesleri için en iyi filtrasyon koşullarının belirlendiği bu aşamada yüzey yanıt yöntemi aracılığıyla Minitab 16 yazılımı kullanılarak ANOVA (Analysis of Variance-Varyans analizi) analizleri gerçekleştirilmiştir. ANOVA analizleri ile değişkenlerin önem düzeyleri ve proses performans parametrelerinin değişkenler üzerindeki rölatif etkileri birbirleri ile kıyaslamalı olarak belirlenmiştir. Daha sonra UF ve NF proseslerinde en iyi filtrasyon şartlarında elde edilen süzüntülerin ulusal ve uluslararası mevzuata göre sulama suyu olarak kullanılabilirliği değerlendirilmiştir.

Üçüncü aşamada; UF ve NF için belirlenen optimum filtrasyon koşullarına göre üç farklı TO membranı kullanılarak (LFC3, CPA3 ve TFC) UF/TO,  $NF_{\text{gevşek}}/TO$ , ayrıca  $UF/NF_{\text{gevşek}}$  ve  $UF/NF_{\text{sıkı}}$  bütünleşik membran sistemleri deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde kentsel arıtılmış atıksuların bütünleşik membran sistemleri ile filtrasyonu sonucu elde edilen süzüntülerin ulusal ve uluslararası mevzuata göre sulama suyu geri kazanımında teknolojik uygulanabilirliği

araştırılmış, ayrıca ülkemiz için pratikte su geri kazanımı esasında uygulanabilir bir atıksu yönetimi yaklaşımını ortaya koymak amacıyla en iyi bütünleşik membran sisteminin belirlenmesi hedeflenmiştir.

Çalışmanın son aşamasında ise akı kayıpları ve membran kirlenme direnci hesapları yapılmıştır. Hesaplamalar öncelikle deneysel tasarım yöntemi ile belirlenen en iyi filtrasyon şartlarında gerçekleştirilen doğrulama deneylerinde kullanılan UP150, NP010 ve NF90 membranları için yapılmıştır. Daha sonra en iyi geri kazanım oranı ve süzüntü akısı sağlanan UF/TO (UP150/LFC3),  $NF_{\text{gevşek}}/TO$  (NP010/TFC),  $UF/NF_{\text{gevşek}}$  (UP150/NP010) ve  $UF/NF_{\text{sıkı}}$  (UP150/NF90) bütünleşik membran sistemleri deneylerine ait işletme şartlarında kullanılan membranlar için akı kayıpları ve kirlenme dirençleri hesaplanmıştır.

## **1. GENEL BİLGİLER**

### **1.1. Kentsel Atıksular**

Kentsel atıksular, evsel atıksu ya da evsel atıksuyun endüstriyel atıksu ve/veya yağmur suyu ile karışımını ifade etmektedir. Bu tanımda yer alan evsel atıksular ise yaygın olarak yerleşim bölgelerinden ve çoğunlukla evsel faaliyetler ile insanların günlük yaşam faaliyetlerinin yer aldığı okul, hastane, otel gibi hizmet sektörlerinden kaynaklanan atıksulardır (ÇŞB, 2006).

Kentsel atıksuların arıtımında genellikle konvansiyonel sistemler uygulanmaktadır. Arıtılmış kentsel atıksular yüksek hacim, uygulanabilirlik ve iyi bilinen kalite özelliklerinden dolayı sürdürülebilir su yönetimi için en iyi sulama suyu kaynakları arasında gösterilmektedir (Acero ve diğ., 2010; Zanetti ve diğ., 2010; Can Doğan ve diğ., 2015). Ancak bu kaynaklarda bulunan bazı kimyasallar ve mikrobiyal kirleticiler, insan ve çevre sağlığı üzerinde kısa ve uzun vadede negatif etkilere yol açmaktadır (Pedrero ve diğ., 2010; Zanetti ve diğ., 2010; Jin ve diğ., 2013; Mized, 2013; Can Doğan ve diğ., 2015). Ayrıca kentsel ikincil arıtılmış atıksularda farmasotik ve kişisel bakım ürünleri ile endokrin bozucular gibi 200' den fazla farklı kimyasal bileşik/mikrokirletici bulunmaktadır (Acero ve diğ., 2010; Chon ve diğ., 2011; Loos ve diğ., 2013). Konvansiyonel atıksu arıtma sistemlerinde yeterli oranda giderilemeyen bu mikrokirleticiler atıksu arıtma tesisi çıkış suları aracılığıyla kanalizasyon sistemlerine ve alıcı ortamlara deşarj olmaktadırlar (Pauwels ve Verstraete, 2006; Escher ve diğ., 2011; Gao ve diğ., 2014). Bununla birlikte insanların temas halinde olduğu alanlarda kentsel atıksuların sulama amaçlı geri kazanımı için yüksek verimlerde arıtım teknolojilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle halk sağlığı bakımından sulama sularındaki mikrokirleticilerin en iyi şekilde giderilmesi gerekmektedir (Acero ve diğ., 2010). Bu nedenle arıtılmış kentsel atıksulardaki olumsuz etkileri ortadan kaldıracak ileri arıtma stratejileri uygulamak gerekmektedir.

## 1.2. Kentsel Atıksuların Geri Kazanımı/Yeniden Kullanımı

Su kaynakları kıtlığı için ihtiyaç ve rekabetin gün geçtikçe artması beklenmektedir. Uluslararası tarımsal araştırma üzerine bir danışma grubunun tahminlerine göre, 2.7 milyon insanın 2025 yılına kadar su kıtlığı olan bölgelerde hayat sürdüreceği beklenmektedir (Radjenovic ve diğ., 2008). Su kıtlığı sadece kurak bölgelerde değil nüfus artışı, yaşam standartlarının yükselmesi, iklim değişikliği, endüstrileşme, tarım ve insan faaliyetlerinden dolayı bir sorun haline gelmiştir (Chon ve diğ., 2012; Bhattacharya ve diğ., 2013). Özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde su ihtiyacının tatmin edici ölçüde temiz su kaynaklarından karşılanmasındaki zorluklardan dolayı global ölçekte su kıtlığı artmakta ve büyük bir problem haline gelmekte, bu bakımdan sulama suyu kaynağı olarak atıksu arıtma proseslerinden geri dönüştürülmüş su kullanımı önemli bir strateji olarak dikkat çekmektedir (Murtaza ve diğ., 2006; Park ve diğ., 2010; Pedrero ve diğ., 2010; Kajenthira ve diğ., 2012; Bunani ve diğ., 2013; Goodman ve diğ., 2013; Norton- Brandao ve diğ., 2013; Shanmuganathan ve diğ. 2015).

Son yıllarda zorlayıcı AB düzenlemelerinden dolayı kentsel arıtılmış atıksuların kalitesinin geliştirilmesi zorunlu hale gelmiştir. Ayrıca endüstri, tarım ve kentsel tüketim gibi pek çok sektörde yüksek kalitede suya olan ihtiyaç artmıştır. Bu bakımdan kentsel atıksuların ve/veya ikincil çıkışlarının geri kazanımı ve yeniden kullanımı, sürdürülebilirlik, temiz su ihtiyacını azaltmak ve su kaynaklarını artırmak ve korumak için çevresel olarak hassas, ekonomik olarak fizibl ve güvenilir özellikte bir araç olarak kabul edilmektedir (Fan ve diğ., 2008; Acero ve diğ., 2010; Xu ve diğ., 2010). Bu konuda Amerika, Japonya ve Avustralya çapında sayıları hızla artan suyun yeniden kullanımı ile ilgili proje geliştirmektedir. AB' nde ise nispeten daha az proje olmakla birlikte konunun gelişimi için büyük bir potansiyel bulunmaktadır. Atıksuların yeniden kullanımı ile ilgili Avrupa ve Akdeniz Bölgeleri gibi yetersiz su dengesine sahip alanlarda artan uygulamalar mevcuttur (Bakopoulou ve diğ., 2011; Rygaard ve diğ., 2011; Agrafioti ve Diamadopoulou, 2012).

Bugüne kadar arıtılmış kentsel atıksuların kullanımı için en ortak uygulama tarımsal sulama iken, son yıllarda yüzey sulaması ilgi çeker hale gelmiştir. Tarımsal sulamada atıksular nütrientler, azalan aşılama maliyetleri ve su kaynağı olarak

hizmet etmektedir (Bakopoulou ve diğ., 2011). Ancak araştırmalar göstermektedir ki; global ölçekte sadece atıksularda değil doğal sularda ve arıtılmış atıksularda bile kimyasal ve mikrobiyal kirleticilerin yanı sıra var olan ağır metaller, toksik organikler gibi toksik kirleticiler halk sağlığı açısından tehlike yaratmaktadır. Bu kirleticiler kentsel, tarımsal ve endüstriyel atıksu kaynaklarından ve konvansiyonel ikincil arıtma ile arıtılmış evsel atıksulardan genellikle yetersiz arıtma yoluyla su kaynaklarına karışmaktadırlar (Radjenovic ve diğ., 2008; El Tokhy ve diğ., 2013). Atıksu üzerine Avrupa yönetmelikleri de biyolojik oksijen ihtiyacı (BOİ<sub>5</sub>), askıda katı madde (AKM), azot, fosfor, bakteri vb. parametrelerin yüksek giderim yüzdeleri için gelişmiş arıtma proseslerine ihtiyaç olduğunu bildirmektedir (Blstakova ve diğ., 2009). Bu nedenle sulama ve diğer amaçlarla kentsel atıksuların geri kazanımı ve yeniden kullanımı açısından mutlaka ileri arıtım teknolojilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Arıtılmış kentsel atıksular bu bakımdan alternatif su kaynakları arasında gösterilmektedir (Agrafioti ve Diamadopoulos, 2012). İleri arıtma olarak nitelendirilen üçüncül arıtma; azot, fosfor, ağır metaller, biyolojik olarak parçalanamayan dirençli organikler, bakteri ve virüsleri gidermek için konvansiyonel ikincil arıtma seviyesinin üzerinde bir performans göstermektedir. Son yıllarda bu amaçla kullanılan membran filtrasyon uygulamaları atıksuyun yeniden değerlendirilmesi ve kullanımında diğer fiziksel arıtma teknikleri ile karışlaştırıldığında çeşitli avantajlarından dolayı tercih edilir hale gelmiştir. Ayrıca MF, UF, NF ve düşük basınçlı TO membranları kullanılarak oluşturulan entegre membran sistemleri de geri kazanılmış su kullanımı ile ilgili artış gösteren projelerde ana arıtma prosesi olarak uygulanmaktadır. Bu teknolojiler, sürdürülebilir su kaynakları gelişimi için uygun su kalitesinin sağlanması ve maliyet etkinliği bakımından son zamanlarda itibar kazanmıştır (Acero ve diğ., 2010; Xu ve diğ., 2010; Chon ve diğ., 2012; El Tokhy ve diğ., 2013).

Çeşitli membran teknolojilerin kullanıldığı su geri dönüşüm projeleri arasında akifer ve/veya yeraltı suyu tabakasının beslenmesi, endüstriyel, rekreasyonel ve tarımsal kullanımlar gibi suyun yeniden kullanım uygulamaları bulunmaktadır (Nghiem ve Hawkes, 2007; Acero ve diğ., 2010; El Tokhy ve diğ., 2013; Michael ve diğ., 2013). Bu uygulamalarda membran süzüntüleri akifer veya rezervuarlara enjekte edilmekte ve çevresel döngüye yeniden kazandırılmaktadır. Bu süreçte iz organik kirleticilerin

halk sağlığının korunması için eliminasyonu oldukça önemlidir. Aslında tipik olarak  $\mu\text{g/L}$  mertebesinde iz seviyede ikincil arıtılmış atıksularda ve kanalizasyon sularında bulunan steroid hormonlar ve farmasotik aktif bileşikleri gibi dirençli yapıdaki organik kirleticiler su alıcı ortamlarını etkilemektedirler. Örneğin karbamazafin gibi bazı farmasotik aktif bileşikleri konvansiyonel arıtma prosesleri için oldukça dirençli olmasına rağmen NF ve TO gibi membran prosesleri ile etkin bir şekilde giderilmektedirler (Nghiem ve Hawkes, 2007; El Tokhy ve diğ., 2013; Michael ve diğ.,2013).

Arıtılmış atıksuların kullanımında; tarımsal, endüstriyel, yer altı suyunun beslenmesi, dinlenme maksatlı kullanılan bölgelerin beslenmesi, dolaylı olarak yangın suyu, tuvaletlerde geri kazanım ve doğrudan içme suyu olarak geri kazanım alternatifleri bulunmaktadır. Atıksuların geri kazanımındaki teknoloji gereksinimi, geri kazanılacak suyun kullanım maksatları ile ilişkilidir. Kentsel atıksuların doğrudan veya dolaylı geri kazanımı söz konusu ise membran teknolojileri, aktif karbon ve ileri oksidasyon gibi daha ileri arıtma alternatifleri gerekmektedir (şB, 2010).

### **1.2.1. Kentsel atıksuların sulama suyu geri kazanımı ve yeniden kullanımı için arıtma seçenekleri**

Arıtılmış kentsel suların tarımsal kullanımında tarım işçilerinin sağlığı ile birlikte en önemli endişeler; evre ve insan sağlığı yönleri bir başka deyişle üretilen yiyeceklerin kalite ve güvenliği ile ilgilidir. Diğer kaygılar topraktaki infiltrasyon hızı ve tuzluluk, ağır metal birikimi ve nütrientlerin yol açtığı kirliliktir. Aslında ikincil çıkış suları sürdürülebilir tarım, yeraltı suyu kalitesi, toprak kalitesi ve insan sağlığı açısından tehlikeli olabilen çözünmüş katılar, ağır metaller, pestisitler ve patojenler, ayrıca belli konsantrasyonlara kadar tarım için faydalı olabilen nütrientler içermektedir. Bu endişeleri ortadan kaldırmak ve özellikle tarımsal üretim için uygun çıkış suları üretmek için kesin çözüm, ileri arıtma tekniklerinin yaygınlaştırılmasıdır. Ancak bu tür tekniklerin varlığı, tarımsal sulamada arıtılmış çıkış suları uygulanmasını garanti altına almak için yeterli değildir. Bunun için, sadece sulama suyu kalite standartlarını tanımlamak değil, aynı zamanda spesifik arıtma tekniklerinin uygulanması ile bu standartların karşılanıp karşılanmadığını da değerlendirmek gerekmektedir. Arıtılmış atıksuların kalitesi kentsel su temini

kalitesine büyük ölçüde bağlıdır. Kentsel atıksuların sulama suyu üretimi için kullanımında uygulanan arıtma teknolojileri Tablo 1.1’de gösterilmektedir (Norton-Brandao ve diğ., 2013).

Tablo 1.1. Sulama suyu üretimi için uygulanan arıtma teknolojileri

Teknoloji	Arıtma Yeteneği	Avantajları	Dezavantajları
<b>NaOCl</b>	Yüksek bakteri yok edici etki; EC giderimi yok, %10-NO <sub>3</sub> giderimi ve % 18-PO <sub>4</sub> giderimi	Düşük işletme maliyetleri	Yüksek işletilebilme, yüksek yan ürün oluşumu, orta yatırım maliyeti
<b>Ozon</b>	Yüksek bakteri yok edici etki	Düşük yan ürün oluşumu	Yüksek işletilebilme, orta işletme maliyetleri, yüksek yatırım maliyetleri
<b>UV</b>	Yüksek bakteri yok edici etki	Yan ürün oluşumu yok, düşük işletme maliyetleri	Yüksek işletilebilme, orta yatırım maliyeti
<b>TiO<sub>2</sub></b>	Koliformların yüksek inaktivasyonu	Güneş fotokatalizi durumunda muhtemel yenilenebilir enerji kullanımı, ucuz katalizörler ve tesislerin kullanımı, yan ürün oluşum yok	Kalıntı bakteri yok edici etki ve yavaş kinetik davranış eksikliği
<b>Havuzlar, yapay sulak alanlar</b>	EC giderimi yok, bakteri giderim verimi 1-6 log birim arasında bakteri taşınma, NH <sub>4</sub> giderimi>%70, TP giderimi>%65, için %55 Cr, %25-35 Ni, %25-87 Zn, %9 Cu, %33 Cd, %75 Co giderimleri	Düşük bakım maliyetleri ve enerji kullanımı, yan ürün oluşumu yok	Meteorolojik koşullara bağlı olarak verimlilik, büyük alan ihtiyacı
<b>Orta filtrasyon</b>	Fekal koliform giderimi: 0,6-1,5 log-birim, TN:5mg/L, PO <sub>4</sub> -P:4-10mg/L (Nihai konsantrasyon)	Düşük yatırım maliyeti, düşük işletme maliyetleri	Fekal koliform giderimi düşük
<b>Membran filtrasyon</b>	Bakteriyel giderim: > 5 logaritmik birim, gözenek büyüklüğüne göre nütrient giderimi, TO ile %90 EC, %83 Na ve %80 Cl giderimi, ayrıca nütrient eş zamanlı olarak sodyum iyonları ve çift değerli katyon giderimi sağlanır. NF nütrientleri içeren tek değerli iyonlardan çok çift değerli iyonları rejekt eder, Cr için %75, As için >%80 giderim sağlar.	Eşzamanlı dezenfeksiyon ile EC ve ağır metal giderimi	Yüksek yatırım masrafları, yüksek işletme maliyeti
<b>Elektroliz</b>	Düşük akım yüklemeye ile etkili dezenfeksiyon (0.9 kA hm <sup>-3</sup> ’ün altında)	Geniş mikroorganizma spektrumunu öldürme etkisine sahip	Perkloratların önemli miktarda formasyonu



## **1.2.2. Sulama suyu geri kazanımı ve yeniden kullanımı ile ilgili ulusal ve uluslararası mevzuat**

### **1.2.2.1. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği**

Ülkemizde sulama suyunun kıt olduğu ve ekonomik değer taşıdığı yörelerde Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği (AATTUT)'nde verilen sulama suyu kalite kriterlerini sağlayacak derecede arıtılmış atıksuların sulama suyu olarak kullanılması teşvik edilmektedir. Bu amaçla uygulanacak işlemler ve yapılması gereken incelemeler bu tebliğe göre yapılmaktadır. Bir atıksu kütlesinin bu tür kullanımlara uygunluğu Valilikçe İl Çevre ve Şehircilik Müdürlüğü, İl Tarım Müdürlüğü ve Devlet Su İşleri Bölge Müdürlüğünden oluşturulacak komisyonca belirlenmektedir (ÇŞB, 2004).

AATTUT, yerleşim birimlerinden kaynaklanan atıksuların arıtılması ile ilgili atıksu arıtma tesislerinin teknoloji seçimi, tasarım kriterleri, arıtılmış atıksuların dezenfeksiyonu, yeniden kullanımı ve derin deniz deşarjı ile arıtma faaliyetleri esnasında ortaya çıkan çamurun bertarafı için kullanılacak temel teknik usul ve uygulamaları düzenlemek amacı ile hazırlanmıştır. Tebliğ, atıksu arıtımı için uygulanabilir olduğu kabul edilmiş metotları, atıksu arıtma tesisi kapasitesinin belirlenmesi ve projelendirilmesine esas teşkil edecek bilgileri, atıksu toplama sistemi bulunmayan yerleşim yerlerinin atıksu uzaklaştırmada uygulayacağı teknik esasları, atıksu toplama sistemi bulunan yerleşim yerlerinde ise değişik nüfus aralıklarına göre uygulanabilecek teknik esasları, dezenfeksiyon yöntemlerini, derin deniz deşarj sistemlerini, arıtma çamurlarının işlenmesi ve bertarafı ile arıtılmış atıksuların geri kazanımı ve yeniden kullanımı ile ilgili teknik esasları içermektedir.

Tebliğin 7. Bölümü arıtılmış atıksuların geri kazanımı ve yeniden kullanımı ile ilgili bilgileri içermekte, Ek 7'de sulama suyu kriterleri verilmektedir. Bu bölümde geçen Madde 21' e göre atıksu geri kazanımı için teknoloji seçimini etkileyen faktörler; atıksuyun nerede geri kullanılacağı, atıksu karakteristikleri, geri kazanılacak atıksuyun kalitesi, eser elementlerin miktarı, mevcut duruma uyumu, prosesin esnekliği, işletme, bakım, enerji, kimyasal ve personel ihtiyacı olarak belirtilmiştir. Atıksular, tarımsal sulamada tekrar kullanılırken sulanacak bitkide meydana

gelebilecek birikme, patojen mikroorganizmaların hala yaşama olasılığı ve halkın bu bölgeye girme riski gibi riskler mutlaka göz önüne alınmalıdır. Arıtılmış atıksuların sulama suyu kullanım kriterleri ise tebliğde Madde 22' de verilmektedir.

Evsel nitelikli atıksuların, AATTUT-Tablo E7.1' de belirtilen parametreler temelinde yapılacak analiz sonuçlarına göre, aynı tabloda Sınıf A'da tarımsal sulama (ticari olarak işlenmeyen gıda ürünleri) ve kentsel alanların sulanması bakımından, Sınıf B' de ise tarımsal sulama (ticari olarak işlenen gıda ürünleri ve gıda ürünü olmayan bitkiler) ve girişi kısıtlı sulama alanları bakımından sulama suyu olarak kullanılmasına izin verilmektedir. Kentsel nitelikli atıksularda ise AATTUT-Tablo E7.1' e ilaveten Tablo E7.2' de belirtilen parametreler temelinde yapılacak analiz sonuçlarına göre Tablo E7.3, Tablo E7.4, Tablo E7.5 ve Tablo E7.6' da belirtilen bitkilerin hassasiyet durumlarının da sulamada dikkate alınması gerektiği belirtilmektedir. Sanayi tesislerinden kaynaklanan atıksuların, tebliğde geçen Tablo E7.1, Tablo E7.2 ve Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği EK-III'de bulunan sektörler hariç Tablo E7.7'de belirtilen parametreler temelinde yapılacak analiz sonuçlarına göre sulama suyu olarak kullanılmasına izin verilmektedir.

AATTUT-Tablo E7.1' e göre arıtılmış atıksuyun sulamada kullanılması için iki değişik sınıf oluşturulmuş olup, bu kriterler minimum gereksinimleri sağlamak ve bazı özel uygulamalarda ilave kriterler de uygulanabilmektedir. Ticari olarak işlenmeyen gıda ürünlerinin ve park, bahçe gibi kentsel alanların sulanmasında, hem yenen ürün ile hem de park, bahçe gibi alanlarda insanların teması olabileceği için iyi kalitede sulama suyu gerekmektedir. Sulama suyunun mikrobiyolojik kalitesi de çok iyi kontrol edilmelidir (Sınıf A). Bunun yanında, ticari olarak işlenen gıda ürünleri (meyve bahçeleri ve üzüm bağları), çim üretim ve kültür tarımı gibi halkın girişinin kısıtlı olduğu yerler ve gıda ürünü olmayan, otlak hayvanları için mera ve saman yetiştiriciliğinde (Sınıf B), sulama suyu daha düşük kalitede olabilmektedir.

AATTUT-Tablo E7.2' de sulama suyu için kimyasal kalite kriterleri verilmektedir. Sulamada geri kullanılacak arıtılmış atıksuların bu kimyasal kriterleri sağlaması gerekmektedir. Bu tablolara göre Türkiye'de geçerli ulusal sulama suyu kriterleri Tablo 1.2'de özetlenmiştir.

Tablo 1.2. Sulama suyu amaçlı yeniden kullanım için ulusal standart değerler özeti

Parametre ve Birim		Türkiye <sup>a</sup>		
		1.Sınıf	2.Sınıf	3.Sınıf
İletkenlik (µS/cm)		<700	700-3000	>3000
TÇM (mg/L)		<500	500-2000	>2000
SAR	0-3	EC≥0,7	EC=0,7-0,2	EC<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
Na <sup>+</sup> (mg/L)	Yüzeysel Sulama	<3	3-9	>9
	Damlatmalı Sulama	<70	>70	sy
Klorür (mg/L)	Yüzeysel Sulama	<140	140-350	>350
	Damlatmalı Sulama	<100	>100	sy
Bor (mg/L)		<0,7	0,7-3,0	>3,0
Toplam N (mg/L)		<1 <sup>b</sup>		
		2-12 <sup>c</sup>		
Toplam P (mg/L)		<0,05 <sup>b</sup>		
		<2 <sup>c</sup>		
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N (mg/L)		<1 <sup>b</sup>		
		1-10 <sup>c</sup>		
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N (mg/L)		sy		
pH		6-9 <sup>d,e</sup>		
Bulanklık (NTU)		<2 <sup>d</sup>		
AKM (mg/L)		<5 <sup>d</sup>		
		<30 <sup>e</sup>		
Ca <sup>2+</sup> (mg/L)		sy		
K <sup>+</sup> (mg/L)		sy		
Mg <sup>2+</sup> (mg/L)		sy		
PO <sub>4</sub> -P (mg/L)		sy		
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> (mg/L)		sy		
KOİ (mg/L)		sy		
Fekal Koliform (kob/100 mL)		0 <sup>d</sup>		
		<200 <sup>e</sup>		
Toplam Koliform (kob/100 mL)		sy		
BOİ <sub>5</sub> (mg/L)		<20 <sup>d</sup>		
		<30 <sup>e</sup>		
Serbet Klor (mg/L)		>1 <sup>d,e</sup>		

<sup>a</sup> AATTUT, Ek 7 (ÇŞB, 2010)

<sup>b</sup> Tablo E7.9. BNR+MF+TO+Dezenfeksiyon içeren bir proses için sınır değerler (ÇŞB, 2010)

<sup>c</sup> Tablo E7.9. BNR+Filtrasyon+Dezenfeksiyon içeren bir proses için sınır değerler (ÇŞB, 2010)

<sup>d</sup> Tablo E7.1. Sınıf A/a-Tarımsal sulama: Ticari olarak işlenmeyen gıda ürünleri, b-Kentsel alanların sulanması (ÇŞB, 2010)

<sup>e</sup> Tablo E7.1. Sınıf B/a-Tarımsal sulama: Ticari olarak işlenen gıda ürünleri, b-Girişi kısıtlı sulama alanları, c-Tarımsal sulama: Gıda ürünü olmayan bitkiler (ÇŞB, 2010)

sy: İlgili standartta sınır değeri yoktur, öy: Ölçüm yapılamamıştır

Atıksuların araziye verilmeye veya sulamaya uygun olup olmadığını belirlemek için incelenmesi gereken en önemli kalite parametreleri şunlardır:

- Toplam katı madde, organik madde yükü ve yağ gres gibi yüzen maddelerin miktarı: AKM, sulama sistemini tıkadığı için önemlidir. Klasik atıksu arıtma tesisi çıkışında AKM konsantrasyonu, 5-25 mg/L aralığında değişmektedir. Üçüncül arıtma uygulandığında, 10 mg/L'nin de altına düşmektedir. Bununla birlikte, sulama sisteminin tıkanmasında AKM yanında, sıcaklık, güneş ışığı ve debi gibi diğer faktörlerde rol oynamaktadır.
- Tuzluluk (su içindeki çözülmüş maddelerin toplam konsantrasyonu ve elektriksel iletkenlik): Tuzluluk, su veya topraktaki tuzların toplu olarak belirtilmesidir. Toplam çözülmüş madde (TÇM) şeklinde ölçülmektedir. Elektriksel iletkenlik (EC), TÇM'nin bir diğer gösterim tarzıdır. TÇM ve EC arasında,  $EC < 5$  dS/m ise  $TÇM \approx EC \times 640$ ,  $EC > 5$  dS/m ise  $TÇM \approx EC \times 800$  şeklinde bir ilişki vardır. Tuzluluk arttıkça, toprağın suyu ile bitki hücresi zarı arasındaki osmotik gradyan azalmaktadır. Bitki, topraktaki tuzlu suyu seyreltmek için kendi hücresindeki suyu toprağa geri bırakmakta ve bu durum bitkinin gelişmesini önlemektedir. AATTUT-Tablo E7.3'te sulama suyunun TÇM konsantrasyonuna göre tarla bitkileri, sebzeler, çayır bitkileri ve meyveli ağaçlar için bitkilerin tuzluluğa olan hassaslıkları, toleranslı, orta toleranslı, orta hassas ve hassas şeklinde verilmekte, TÇM'nin 500 mg/L'den küçük olması durumunda bitkilerde herhangi bir etki gözlenmediği ifade edilmektedir (ÇŞB, 2010). Tuzluluk, özellikle sulama amaçlı kullanımda atıksudaki yüksek tuz içeriğinden ötürü bitki büyümesi, ürün performansı ve toprak özellikleri bakımından tehlike yaratmaktadır. Bu nedenle sulamada risk faktörleri arasında yer alır (Shanmuganathan ve diğ., 2015).
- Özgül iyon toksisitesi (B,  $Cl^-$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{+2}$  ve  $Mg^{+2}$  konsantrasyonları ve sodyum adsorpsiyon oranı (SAR)): Geri kazanılmış atıksudaki birçok iyon, yüksek konsantrasyonlarda bitki üzerinde birikebilmektedir. Sodyum, klorür ve bor bunların başlıcalarıdır. Sodyum toksisitesi, yapraklara zarar vermektedir. Bu durum, avokado ve bazı meyve ağaçlarında (kayısı, kiraz, şeftali) gözlemlenmiştir. AATTUT-Tablo E7.4'te değişik bitkilerin sulama suyunda sodyuma toleransları SAR değeri bazında verilirken, SAR değeri eğer çok yüksek değilse sebze ve tarla bitkilerinin sodyum ve klorürden etkilenmediği belirtilmektedir. Buna göre SAR, en düşük 2-8 aralığında, yaprak döken meyve ağaçları, turunçgiller ve avokado için yapraklarda yanma şeklinde etki gösterirken; en yüksek 46-102 aralığında, zayıf toprak yapısından

dolayı bitki büyümesinin engellenmesi ve bodur kalma şeklinde buğday, arpa, domates, şeker pancarı ve değişik çimen türlerini etkilemektedir. Klorür de benzer şekilde zarar vermektedir. Klorürün etkisi daha çok kavak gibi ağaçlarda olmaktadır. Değişik bitkilerin yapraklarına zarar veren klorür konsantrasyonları AATTUT-Tablo E7.5'te, bitkilerin bora karşı dayanıklılık dereceleri ise toleranslı, orta toleranslı, orta hassas ve hassas şeklinde AATTUT-Tablo E7.6'da verilmektedir. Bor, bitki büyümesinde gerekli dozdan yüksek olduğunda zarar vermekte, yaprak yanması ve sararması gibi etkiler ile kendini göstermektedir. Aslında, bütün bitkilerin normal gelişmeleri için az bir miktar bora ihtiyaçları vardır. Ancak borun bitkilere gerekli miktarı ile zehirlilik seviyesi arasında çok dar bir sınır vardır ve bu sınır bitki türlerine göre değişmektedir (ÇŞB, 2010).

Bahçe bitkileri için geri dönüştürülmüş suyun etkin yeniden kullanımı için bir bariyer, atıksuyun SAR değeridir (Goodman ve diğ., 2013; Shanmuganathan ve diğ., 2015). Yüksek SAR değerine sahip toprakta sodyum iyonları, kalsiyum ve magnezyum iyonları ile yer değiştirebilir. SAR, toprak bünyesindeki suda ve sulama suyunda sodyumun baskın iyon olduğu durumu göstermektedir. Yüksek sodyumlu durumlarda, toprak partikülleri birbirinden ayrılmaktadır. Bu durum toprağın geçirgenliğinin ve su tutma kapasitesinin azalmasına yol açarak toprak boşluklarının stabilitesinin bozulmasına neden olur, bitki büyümesi engellenir. Böylelikle, su ve havanın toprak içine nüfuzu engellenmektedir. SAR, suyun sodyum veya benzer alkaliler açısından zararlılığının bir ölçüsü olarak kullanılmaktadır (ÇŞB, 2010; Goodman ve diğ., 2013). SAR ve tuzluluk parametreleri birlikte sulama için kısıtlayıcı rol oynamaktadır. Tuzluluk ürün suyunun uygunluğunu etkilerken, SAR suyu dağıtmak için killi toprakları etkilemektedir (Garcia-Figueruelo ve diğ., 2009).

- Eser elementler ve nütrientler (ağır metal ve toksik olabilecek diğer maddelerin konsantrasyonu): Eser elementler, ortamda çok düşük konsantrasyonlarda bulunan elementlerdir. Eser elementlerin bitkiler üzerindeki etkisi, konsantrasyonuna bağlı olarak değişmektedir. AATTUT-Tablo E7.7' de sulama sularında izin verilebilen maksimum ağır metal ve toksik elementlerin konsantrasyonları verilmektedir. Bu elementlerden yüksek konsantrasyonlarda alındığında, yaprakların zarar görmesi veya büyümede gerileme gibi etkiler görülebilmektedir. Evsel atıksulardaki eser elementlerin konsantrasyonu, genellikle

düşük miktarlardadır. Ancak, evsel atıksulara endüstriyel deşarjlar olduğu durumda, konsantrasyonlar yükselebilmektedir. Bu nedenle eğer uzun süreli ve tarımsal sulama yapılacaksa birim alana verilebilecek maksimum miktarlar (kg/ha) bazında bu elementlerin ayrıca irdelenmesi gerekmektedir.

Geri kazanılmış atıksu, sulama için faydalı olan nütrientleri içermektedir. Geri kazanılmış atıksuda bulunan üç ana nütrient, azot, fosfor ve potasyumdur. Azot ve fosfor, arıtılmış atıksuda yeterli miktarlarda bulunurken, bitki büyümesini etkilemektedir. Bununla birlikte, potasyum konsantrasyonu düşük olmasına karşın, bitki büyümesini daha az etkilemektedir. AATTUT-Tablo E7.9' da değişik arıtma sistemleri ile geri kazanılmış atıksudaki nütrient seviyeleri verilmektedir.

- Mikrobiyal kalite (patojen organizmaların miktarı): Sulamada tekrar kullanılacak arıtılmış atıksularda aranan mikrobiyolojik özellikler, AATTUT-Tablo E7.1'de verilmektedir. Arıtılmış atıksuların bu tabloya göre Sınıf A kalitesinde olması için fekal koliform değeri hiç bir zaman 14 ad/100 ml' yi geçmemelidir. Bunun yanında, arıtılmış atıksuların Sınıf-B kalitesinde olması için fekal koliform değeri, 200 ad/100 ml' den küçük olmalı (30 günlük ortalama değer) ve hiç bir zaman 800 ad/100 ml'yi geçmemelidir. Ayrıca koliform geri kazanılmış atıksuların yeniden kullanımında mutlaka günlük olarak izlenmelidir (ÇŞB, 2010).

#### **1.2.2.2. Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı rehberi**

Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı [United States Environmental Protection Agency (USEPA)], yeniden kullanım üzerine hazırladığı rehberi 2004 yılı Aralık ayında güncellemiştir. Hazırlanan bu rehberin amacı, yeniden kullanım rehberi sunmak ve özetlemek, yeniden kullanım uygulama alanları ve faydaları ile ilgili yönetmelikleri düzenleyen kuruluşlara bilgi desteği oluşturmaktır.

Bu rehberde suyun iyileştirilmesi ve içilemeyen suların yeniden kullanılması için tüm dünyada bilinen ve uygulanan geleneksel su ve atıksu arıtma teknolojilerine ihtiyaç duyulduğu belirtilmektedir. Ancak, herhangi bir işlem görmeden tüketilen sebzelerin sulanması gibi halkı doğrudan etkileyen uygulamalarda estetik açıdan dikkat etmek gerektiği kadar sağlık açısından da dikkat etmenin ve bu nedenle daha yüksek kalitede arıtılmış su elde etmenin gerekliliği vurgulanmaktadır. (USEPA,

2004)' de belirtildiği üzere dünyada çekilen toplam suyun %40'ı tarımda kullanılmaktadır. Bu oranın azaltılması amacıyla arıtılmış atıksuların tarımda yeniden kullanılması uygulamasına gidilmiş ve Florida eyaletinde yeniden kullanım amacıyla arıtılan atıksuların yaklaşık %19'u tarımda kullanılmıştır. Kaliforniya eyaletinde ise arıtılmış atıksuların yaklaşık %48'i sulama amaçlı kullanılmaktadır (Başkan, 2006).

(USEPA, 2004) tarafından hazırlanan rehberlerde sulama suyundaki kalite parametreleri anlatılırken dikkat edilmesi gereken parametrelerin tuzluluk, sodyum, eser elementler, serbest (bakiye) klor ve nütrientler olduğu belirtilmektedir. Rehberdeki "Tablo 2-7. Sulama için arıtılmış sulardaki bileşenler için tavsiye edilen sınır değerler" tablosunda bu konudaki öneriler verilmektedir. Önerilerde ağır metallerin önemli bir yer tuttuğu, uzun ve kısa dönemli kullanıma ait sınır değerlerin değiştiği gözlenmektedir. Ayrıca arıtılmış atıksuların yeniden kullanımı söz konusu olduğunda tuzluluk belirtisi olan TÇM ve serbest (bakiye) klor parametreleri dikkati çekmektedir.

Rehberde (Tablo 4-3)' den (Tablo 4-12)' ye kadar arıtılmış su kalitesi ve arıtma gereksinimleri; sınırlı ve sınırsız kentsel yeniden kullanım, yenebilen ve yenemeyen ürünler için tarımsal yeniden kullanım, sınırlı ve sınırsız rekreasyonel amaçlı yeniden kullanım, yapay ve/veya doğal sulak alanlar, endüstriyel amaçlı yeniden kullanım, yeraltı suyunun yeniden yüklenmesi ve içilebilir suyun dolaylı yeniden kullanımı başlıkları halinde ve eyaletlere göre farklı sınırlandırmalar yapılarak verilmiştir. Özellikle Kaliforniya ve Florida gibi eyaletlerde yeniden kullanım konusuna özel önem gösterildiğinden, bu eyaletlerdeki sınırlamalar oldukça sıkıdır. Ayrıca gerekli arıtma yöntemleri açısından da eyaletler arasındaki limitler farklılık göstermektedir. "Tablo 4-13. Suyun yeniden kullanımı için yönergeler" tablosunda ise pH, BOİ, AKM, bulanıklık ve mikrobiyolojik parametreler için kentsel yeniden kullanım, giriş kısıtlı sulama alanı, tarımsal yeniden kullanım (ticari olarak işlenen/ işlenmeyen ve yenemeyen gıda ürünleri için) vb yeniden kullanım amaçlarına göre izleme periyotları ve tavsiyeleri de içeren sınırlandırmalar getirilmiş, bu tablonun özeti Tablo 1.3'te verilmiştir.

Bu tabloda “Tablo 8-3. Suyun yeniden kullanımı için ilgili su kalite parametreleri özetı” tablosunda ise, yeniden kullanımda önemli olan AKM, bulanıklık, BOİ<sub>5</sub>, kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), toplam ve fekal koliform, helmint yumurtaları, virüsler, ağır metaller, inorganikler, bakiye klor, azot ve fosfor parametreleri “ikincil arıtma çıkış suları” ve “arıtılmış sudaki arıtma hedefi” sınır değerleri belirtilmektedir (USEPA, 2004).

### **1.2.2.3. Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü rehberi**

Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü [Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)], 1985 yılında sulama ile ilgili bir rehber hazırlamış ve bu rehberi 1992 yılında güncellemiştir. FAO'nun rehberlerinde çok çeşitli sulama suyu kalite parametreleri belirtilmektedir. Bunların başında tuzluluk gelmektedir. Tuzluluk değerlerinin ise elektriksel iletkenlik ve TÇM konsantrasyonu ile anlaşılacağı belirtilmektedir. FAO; kalite parametrelerini belirtirken sulama suyundaki sodyum içeriğine de özel bir önem verilmesi gerektiğini belirtmektedir. FAO rehberlerinde SAR parametresine de özel önem gösterilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Bor, sodyum ve klorür parametrelerine ait sınırlandırmalar da sulama yöntemlerine göre değişmektedir. Pek çok ülke kendi rehberlerini, standartlarını ya da kriterlerini hazırlarken FAO rehberlerinden etkilenmiştir. Ancak FAO rehberini diğer rehberlerden ayıran en büyük fark; bu rehberin özellikle sulama suyu kalitesini belirtmesidir. Bu rehberlerde kullanılacak sulama suyunun arıtılmış atıksu ya da temiz su olup olmadığı belirtilmemektedir (Başkan, 2006).

(FAO, 1992)' de sulama sularında mikrobiyal kalitenin izlenmesi için gerekli sınır değerlerin verildiği “Tablo 8. Tarımda atıksu kullanımı için tavsiye edilen mikrobiyolojik kalite yönergeleri” tablosu, (WHO, 1989)' dan alınmıştır. Ayrıca FAO' nun çeşitli kimyasal parametreler için 1985 rehberinde vermiş olduğu sınır değerler ile 1992 yılında revize edilen rehberdeki “Tablo 9. Sulama için su kalitesinin yorumlanmasına yönelik yönergeler” tablosunda verilen sınır değerler aynıdır. İlave olarak “Tablo 27. Damlatmalı sulama sistemlerinde su kalitesi ve tıkanma potansiyeli” tablosunda AKM, pH, TÇM, Mn, Fe, H<sub>2</sub>S ve bakteriyel popülasyon parametrelerine ait sınır değerler üç farklı sınıfta verilmektedir.



Tablo 1.3. (USEPA, 2004) rehberine göre suyun kentsel ve tarımsal yeniden kullanımı için yönergeler (Tablo 4-13)

Yeniden kullanım tipi	Aritma Tipi	Geri kazanılmış su kalitesi	İzleme periyotları	Tavsiyeler
<b>Kentsel yeniden kullanım</b>	-İkincil arıtma -Filtrasyon -Dezenfeksiyon	*pH=6-9 *≤10mg/L BO <sub>5</sub> *≤2mg/L NTU *tem fekal koliform/100mL *1mg/L bakiye Cl <sub>2</sub> (minimum)	*pH-haftalık *BO <sub>5</sub> -haftalık *Bulanıklık-sürekli *Koliform-günlük *Bakiye Cl <sub>2</sub> -sürekli	*Tablo 2-7'de diğer önerilen limitlere bakınız. * Erişim kontrollü sulama alanlarında tasarım ve işletme tedbirleri geri kazanılmış suyla potansiyel halk temasını önemli oranda azaltır. *Filtrasyon öncesinde kimyasal ilavesi su kalite gereksinimlerini karşılamak için gerekli olabilir. *Geri kazanılmış su ölçülebilir düzeyde patojen içermemelidir. * Geri kazanılmış su berrak ve kokusuz olmalıdır. *Daha yüksek kalıntı klor ve/veya temas süresi virüs ve parazitleri inaktif hale getirmek için gerekli olabilir. *Koku, balçık ve bakteri büyümesini azaltmak için dağıtım sistemine ≥0,5mg/L tavsiye edilir.
<b>Giriş kısıtlı sulama alanı</b>	-İkincil arıtma -Dezenfeksiyon	*pH=6-9 *≤30mg/L BO <sub>5</sub> *≤30mg/L TAKM *≤200 fekal koliform/100mL *1mg/L bakiye Cl <sub>2</sub> (minimum)	*pH-haftalık *BO <sub>5</sub> -haftalık *TAKM-sürekli *Koliform-günlük *Bakiye Cl <sub>2</sub> -sürekli	*Tablo 2-7'de diğer önerilen limitlere bakınız. * Sprey sulama yapılacaksa, sprinkler kafalarının tıkanmasını önlemek için ≤30 mg/l TAKM gerekli olabilir.
<b>Tarımsal yeniden kullanım (ticari olarak işlenmeyen gıda ürünleri)</b>	-İkincil arıtma -Filtrasyon -Dezenfeksiyon	*pH=6-9 *≤10mg/L BO <sub>5</sub> *≤2mg/L NTU *tem fekal koliform/100mL *1mg/L bakiye Cl <sub>2</sub> (minimum)	*pH-haftalık *BO <sub>5</sub> -haftalık *Bulanıklık-sürekli *Koliform-günlük *Bakiye Cl <sub>2</sub> -sürekli	*Tablo 2-7'de diğer önerilen limitlere bakınız. *Filtrasyon öncesinde kimyasal ilavesi su kalite gereksinimlerini karşılamak için gerekli olabilir. *Geri kazanılmış su ölçülebilir düzeyde patojen içermemelidir. *Daha yüksek kalıntı klor ve/veya temas süresi virüs ve parazitleri inaktif hale getirmek için gerekli olabilir. *Yüksek nütrient seviyeleri bazı ürünleri büyüme aşamasında olumsuz etkileyebilir.
<b>Tarımsal yeniden kullanım(ticari olarak işlenen gıda ürünleri)</b>	-İkincil arıtma -Dezenfeksiyon	*pH=6-9 *≤30mg/L BO <sub>5</sub> *≤30mg/L TAKM *≤200 fekal koliform/100mL *1mg/L bakiye Cl <sub>2</sub> (minimum)	*pH-haftalık *BO <sub>5</sub> -haftalık *TAKM-sürekli *Koliform-günlük *Bakiye Cl <sub>2</sub> -sürekli	*Tablo 2-7'de diğer önerilen limitlere bakınız. * Sprey sulama yapılacaksa, sprinkler kafalarının tıkanmasını önlemek için ≤30 mg/l TAKM gerekli olabilir. *Yüksek nütrient seviyeleri bazı ürünleri büyüme aşamasında olumsuz etkileyebilir.
<b>Tarımsal yeniden kullanım(yenmeyen gıda ürünleri)</b>	-İkincil arıtma -Dezenfeksiyon	*pH=6-9 *≤30mg/L BO <sub>5</sub> *≤30mg/L TAKM *≤200 fekal koliform/100mL *1mg/L bakiye Cl <sub>2</sub> (minimum)	*pH-haftalık *BO <sub>5</sub> -haftalık *TAKM-sürekli *Koliform-günlük *Bakiye Cl <sub>2</sub> -sürekli	*Tablo 2-7'de diğer önerilen limitlere bakınız. * Sprey sulama yapılacaksa, sprinkler kafalarının tıkanmasını önlemek için ≤30 mg/l TAKM gerekli olabilir. *Yüksek nütrient seviyeleri bazı ürünleri büyüme aşamasında olumsuz etkileyebilir. *Süt hayvanları meralara sulamadan 15 gün sonra alınmalıdır. Bu sürenin kısa olmaası gerekiyorsa fekal koliform değeri ≤14 fekal koliform/100mL olmalıdır.

#### 1.2.2.4. Dünya Sağlık Örgütü rehberi

Dünya Sağlık Örgütü [World Health Organization (WHO)] tarafından ilk olarak 1989 yılında hazırlanan rehberde, arıtılmış atıksuların tarımda yeniden kullanılması ile ilgili mikrobiyolojik kalite parametreleri yer almıştır. Rehberde “Tablo 3. Tarımda atıksu kullanımı için tavsiye edilen mikrobiyolojik kalite yönergeleri” tablosunda geçen sınırlamalar Tablo 1.4’te verilmektedir. Tabloda yerel epidemiyolojik, sosyo-kültürel ve çevresel faktörlerin özel durumlarda hesaba katılması ve yönergelerin buna göre modifiye edilmesi gerektiği belirtilmektedir. WHO atıksuların tarımda hem potansiyel kullanımını hem de riskleri göz önünde bulundurmaktadır. Patojen indikatör olarak bu rehberde fekal koliform ve bağırsak nematodları esas alınmıştır. Rehberin amacı, arıtılmış atıksu ile çeşitli yollarla temasta bulunma riski olan insanların (tüketiciler, çiftçiler vb.) sağlığının korunmasıdır. İstenen mikrobiyal kaliteyi sağlamak için stabilizasyon havuzlarının kullanılması tavsiye edilmektedir.

1989 yılından sonra pek çok ülke, sulama ile ilgili WHO rehberlerinden etkilenecek kendi rehberlerini oluşturmuştur. WHO ise 2006 yılında rehberlerini revize etmiş, bu tablodaki yeniden kullanım şartlarını sulama tipi bakımından kısıtlamalı ve kısıtlamasız olarak yeniden düzenlemiştir. Yeni düzenlemede fekal koliform parametresinin yerini E.Coli parametresi almıştır. E.Coli değerlerinin litredeki sayısı ise arıtılmış atıksuyun kullanım amacına göre değişiklik göstermektedir. Bu değer 1989 rehberine kıyasla  $10^6$  gibi oldukça yüksek değerlere kadar çıkmaktadır. Örneğin mekanik tarımın gerçekleştiği kısıtlı alanlarda E.Coli değerinde  $10^5$  gibi yüksek bir değere bile izin verilebilmektedir. Yeniden kısımları atıksu ile temas etmeyen, yerden yüksekte yetişen bitkilerin sulanması için E. Coli değeri bakımından oldukça yüksek bir değere izin verilebilirken, toprak altında yetişen ve kök kısmının yenildiği bitkilerin sulanmasında bu değer  $10^3$  değerlerine kadar düşmektedir. Ayrıca bu son revizyonda patojenlerin logaritmik olarak azaltılması ile ilgili de bir sınıflandırma bulunmaktadır (WHO, 1989; WHO, 2006; Başkan, 2006).

Tablo 1.4. (WHO, 1989) rehberine göre tarımda kullanılacak atıksuyun mikrobiyolojik kalitesi<sup>a</sup>

Kategori	Yeniden Kullanım Şartları	Maruz Kalan Grup	Bağırsak Nematodları <sup>b</sup> (Aritmetik Ort.Yumurta Sayısı/100mL <sup>c</sup> )	Fekal Koliformlar (Geometrik Ort./100mL <sup>c</sup> )	Mikrobiyal Kaliteyi Sağlaması Beklenen Atıksu Arıtımı
A	Pişmeden yenilen ürünler, spor sahaları, umumi parkların sulanması <sup>d</sup>	İşçiler, Tüketiciler, Halk	≤1	1000 <sup>d</sup>	İstenen mikrobiyolojik parametreyi sağlayacak iyi dizayn edilmiş bir dizi stabilizasyon havuzları veya eşdeğer bir arıtma
B	Tahıl ürünleri, endüstriyel ürünler, yem, otlak ve ağaçların sulanması <sup>e</sup>	İşçiler	≤1	Tavsiye edilen standart yok	Stabilizasyon havuzlarında 8-10 gün bekletme ya da eşdeğer helmint giderimi
C	İşçi ve maruz kalması beklenmiyorsa kategori B' deki ürünlerin yerel sulanması	Hiçkimse	Uygulanamaz	Tavsiye edilen standart yok	Ön çöktürmeden az olmamak kaydıyla istenen sulama teknolojisine göre ön arıtma

<sup>a</sup> Yerel epidemiyolojik, sosyo-kültürel ve çevresel faktörler özel durumlarda hesaba katılmalı ve yönergeler buna göre modifiye edilmelidir.

<sup>b</sup> Ascaris ve Trichuris türleri ve kannçalı kurtlar.

<sup>c</sup> Sulama dönemi boyunca.

<sup>d</sup> Sıkı rehber limiti (≤200 fekal koliform/100 mL) halkın direkt teması olabilecek umumi yerler için uygundur.

<sup>e</sup> Meyve ağaçlarının sulanması durumunda sulama meyvelerin toplanmasından iki hafta önce durdurulmalıdır ve hiçbir meyve yerden alınmamalıdır.

(WHO, 2006)' ya göre kaliteli sulama uygulamaları, iyi su kalitesi ve miktarı, toprak özellikleri, ürün seçimi, sulama teknikleri, süzülme ve yönetim politikalarına dayalıdır. Bu konuda atıksudaki kimyasalların çoğunun konsantrasyon limitleri ürün gereksinimleri ve sağlık sorunları olmamak koşuluyla belirlenmelidir. (WHO, 2006)' da verilen "Tablo A1.1. Sulama için su kalite gereksinimleri" tablosunda birçok kimyasal parametreye ait limitler, kullanımda kısıtlanma dereceleri "Yok", "Hafif ve Orta", "Şiddetli" şeklinde 3 grupta düzenlenmiştir. Ayrıca "Tablo A1.2. Bitkisel üretim için eser element eşik seviyeleri" tablosunda (USEPA, 2004) ve AATTUT'nde de görüldüğü gibi ürün yetiştirilmesi için eser element seviyeleri sadece maksimum izin verilebilen konsantrasyon bazında verilmiştir.

Çalışmada kentsel arıtılmış atıksulara membran teknolojiler uygulanarak sulama amaçlı kullanım için USEPA, FAO ve WHO kriterleri referans alınmıştır. Bu

kapsamda sulama sularında izlenmesi gereken önemli parametrelere ilişkin uluslararası standart değerler Tablo 1.5’te özetlenmiştir.

### **1.3. Membran Teknolojiler**

#### **1.3.1. Tarihçe**

Membranlarla ilgili ilk bilimsel çalışmalar 18. yüzyılda yapılmaya başlanmıştır. İlk belgeli membran-difüzyon deneyi 1748 yılında Fransız Abbe Nollet tarafından gerçekleştirilmiş ve böylece ozmoz olayı tanımlanmıştır. 1855 yılında Fick tarafından nitroselülozdan ilk sentetik membran üretilmiştir. Daha sonraki 20 yıl içerisinde, değişik malzemelerden sentetik membranlar üretilmiştir. 1907 yılında Bechold, membran üzerindeki boşluk miktarının kontrol edildiği bir membran üretme sistemi geliştirmiş ve ultrafiltrasyon terimi ilk olarak kullanılmaya başlanmıştır (Cheryan, 1998; Özçelep, 2009).

1916 yılında Zsigmondy ve Bachmann, gözenek boyutunun tanımlanmasına yönelik bir yöntem geliştirmiştir. 1927 yılında Sartorius firması tarafından ticari olarak membran üretime başlanmış olmakla birlikte, II. Dünya Savaşı sonrasına kadar membran malzeme üretimindeki ticari gelişmeler oldukça yavaş ilerlemiştir. 1931 yılında Elford ultraviyole radyasyon kullanarak sterilize membran filtreler için metotlar geliştirmiştir (Cheryan, 1998; Aydın, 2006).

1945’e kadar sıvı ve gaz akımlarından mikroorganizmalar ve partiküllerin giderimi için öncelikli olarak membran filtreler kullanılmıştır. Alman bilim adamları membran üzerinde kültür bakteri hücrelerinin tutunması üzerine metotlar geliştirmiştir. 1951 yılında Goetz bakteri kolonilerinin sayımını kolaylaştırmak için halen yaygın olarak kullanılan çizgili membranları bastırmıştır. 1957’ de Amerikan Halk Sağlığı Servisi (U.S. Public Health Service) içme suyu analizleri için membran filtrasyon prosedürünü resmen kabul etmiştir. 1950’li yılların hemen başlarında başlayan çalışmalar çerçevesinde yeni geliştirilen metodlarla su ve atıksu arıtımının yanı sıra birçok ayırma prosesinde membranların etkin bir şekilde kullanımına dönük araştırmalar başlatılmıştır. Kaliforniya Üniversitesi’nden Srinivasa Sourirajan ticari olarak homojen selüloz asetat membranlar kullanarak tuzlu sudan temiz su elde etmede başarılı sonuçlar elde etmiştir.

Tablo 1.5. Sulama suyu amaçlı yeniden kullanım için uluslararası standart değerler özeti

Parametre ve Birim	WHO <sup>a</sup>			FAO <sup>c</sup>			USEPA <sup>e</sup>	
	Kullanımda kısıtlanma derecesi							
	Yok	Hafif ve Orta	Şiddetli	Yok	Hafif ve Orta	Şiddetli		
İletkenlik (µS/cm)	<700	700-3000	>3000	<700	700-3000	>3000	sy	
TÇM (mg/L)	<450	450-2000	>2000	<450	450-2000	>2000	500-2000 <sup>f</sup>	
SAR	0-3	EC>0,7	EC=0,7-0,2	EC<0,2	EC>0,7	EC=0,7-0,2	EC<0,2	sy
	3-6	>1,2	1,2-0,3	<0,3	>1,2	1,2-0,3	<0,3	
	6-12	>1,9	1,9-0,5	<0,5	>1,9	1,9-0,5	<0,5	
	12-20	>2,9	2,9-1,3	<1,3	>2,9	2,9-1,3	<1,3	
	20-40	>5,0	5,0-2,9	<2,9	>5,0	5,0-2,9	<2,9	
Na <sup>+</sup> (mg/L)	Sprinkler Sulama	<69	>69	sy	<69	>69	sy	sy
	Yüzey Sulaması	<69	69-207	>207	<69	69-207	>207	
Klorür (mg/L)	Sprinkler Sulama	<106,5	>106,5	sy	<106,5	>106,5	sy	sy
	Yüzey Sulaması	<142	142-355	>355	<142	142-355	>355	
Bor (mg/L)		<0,7	0,7-3,0	>3,0	<0,7	0,7-3,0	>3,0	0,75-2 <sup>f</sup>
Toplam N (mg/L)		<5	5-30	>30	sy			<1-30 <sup>g</sup>
Toplam P (mg/L)		sy			sy			<1-20 <sup>g</sup>
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N (mg/L)		sy			<5	5-30	>30	sy
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N (mg/L)		sy			sy			sy
pH		6,5-8			<7,0 <sup>d</sup>	7,0-8,0 <sup>d</sup>	>8,0 <sup>d</sup>	6-9
Bulanıklık (NTU)		sy			0-0,2			≤2
AKM (mg/L)		<50	50-100	>100	<50 <sup>d</sup>	50-100 <sup>d</sup>	>100 <sup>d</sup>	<5
Ca <sup>2+</sup> (mg/L)		sy			sy			sy
K <sup>+</sup> (mg/L)		sy			sy			sy
Mg <sup>2+</sup> (mg/L)		sy			sy			sy
PO <sub>4</sub> -P (mg/L)		sy			sy			sy
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> (mg/L)		sy			sy			sy
KOİ (mg/L)		sy			sy			<20 <sup>g</sup>
BOİ <sub>5</sub> (mg/L)		sy			sy			≤10
H <sub>2</sub> S (mg/L)		<0,5	0,5-2,0	>2,0	<0,5 <sup>d</sup>	0,5-2,0 <sup>d</sup>	>2,0 <sup>d</sup>	sy
Demir (Fe) (mg/L)	Damlatmalı Sulama	<0,1	0,1-1,5	>1,5	<0,1 <sup>d</sup>	0,1-1,5 <sup>d</sup>	>1,5 <sup>d</sup>	sy
Mangan (Mn) (mg/L)	Damlatmalı Sulama	<0,1	0,1-1,5	>1,5	<0,1 <sup>d</sup>	0,1-1,5 <sup>d</sup>	>1,5 <sup>d</sup>	sy
Bakiye Klor (mg/L)		<1	1-5	>5	sy	sy	sy	<1 <sup>f</sup>
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)		<90	90-500	>500	<91,5	91,5-518,5	>518,5	sy
Fekal Koliiform (kob/100 mL)		≤1000 <sup>b</sup>			≤1000			tem
Toplam Koliiform (kob/100 mL)		sy			sy			<1-200 <sup>g</sup>

<sup>a</sup> Tablo A1.1. Sulama için su kalitesi (WHO, 2006)

<sup>b</sup> Tablo 3. Tarımda atıksu kullanımı için tavsiye edilen mikrobiyolojik kalite yönergeleri (WHO,1989)

<sup>c</sup> Tablo 8. Tarımda atıksu kullanımı için tavsiye edilen mikrobiyolojik kalite yönergeleri, Tablo 9. Sulama için su kalitesinin yorumlanmasına yönelik yönergeler (FAO, 1992)

<sup>d</sup> Tablo 27. Damlatmalı sulama sistemlerinde su kalitesi ve tıkanma potansiyeli (FAO, 1992)

<sup>e</sup> Tablo 4-13. Suyun yeniden kullanımı için önerilen yönergeler, Yeniden kullanım türü: Kentsel yeniden kullanım (USEPA, 2004),

<sup>f</sup> Tablo 2-7. Sulama için artırılmış sulardaki bileşenler için tavsiye edilen sınır değerler (USEPA, 2004),

<sup>g</sup> Tablo 8-3. Suyun yeniden kullanımı için ilgili su kalite parametreleri özeti (USEPA, 2004),

tem: Tespit Edilemez Miktarda

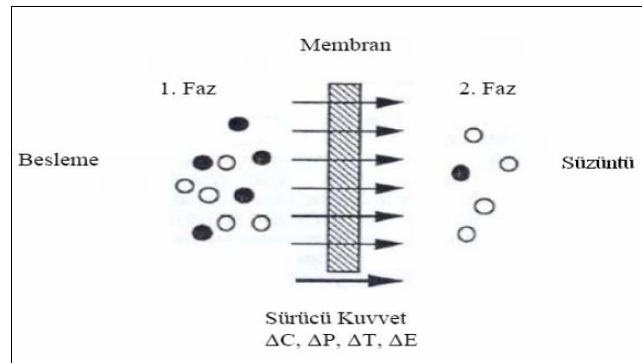
sy: İlgili standartta sınır değer yoktur (FAO, 1992; USEPA, 2004; WHO, 2006)

1960-1980 yılları arasındaki 20 yıl boyunca membran teknolojisinde büyük değişimler olmuştur. S. Loeb ve S. Sourirajan tarafından geliştirilen membran

teknolojisi üzerine son derece ince ve yüksek performanslı membranlar üretmek üzere başka teknolojiler geliştirilmiştir. Membran kararlılığını artıran spiral sargılı, boşluklu elyaf, kapiler ve plaka modüller geliştirilerek 1980'lere doğru mikrofiltrasyon, ultrafiltrasyon, ters osmoz ve elektrodializ prosesleri dünyada birçok büyük tesiste kurulmuştur. 1980'li yılların son çeyreğinde nanofiltrasyon membranları da üretilmeye başlanmıştır. Bugün dahi, konu üzerine çok yönlü ve derinlemesine araştırmalar devam etmektedir (Cheryan, 1998; Aydın, 2006; Özçelep, 2009).

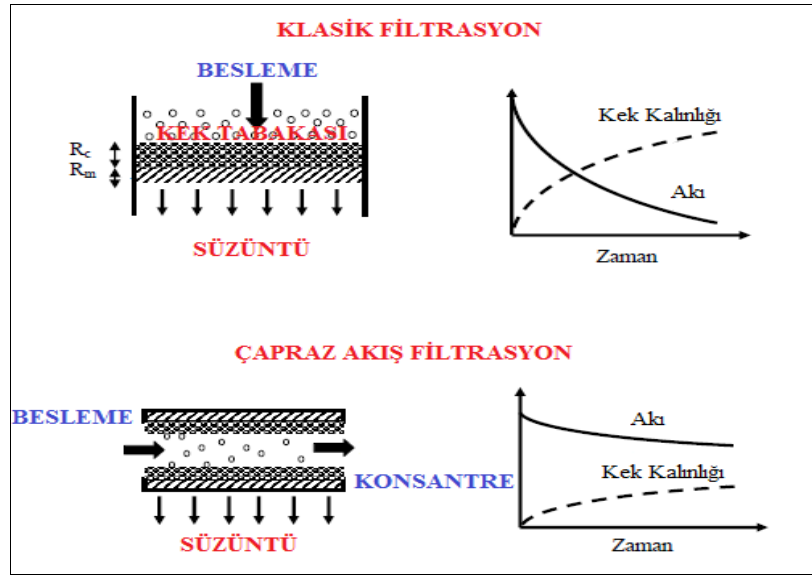
### 1.3.2. Membran filtrasyonu ve filtrasyon teknikleri

Membran belirli türlerin hareketini kısıtlayan, metal, anorganik veya organik polimerlerden yapılan geçirgen veya yarı geçirgen bir malzemedir. Membranlar genel olarak; sıvılardan ve gazlardan mikron boyutundaki partikül filtrasyonu, sıvılardan kolloidlerin ve büyük ölçekli moleküllerin ayırımı, sadece iyonik türlerin ayırımı, sulardan veya diğer sıvılardan bütün askıda katı veya çözünmüş maddelerin ayırımı ve konsantre çözelti elde etmek gibi amaçlar için kullanılır. Şekil 1.1' de bir membranın ayırma mekanizması şematik olarak gösterilmektedir. Bu mekanizmada I. Faz besleme fazı, II. Faz ise süzüntü fazı olarak isimlendirilmektedir. Membran ile ayırma işlemi, membranın I. Fazdaki bir bileşeni, öteki bileşen veya bileşenlerden daha kolay bir şekilde diğer tarafa geçirmesi esasına dayanır. Bu geçiş işlemi basınç, konsantrasyon, elektriksel potansiyel ve sıcaklık farklılığı gibi değişik sürücü kuvvetlerin etkisi ile meydana gelmektedir. Membrandan geçen akım "süzüntü", geçemeyen akım ise "konsantre" şeklinde tanımlanmaktadır (Mulder, 1991; Aydın, 2006; Özçelep, 2009).



Şekil 1.1. Membran ayırma mekanizmasının şematik gösterimi

Filtrasyon bir sıvıdan partikül ve kolloidal maddeleri ayırma (uzaklaştırma) işlemi olarak tanımlanır. Membran filtrasyonundaki partikül boyut aralığı çözünmüş bileşenleri (0,0001-1  $\mu\text{m}$ ) de eklemek için genişletilmiştir. Membran, sıvı içinde bulunan bazı bileşenlerin geçişine izin verirken, bazılarını ise tutacak seçici bir bariyer olarak hizmet etmektedir (Cheryan, 1998; Metcalf and Eddy, 2003). Sıvı akımlarda uygulanan basınç sürücülü filtrasyon teknikleri klasik (dead-end) ve çapraz akış (cros flow) olmak üzere iki sınıfta incelenebilir. Bu iki filtrasyon türüne ait şematik gösterim Şekil 1.2' de verilmektedir (Mulder, 1991; Cardew ve Le, 1998).



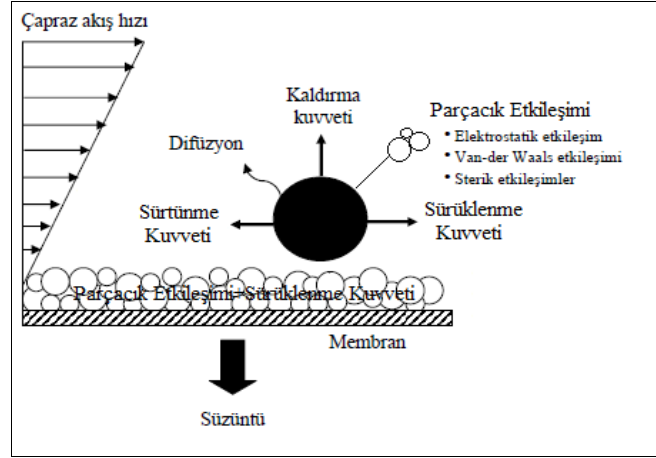
Şekil 1.2. Basınç sürücülü filtrasyon teknikleri arasındaki fark

Klasik filtrasyon yönteminde, akış membran yüzeyine diktir. Ayrılması istenen partiküller membran üzerinde birikirken filtre edilen süzüntü membranın diğer tarafına geçer. Akış membran yüzeyine dik olduğu için membran üzerinde filtre kek oluşur ve oluşan bu kek tabakası filtrenin daha çabuk kirlenmesine neden olur (Cardew ve Le, 1998).

Çapraz akış filtrasyonu, basınç farkı ile filtrenelecek olan sıvı veya gaz akımının, membran yüzeyine paralel olarak geçirilmesi ve bu sırada süzüntünün akım yönüne dik doğrultuda membran içerisinden geçmesi olarak tanımlanır. Bu sırada membran tabakası üzerinde kek tabakası meydana gelmektedir. Çapraz akış uygulaması bu kek tabakasının kalınlığını düşük seviyede tutmaktadır. Çapraz akışın bu etkisi sayesinde, Şekil 1.2' de gösterildiği üzere, sistemin uzun süreli periyotta sabit bir akıda

çalıştırılabilmesi mümkün olmaktadır. Çapraz akış filtrasyonda membran yüzeyi üzerinde tutulan parçacıklara birçok kuvvet etki etmektedir. Bu kuvvetlerin belirlenmesi akı azalması, membran kirlenmesi, giderme verimi olaylarının işletme koşulları ile bağdaştırılmasına imkan sağlamaktadır.

Çapraz akış filtrasyonda membran yüzeyi üzerinde tutulan parçacıklara etki eden kuvvetler Şekil 1.3’ te gösterilmiştir (Ripperger ve Altmann, 2002). Çapraz akış membran filtrasyonu, içmesuyu hazırlama da dahil olmak üzere bir dizi uygulama ile yapılandırma, buhar kondensinin arıtımı, kullanılmış su arıtımı, deniz suyu TO için ön arıtma, yeraltı suyundan mangan ve/veya demir giderimi ve tuzsuzlaştırma diğer proseslerle kombine olarak uygulanmaktadır (Xie ve diğ., 2008).



Şekil 1.3. Membran yüzeyinde tutulan parçacıklara etki eden kuvvetler

### 1.3.3. Membran seçimini ve performansını etkileyen faktörler

Akı ve Giderme Verimi: Membran performansı, akı ve giderme (giderim) verimi ifadeleri ile belirtilir. Giderme verimi, membranın tuttuğu madde miktarının ölçüsüdür. Membranın giderme verimi “R” ile ifade edilmektedir. R birimsiz bir büyüklüktür ve 0-1 arasında değişir. “0” değeri, bütün çözülmüş maddelerin membrandan geçtiğini, “1” değeri ise membranın hiçbir madde geçişine izin vermediğini gösterir. Süzüntü oranı olarak da ifade edilen yüzde olarak giderim verimi Eşitlik (1.1) ile tarif edilmektedir.

$$R(\%)=1-\frac{C_s}{C_k} \quad (1.1)$$



Bu eşitlikte  $R(\%)$ =giderim verimi,  $C_s$  ve  $C_k$  sırasıyla süzüntü akımındaki ve konsantredeki çözünen madde konsantrasyonudur (Judd ve Jefferson, 2003; Chen ve diğ. 2006; Aydınler, 2006; Özçelep, 2009).

Akı ise birim zamanda membranın birim alanından geçen sıvı miktarı olup,  $m^3/m^2.gün$  veya  $L/m^2.saat$  birimleriyle ifade edilir. Membrandan geçen sıvının miktarı, basınçlı membran prosesler için, basınç farkı, membran gözenek boyutu ve dağılımı, membranın ve sıvının fizikokimyasal yapısı, prosesin işletme koşulları gibi birçok değişkene bağlıdır. Akı miktarı Darcy kanununa göre Eşitlik (1.2)' deki gibi tanımlanmaktadır.

$$J = \frac{1}{A} \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P}{\mu \cdot R_t} = \frac{\Delta P}{\mu \cdot (R_m + R_k)} \quad (1.2)$$

Eşitlikte;  $J$ =akı,  $\Delta P$ =membrandaki basınç farkı,  $\mu$ =akışkanın viskozitesi,  $R_t$ =membran direnci ve membran kirlenme direnci toplamı ( $R_m + R_k$ ),  $A$ =etkili membran alanı ve  $dV/dt$ =süzüntü akış hızı olarak ifade edilmektedir (Judd ve Jefferson, 2003; Aydınler, 2006; Özçelep, 2009).

Basınç: Akı, uygulanan basınç ve membrandaki ozmotik basınç farkı ile artar. Uygulanan basınç ne kadar fazla ise akı da o kadar fazladır. Ancak basınç farkının artışıyla daha yoğun bir kek tabakası oluşumuna bağlı olarak dirençler de artacağından, belli bir basınç artışından sonra akı azalış gösterebilir (Öztürk ve diğ., 2005; Aydınler, 2006).

Sıcaklık: Sıcaklık su akımını ve ozmotik basıncı etkilemektedir. Sıcaklıktaki her  $1^\circ C$ 'lik artış, akı değerini % 3 civarında arttırmaktadır. Akı, beslenen atıksu sıcaklığı ile artar. Membran proseslerde standart sıcaklık  $21^\circ C$  olarak verilmektedir. Ancak  $29^\circ C$ 'a kadar sıcaklık tolere edilirken, bunun üzeri membran yapısını bozmaktadır. Sıcaklığa bağlı olarak akıdaki düzeltme Eşitlik (1.3)' e göre yapılmaktadır (Öztürk ve diğ., 2005; Özçelep, 2009).

$$J_t = J_{25} \cdot (1,03)^{(t-25)} \quad (1.3)$$

Sıcaklık, plastik yapıdaki membran malzemenin performansını etkileyen başlıca faktörlerden biridir. En çok kullanılan membran türü olan ve maliyeti diğerlerine

göre daha düşük olan selüloz asetat membranlarının 35-40°C' ye kadar dayanıklılığı vardır. Diğer bir membran türü olan seramik membranlara uygulanan sıcaklık, 800°C' ye kadar çıkabilmektedir (Kaleli, 2006).

**Geri Kazanım Faktörü:** Membranda geri kazanım faktörü (y), süzüntü akımının, besleme akımına oranıdır. Sistemin kapasitesini gösterir. Uygulamada ulaşılan maksimum değer %80'dir. Daha yüksek geri kazanım faktörüne proses suyunda daha yüksek tuz konsantrasyonu olduğunda ulaşılır. Yüksek konsantrasyonda membranın yüzeyinde çökme fazla olur, bu da işletme veriminin düşmesine neden olur (Öztürk ve diğ., 2005; Kaleli, 2006). Geri kazanım değeri Eşitlik (1.4)' teki şekilde gösterilir.

$$y = \frac{Q_s}{Q_b} = \frac{Q_b - Q_k}{Q_b} \quad (1.4)$$

Bu eşitlikte;  $Q_b$ =besleme suyu debisini,  $Q_k$ =konsantre kısmın debisini ve  $Q_s$ =süzüntü kısmın debisini ifade etmektedir (Özçelep, 2009).

**Kimyasal Uygunluk:** Membran polimerleri kimyasal olarak çözeltiliye uygun ve dayanıklı olmalıdır. Çözelti içindeki kimyasal maddelere göre, membranda performans düşüklüğü meydana gelir. Selüloz asetat membranlar özellikle klor karşı dayanıksızdır. Bu sebepten bu tip membranların besleme suyunda klor olmamalıdır.

**Mekanik Kararlılık:** Kırılgan membran yüzeyinin yüksek basınçlardan minimum şekilde etkilenmesi için, yüksek basınçların kullanıldığı membranların mekanik dayanıklılığının da yüksek olması gerekir.

**Ekonomik Özellikler:** Genel olarak membranlar yüksek geçirgenlik, iyi seçicilik, kararlı işletme özelliğine sahip olmalı ve düşük maliyet gerektirmelidir. Ekonomik özellikler membran seçiminde önemlidir.

**pH:** Asitlik ve bazikliğin bir belirtisi olan pH, membranın ömrü ve performansı açısından önemlidir. Genelde kullanılan pH aralığı 2-8' dir. Selüloz asetat membranlar yüksek ve düşük pH' larda hidroliz olurlar. Bunlar için optimum işletme pH aralığı 4-6' dır (Kaleli, 2006).

Membran Diziliş Yoğunluğu: Birim hacme yerleştirilebilecek membran alanı olarak tanımlanır. Bu faktör ne kadar büyükse sistemden çıkan toplam akı da o kadar büyük olur. Tipik membran yoğunluğu 160-1640 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> olarak verilmektedir.

Membran Ömrü: Atıksudaki fenol, bakteri, mantar gibi maddelerin varlığı, yüksek sıcaklık ve yüksek veya düşük pH değerleri membran ömrünü etkiler. Membranlar en fazla 2 yıl kullanılırlar.

Ön Arıtma: Membran sistemlerin toplam çözünmüş katı miktarı 10.000 mg/l'nin üstündeki besleme akımlarına doğrudan uygulanması uygun değildir. Bunun dışında kalsiyum karbonat, kalsiyum sülfat, demir oksit ve hidroksitleri, mangan ve silikon, baryum sülfat, çinko sülfür ve kalsiyum fosfat gibi tabakalaşma yapan maddelerin ön arıtma ile kontrol altına alınmaları gerekir. Bu maddeler pH ayarlaması, kimyasal arıtım, çöktürme, inhibisyon ve filtrasyon gibi yöntemlerle kontrol altına alınabilirler. Organik kalıntılar ve bakteriler filtrasyon, karbonla ön arıtım ve klorlama ile kontrol edilebilirler. Yağ ve gres ise membranın yüzeyini saracağından ve tıkanmaya neden olacağından membran prosesi öncesi mutlaka giderilmelidir (Öztürk ve diğ., 2005).

Çapraz Akış Hızı: Membran performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Membran yüzeyinde oluşan kek tabakasının direnci ve konsantrasyon polarizasyonu tabakasının kalınlığı hızın artırılmasıyla azalabilmektedir (Özçelep, 2009).

#### **1.3.4. Basınç sürücülü membran teknolojiler**

Farklı ayırma prensipleri ve mekanizmalarına sahip çok sayıda membran teknolojisi mevcut olup, bunlar partiküllerden moleküllere kadar çok sayıda maddenin ayrılmasında karşılaşılan problemlere çözüm getirebilme yeteneğine sahiptir. Bu nedenle günümüzde membran prosesler, içmesuyu arıtımı, biyolojik atıksu arıtımı ve saf su üretimi gibi birçok alanda önemli bir konuma gelmiştir. Membran teknolojileri diğer arıtma teknolojileri ile karşılaştırıldıklarında ortaya çıkan avantaj ve dezavantajlar aşağıda sıralanmıştır (Mulder, 1991; Aydın, 2006; Özçelep, 2009; Guo ve diğ., 2012).

#### Avantajları:

- \* Sistemlerin tasarımları basittir.
- \* Modüler olarak tasarımları yapılabilir ve fazla yer kaplamazlar.
- \* Klasik sistemlere göre daha az enerji kullanırlar.
- \* Potansiyel olarak daha düşük yatırım ve işletme maliyetlerine sahiptirler.
- \* Sürekli ve otomatik işletme özelliği ve otomasyon kolaylığı sağlarlar.
- \* Düşük bakım maliyeti gerektiren az sayıda hareketli parça içerirler.
- \* Kirleticilerin kimyasal yapıları veya biçimine etki etmezler.
- \* Hiçbir kimyasal ilavesi gerektirmezler.
- \* Su veya atıksuyun özelliklerindeki değişikliklerden fazla etkilenmezler.
- \* Sıcaklık değişimlerinden fazla etkilenmezler.
- \* Yüksek saflıkta ürün ortaya koyabilirler.

#### Dezavantajları;

- \* Membran kirlenmesi
- \* Membran ömrünün düşük olması
- \* Konsantre akımının bertarafı

Membran teknolojileri kullandıkları sürücü kuvvetlere göre Tablo 1.6'daki şekilde sınıflandırmak mümkündür. Klasik ve çapraz akış filtrasyon esasına göre çalışan basınç sürücülü membran teknolojiler MF, UF, NF ve TO olmak üzere 4 farklı grupta incelenebilir (Mulder, 1991; Aydın, 2006; Torunoğlu, 2009). Atıksu arıtımı ve yeniden kullanım için membran teknolojileri düşük basınçlı (MF ve gevşek UF membranlar) ve yüksek basınçlı (sıkı UF, NF ve TO membranlar) membranlar şeklinde kategorize etmek mümkündür (Guo ve diğ., 2012).

Tablo 1.6. Membran teknolojilerin sürücü kuvvetlere göre sınıflandırılması

<b>Basınç farkına göre</b>	<b>Konsantrasyon farkına göre</b>	<b>Sıcaklık farkına göre</b>	<b>Elektriksel potansiyel farkına göre</b>
Mikrofiltrasyon (MF) Ultrafiltrasyon (UF) Nanofiltrasyon (NF) Ters Ozmoz (TO)	Pervaporasyon Gaz Ayırma Diyaliz Buhar Geçişi	Termo-ozmoz Membran Distilasyonu	Elektrodiyaliz Elektro-ozmoz Membran elektrolizi



verimi, mikroorganizma giderme kapasitesi (log-giderme verimi) ile belirlenir (Arı, 2009).

Gözenek çapları 0,01-5 µm arasında (bazı kaynaklarda 0,02-20 µm) değişen MF membranlarında ayırma işlemi elek mekanizmasına dayanır ve büyüklüğü gözenek çapından daha fazla olan maddeler membran tarafından tutularak sudan ayrılır (Aydiner, 2006; Arı, 2009). Membran direnci düşük olduğu için MF teknolojisi 0-2 bar basınç farkı ile işletilir ve akış yönü membran yüzeyine paralel olarak uygulanır. MF teknolojisi klasik filtrasyon işletim şekli ile işletilir. Öte yandan büyük ölçekli uygulamalarda çapraz akış filtrasyon işletim şekli tercih edilmektedir (Koyuncu, 2001; Kaleli, 2006; Özçelep, 2009).

Daha çok partiküllerin, askıdaki katıların, bulanıklık ve bazı bakterilerin gideriminde kullanılır (Metcalf ve Eddy, 1991). MF virüsler için bariyer oluşturmaz, ancak dezenfeksiyon ile birlikte kullanıldığında sudaki bu tür mikroorganizmaları da kontrol altında tutabilir. Membrandan geçemeyen konsantrasyon zamanla membran yüzeyinde birikerek direnci arttırmaktadır. MF uygulamalarında karşılaşılan en büyük problem, zamanla akının azalmasıdır. Akıyı iyileştirmek için membranların belirli bir süre sonra temizlenmesi gerekir. Mikrofiltrasyonda, işletme sırasında konsantrasyon polarizasyonu ve tıkanmanın etkisini azaltmak için vorteksli akımlar, ses dalgaları, titreşimler, elektriksel alanlar vb. çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. MF uygulamalarında arıtma sırasında herhangi bir kimyasal madde kullanımı söz konusu değildir, dolayısıyla konvansiyonel arıtma sistemlerinde kullanılan kimyasal maddelerin oluşturduğu toksik etkiler mikrofiltrasyonda görülmez (Koyuncu, 2001; Kaleli, 2006; Arı, 2009).

MF membranları polipropilen, akrilonitril, naylon, politetrafloroetilen tipinde ve spiral sarımlı, hollow-fiber (boşluklu elyaf), plaka ve çerçeve konfigürasyonlarında yapılmaktadır (Metcalf ve Eddy, 1991).

MF teknolojisinin genel kullanım amaçları arasında saf sıvı üretimi, değerli ürünlerin geri kazanımı için süspansiyonların konsantrasyon edilmesi, proses sıvılarının rejenere edilmesi, endüstride sterilizasyon, meyve suları, şarap ve bira hammaddelerinin ayrımı, fermentasyon, yağ-su karışımlarının arıtımı yer almaktadır (Zaidi ve diğ., 1992; Ripperger ve Altmann, 2002). MF teknolojisinin içme suyu arıtımında ince

ızgaralardan sonra ana arıtma prosesi olarak kullanıldığı farklı uygulama şekilleri bulunmaktadır. Son yıllarda su geri kazanımı konusu ağırlık kazandığından, MF membranları NF ve TO membranları öncesinde ön arıtma amacıyla da kullanılmaktadır (AWWA, 1996; Koyuncu 2001; Kaleli, 2006; Büyükdere, 2008; Fan ve diğ., 2008).

#### **1.3.4.2. Ultrafiltrasyon (UF)**

UF, kolloidler, proteinler ve karbonhidratlar gibi yüksek moleküler ağırlıklı çözülmüş maddeler içeren çeşitli çözeltilerin ayrıştırılması için kullanılan ve 1930'lu yıllardan beri kullanılmakta olan basınçla çalışan bir prostedir (Metcalf ve Eddy, 1991; Arı, 2009). İşletme açısından mikrofiltrasyona benzeyen UF membranların gözenek boyutları 0,05-1 nm arasında değişmektedir. UF membranları üst tabaka kalınlığı, 50–250 µ arasında değişen, yüksek geçirgenlik ve seçiciliği olan bir alt tabaka ile desteklenmiştir. Esas filtrasyon olayı üst tabakada meydana gelmektedir. UF membranların işletme basıncı NF membranlardan daha düşük olmakla birlikte 1-7 bara kadar olabilmektedir (Scott ve Hughes, 1996; Arı, 2009). UF, dünya çapında başarılı bir şekilde kullanılan, bir çok endüstriyel uygulamada ve kentsel atıksuyun arıtımında aktif çamur proseslerindeki çöktürme tanklarının yerini alan bir filtrasyon prosesidir (Blstakova ve diğ., 2009).

UF membranları ile tutulan maddeler arasında şeker, biyomoleküller, makromoleküller, kolloidal maddeler, polimerler, çözülmüş ve askıda katılar, renk bileşikleri, bazı virüs ve bakteriler sayılabilir. Molekül ağırlığı düşük solvent ve tuzlar ise UF membranlardan geçecektir. UF membranlarında, ayırma işlemi MWCO ile ifade edilmekte olup her bir membran türü için bu değer belirlenmiştir. Ultrafiltrasyon membranları ile moleküler ağırlıkları, 1.000-1.000.000 D (Dalton)=kg/kmol arasında değişen maddeler tutulmaktadır. UF membran performansı, sadece membran özellikleri ile değil, aynı zamanda konsantrasyon polarizasyonu, tıkanma ve adsorpsiyon ile de belirlenmektedir (Metcalf ve Eddy, 1991; Scott ve Hughes, 1996; Fan ve diğ., 2008; Arı, 2009; Özçelep, 2009; Kaya ve diğ., 2010).

UF membran tipleri selüloz asetat, aromatik polyamidler; konfigürasyonları ise spiral sarımlı, hollow-fiber, plaka ve çerçeve şeklindedir (Metcalf ve Eddy, 1991).

UF teknolojisi; gıda, süt, ilaç, kimya, metalurji ve deri endüstrilerinde atıksuların arıtılması ve geri kazanılması amaçlı, içme suyunda ileri arıtma amaçlı, TO ve NF öncesinde ön arıtma amaçlı olarak, tekstil endüstrisinde haşıl maddelerin ve indigo boyar maddelerin geri kazanımı, kağıt endüstrisinde ağartma atıksularının konsantre edilmesi, metal endüstrisinde yağ emülsiyonlarının konsantre edilmesi, süt endüstrisinde steril filtrasyon, otomobil endüstrisinde elektroboya banyolarında geri kazanım için kullanılmaktadır. Ayrıca aşuların, fermantasyon ürünlerinin, enzimlerin ve diğer proteinlerin ayrıştırılmasında uygulanmaktadır (Mulder, 1991; Scott ve Hughes, 1996; Aydın, 2006; Kaleli, 2006; Arı, 2009).

#### **1.3.4.3. Nanofiltrasyon (NF)**

1980'li yılların başlarında organik madde giderimi ve yumuşatma uygulamalarında kullanılmak üzere ortaya çıkarılmıştır. NF teknolojisi, düşük moleküler ağırlıklı organik bileşiklerin ve iki değerlikli iyonların tutulmasında kullanılır. NF kavramı, 200 kg/kmol molekül ağırlığı ve buna ait 1 nanometre (10 angstrom) büyüklük ile ilgilidir. NF membranları ile moleküler ağırlığı 200-500 Dalton arasında değişen çözülmüş maddeler tutulmaktadır. Bu teknoloji ile yüksek tuz konsantrasyonlarında ve daha düşük basınçlarda bile TO' dan daha yüksek akı sağlanabilmektedir (Eriksson, 1988; Van Der Bruggen ve diğ., 2008). NF, UF ve TO teknolojileri arasındaki basınç sürücülü membran teknolojisidir. Daha yoğun ve ince olmasına rağmen daha az geçirgen olan membran tabakasının göstermiş olduğu dirençten dolayı MF ve UF' den daha yüksek, TO' dan daha düşük basınçlarda işletilmektedir. Bu nedenle enerji maliyeti TO prosesine oranla daha düşüktür. Ayrıca ters ozmoza göre daha düşük kalitede su vermektedir (Scott ve Hughes, 1996; Akgül, 2006; Kaleli, 2006).

NF teknolojisi, atıksudan çok değerlikli metalik iyonlar gibi çözülmüş bileşiklerin, çok küçük moleküllerin ve virüslerin giderilmesinde kullanılmaktadır. NF hem organik hem de inorganik bileşikleri dezenfeksiyon gerektirmeksizin giderdiğinden yeniden kullanım gereksinimlerini karşılayan bir teknolojidir. NF membran tipleri selüloz asetat, aromatik polyamidler, konfigürasyonları ise spiral sarımlı, hollow-fiber ve ince film kompozit şeklindedir (Metcalf ve Eddy, 1991). NF membranlar ile %80' den daha fazla KOİ giderimi sağlanmaktadır. Ayrıca UF membranlara göre



kalsiyum, magnezyum ve sülfat daha etkin olarak giderilmektedir. Ancak klorür, sodyum ve potasyum gibi tek değerlikli iyonların TO membranlara göre giderimleri daha azdır (Kaya ve diğ., 2010).

NF membranlarının giderme mekanizması çözünme difüzyon modeline göre gerçekleşmektedir. Ayrıca yüzey yükü de NF membranların giderme mekanizmasında önemli rol oynar. İki farklı yüzey yüküne sahip NF membranının, por büyüklükleri ve geçirimsizlikleri aynı olsa bile farklı pH değerlerinde iyon giderimleri aynı olmayacaktır. Yüklü moleküllerin giderimi, yükün değerliğine, molekülün konsantrasyonuna ve kimyasal yapısına, membranın yüzey yüküne ve yoğunluğuna bağlı olarak gerçekleşmektedir. Yüksüz moleküllerin gideriminde ise molekülün boyutu, kimyasal yapısı ve hidrofobik/hidrofilik özellikleri etkili olmaktadır (Özçelep, 2009).

İnce filmlili selüloz olmayan membranlardaki gelişmeler ile beraber kullanımı daha da yaygın hale gelen NF membranları genellikle % NaCl veya MgSO<sub>4</sub> giderme verimi ile sınıflandırılır. Ayrıca moleküler ağırlık engelleme sınırı da giderme verimini belirlemede kullanılmaktadır. Bu membranlarda, iki değerlikli iyonların giderimi, tek değerlikli iyonların giderimine göre daha yüksek olmaktadır (Arı, 2009).

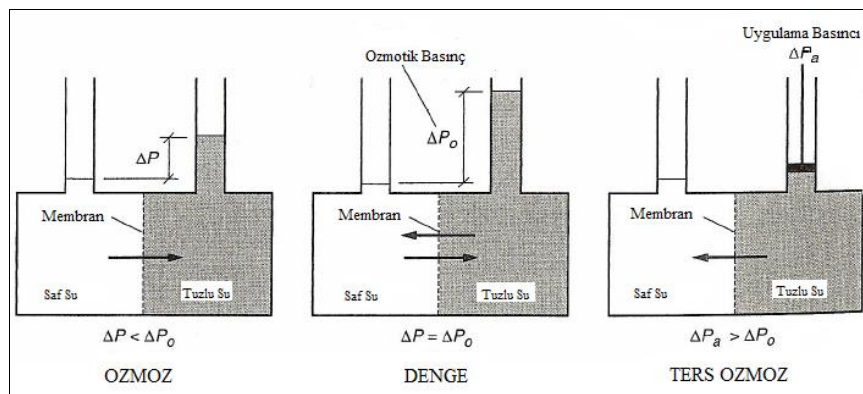
Literatürdeki verilere göre NF teknolojisi; proses, içme ve yüzey sularından sertlik gideriminde, organik madde gideriminde, atıksu uygulamalarında inorganik maddelerden organik madde ayırımında, kuyu sularından TDS ve nitrat gideriminde, atrazin gibi pestisitlerin gideriminde, iyon değiştirici veya TO öncesi ön arıtma yapılmasında, bakteri ve virüs gideriminde, özellikle kuyu suyu ya da nehir veya göl gibi yüzeysel suların arıtılması için kullanılmaktadır. Ayrıca endüstriyel alanda tuzlu peynir sularının arıtımında, süt endüstrisi atıksularının geri kazanılmasında, tekstil endüstrisinde renk ve organik madde gideriminde ve boyanın bertarafında, gıda sanayinde organik maddelerin konsantre edilmesi ve tuz giderilmesinde, eczacılıkta renk ve TOK gideriminde, deri sanayinde atıksudan suyun ve tuzun geri kazanımında, kağıt, elektro kaplama ve boya endüstrisinde, metal kaplama endüstrisinde asidik çözeltilerden ağır metallerin geri kazanımında, nikel arıtımında uygulamaları vardır (Köseoğlu, 2005; Akgül, 2006; Çevik, 2006; Kaleli, 2006; Arı, 2009; Hacifettahoğlu, 2009). Suyun yeniden kullanımında güvenilir kaynak

sağlamak bakımından NF teknolojisi, farmasotik aktif bileşikler gibi düşük molekül ağırlıklı organik maddelerin gideriminde de alternatif bir ileri arıtma tekniği olarak nitelendirilmektedir (Michael ve diğ., 2013; Yaşar ve diğ., 2015).

#### 1.3.4.4. Ters ozmoz (TO)

Ters ozmoz, 1960’larda kullanımı hızlı bir şekilde artmaya başlayan ve ozmotik basınç prensibinden yola çıkılarak geliştirilen bir teknolojidir. Özellikle desalinasyon ve atıksu arıtma alanlarında ters ozmoz kullanımı yaygınlaşmıştır. Basınçla çalışan bu proste, yoğunluğu fazla olan sıvı içerisindeki tuzlar, sertlik, patojenler, bulanıklık, dezenfeksiyon yan ürünleri, pestisitler, mineraller ve organik maddeler, çok küçük moleküller, renk, sülfat, nitrat, sodyum ve diğer iyonlar tutulmaktadır (Metcalf ve Eddy, 1991; Arı, 2009).

Ozmotik basınç, bir zar (membran) ile ayrılmış olan konsantrasyonu düşük olan suyun konsantrasyonu yüksek olan su tarafına doğru geçişini engellemek için konsantre su tarafına uygulanacak basınçtır. Ozmozda, yoğunluğu az olan sıvı, yarı geçirgen bir membrandan, yoğunluğu fazla olan tarafa geçerek, yoğunluğu fazla olanı sulandırır ve bu işlem ozmotik basınçta dengelenene kadar devam eder. Ozmotik basınçtan daha yüksek bir basınç uygulanarak, suyun daha fazla konsantre olan çözülden yüksek basınç ile seyreltilmiş olan çözelti tarafına doğru geçmesi “Ters Ozmoz” olarak ifade edilmektedir (Özçelep, 2009). Şekil 1.5’ te ozmoz ve ters ozmoz teknolojileri gösterilmektedir (Metcalf ve Eddy, 1991).



Şekil 1.5. Ozmoz ve ters ozmoz teknolojileri

Düşük molekül ağırlıklı maddeleri (inorganik tuzlar) ve organik maddeleri, 0,1-1 nm arasındaki partikülleri tutmak amacıyla kullanılan TO teknolojisi, 10-100 bar

arasında değişen yüksek basınçlarda uygulanmaktadır. Son yıllarda membran üretiminde meydana gelen gelişmelerle birlikte düşük basınçlı ters ozmoz membranları da değişik alanlarda kullanılmaya başlanmıştır. Uygulanan basınç besleme suyuna bağlı olarak 10 bar'a kadar düşürülmüştür. TO olayının teorisi, solvent ve çözeltilerin membran üst tabakasında çözüdüğü ve difüze olduğu “Çözünme-Difüzyon Modeli”ne dayandırılmaktadır. TO membranları genellikle %NaCl giderme verimi ile sınıflandırılmaktadır. Ters ozmoz membranlarının kullanımı arttıkça zaman içerisinde işletme maliyetleri azalmış ve akı değerleri ile giderme verimleri artmıştır. Ayrıca geri kazanım oranları da yükselmiştir (Scott, 1996, Koyuncu, 2001; Arı, 2009). En küçük gözenek çapına sahip oldukları için tıkanma riski çok yüksek olan TO membranları öncesi iyi bir ön arıtma uygulanmalıdır (Özçelep, 2009).

TO teknolojisinin başlıca uygulama alanları; deniz suyu veya tuzlu sudan içme suyu elde edilmesi, gıda endüstrisi atıksularının konsantre edilmesi, proses suyu üretimi, metal, süt kağıt ve tekstil endüstrileri atıksularının arıtımı ve geri kazanımı (Öztürk ve diğ., 2005; Özçelep, 2009), herbisit ve pestisitler gibi spesifik inorganiklerin giderimi (Köseoğlu, 2005), içme suyu üretimi, atıksu arıtımı, endüstriyel su üretimi, değişik endüstriyel atıksuların arıtımı (Arı, 2009), acısu (brackish water) ve denizsuyunun saflaştırılmasıdır (Aydiner, 2006). Ayrıca atıksu arıtımında TO öncesinde MF' nin ön arıtma amaçlı uygulanması sonrasında suda kalan çözünmüş bileşiklerin giderimi için kullanılmaktadır. Deiyonize su elde etmek için yüksek basınç gerektirir (Metcalf ve Eddy, 1991). NF gibi TO da iz organik kirleticilerin, antibiyotik gibi farmasotiklerin giderildiği yüksek kalitede geri kazanılmış suların üretimi için önemli role sahip membran proseslerdir (Nghiem ve Hawkes, 2007; Chon ve diğ., 2011; Michael ve diğ., 2013).

### **1.3.5. Membran kirlenmesi ve modelleri**

Membran kirlenmesi, sıvıdan ayrılması istenen çözünmüş veya katı haldeki maddelerin, membran yüzeyinde sürücü kuvvetler ve hidrodinamik şartlar nedeniyle sürüklenmeleri ve yüzeyde birikmeleri sonucunda meydana gelir. Kirletici maddelerin membran yüzeyine tutulmaları çeşitli mekanizmaların bir sonucu olarak ortaya çıkar. Membran gözenekleri içinde veya membran yüzeyinde kirleticilerin

bağlanması, birikmesi veya adsorpsiyonu ile membranda biriken maddeler membranın kirlenmesine yol açarlar. Membran kirlenmesi ön arıtma ihtiyacı, temizleme gereksinimleri, işletme şartları, maliyet ve performans etkilerinden dolayı membran sistemlerinin işletme ve dizaynında oldukça önemlidir (Metcalf and Eddy,1991; Aydın, 2006). Bu kirlenme zamanla membran ömründe azalma, enerji tüketiminde artış ve membran temizleme maliyetlerine sebep olmaktadır. Membran kirlenmesine sebep olan kirleticiler ve kirlenme türleri 4 grupta sınıflandırılmaktadır:

- Partiküler madde birikimi (kolloidal kirlenme)
- Organik maddelerin adsorpsiyonu (organik kirlenme)
- İnorganik birikim (çökeltme)
- Mikrobiyal büyüme (biyokirlenme)

Kolloidal kirlenme, inorganik ve organik partiküllerin/kolloidlerin makromoleküllerin membran yüzeyi ve/veya membran porlarında birikmesiyle meydana gelmektedir. Kolloidler geçirgenlik direncine ilave bir katman yaratarak membran yüzeyinde birikmektedir. TO membranlarında meydana gelen kolloidal kirlenmeyle ilgili ikincil çıkış sularını arıtmak için yapılan çalışmalar, 5 µm'dan daha küçük partiküllerin büyük partiküllere göre bu tür kirlenmeye daha çok katkıda buldukları göstermektedir. Yüzey birikimine ilave olarak bazı partiküller, porların içine girebilecek kadar küçük boyutta olabilirler. Porlarda meydana gelen bu kirlenme, por boyutlarının daha büyük olması nedeniyle MF ve UF membranlarında daha fazla görülmektedir. NF membranlarında ise kolloidal kirlenme daha çok kek tabakası oluşumuyla akı düşüşüne neden olmaktadır.

Organik kirlenmeye neden olan kirleticiler; organik maddelerin membran yüzeyinde adsorpsiyonu, süzüntü akısına zarar vermekte ve membranların tuz giderimini olumsuz etkilemektedir. Organik kirleticilerin negatif yüklü fonksiyonel grupları, yüklü membran yüzeyi ile benzer özelliği sahiptir. Bu nedenle organik bileşikler kolloidal kirleticiler ile etkileşime girerek membran yüzeyinde süzüntü-direnç tabakası oluşturur. Ayrıca, organik kirleticilerden çözünmüş bileşikler ve kolloidler (humik ve fulvik asitler, polisakkaritler, polifenolik bileşikler, hidrofilik ve hidrofobik materyaller ve proteinler) adsorbe olarak membranda yüzeyinde birikirler. Doğal organik maddelerin adsorpsiyonu ile membran kirlenmesi, içmesuyu arıtımı için MF kullanımını sınırlandıran önemli bir faktördür. UF humik maddeler gibi

organiklerin ayrılması için kullanılmaktadır. Ayrıca organik maddeler ve mikroorganizmalar arasındaki biyokimyasal etkileşim membran yüzeyinde biyofilm oluşumunu ve mikroorganizma büyümesini desteklemektedir. Sudaki çözünmüş organiklerin bileşimi hakkında yeterli bilgiye sahip olunmaması, organik kirlenme kontrolünü zorlaştırmaktadır.

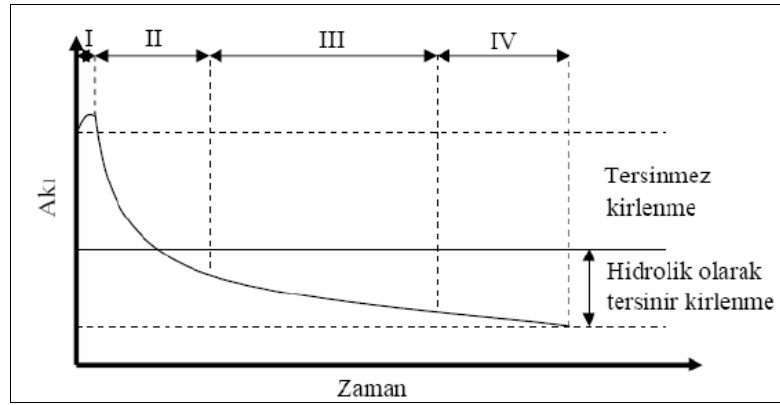
İnorganik kirlenme, demir, manganez, silika, alüminyum, kalsiyum, fosfor ve sülfat tuzlarının membran yüzeyinde çökmesi sonucunda meydana gelmektedir. Membran yüzeyindeki kirlenme mekanizması konsantrasyon polarizasyonu etkisine dayanmaktadır. Membran yüzeyinde oluşan konsantre sınır tabakası, çözünürlük sınırını aşan tuzların çökmesine (scaling) ve askıda katı maddelerin membran yüzeyinde birikimine neden olmaktadır. TO membranlarda membran yüzeyine çöken tuz besleme akımının hidrodinamik şartlarına zarar vermektedir. İnorganik kirlenme ile membranın fiziksel yapısı zarar görmektedir.

Biyokirlenme, algler, bakteri gibi mikroorganizmaların membran yüzeyine yapışarak biyofilm tabakası oluşturması olarak ifade edilmektedir. Biyokirlenme, transmembran basıncının artması ve süzöntü akısının azalmasıyla birlikte, membran yapısının kimyasal olarak bozunmasına da sebep olmaktadır. Bu durum membran yüzeyinin direkt enzimatik bozulmasından veya membran polimerini hidrolize edebilen yüksek pH' dan kaynaklanabilmektedir (Chen ve diğ., 2006; Guo ve diğ., 2012).

Günümüzde katı-sıvı ayırma proseslerinde ve sürdürülebilir su kaynakları yönetiminde membran prosesler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak bu proseslerde membran kirlenmesi ve buna bağlı akı azalması ve ürün suyu kalitesinin bozulması önemli bir sorun teşkil etmektedir. Membran yüzeyindeki kirlenme özellikleri ve davranışı membran özellikleri, besleme suyu özellikleri, işletme şartları ve ön arıtma proseslerine bağlı olarak belirlenmektedir (Chon ve diğ. 2012). Kütle taşınımına bağlı olarak membran kirlenmesine neden olan akı azalması ve konsantrasyon polarizasyonu birbirleri ile bağlantılı konular olup, bu bölümde membranda kirlenmesi sonucu oluşan akı azalması, kütle taşınımı ve taşınım sırasında oluşan kirlenme dirençleri, konsantrasyon polarizasyonu ve tıkanma ile gözenek tıkanma modelleri ayrı başlıklar halinde verilmiştir.

### 1.3.5.1. Membranlarda akı azalması

“Akı azalması” membran gözenekleri ve yüzeyinde biriken malzemelerin, membran kirlenmesi olarak ortaya çıkardıkları, zamana bağlı süzüntü akısı miktarındaki azalmadır. Bu olayda etkili olan mekanizmalar konsantrasyon polarizasyonu, kek tabakası oluşumu, inorganik çökme, organik adsorpsiyon ve biyolojik kirlenmedir. Zamanla membrandan geçen akı azalması Şekil 1.6’ da gösterilmektedir (Aydiner, 2006).

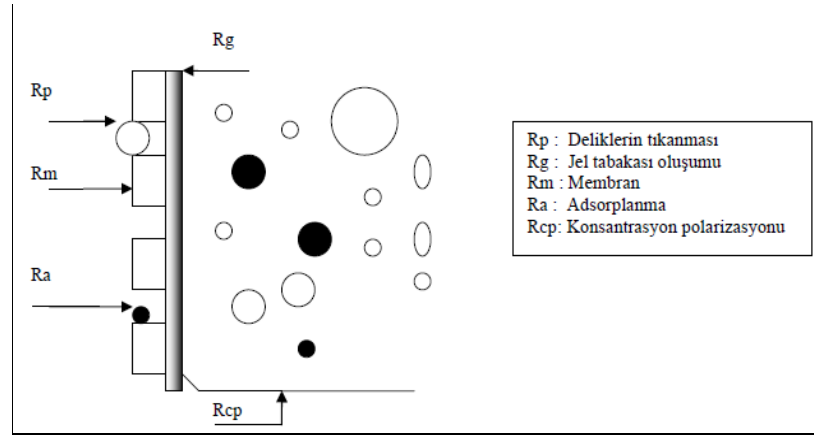


Şekil 1.6. Akı azalmasının şematik gösterimi

Şekil 1.6’ dan görüleceği üzere, akı azalması dört kademe meydana gelmektedir. 1. kademe, su içerisindeki maddelerin depolanması nedeniyle oluşan membran yüzeyinin modifikasyonu veya prosesin geçişi nedeniyle akı yükselmesi görülür. 2. kademe ise suyun yapısına göre kısa bir süre içerisinde meydana gelir ve konsantrasyon sınır tabakasının oluşması nedeniyle ortaya çıkar. Bu kademe hızlı bir akı azalması gözlenir. 2. kademe ortaya çıkan akı azalması, membranın geri yıkanması veya kimyasal temizleyiciler yardımıyla giderilebilir. Bu duruma “tersinir kirlenme” adı verilmektedir. 3. kademe oluşan akı azalması ise yavaş akı azalması periyodu olarak bilinmekte olup membran üzerinde jel tabakasının oluşması nedeniyle ortaya çıkar. Bu aşamadan sonraki akı azalmaları kimyasal bozunma ve por tıkanma mekanizmaları aracılığıyla meydana gelen “tersinmez kirlenme” olarak bilinir. Membran üzerinde oluşan bu jel tabakası zamanla membranın bir parçası gibi davranan ikinci bir membran olarak davranış gösterir. Bu kirlenmede düşük akı hidrodinamik veya kimyasal olarak iyileştirilemez. 4. ve son aşamada ise akı, çok yavaş bir şekilde azalır ve membran filtrasyonu kararlı halde kabul edilir (Aydiner, 2006; Özçelep, 2009; Guo ve diğ., 2012).

### 1.3.5.2. Kütle taşınımı ve kirlenme dirençleri

Membran filtrasyon proseslerinde parçacık ayırımı ve suyun süzülmesi işlemleri farklı kütle taşınım adımları içermektedir. Kolloidler ve ince parçacıklar için başlıca kütle taşınımı mekanizmaları konveksiyon, brownian difüzyon, kesme etkili difüzyon, kaldırma kuvveti, yerçekimi etkisiyle çökme ve elektriksel güçtür. Kütle taşınımı olayında membran kirlenmesi ve akı azalmasına bağlı olarak bazı dirençler oluşmaktadır. Şekil 1.7’ de bir membran kesitinde kütle taşınımına karşı koyan tüm dirençler gösterilmektedir (Mulder, 1991; Aydın, 2006; Kaleli, 2006).



Şekil 1.7. Membran kesitinde meydana gelen direnç türleri

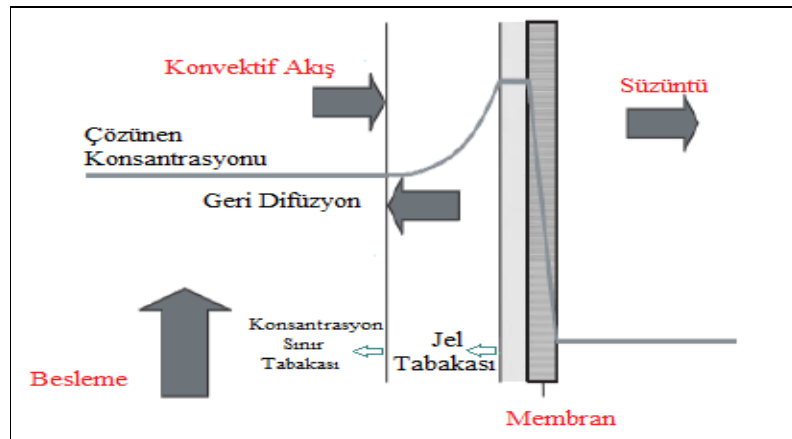
İdeal bir durumda akışkana karşı oluşan tek direnç “membran direnci ( $R_m$ )” dir. Membran, çözelti içindeki çözülmüş maddeleri geri çevirdiğinden, membran yakınında çözülmüş madde konsantrasyonunda artış meydana gelmektedir. Bu da “konsantrasyon polarizasyonu direnci ( $R_{cp}$ )” olarak adlandırılan ek bir dirence sebep olmaktadır. Zamanla membran kenarında meydana gelen konsantrasyon artışı daha da yükselmektedir. Bunun sonucu “jel polarizasyonu direnci ( $R_g$ )” olarak adlandırılan bir direnç daha oluşmaktadır. Özellikle boşluklu membranlarda membran deliklerinin tıkanmasıyla oluşan diğer bir direnç türü de “por direnci ( $R_p$ )” dir. Membran boşlukları üzerinde kirleticilerin tutunması ile oluşan direnç ise “adsorplanma direnci ( $R_a$ )” olarak ifade edilir. Aynı zamanda membran delikleri üzerinde konsantrasyon artışı boşluk çapının daralmasına da sebep olmaktadır (Kaleli, 2006).

Membranların ekonomik olarak etkinlikleri, membran üzerinde akıyı azaltıcı yönde tesirleri bulunan bu dirençlerin en az düzeyde tutulmaları ile yakından ilgilidir. Son

araştırmalar göstermiştir ki, kütle taşınımı olayında, adsorpsiyon, van-der waals etkileşimi ve elektrostatik çift tabakadan dolayı itme gibi, parçacıklar arası kısa mesafedeki etkileşimler önemli rol oynamaktadır. Bu kuvvetler özellikle, parçacıklar arası mesafenin oldukça azaldığı, yüzey kekinin ve konsantrasyon polarizasyonunun söz konusu olduğu membran duvarının hemen yakınında oldukça etkili olmaktadır (Aydıner, 2006).

### 1.3.5.3. Konsantrasyon polarizasyonu ve tıkanma

Membranlar seçici geçirgen yapıya sahip olduklarından, besleme çözeltisi içindeki maddelerin (tuzların) membrandan geçişini engellerken, çözücü formundaki suyun membranın diğer tarafına geçmesine izin verirler. Böylece membranın bir tarafında yüksek konsantrasyonlu, diğer tarafında ise (süzüntü kısmı) çok düşük konsantrasyonlu akımlar oluşur. Membran prosese verilen besleme akımı devam ettikçe membran tarafından tutulan maddeler, membran yüzeyinde birikerek yüksek konsantrasyon artışına sebep olurlar. Bu olay, membran yüzeyindeki tuzların konsantrasyonunun aşırı artışı anlamına gelen “konsantrasyon polarizasyonu” olarak adlandırılır. Bu durumda membran yüzeyindeki konsantrasyon, besleme akımındaki konsantrasyon değerinden yüksek olur. Bir süre sonra membran yüzeyindeki konsantrasyon birikmesi geri difüze olmaya başlar. Durum daha kararlı hal alır ve iki yöndeki difüzyon birbirine eşitlenir. Böylece, membran yüzeyinde oluşan konsantrasyon profili, sınır tabakası içinde gözlemlenir (Kaleli, 2006). Konsantrasyon polarizasyonu şematik olarak Şekil 1.8’ de gösterilmektedir (Judd ve Jefferson, 2003).



Şekil 1.8. Konsantrasyon polarizasyonunun şematik gösterimi



Konsantrasyon polarizasyonun etkileri; membran yüzeyinde ozmotik basıncın artması ve akının azalması, membran yüzeyindeki konsantrasyon artışıyla membran deliklerinin tıkanması ve böylece akı miktarının azalması, membran arıtma veriminin değişmesi ve membran kirlenmesi olarak sıralanabilir. Polarizasyon ve tıkanma membran sisteminin ideal durumunda akıda azalmaya neden olarak bir düşüş meydana getirir. Özellikle makromoleküller ve partiküler maddeler, polarizasyon ve tıkanmaya sebep olur. Akıda düşüş meydana getiren polarizasyon ve tıkanma, membran yüzeyinde ilave bir bariyer oluşturarak membranın direncini artırmaktadır (Kaleli, 2006).

#### 1.3.5.4. Gözenek tıkanma modelleri

Membran kirlenme mekanizması, gözenek tıkanması modelleri kullanılarak belirlenebilmektedir. Bu modeller, Hermia tarafından geliştirilen zamana bağlı akı azalmasını esas alarak membrandaki kirlenme mekanizmasını açıklayan modellerdir. Gözenek tıkanması kompleks bir olay olmakla birlikte, akı düşüş verisini analiz etmek ve tıkanma mekanizmasını tanımlamak için en genel yaklaşım, 4 farklı klasik tıkanma modelinden birini kullanmaktır. Bu modeller;

- Standart gözenek tıkanması,
- Ara seviye gözenek tıkanması,
- Tam gözenek tıkanması ve
- Kek filtrasyonu olarak ifade edilmektedir.

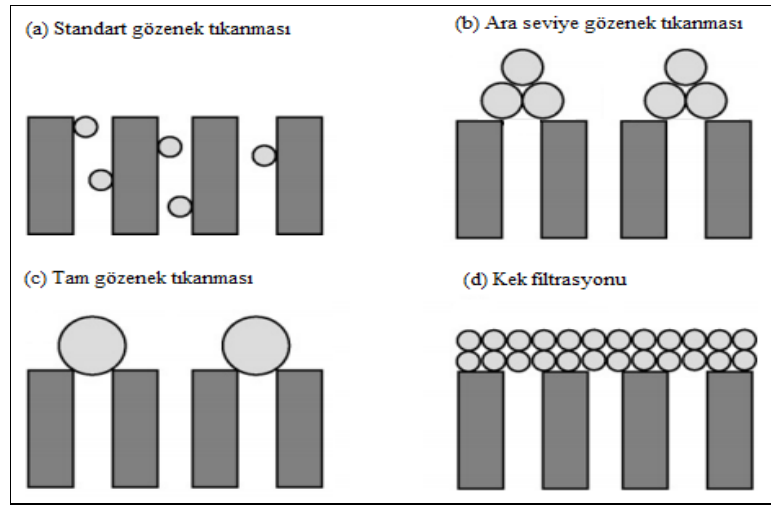
$$\frac{d^2t}{dV^2} = k \left( \frac{dt}{dV} \right)^q \quad (1.5)$$

Eşitlik (1.5)' te yer alan k, kütle transfer katsayısını; q, filtrasyon sabitini göstermektedir. q, kek, ara seviye, standart ve tam gözenek tıkanmaları için sırasıyla 0, 1, 1,5 ve 2 değerlerini almaktadır. Bu eşitlik membran filtrasyonuna ait deneysel veriler kullanılarak filtrasyon mekanizmasının tanımlanmasında kullanılır (Mohammadi ve diğ., 2003; Aydın, 2006; Vela ve diğ., 2008; Dere, 2010; Guo ve diğ., 2012). Her bir tıkanma modeli için lineerleştirilmiş denklemler Tablo 1.7'de verilmektedir. Denklemlerde  $J_0$ =ilk süzüntü akısını,  $J$ =süzüntü akısını, k sabitleri her bir model için kütle transfer katsayılarını ve t zamanı ifade etmektedir (Aydın, 2006; Vela ve diğ., 2008; Kaya ve diğ., 2010).

Tablo 1.7. Gözenek tıkanması modellerine ait denklemler

Gözenek Tıkanma Modeli	Lineer Denklem
Standart gözenek tıkanması	$J^{-1/2} = J_0^{-1/2} + k_s \cdot t$
Ara seviye gözenek tıkanması	$J^{-1} = J_0^{-1} + k_{as} \cdot t$
Tam gözenek tıkanması	$\ln(J)^{-1} = \ln(J_0)^{-1} + k_t \cdot t$
Kek filtrasyonu	$J^{-2} = J_0^{-2} + k_k \cdot t$

Bu modellerin her birinin dayandığı kirlenme mekanizmaları Şekil 1.9' da gösterilmektedir (Vela ve diğ., 2008).



Şekil 1.9. Gözenek tıkanma modellerine ait kirlenme mekanizmalarının şematik gösterimi

Standart gözenek tıkanması: Bu model, parçacık boyutunun gözenek boyutundan daha küçük olduğu durumlarda meydana gelir. Moleküllerin membran gözenek duvarı veya membran destek malzemesi üzerinde biriktiği modeldir. Böylece membranın gözenek hacminde ve süzüntü akısında azalma meydana gelmektedir.

Ara seviye gözenek tıkanması: Bu tür tıkanma da tam gözenek tıkanması gibi parçacığın gözenek girişini kapatması durumunda gözeneklerin tamamen tıkanmasına sebep olabilir. Fakat ara seviye gözenek tıkanmasında gözeneklerde kısmen bir tıkanma gözlenir. Her parçacık membran gözeneklerini tıkamaz. Bu model, gözeneklerin tıkanma ihtimalini araştırır. Ayrıca bu modelde bazı moleküller öncelikle diğer moleküllerle birleşerek çökebilir ve membran porlarını kapatabilir.

Tam gözenek tıkanması: Parçacık boyutunun membran gözenek boyutuna yaklaşık olarak eşit olması durumunda membran gözeneklerinin, gözenek girişinin hemen ağız kısmından tek bir parçacık ile kapatıldığı akı azalma modelidir. Bu modele göre membran yüzeyine ulaşan her molekül membran porları girişini bloke eder ve bir molekül diğer bir molekülün üzerine yerleşmez.

Kek filtrasyonu: Parçacık boyutu membranın gözenek boyutundan daha büyük olduğunda parçacıklar membran yüzeyi üzerinde birikerek bir kek tabakası oluştururlar. Bu durumda, membran gözenek yapısı etkilenmez (Aydiner, 2006; Vela ve diğ., 2008).

#### **1.4. Kentsel Atıksuların Geri Kazanımı, Yeniden Kullanımı ve Membran Teknoloji Uygulamaları**

Kentsel atıksulardan geri kazanım ve yeniden kullanım amacıyla membran teknoloji uygulamaları özellikle son yıllarda gelişme göstermiştir. Literatürde sulama ve diğer amaçlarla membran teknolojiler kullanılarak, farklı endüstriyel atıksuların geri kazanımı ve yeniden kullanımı ile ilgili birçok çalışma olmasına rağmen, kentsel/evsel atıksular ile arıtılmış kentsel/evsel atıksuların geri kazanımı ve yeniden kullanımı ile ilgili çalışma sayısı daha azdır. Bu bakımdan literatürde bulunan ve çalışmaya yön vereceği düşünülen kentsel/evsel atıksuların geri kazanımı, yeniden kullanımı ve bu konudaki membran teknoloji uygulamalarına aşağıda yer verilmiştir:

Bixio ve diğ., 2006; “Avrupa’da Atık Suyun Yeniden Kullanımı” adlı çalışmalarında Avrupa’da son 20 yıldır artan su stresini hem su kıtlığı hem de kalitesindeki düşme anlamında irdelemiş ve suyun yeniden kullanım uygulamalarının su kaynaklarının daha etkin kullanımı için Avrupa’da pek çok belediye tarafından desteklenen suyun yeniden kullanım pratiklerini gözden geçirmiş, suyun arıtımı teknolojileri haritasını çıkarmış ve yeniden kullanım uygulamalarını ortaya koymuştur. Avrupadaki yeniden kullanım projelerinin ön değerlendirmesi üzerine veriler geleneksel literatür taramasına dayanmaktadır. Ön değerlendirmeye göre arıtılmış suyun artan kullanımı için daha açık kurum ayarlamaları ve yeniden kullanım ilkelerinin ortaya konulması gerektiği bildirilmiştir.

Murtaza ve diğ., 2006; yaptıkları çalışmada tuzlu ve sodalı sular, yeraltı suyu, drenaj suyu kullanılarak sulama suyu ihtiyacının karşılanmasını ön gördüklerini belirtmektedirler. 3 yıllık bir alan çalışması olan bu çalışmada Pakistan'ın İndus Ovalarında pamuk ve buğday yetiştirmek için tuzlu ve sodalı su kullanarak farklı sulama suyu ve toprak yönetimi stratejilerinden bahsetmişlerdir. Artan nüfus ile birlikte artan gıda ihtiyaçları için sulama suyu gereksinimi de artış göstermektedir. Bu çalışmanın amacı tuzlu-sodali sulama suyunun kumlu balçık toprak üzerindeki fiziksel ve kimyasal etkilerini izlemek, pamuk ve buğday bitkilerinin büyümesi üzerine farklı sulama ve toprak yönetim uygulamalarının etkilerini test etmek ve sulama ve toprak yönetimi uygulamalarının ekonomisini değerlendirmektir. Çalışma Su Yönetimi Araştırma Çiftliği'nde Nisan 2001'de Pakistan Üniversitesi tarafından başlatılmış, deneyler aşamalı olarak yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda uygun yöntemler kullanılmadan tuzlu-sodali su ile sulamada toprağın fiziksel ve kimyasal özelliklerinde bozulmaya neden olduğu saptanmıştır. Ancak tuzlu-sodali suyun, tatlı su ile döngüsel kullanıldığında ya da uygun toprak değişiklikleriyle birlikte uygulandığında alternatif bir sulama yöntemi olarak kullanılabileceği ayrıca mahsul veriminin olumsuz etkilenmeyeceği belirtilmektedir.

Tam ve diğ., 2007; tarafından yapılan pilot çalışma MBR/TO veya MF/TO ünitelerinden oluşan gelişmiş üçüncül arıtma proseslerinin çıkış suyu kalitesini değerlendirmek, içilebilir ve içilemeyen yeniden kullanım uygulamaları için arıtılmış atıksuyun ıslahının fizibilitesini araştırmak amacıyla yürütülmüştür. Pilot çalışma süresince 24 saatlik kompozit örneklerde pH, iletkenlik, bulanıklık, sertlik, amonyak, nitrat, KOİ, BOİ<sub>5</sub>, metaller, renk, E.Coli ve virüs analizleri yapılmış, ayrıca periyodik olarak östrojenler ve dezenfeksiyon yan ürünleri izlenmiştir. Sadece MBR ve MF ile içilemeyen yeniden kullanım uygulamaları için kabul edilebilir limitlerin altında kirletici konsantrasyonlarına ulaşılmış, TO uygulaması ile de özellikle estetik ve mikrobiyal açıdan arıtılmış su kalitesi artış göstermiştir. MBR/TO pilot tesisi ham atıksu, MF/TO tesisi ise ikincil çıkış suyu ile beslenmiş, MBR ve MF için batık sistem kullanılmış, MBR/MF süzüntüleri LFC1 ve ESPA1 olmak üzere 2 farklı TO membrandan geçirilmiştir. Toplam östrojen gideriminde, MBR/TO kombinasyonunun MF/TO' dan daha iyi olduğu belirlenmiştir. Virüs rejeksiyonu MBR ve MF uygulamalarında membran temizliği sırasında olumsuz etkilenmiştir.

Pilot denemelerin sonuçları, MBR/TO ve MF/TO teknolojilerinin sırasıyla ham atıksu ve ikincil arıtma çıkış sularını arıtarak yeniden kullanılabilir su üretmek için kullanılabilir olduğunu göstermiştir.

Bonnelye ve diğ., 2008; çalışmalarında teorik olarak TO öncesi UF ve MF teknolojilerinin besleme suyundaki kirleticilerin çoğunun giderilmesi açısından en iyi arıtma seçenekleri olduğunu belirtmişlerdir. Uzun dönem işletme temelinde bu arıtma yöntemleri ekonomik olarak uygulanabilir olmasına rağmen, UF/MF tek filtrasyondan daha maliyetli olmakta, ön arıtma için en iyi su kalitesi elde etmek bakımından ekonomik uygunluğu olmamaktadır. Ayrıca TO öncesi UF/MF direkt filtrasyonu teknik limitleri sağlayabilir, ancak sık sık temizleme ihtiyacı doğmaktadır. Bu nedenle TO kirlenmesi ön arıtma aşamasına taşınmaktadır. Ayrıca bu membranlar TO membranlarda biyokirlenme yaratan çok küçük organik molekülleri ortadan kaldıramazlar. Bu durumda TO öncesinde UF/MF' nin gerçek teknik avantajlarını kanıtlamak çok zordur, bu kanıtlar uzun süreli işletme şartı gerektirmektedir. Bu problemin çözümü için araştırmacılar flotasyon öncesi ön çöktürme ekleyerek UF/MF arıtımının artırılmasını önermektedirler. Ayrıca bu teknolojilerin birlikte uygulanmasının prosesin ekonomik dengesini de geliştirebileceğini ifade etmektedirler.

Cazurra, 2008; “Güney Barselona Atık Su Arıtma Tesisinde Suyun Yeniden Kullanımı” adlı çalışmasında Güney Barselona (İspanya)'da bulunan atık su arıtma tesisinden çıkan suyun Barselona kent bölgesinde yaşanan su kıtlığı problemini çözmek amacıyla yeni kaynak olarak kullanımını irdelemiştir. Arıtma tesisi çalışmaya başladığında yılda 50 milyon metreküp arıtılmış suyun Llobregat Nehri'nin aşağı bölümlerine ekolojik olarak akışı arttırmak, çiftlik alanlarının sulanması ve nehir deltasında sulak alana su sağlama amaçlarıyla yeniden kullanımı hedeflenmiştir. Ayrıca, nehrin aşağı delta akiferinde tuzluluk problemini çözmek için hidrolik bariyer olarak kullanımı da belirlenmiştir. Çalışmada, yeniden kullanım için gerekli su kalitesinin sağlanmasında azot ve fosfor gibi besin elementlerinin giderilmesi ve 3. derecede arıtımın gerçekleştirilmesi gerektiği bildirilmiştir.

Fan ve diğ., 2008; tarafından yapılan “Suyun yeniden kullanımında ikincil çıkış sularının düşük basınçlı membran filtrasyonu: kirlenmenin azaltılması için ön

arıtma” başlıklı çalışmalarında, Avustralya-Victoria’ da aktif çamur-lagün arıtımı (AS) prosesine sahip Western Atıksu Arıtma Tesisi’ nde arıtılan çıkış sularını kullanarak, düşük basınçlı membran performansını geliştirmek için reçine anyon değişimi, kimyasal koagülasyon, ön filtrasyon içeren çeşitli ön arıtma metodlarını değerlendirmeyi amaçlamışlardır. MF ve UF membran performansı akı artışı, çıkış suyu organik madde giderim veriminin geliştirilmesi, geri dönüşümsüz kirlenmenin azaltılması açısından denenmiştir. İkinci amaç ise kirlenmenin ana nedeni olan besleme ve çıkış suyundaki organik madde bileşenlerini araştırmak olarak belirlenmiş ve bunun için farklı analitik teknikler kullanılmıştır. Bir hücreye birleştirilmiş MF/UF ekipmanı (Amicon-8050, membran alanı 13,4 cm<sup>2</sup>, Millipore) besleme haznesine bağlanmış ve azot gazı ile sağlanan MF için 70kPa ve UF için 110kPa membran geçiş basıncında ve 430 rpm hızda ekipman işletilmiştir. Filtrasyon deneylerinde PVDF-MF membran (Durapore GVWP, 0.22\_μm, Millipore) ve PES-UF membran (Amicon PBHK, 100 kDa, Millipore) kullanılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre; ön filtrasyon, MF için partikülleri atıksudan uzaklaştırarak süzüntü akısını artırmış, ancak UF için çok az etki göstermiştir. Akıdaki iyileşme, membran iç kirlenmesinin önemli ölçüde azaltılabildiği 5 mg/L Al<sup>+3</sup>’ deki koagülasyon ön arıtımı aracılığıyla elde edilmiştir. Reçine anyon değişimi çıkış suyundaki organik maddenin %50’ den fazlasını ortadan kaldırmıştır, ancak akıyı artırmamış ve geri dönüşümsüz kirlenmeyi azaltmamıştır. Organik bileşenlerin analitik analizleri ile birlikte bu sonuçlar, membran kirlenmesinin ana nedeni olarak protein benzeri hücre dışı maddeler ve mikrobiyal ürünler gibi yüksek molekül ağırlıklı organik maddeler (40-70 kDa) olduğunu göstermektedir.

Xie ve diğ., 2008; tarafından yapılan çalışmada kentsel atıksu arıtma tesisinden kaynaklanan ikincil çıkış sularından su geri kazanımı için pilot ölçekli MF sisteminin performansı değerlendirilmiştir. Pilot tesis MF, TO ve gelişmiş oksidasyon prosesi bir kum filtresi veya bir kartuşla yeniden kullanım için en iyi kombinasyonlar belirlenerek oluşturulmuştur. Çalışmanın amaçları, trans membran basıncındaki değişiklikleri, MF’ nin spesifik süzüntü akısında ve kirlenme potansiyelindeki azalmayı değerlendirmek, ayrıca ön arıtma olmaksızın ve kum filtresi ile ön arıtma yapılarak MF performansını test etmektir. Bu amaçla MF için poliviniliden florit (PVDF) hollow-fiber membran kullanılmıştır. Toplam filtrasyon alanı 56 m<sup>2</sup> olan

kum filtresi ile ön arıtmalı MF sisteminde 480 saat süre ile 60,7 L/m<sup>2</sup>.sa süzöntü akısı sürdürülmüştür. Aynı şartlarda MF, kum filtresi olmaksızın sadece 250 sa akıyı sürdürmüştür. Filtrasyon zamanı ile süzülme dengesindeki artış nedeniyle süzöntü akısı ve geçirimsizlik azalmışken, trans membran basıncı artmıştır. TO arıtımı için kentsel ikincil çıkış sularının hazırlanmasında MF' nin filtrasyon süresinin uzatılması için kum filtresi ile ön arıtmanın önemli bir role sahip olduğunun bu çalışma ile belirlenmiştir. Kum filtresi, ikincil çıkış suyunda bulunan askıda katı maddelerin giderimine büyük katkı sağlamakta bu da süzöntü akısı ve membran geçirimsizliğinin daha uzun süre sürdürülmesine imkan vermektedir.

Blstakova ve diğ., 2009; tarafından Bratislava-Çek Cumhuriyeti' nde bulunan bir evsel atıksu arıtma tesisinde 2005-2007 yılları arasında yapılan bir çalışmada düz plaka ve hollow-fiber membran modüllerin performansları değerlendirilmiştir. Temizleme olmaksızın düz plaka modül 6 ay süre ile 20-60 L/m<sup>2</sup>.sa akıda, hollow-fiber modül ise 4 ay süre ile 20-45 L/m<sup>2</sup>.sa akıda işletilmiştir. İki modülün paralel olduğu işletme şartlarında çıkış suyu kalitesi benzer sonuçlar göstermiştir. Çalışmada her iki membranda da %90' dan fazla organik madde, %97' den fazla NH<sub>4</sub><sup>-</sup>-N giderimi gerçekleşmiş, AKM içeriği ölçüm limitlerinin altında tespit edilmiş, düşük oksijen konsantrasyonu ile kısa süreli işletme süresince denitrifikasyon aracılığıyla azot giderimi meydana gelmiştir. Bu çalışmada gerçekleştirilen su kalite analizleri sonuçları, ham atıksudan yüksek su kalitesi elde etmek için membran teknolojilerin kullanılabileceğini göstermektedir.

Garcia-Figueruelo ve diğ., 2009; “İkincil çıkış sularından nanofiltrasyon ile filtrelenemeyen maddelerin ters ozmoz” başlıklı çalışmalarında yetersiz temiz suyu kaynaklarından dolayı atıksuların geri kazanım ve yeniden kullanımının geniş çapta uygulandığını, tarımsal sulama için gereken düzeyde su kalitesi elde etmek için tuzluluğun sınırlayıcı parametrelerden biri olduğunu ve tuzluluğu gidermek için tuzsuzlaştırma aşamasının gerektiğini, bu nedenle fizibl bir üçüncül arıtma için önemli bir role sahip NF/TO uygulaması ile ilgili derinlemesine araştırma gerektiğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada, NF ve TO için ilk denemeler hem süzöntü kalitesini belirlemek hem de TO deneyleri için besleme akımı olarak yeterli hacimde rejeksiyon sağlamak için; ikinci deneyler ise uygun NF rejeksiyonu kadar konsantre için de en az tuzlu su hacmi aynı zamanda çok iyi arıtılmış atıksu kalitesi elde etmek

için gerçekleştirilmiştir. Analiz parametreleri olarak iletkenlik, pH, KOİ, bulanıklık, sodyum, potasyum, magnezyum, kalsiyum, sülfat ve klorür seçilirken, besleme suyu olarak Sagunto-İspanya atıksu arıtma tesisi ikincil arıtma çıkış suları kullanılmıştır. Kentsel atıksu arıtma tesisi ikincil çıkış sularının nanofiltrasyonu, %75 oranında son bir dönüştürmeye ulaşmak amacıyla artan besleme konsantrasyonu için değerlendirilmiştir. Deneysel laboratuvar ölçeğinde 2.2 m<sup>2</sup> aktif membran alanıyla spiral sarımlı membran (DURASLICK-2540, General Electric) kullanılarak ve artan hacim azaltma faktörleri izlenerek yapılmış, istatistiksel olarak sonuçları onaylamak için dört kez tekrarlanmıştır. NF deneylerinde tavsiye edilen akılar (17 L/m<sup>2</sup>.sa) ve en yüksek hacim azaltma faktörü, 3,2 bar membran geçiş basıncında üretilmiş, ikincil çıkış suyundaki çift değerli iyonlar düşük enerji tüketimi ile giderilmiştir. Basınç hacim azaltma faktörü ile çok sıkı bir şekilde artmış, NF membran %42 civarında iletkenlik, %99' a yakın sülfat ve %23 klorür rejeksiyonu sağlamıştır. Nanofiltrasyon deneyleri sonrası filtrelenemeyen maddelerin ters ozmoz, en az tuzlu su hacmi ve arıtılmış suda en iyi kalite elde etmek için ESPA1-2540 TO membranı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. NF ve TO kombinasyonu ile 10µS/cm' den daha yüksek bir iletkenlik değeri ile %95' in üzerinde geri kazanım sağlanmıştır.

Kimura ve diğ., 2009; tarafından yapılan çalışmada TO arıtma prosesleri ile yeniden kullanımın dünyada birçok şehirde kullanıldığı ifade edilmektedir. Aynı çalışmada evsel atıksu arıtma proseslerinde NF/TO membranlar kullanılacağı zaman, membranı korumak için bazı ön arıtma sistemleri uygulanması gerektiği belirtilmektedir. Bu amaçla batık-yüzeysel filtrasyon, MBR veya MF/UF kullanılacağı ancak bazı tür kirleticilerin bu yöntemlerle giderilmesi yeterli olmadığından NF/TO' ya ihtiyaç duyulduğu aynı çalışmada vurgulanmaktadır.

Acero ve diğ., 2010; yaptıkları çalışmada, Madrid-İspanya' da bulunan ve aktif çamur esasına göre çalışan biyolojik kentsel atıksu arıtma tesisi ikincil arıtma çıkış sularının filtrasyonu için, farklı MWCO değerlerine sahip 4' er çeşit UF (GH, GK, PT ve PW) ve NF (DL, CK, DK ve HL) membranı kullanarak, KOİ, toplam organik karbon (TOK) , 254 nm' de absorbans, bulanıklık, toplam azot (TN) ve toplam fosfor (TP) rejeksiyonlarını değerlendirmişlerdir. Seçilen su kalite parametreleri rejeksiyon katsayıları, UF için bulanıklık > absorbans > KOİ > TOK = TP > TN; NF için absorbans > TP = KOİ > TOK > bulanıklık > TN şeklinde sıralanabilir. Bu



filtrasyon proseslerinde fosfor ile birlikte organik bileşiklerin giderimi UF' de orta, NF' de ise yüksek seviyede gerçekleşmiştir. Bunun aksine azot giderimi özellikle UF' de çok az başarılmıştır. Bu parametrelere göre UF ve NF membranların her ikisinin de fizibilitesi yüksek arıtma seçenekleri olduğu, verimli bir süzöntü akımının farklı alanlarda yeniden kullanılabilmesi belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca çıkış suyunda tespit edilen 28 farklı farmasotik için NF membranların UF membranlara göre daha iyi giderim sağladığı (%75' den daha fazla), toplam koliformun her iki membranda da giderildiği belirlenmiştir.

Aküzüm ve diğ., 2010; çalışmalarında Türkiye' nin 2000 yılı öncesinde su kaynakları bakımından zengin olduğunu ancak şimdilerde su problemleri olan ülkeler arasında gösterildiğini belirtmektedirler. Uygun olmayan su yönetimi uygulamaları, uygulanan su politikaları, artan nüfus ve su ihtiyacı ile birlikte küresel iklim değişiklikleri su problemleri arasında en önemlileri olarak gösterilmektedir. Türkiye' de sürdürülebilir su kaynakları yönetimi üzerine AB uyum çalışmaları çerçevesinde önemli aşamalar kaydedilmiştir. Çalışmada ayrıca bu kapsamda yer alan Su Çerçeve Anlaşması (Water Framework Directive-WFD)' na göre mevcut yönetmeliklerin yeniden gözden geçirilmesi ve yasal düzenlemelerin gerçekleştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Türkiye' de bu konu ile ilgili kurumlar arasındaki koordinasyon ve işbirliği sorunları, kaynak, etkin izleme ve değerlendirme sistemleri ve veri tabanının yetersizliği en önemli problemler arasında gösterilmektedir.

Park ve diğ., 2010; çalışmalarında MF membranların kirlenme davranışını araştırmak için çeşitli işletme şartlarında laboratuvar ölçekli filtrasyon deneyleri gerçekleştirmişler, bu deneylerde biyolojik atıksu arıtma tesisi ikincil çıkış suları koagülasyon-flokülasyon- MF (CF-MF) ve ozonlama-MF proseslerini içeren her bir hibrid sisteme beslenmiştir. Tüm deneyler, 0,22 µm por boyutuna sahip düz plaka PVDF MF membranla dizayn edilen karışık hücre kullanılarak gerçekleştirilmiştir Polialüminyum klorit (PACl) koagülant ile karıştırılmış veya ozonlanmış ikincil çıkış suları klasik filtrasyon (dead-end) uygulanan hücrede işlem görmüştür. Ön arıtma verimi çeşitli fizikokimyasal parametreler ile ölçülmüştür. Her bir prosesin işletme kapasitesi, atıksu yeniden kullanım rehberlerinde önerilen KOİ, pH, bulanıklık, renk, TN ve TP parametrelerine ait giderim verimleri için değerlendirilmiştir. Ön arıtma olmaksızın MF membran tek başına uygulandığında süzöntü akısı önemli miktarda

düşmüş, ancak koagülasyon ve ozonlama ile ön arıtma uygulandığında her bir sistem için sırasıyla %88 ve %38' e kadar akı azalma oranı artırılmıştır. KOİ ve TP giderim verimleri CF-MF hibrid sisteminde 30 mg/L' den fazla koagülant dozunda önemli miktarda artırılırken, ozonlama ile %90' dan fazla renk 5 mg/L ozon dozunda bile giderilmiştir. Organik madde giderimi açısından ön arıtma olarak ozonlama güçlü bir şekilde tavsiye edilmektedir. Çalışmanın sonuçları, ozonlama-MF prosesi ile süzüntü suyu kalitesinin, USEPA ve Güney Kore Çevre Bakanlığı tarafından önerilen atıksuyun yeniden kullanımı ile ilgili yönetmeliklere uyumlu olduğunu göstermiştir.

Pedrero ve diğ., 2010; "Tarımsal sulamada arıtılmış kentsel atıksuların kullanımı-İspanya ve Yunanistan' da bazı uygulamalar üzerine bir görüş" başlıklı çalışmada; dünyada nehirlerden çevrilen ve yeraltından pompalanan tüm suyun %70' inin tarımsal sulama için kullanıldığı, tarımsal ve yüzeysel sulama gibi amaçlar için arıtılmış kentsel atıksuların yeniden kullanımıyla çevreye atıksu deşarjının ve bunun yanı sıra doğal su kaynaklarından karşılanması gereken su miktarının da azaltıldığı belirtilmiştir. Bu nedenle arıtılmış kentsel atıksular Akdeniz ülkelerinde geri dönüşüm ve yeniden kullanım için değerli su kaynakları arasında nitelendirilmektedir. Ayrıca çalışmada Akdeniz ülkelerinde insan tüketimi için istenilen ürünler üzerine arıtılmış atıksuların uzun dönem etkilerinin belirlenmesine yönelik yoğun bir ilgi olduğu ifade edilmiştir.

Zanetti ve diğ., 2010; yaptıkları çalışmada, yeniden kullanım için zorlayıcı mikrobiyal standartlarla karşılaşıldığından konvansiyonel aktif çamur prosesini takiben mutlaka üçüncül arıtım gerektiğini belirtmişlerdir. Kimyasal ileri arıtım prosesleri tehlikeli veya uygun olmayan ara ürünler oluşturduğu için, bu çalışmada evsel ve endüstriyel suların biyolojik içeriği ve organik-inorganik kirleticilerin giderimini sağlayabilen membran filtrasyonu ile biyolojik parçalanmayı entegre eden MBR teknolojilerini tercih etmişlerdir. Çalışmanın sonucunda; evsel atıksuların arıtımında MBR prosesinin yüksek mikroorganizma, KOİ ve toplam askıda katı madde (TAKM) giderimi sağladığı belirlenmiştir.

Bakopoulou ve diğ., 2011; Yunanistan Teselya Bölgesinde bulunan 4 farklı arıtma tesisi çıkış sularının kalitesini incelemişler, bunun için her tesisten yaz, kış ve sonbahar dönemlerinde üçer örnek (Volos atıksu arıtma tesisinden 2 örnek)

almışlardır. Örneklerde fizikokimyasal ve mikrobiyolojik parametreler;  $BOI_5$ ,  $KOI$ ,  $TÇM$ , pH, EC ve fekal koliform ile ağır metaller; Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn ve As analiz edilmiştir. Bu çalışmada arıtılmış kentsel atıksuların tarımsal ve kentsel sulamada kullanıma elverişli olup olmadığını belirlemek amaçlanmıştır. Araştırmanın iki yönü izlenmiştir: 1) Yunanistan'ın su sorunu için önerilen ulusal ve uluslararası rehberlere dayalı olarak fizikokimyasal ve mikrobiyolojik kriterleri oluşturmak için atıksu kalitesinin uyumu, 2) bitki ve hayvan organizmaları için arıtılmış atıksuyun toksisitesi. Sulama için atıksuyun yeniden kullanımı ile ilgili yönetmeliklerle karşılaştırılan bulgular, Teselya bölgesindeki ikincil çıkış sularının öncelikle gelişmiş arıtma yöntemleri uygulayan tesisler için genellikle sulama amaçlı kullanıma uygun olduğunu göstermiştir. Ancak bu tesislerin mevsime ve yere ilişkin toksisite değerleri önemli ölçüde değişebilir bulunduğundan, mutlaka potansiyel toksisitelerinin izlenmesi gerekmektedir.

Chon ve diğ., 2011; çalışmalarında kentsel atıksuyun yeniden değerlendirilmesi için MF membran içeren batık MBR-NF membran ünitesini geliştirmişler, su kalite kriteri ve minimum akı düşüşüne ulaşmak için bu prosesleri kirletici kontrolü ve kirlenme azalması açısından değerlendirmişlerdir. Çalışmada Gwangju-Kore Atıksu Arıtma Tesisi ön çökeltme çıkış suları sürekli olarak üniteye beslenmiş, atıksudaki çözülmüş kirleticiler MBR ile yetersiz miktarda parçalanmış, ancak MBR'deki mikrobiyal nitrifikasyon, NF membran ilavesiyle MBR süzütüsünde azot giderimine büyük oranda katkı sağlamıştır. Ayrıca organik, inorganik ve mikrokirleticiler gibi çözülmüş kirleticilerin birçoğu NF membran ile etkin bir şekilde giderilmesine rağmen atıksuyun pH değerinden ötürü bor giderilememiştir. Farmasotik ve kişisel bakım ürünleri bakımından NF membran ile MBR'dan daha yüksek giderim verimi ( $\geq 78\%$ ) elde edilmiştir. Kirlenmiş membranlar alkali çözeltilerle kolaylıkla temizlenebilmiş, MF ve NF membranlar arasında kirlenme karakteristikleri karşılaştırıldığında; kirlenme formasyonunu etkileyen en önemli faktörün, membran özelliklerinden çok beslemedeki çözülmüş organik madde özellikleri olduğu tespit edilmiştir.

Mrayed ve diğ., 2011; tarafından yapılan çalışmanın amacı, yüksek tuzluluğu olan arıtılmış sudan sulama amacına uygun geri dönüştürülmüş su üretmek için NF ve TO kullanımının etkinliğini ve esnekliğini belirlemektir. Çalışmada, Avustralya'daki

Altana Atıksu Arıtma Tesisi'nden alınan ikincil çıkış suları önerilen entegre membranı beslemek için kullanılmıştır. Bu kapsamda konvansiyonel MF-TO prosesine NF aşaması eklenmiş, iyon rejeksiyonu için şelat tabakası olarak poliakrilik asitle (PAA) veya asitsiz şekilde 2 ticari NF membranı (KOCH ve NF270) kullanılarak NF etkinliği test edilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre PAA ilavesi, KOCH membranla tek değerli iyonların rejeksiyonunu artırırken, NF270 membranla iyon rejeksiyonu önemli miktarda etkilenmemiştir. Ayrıca KOCH membranın NF270' e göre daha az enerji ihtiyacı ile gerekli giderimleri sağladığı belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar, Yeni MF-NF-TO konfigürasyonunun geri dönüştürülmüş su üretimi için yeterli kapasiteye sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca farklı ürünler için SAR, EC ve TÇM seviyelerinin kabul edilebilir düzeyde olduğu, NF ile %70 ve TO ile %92 oranlarında geri kazanım elde edildiği tespit edilmiştir.

Sahar ve diğ., 2011; çalışmalarında Telaviv' deki bir atıksu arıtma tesisinden kaynaklanan ham atıksuların arıtılması için Aktif Çamur Sistemi (AÇS)-UF' den sonra üç aşamalı TO ve MBR' dan sonra yarı kesikli TO şeklinde dizayn edilen iki farklı pilot tesisin performansını araştırmışlardır. Çalışmanın amacı, organik mikrokirleticilerin giderimi için TO' un katkısını ve TO membranının bu kirleticiler için mutlak bir bariyer olup olmadığını ortaya koymaktır. Kentsel atıksulardan çeşitli mikrokirleticilerin giderimlerinin karşılaştırıldığı çalışmada, TO teknolojisinin bisfenol-A' yı %99 oranında giderdiği ancak bazı antibiyotiklerin gideriminde yeterli olmadığı belirlenmiştir.

Agrafioti ve Diamadopoulos, 2012; "Girit Adası'nda ürün sulama için arıtılmış kentsel atıksuların yeniden kullanımında stratejik bir plan" başlıklı çalışmalarında, çığ yenebilen sebzeleri temsilen zeytin ağaçları, üzüm bağları ve marul seçmişler, bu ürünlerin sulanmasında Yunanistan' daki suyun yeniden kullanım kriterlerini kullanmışlar, arıtma tesisi çıkış suları ile ilgili verileri Girit Adası'nda işletilen 16 atıksu arıtma tesisinden toplamışlardır. Çalışmada, atıksu arıtma tesislerinden alınan verilerin ürünlerin sınırsız sulama kriterlerini karşılamadığı, bu nedenle üçüncül arıtma gerektiği ifade edilmiştir. Bu doğrultuda, arıtılmış çıkış suları kullanılarak sulanabilir arazileri tahmin edebilmek için, CROPWAT yazılımı girişi olarak iklim verileri aracılığıyla bitki su tüketimi ve yağış arasındaki farka göre her bir ürünün su

gereksinimleri tahmin edilmiştir. Arıtma tesisleri kapasitesi bağı olarak sulanmış alan ArcGIS içinde CORINE 2000 veritabanı kullanılarak görüntülenmiş ve gösterilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, atıksu arıtma tesislerinden toplanan çıkış suları ile adadaki yaklaşık %25,4 oranında üzüm bağı sulamanın mümkün olduğunu, 19,16 Mm<sup>3</sup> suyun yaz ayları boyunca depolanabileceğini ve bu miktarın toplam sulama gereksiniminin %4,3' ünü karşıladığını göstermektedir. Bununla birlikte tarımsal sulama için yeniden kullanımdan önce çıkış suları ilave üçüncül arıtma ile arıtılmalı ve kalite parametreleri sıkı bir şekilde izlenmelidir.

Bhattacharya ve diğ., 2013; kompleks endüstriyel ve evsel atıksuların tarımsal faaliyetlerde yeniden kullanılması amacıyla yaptıkları çalışmada, evsel ve endüstriyel iki farklı kaynaktan toplanan atıksu kullanılmıştır. Evsel atıksu, bir kanalizasyon arıtma tesisinden toplanan farklı başlangıç yükleriyle üç günün kompozit atıksuyu (çıkış suyu-A) alınarak, endüstriyel atıksu ise tekstil endüstriyel çıkış suyu ile mutfak lavaboları atıksuları karıştırılarak (çıkış suyu-B) hazırlanmıştır. Çalışma, yüksek organik içeriğe sahip kompozit özellikte iki tür atıksuyun arıtılması için, seramik MF prosesi tek başına ve Lagerstroemia sp. bitkisi yaprakları ile hazırlanan biyosorbent ile birleştirilerek (kombinasyon prosesi) iki şekilde uygulanarak ve çapraz akışlı esasa göre yürütülmüştür. Veri analizinde ANOVA yöntemi kullanılmış, arıtılmış suların rezene ve hardal bitkilerinin çimlenmesi ve büyümesi üzerindeki farklı biyokimyasal etkileri araştırılmıştır. Kombinasyon prosesi tek başına MF prosesine göre daha fazla potansiyel göstermiştir. Buna göre KOİ' nin A çıkış suyunda %89, B çıkış suyunda ise %88 oranında giderildiği gözlenmiştir. Çalışmanın sonucunda kombine arıtma prosesinin geniş ölçekte uygulanması durumunda gübre kullanımının azaltılmasının yanı sıra temiz su kaynaklarının yoğun tüketimi ile de mücadele edebileceği vurgulanmaktadır.

Bunani ve diğ., 2013; tarafından yapılan çalışmada Çiğli-İzmir Atıksu Arıtma Tesisi' nden kaynaklanan biyolojik olarak arıtılmış kentsel atıksu, NF membranlar kullanılarak çapraz akışlı düz plaka membran ünitesinde daha ileri arıtmaya tabi tutulmuştur. Yeniden kullanım amacıyla gerçekleştirilen bu çalışmada CK, NF90 ve NF270 membranları kullanılmış, bu membranlarda sırasıyla 10 bar işletme basıncında 26,6, 49,3 ve 81 L/m<sup>2</sup>.sa. süzüntü akıları elde edilmiştir. Süzüntü kalite analizleri çeşitli analitik tekniklerle yapılmıştır. Sonuçlar, NF90 mebranının diğer iki

membrana göre daha iyi kalitede su üretebildiğini göstermiştir. NF90' dan sonra CK ile en iyi rejeksiyon elde edilmiştir. CK membranda yaşanan en önemli sıkıntı düşük su akı olmuştur. Ayrıca NF270 ile yeterli su akısı edilmesine rağmen süzöntü kalitesi diğer iki membrana göre çok iyi bulunmamıştır.

El Tokhy ve diğ., 2013; Mısır' daki büyük ölçekli bazı Atıksu Arıtma Tesisleri ikincil arıtma çıkış suları özelliklerini geliştirerek tarımsal, rekreasyonel ve santral soğutma uygulamalarında güvenilir olarak yeniden kullanmak için yaptıkları çalışmada NF membran uygulamasının atıksuyun yeniden kullanımında aday bir teknoloji olduğunu belirlemişlerdir. 12 farklı arıtma tesisi çıkış suyu özellikleri incelendiğinde BOİ, KOİ, TAKM, TÇM giderim verimleri sırasıyla %86,9-92,8, %87,3-96,5, %89,5-96,9, %5-48,5 şeklindedir. Çalışmada 200-1000 D ayırma sınırına sahip polimerik NF membranlar (NF90, NF255-400, NF70, LF10, LES90, NTR 729HF, DUR.NF2540) ve farklı işletme basınçları kullanılarak NF rejeksiyonları incelenmiştir. Kısa kesim tahmin modeli kullanılarak her bir membranın BOİ, KOİ, TAKM ve TÇM giderim verimlerinin tahmin edilmesi sağlanmıştır. Bu ampirik model sonuçları, pilot ve geniş ölçekteki NF atıksu sisteminden alınan veriler kullanılarak onaylanmıştır.

Jin ve diğ., 2013; tarafından gelişmiş arıtma gereksinimleri ve yeniden kullanım amaçları için ikincil arıtma çıkış suyunun kimyasal güvenliği üzerine yapılan bu çalışmada su kalite analizleri, iz organikler ve endokrin bozucu kimyasallar, tehlikeli metaller, konvansiyonel kimyasal maddeler için yapılmıştır. Genel olarak ikincil çıkış suları bulanıklık, KOİ, BOİ, TN ve TP değerleri, kentsel suyun yeniden kullanımı için Çin standartlarını karşılayabilmekte, fakat yüksek renk bir problem teşkil etmekte, arıtılmış atıksu özellikle rekreasyon amacıyla yüzeysel ve çevresel amaçlı kullanılacaksa, BOİ ve TP' nin ileri derece giderimi gerekebilmektedir. İlâveten çalışmada ikincil çıkış sularının yeniden kullanımındaki ana problemin iz organikler ve endokrin bozucu kimyasallar ile tehlikeli metaller olduğu belirtilmiş, bu nedenle üçüncül arıtmanın değerlendirilmesi gerektiği ifade edilmiştir. Konvansiyonel su kalitesinin geliştirilmesi için, kimyasal maddeler ve metallerin gideriminde koagülasyon-filtrasyon prosesinin etkili bir proses olduğu ancak çözünmüş organiklerin giderimi için etkili olmadığı; poliakrilonitril hollow-fiber membran kullanılan ve çapraz akışlı olarak işletilen UF prosesiyle bulanıklık ve

makromoleküllerin giderildiği ancak çözünmüş organik ve inorganik maddelerin sınırlı miktarda giderildiği; ozon-biyofiltrasyon işleminin renk ve organik madde gideriminde etkili olduğu, kalıntı metalleri ise güçlükle giderdiği çalışmada belirtilen hususlar arasındadır. Xi'an-Çin' de evsel atıksu arıtma tesisi ikincil arıtma çıkış suları ve bahsi geçen üçüncül arıtma prosesleri çıkış sularında bulanıklık, renk, KOİ, TN ve TP konvansiyonel parametreleri, As, Pb, Cd, Cr, Ni ve Zn ağır metalleri ve 8 çeşit iz organik ve endokrin bozucu kimyasal ölçülmüştür. Çalışmanın sonucunda atıksuyun yeniden kullanımı için farklı su kalitesi bakımından uygun proses seçiminin önemli olduğu vurgulanmıştır.

Lau ve diğ., 2013; tarafından yapılan çalışmada araç atıksularını arıtmak için UF PVDF100 (MWCO 100 kDa), UF PES30 (MWCO 30 kDa) ve NF270 olmak üzere 3 farklı ticari membran kullanılmıştır. Süzüntü akısına göre iletkenlik, toplam çözünmüş katı, KOİ ve bulanıklık rejeksiyonları değerlendirilmiştir. Bu amaçla filtrasyon deneyleri, her membran için 14,6 cm<sup>2</sup> efektif alan, 5 bar basınç ve en az 30 dakika bekleme süresi şartlarında laboratuvar ölçekli çapraz akış membran ünitesinde gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar, PVDF100 ve UF PES30 membranlarına göre NF270 membranının, arıtma süresince daha yüksek akı geri kazanımı ve dengesi sağladığını göstermiş, kirlenme karşısında aynı membran ile daha yüksek direnç elde edilmiştir. Tüm membranlar için elde edilen bulanıklık giderim verimi en az %92' dir. UF PVDF100, UF PES30 ve NF270 membranlarında elde edilen KOİ giderim verimleri sırasıyla %56,1-82,4, %54,9-83,9 ve %70,9-91,5 arasındadır. İletkenlik ve toplam çözünmüş katı gideriminde NF270 membranına göre UF membranların etkili olmadığı belirlenmiştir. NF270 için en az %60, UF PVDF100 ve UF PES30 membranları için sırasıyla %13,6-35,4 aralığında iletkenlik ve toplam çözünmüş katı giderimi sağlanmıştır. Çalışmanın sonucunda; deşarj için yönetmelik gerekliliklerini ve temiz su tüketimini azaltmaya yönelik atıksuların yeniden kullanımını sağlamak bakımından, NF270 membranın diğer UF membranlarına göre araç yıkama suları için sürdürülebilir bir seçenek olduğu ifade edilmektedir.

Mizyed, 2013; çalışmasında Batı' daki kurak ve yarı kurak alanlarda yüz yüze gelenen arıtılmış atıksuyun teknik, yasal, sosyal ve ekonomik sorunlarını değerlendirmiş, bu alanda artan tarımsal su uygulamalarında arıtılmış atıksuların yeniden kullanımının stratejik bir seçenek olarak farkına varıldığını ifade etmiştir.

Ayrıca çalışmada yeniden kullanımın geliştirilmesinde, yasal sorunlar açısından tarım düzeyinde uygulanabilecek ilgili ve uygun standartların geliştirilmesinin gerektiği, sosyal ve ekonomik açıdan ise çeşitli stratejilere ihtiyaç olduğu belirtilmektedir. Batı Şeria’ da arıtılmış atıksuların yeniden kullanım rehberleri ve standartları benimsenmiştir. Saha araştırmaları çiftçilerin birçok üründe arıtılmış atıksu kullanarak sulama yapmak için istekli olduğunu göstermesine rağmen, bu çalışma planlamacı ve politikacıların önerdikleri ile çiftçilerin uygulamak istedikleri arasında tutarsızlık olduğunu göstermektedir. Çalışmada arıtılmış atıksuların teknik olarak ve güvenli bir şekilde nasıl kullanılacağı üzerine iyi bir anlayış gösterilmesine karşılık yeniden kullanımın başarısı için ekonomik ve sosyal etkilerin vurgulanmasının son derece önemli olduğu belirtilmektedir. Tarımsal yeniden kullanım için gelişmekte olan kurallar, standartlar, politikalar ve planlarda çiftçilerin katılımı arıtılmış atıksuların sürdürülebilirliği için çok önemlidir.

Norton-Brandao ve diğ., 2013; “Sulama amaçları için kullanılmış kentsel atıksuların yeniden değerlendirilmesi: Arıtma teknolojilerinin incelenmesi” başlıklı çalışmalarında; dünyada temiz su sıkıntısının su kaynakları ihtiyacına binaen arttığını, sulamada arıtılmış atıksu uygulamaları için teknoloji olmasına rağmen, tarımda çıkış suyu kullanımının etkin bir şekilde yönetilmediğini, suyun etkin yeniden kullanımını sağlayacak, ulusal ve uluslararası su kalite yönetmelikleri ve rehberlerine uyumlu olacak, çevre ve halk sağlığı üzerindeki negatif etkileri azaltacak basit, uygun ve kabul edilebilir arıtma stratejilerine ihtiyaç olduğunu belirtmektedirler. Finansal kaynağı uygun ancak kısıtlı olan endüstriyel ülkelerin karşılaştığı zorluklar, sulama suyu kalite standartlarının tam olarak tanımlanmasının ve çıkış suyunun sulama amaçlı kullanıma uygun olup olmadığını belirlemek için gerekli izleme bileşenlerinin eksikliği ile ilgilidir. Amerika’ da çekilen suyun %1,5 kadarı kentsel atıksuyun yeniden kullanımından oluşmaktadır ve Kaliforniya halkı yıllık arıtılmış suyun 656.000 hm<sup>3</sup> ünü kullanmaktadır. Avrupa’ da su kaynakları daha fazla olmasına rağmen, geçen son on yılda su kalitesindeki bozulmanın artışı, gerçekte Avrupa ülkelerinin yarıdan fazlasının su sıkıntısı zorlukları ile yüz yüze geldiği sonucunu vermiştir. Bu çalışma sulama için kentsel arıtma teknolojileri üzerine kritik görüşleri sunmaktadır. Teknolojiler sulama suyu kalite parametreleri tuzluluk, patojenler, nütrientler ve ağır metaller açısından incelenmiştir. Bu



teknolojilerden membran filtrasyon, sulamada kullanılacak atıksudan ağır metal, patojenler ve diğer tüm ilgili kirleticileri gideren pahalı ancak etkili bir teknoloji olarak belirtilmektedir. Membran prosesler ile bakteri gideriminin 5 logaritmik birimden daha fazla oranda, nütrient gideriminin ise por boyutuna göre gerçekleştiği, TO prosesinin %90 EC, %83 sodyum (eş zamanlı olarak çift değerli katyonları da), %80 klorür ve nütrient giderimine izin verdiği, NF prosesinin ise sadece nütrient içeren tek değerli iyonlara izin veren çift değerli katyonları rejekt ettiği çalışmada belirtilen diğer hususlar arasında yer almaktadır.

Urriaga ve diğ., 2013; çalışmalarında belediye atıksularından kirleticilerin uzaklaştırılması için TO konsantresinin elektrokimyasal oksidasyonunu ile birlikte entegre UF ve TO sistemlerini kullanmışlar, atıksuyun giriş ve çıkışında 77 kirletici izlemişlerdir. Bu çalışmada klasik kirleticilerin yanı sıra farmasotik ve kişisel bakım ürünleri gibi yeni gelişen kirleticilerin varlığının çevresel araştırmaların odak noktasında olduğu, bu kirleticilerin sucul sistemlerde düşük konsantrasyonlarda dahi toksisite, endokrin sisteminde bozulma ve patojen direnç gelişimi ile ilgili olumsuz etkiler gösterdiği belirtilmiş, bu sebeple ikincil arıtma çıkışında bu tür kirleticilerin deşarjını engellemek için membran teknoloji ve elektrokimyasal oksidasyon sistemi içeren üçüncül arıtma kurulması önerilmiştir. Atıksu arıtma tesisinin girişinde ve çıkışında oluşan kirleticiler değerlendirilerek, ilaç ve uyarıcılar için en yaygın giderim verimleri UF-TO pilot sistem kullanılarak belirlenmiştir. Bor kaplı elmas elektrotların kullanıldığı elektrokimyasal oksidasyon sistemi ilaçların mineralizasyonu için önerilmiştir. Deneysel çalışmalar Vuelta Ostrera (Cantabria, İspanya)'da bulunan bir atıksu arıtma tesisinde yapılmıştır. UF membran olarak; AquaFlex™ (Norit) marka, polietersülfondan yapılmış, 80 m<sup>2</sup> hollow-fiber modül (40 m<sup>2</sup>'lik birbirine paralel bağlı 2 modül), TO membran olarak ise; LFC1-4040 (Hydranautics) marka, polyamid malzemedan yapılmış, 15,8 m<sup>2</sup> spiral sargılı modül (7,9 m<sup>2</sup>'lik birbirine seri bağlı 2 modül) kullanılmıştır. Elektrokimyasal oksidasyonda ise DiaCell sistemi (iki 70 cm<sup>2</sup> dairesel elektrotlar, boron kaplı silikon anot ve paslanmaz çelik katot üzerinde elmas) 5mm elektrot boşluğu ile kullanılmıştır. 77 kirleticinin giriş ve çıkış olmak üzere 2 yıl boyunca izlendiği bu çalışmada ikincil arıtma çıkış suyunda en çok kafeine rastlanırken, toplam kirletici konsantrasyonununun 128 µg/L'den 32 µg/L'ye düştüğü gözlenmiştir. TO membranı 11 bar gibi düşük bir

basınç ile çalıştırılmış ve düşük bir maliyet ile hedef kirleticilerin %99'unu tutmuştur. Ancak büyük boyutlu kirletici konsantrasyonları incelendiğinde TO verimi %50-%70 arasındadır. Ayrıca çalışmada bor kaplı elmas elektrotların kullanıldığı elektrokimyasal oksidasyonun, TO'ya göre %95 daha verimli olduğu belirtilmektedir.

Azais ve diğ., 2014; 2013 yılı Nisan-Ağustos periyodunda, Fransa' nın güneyinde toplanan ve UF-MBR ünitesi içeren atıksu arıtma tesisi çıkış suları, çapraz akışlı NF ünitesinde 2 farklı ticari NF membranı (NF90 ve NF270) kullanılarak işleme tabi tutulmuştur. Bu çalışmanın amacı, yeniden kullanım uygulamaları için etkin bir bariyer olan TO yerine NF' yi desteklemek amacıyla, gerçek atıksuda NF süresince 4 farklı farmasotik aktif bileşiğin (asetaminofen, atenolol, karbamazefin, diatrizoik asit) rejeksiyonu analiz edilerek çıkış suyu matrisi ve kirlenmenin etkisini araştırmaktır. Çalışmanın sonuçları, NF90 membranının TO sistemine alternatif olabileceğini göstermiştir. Ayrıca NF270 membranında NF90' a göre daha şiddetli akı düşüşü meydana geldiği, akı düşüşünün, filtre edilmiş MBR çıkış suyunda bulunan ve membran yüzeyine adsorbe olan polisakkaritler ve hümik asitlerden kaynaklandığı belirlenmiştir.

Bunani ve diğ., 2015; yaptıkları çalışmada İzmir Kentsel Atıksu Arıtma Tesisi' nden biyolojik olarak arıtılmış atıksuyun, TO membranlar kullanılarak daha iyi duruma getirilmesini ve TO süzöntülerinin su kalitesinin tarımsal sulamada kullanım için değerlendirilmesini amaçlamışlardır. Bu amaçla çapraz akışlı düz plaka membran ünitesinde 10 bar işletme basıncında AK-BWRO ve AD-SWRO TO membranları, ayrıca 20 bar işletme basıncında AD-SWRO membranı kullanılmıştır. AK-BWRO membranı ile iletkenlik, tuzluluk, KOİ, TOK ve renk için elde edilen giderim verimleri sırasıyla %94,6, %95,2, %85,8, %76,4 ve %91,3 iken, ADSWRO membranı ile %98,3, %98,3, %84,6, %69,7 ve %86,6' dır. Ayrıca AD-SWRO membranı ile TOK için her iki işletme basıncında benzer oranda giderim verimi elde edilmiştir. Ürün suyunun kalite değerlendirmesi, ikincil arıtılmış kentsel atıksuyun ve TO süzöntülerinin belli oranlarda karıştırılması ile gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, %20-30 oranında ikincil çıkış suyunun, %80-70 oranında TO süzöntüsü ile karıştırılmasının, FAO standartlarına göre tarımsal sulamada yeniden kullanım için, kirleticilerin en aza indirilmesi bakımından iyi bir strateji olduğu belirlenmiştir.

Shanmuganathan ve diğ., 2015; “Sulama için mikro-filtre edilmiş biyolojik olarak arıtılmış kanalizasyon çıkış sularının arıtımında NF ve TO kullanımı” başlıklı çalışmalarında Sidney-Avustralya’ daki atıksu arıtma tesisinden toplanan çıkış sularına, sulama için risk parametrelerini güvenli limitlere getirmek için NF ve TO uygulanmıştır. Bu amaçla üç tip NF (NP010, NP030 ve NTR729HF) ve bir tip polyamid TO membran kullanılmış, 20L besleme suyu, 68 cm<sup>2</sup> efektif membran alanına sahip çapraz akışlı membran ünitesinden, farklı iletme şartlarında geçirilmiştir. Biyolojik arıtılmış atıksuların genellikle SAR, sodyum ve klorür konsantrasyonlarının yüksek olduğu, bu nedenle hassas ürünlerin direkt olarak sulanması için uygun olmadıkları çalışmada belirtilmektedir. Bu çalışma sonuçları; NF ve TO tek başına uygulandığında SAR için gereken limitlerin elde edilemediğini, ayrıca TO haricinde NF’ nin tek uygulanması halinde sodyum ve klorürün yeterince giderilemediğini göstermiştir. “Hamsu-TO süzütüsü” veya NF ile ön arıtım sonrasında “NF süzütüsü-TO süzütüsü” karışımlarından ikincisi ile seçilen risk faktörleri açısından sulamaya daha uygun kalitede su üretildiği belirlenmiştir. İlaveten TO membran kirlenmesinin, NF’nin ön arıtma olarak uygulanması durumunda azaltıldığı, TO uygulaması ile NF’den daha yüksek farmasotik ve kişisel bakım ürünlerinin giderildiği tespit edilmiştir. Bu şekilde toprak ve yer altısuyunun potansiyel tehlikelerden korunacağı belirtilmektedir.

Literatürde yer alan kentsel/evsel atıksuların geri kazanımı, yeniden kullanımı ve bu konudaki membran teknoloji uygulamalarının su kaynaklarının etkin yönetimi bakımından kısa vadede ve gerçek ölçekte uygulamaya geçirilmesi gerekmektedir. Membran prosesler konusundaki ilk yatırım ve işletme maliyetlerindeki azalmalar da dikkate alındığında, arıtılmış kentsel atıksuların sulama suyu olarak çevre ve halk sağlığına zarar vermeyecek doğrultuda güvenilir bir şekilde kullanılması için ileri arıtma amaçlı membran teknoloji uygulamalarının hayata geçirilmesi bakımından bu çalışma literatüre önemli ölçüde katkı sağlayacaktır.

### **1.5. Deneysel Tasarım (Design of Experiment-DoE) ve ANOVA (Analysis of Variance) Analizi**

Deneysel tasarım (Design of Experiment-DoE), en az sayıda deney ile teşkil edilebilen bir deney planı kapsamındaki giriş faktörlerinin, proses etkinliği

çerçevesinde sonuç parametreleri üzerindeki etkilerinin test edilebildiği bir yöntemdir. Son zamanlarda membran alanında dikkat çekici hale gelmiştir. Performans, kalite ve maliyet açısından bir sistemde en uygun tasarıma imkân sağlar. Bu yöntemde, çok sayıdaki giriş değişkenlerinin farklı seviyeleri için söz konusu olan deneysel kombinasyonlar, az sayıda deney ile gerçekleştirilerek en iyi kombinasyon belirlenebilmektedir. Bu yaklaşımla, deney sayısı ile birlikte istatistiksel tahminlerdeki hata seviyesi de azaltılmaktadır. Ayrıca sonuçların değerlendirilmesinde kolaylık sağlanarak belli güven aralıklarında analiz sonuçları tekrarlanabilmektedir (Montgomery, 1991; Aydın ve diğ., 2009; Gönder ve diğ., 2011).

Deney tasarımında, süreci etkileyen her türlü etken “faktör (değişken)”, değişkenlerin çeşitli kategorileri, dereceleri ve yoğunlukları ise “seviye“ olarak adlandırılır. Bir deney tasarımı sırasında birden fazla değişken ve seviye grupları bulunabilir.

Deneysel tasarım özellikle araştırma-geliştirme faaliyetlerinde kullanılan bir kalite tekniğidir. Genelde, öngörülen kalitede ürün üretmeye yönelik çalışmalarda ve optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılmaktadır. Bu yöntem matematikçi ve istatistikçiler tarafından deneylerin sayısını azaltmak ve deneylere etki eden faktörlerin tek başlarına ve diğer faktörlerle beraber deney sonuçlarını nasıl etkilediklerini ortaya koymak amacıyla geliştirilmiştir. Deneysel tasarım, bağımlı faktördeki değişikliğin nedeni olarak ele alınan bağımsız faktörün etkilerinin ölçülmesi işlemini yürütmek için kullanılmaktadır. Deneysel tasarım teknikleri, yeni bir proses geliştirmede ve performans artırma amacıyla, mevcut prosesi düzeltme çalışmalarında da önemli bir rol oynamaktadır. Deneysel tasarımın amaçları kısaca aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Sonuç üzerinde en etkin girdi faktörlerini belirlemek,
- Performans karakteristiğini hedef değere en yakın sonuca ulaştıracak girdi faktörlerinin seviyelerini belirlemek,
- Kontrol edilemeyen girdi faktörlerinin çıktı üzerindeki etkisinin en az olacağı kontrol edilebilen girdi faktörleri kombinasyonunu oluşturmak.

Deney sonuçlarının kalitesi ve içeriği büyük ölçüde deneylerin planlaması aşamasında belirlenir. Planlama aşamasındaki eksiklikler ve hatalar kesinlikle deneyler sonrasında sonuçların değerlendirilmesi sırasında giderilemezler. Deney tasarımı aşaması dolayısı ile deney sonuçlarının yorumlanması sırasında kullanılacak değerlendirme ve inceleme stratejilerinin de belirlenmesini kapsar ve matematiksel, istatistiksel prensiplere dayanır (Hepşen, 2010).

Tam faktöriyel ve kısmi faktöriyel deney tasarım türleri geleneksel tasarım yaklaşımları arasında yer almaktadır.

Faktöriyel tasarım, deneydeki her bir faktörün tüm seviyelerinin diğer faktörlerin her bir seviyesini içeren bütün kombinasyonlarının yapılması ile gerçekleşir. Örneğin; 2 seviyeli 7 faktörü olan bir deneyde tam faktöriyel deney tasarımı çerçevesinde yapılması gereken deney sayısı  $2^7(128)$  tanedir. Faktöriyel deney tasarımının dezavantajı, deneyde mümkün olan bütün kombinasyonların denenmesi nedeniyle zaman ve maliyet kaybına yol açmasıdır. Bunun yerine kullanılan bir yaklaşım olan kısmi faktöriyel deney tasarımlarında ortogonal dizinler kullanılarak olası kombinasyonların sadece seçilmiş olanları denenir ve değerlendirilir. Her bir deneyde birden fazla sayıda faktörün seviyesi değiştirilerek az sayıda deney ile bütün faktörlerin seviyelerinin denenmesi sağlanmaktadır. Kısmi faktöriyel deney tasarımında deney sayılarının azaltılması için faktör seviyeleri mümkün olduğunca “yüksek değer” ve “düşük değer” olarak 2 seviyeli seçilmektedir. Böylece, deneylerin bütün kombinasyonlarının yapılması yerine sadece sonucu etkileyeceği düşünülen faktör ve seviyelerinin performans karakteristiği üzerindeki etkisi araştırılabilmektedir (Özçelep, 2009; Hepşen, 2010).

### **1.5.1. Taguchi deneysel tasarım yöntemi**

Modern deneysel tasarım metotları arasında yer alan Taguchi deneysel tasarım yöntemi, 1950-1960 yılları arasında Genichi Taguchi tarafından Japonya’ da toplam kalite kontrolü uygulamaları için geliştirilmiş, tam faktöriyel deneylerin az sayıda ve yüksek derecede kısmi faktöriyel seçim ile oluşturulmasına imkan sağlayan bir yöntemdir (Mousavi ve diğ., 2007; Hepşen, 2010; Yıldız, 2011).

Bu yöntemin amacı, işaretlerin hassaslığını minimize eden güçlü ve optimal ürün/proses özelliklerinin ortaya çıkarılmasıdır. Karakteristik özellikler üzerine değişkenlerin etkilerini belirleyebilen Taguchi dizaynı, performans, kalite ve maliyeti optimize etmek için basit ve sistematik bir yaklaşımdır. Kısmi faktöriyel deney tasarımı yöntemine sağlam tasarım ve ortogonal dizinler gibi kavramların dahil edilmesiyle oluşturulmuştur. Üründe ve proseste, değişkenliği oluşturan ve kontrol edilemeyen faktörlere karşı, kontrol edilebilen faktörlerin düzeylerinin en uygun kombinasyonunu seçerek ürün ve prosesteki değişkenliği en aza indirmeye çalışan bir deneysel tasarım yöntemidir. Bu yöntem, ürünlerin kalitesinin iyileştirilmesinde etkinliğinin yanı sıra, kalite geliştirmede çok daha az deneme ile daha iyi sonuçlar vermektedir (Baynal, 2005; Mousavi ve diğ., 2007; Gönder ve diğ., 2011). Geleneksel deneysel tasarım yöntemlerine göre Taguchi yönteminin avantajlarından biri de hedef değer için performansı oluştururken hedef etrafındaki değişkenliği minimize etmesidir (Safarzadeh ve diğ., 2008).

Performans karakteristiği, bir deneyin kalitesini belirleyen özellikleridir. Taguchi yönteminin amacı, bu karakteristiklerin hedef değer etrafındaki değişkenliğini azaltmaktır. Bir deneyin birden fazla performans karakteristiği olabilir. Bu karakteristiklerin her biri deneyin ayrı bir özelliğini temsil eder. Bu özelliklerin içinden araştırmacı gereksinimlerine göre ve deneyin kullanım amaçlarına göre en uygun olan özellik performans karakteristiği olarak seçilmelidir (Yıldız, 2011).

Taguchi deneysel tasarım yönteminde, kısmi faktöriyel tasarımdaki gibi deneylerin tüm kombinasyonlarının denenmesi yerine ortogonal dizinler kullanılarak sadece bir kısmı yapılmaktadır (Ross, 1996; Aydınlar ve diğ., 2009; Shrivani ve diğ., 2011). Böylece en iyi performans karakteristiği değerini veren faktör seviyeleri belirlenmektedir. Ortogonal kavramı istatistikte denge anlamında kullanılmaktadır. Ortogonal dizinler, faktör seviyelerini teker teker değiştirmek yerine eş zamanlı olarak değiştirerek deney sayısını azaltmaktadır. Ortogonal dizinler  $L_A(B)^C$  şeklinde gösterilmektedir. Bu dizinler latin kare tasarımından türetildiği için burada L latin kare tasarımını göstermektedir. A; deneylerin sayısını veya deneyde kullanılan faktörlerin kombinasyonlarını, B; her kolondaki seviye sayısını, C; faktör sayısını yani ortogonal dizindeki kolon sayısını ifade etmektedir.  $L_4(2^3)$ ,  $L_8(2^7)$ ,  $L_{12}(2^{11})$  ve  $L_{16}(2^{15})$  en çok kullanılan 2 seviyeli ortogonal

dizinlerdir.  $L_9(3^4)$ ,  $L_{18}(2^1 \times 3^7)$  ve  $L_{27}(3^{13})$  ise en çok kullanılan 3 seviyeli ortogonal dizinlerdir (Hepşen, 2010; Yıldız, 2011). Bu çalışmada kullanılan  $L_9(3^4)$  3 seviyeli 4 değişkenli ortogonal dizini Tablo 1.8’de verilmektedir (Ross, 1996).

Tablo 1.8. Taguchi deneysel tasarımı  $L_9$  ortogonal dizini

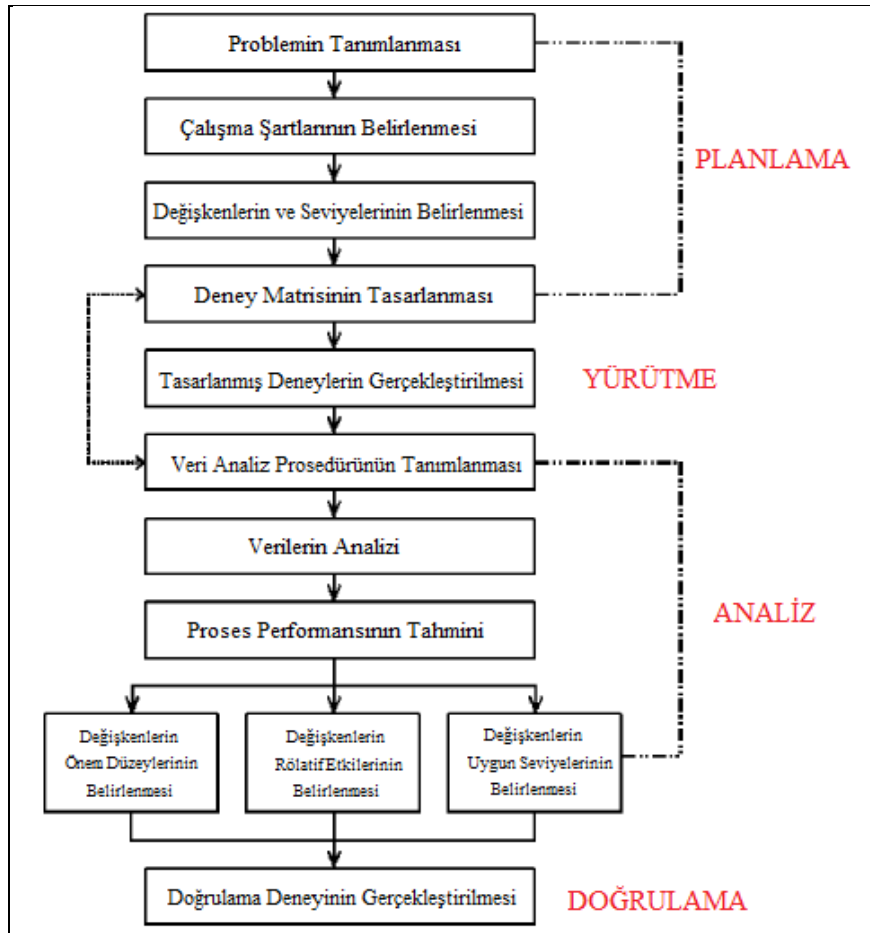
Deney No	Kolon No			
	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Performans istatistiği, kontrol edilebilen faktörlerin farklı seviyelerinin karşılaştırılıp en uygun faktör-seviye kombinasyonunun seçilmesini sağlayan bir değerlendirme metodudur. Taguchi yönteminde verilerin anlaşılabilirliğini kolaylaştırmak ve toplanabilirliğini sağlamak için genellikle performans istatistiği olarak ortalama yerine S/N (Signal/Noise-İşaret/Gürültü) oranı kullanılmaktadır (Sharma ve diğ., 2005; Mousavi ve diğ., 2007; Yıldız, 2011). Böylece, ortalama ile standart sapma, aynı analiz tekniği ile analiz edilmiş olur. S/N oranı en basit ifade ile ortalamanın standart sapmaya oranı olarak kabul edilir. Bu oranın kullanılması, performans karakteristiğinin ölçülmesinde ortalama veya standart sapmanın tek tek kullanılmasına göre daha dengeli ve güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlar (Yıldız, 2011).

S/N oranı değişkenliği ifade etmektedir. “S” ve “N”, sonuç karakteristikleri için sırasıyla istenilen (ölçülmek istenen gerçek değer) ve ölçülen değer içindeki istenilmeyen değerleri tarif etmektedir. Birimi desibeldir (dB). S/N oranının hesaplanmasında deneyler sonucunda ulaşılmaması hedeflenen kalite değerinin özelliği önemlidir. S/N oranı analizinde performans karakteristiği genellikle 3 kategoride incelenmektedir: “En küçük değer-En iyi”; “En büyük değer-En iyi” ve “Nominal değer-En iyi”. Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde hangi S/N oranı kullanılırsa kullanılsın sonuç olarak en yüksek S/N oranına sahip olan değer en iyi performansı

verecektir. Bu aşamada tüm değişkenler için en iyi performansa göre belirlenen optimum işletme şartlarında Taguchi metodunun uygulanabilirliğini doğrulamak için doğrulama deneylerine ihtiyaç duyulmaktadır (Mousavi ve diğ., 2007; Safarzadeh ve diğ., 2008; Gönder ve diğ., 2011).

Taguchi yönteminin son aşamasında gerçekleştirilen doğrulama deneyi, belirlenen en iyi koşullar için deneyin tekrarlanması işlemidir. Doğrulama deneyleri sonucunda elde edilen değerler beklenen güven aralığının içinde ise bulunan faktör-seviye kombinasyonu en iyi performans karakteristiği değerini veren kombinasyondur ve deney tasarımı amacına ulaşmıştır (Yıldız, 2011). Şekil 1.10' da bu çalışmada uygulanan Taguchi deneysel tasarım yönteminin aşamalarını içeren şematik gösterim verilmiştir (Aydın ve diğ., 2009).



Şekil 1.10. Taguchi deneysel tasarım yönteminin (DoE) aşamalarını içeren şematik gösterim



### 1.5.2. Yüzey yanıt yöntemi

Yüzey yanıt yöntemi (Response surface method), optimizasyon proseslerini geliştirmek için kullanılan matematiksel ve istatistiksel teknikleri bir araya toplayan bir yöntemdir. Yeni ürünlerin şekillendirilmesi ve dizaynında ayrıca mevcut ürün tasarımının geliştirilmesinde önemli uygulamalara sahiptir. Endüstride birkaç giriş değişkeninin potansiyel olarak performansa etkisini veya ürün/prosesin kalite özelliklerini ölçmek için yaygın uygulamaları bulunmaktadır. Performans ölçümü veya kalite özellikleri “response (yanıt)” olarak isimlendirilmektedir. Tipik olarak sürekli ölçekte ölçülmesine rağmen yanıtlar, algısal yanıtlar ve dereceler olağan dışı değildir. Birçok gerçek ölçekteki yüzey yanıt uygulaması birden fazla yanıt içermektedir. Giriş değişkenleri “independent variables (bağımsız değişkenler)” olarak ifade edilmektedir. Ayrıca bu değişkenler bir denemenin amacına ulaşması için mühendisin kontrolüne bağlıdır. Bu yöntem birçok endüstriyel problemin çözümünde kullanılmaktadır. Bir prosesin optimizasyonunda proses ile ilgili zaman, sıcaklık gibi işletme şartlarının seçilmesi oldukça önemlidir. Yüzey yanıt uygulamasında izlenen yol, uygulayıcılara, yöntemle elde ettikleri grafiklerde optimum bölgenin yeri, optimum bölgeye yaklaşan fonksiyonun tipi, deneysel dizaynın uygun seçimi, ne kadar tekrar gerektiği, herhangi bir proses değişkeni veya yanıtlar üzerine dönüşüm gerekip gerekmediği gibi sorulara cevap bulunmasını sağlar. Yöntemde yanıtlardaki değişkenliğin analizinde ANOVA kullanılmaktadır (Myers ve diğ., 2009).

Deneysel tasarım yöntemlerinde, deney yürütücüsünün ihtiyaçlarına cevap verebilmek için; geliştirilmekte olan tasarımın sınırlarını bilmek, bu sınırlar dahilinde tasarım değişkenlerinin tasarıma etkilerini anlamak ve analitik olarak en uygun çözümü bulmak tasarımcı için son derece önem taşır. Fakat tasarımı tanımlayan değişkenler ile tasarımın kalitesini ölçmekte kullanılacak olan değerlendirme ölçütü arasında analitik bir bağıntı ifade edilemez ise optimum çözüme ulaşmak başka yöntemlerin kullanılmasını gerektirebilir. Böyle durumlarda değerlendirme ölçütünün tasarım değişkenlerindeki değişmelere karşı duyarlılığını görmek ve hatta gerekli bağıntıları deneysel yoldan elde etmek için yüzey yanıt yöntemi kullanılır.

Yüzey yanıt yönteminde model regresyon analizi yardımıyla oluşturulur. Bir faktörün ana etkisinin veya etkileşimlerinin yanıt değişkeninin değerlerinde ne derecede önemli bir etkiye sahip olduğuna regresyon katsayılarıyla karar verilir. Yüzey yanıt yönteminde ilk adım yanıt değişkeni üzerinde etkisi olduğu düşünülen faktörleri ve sahip oldukları düzeyleri belirlemektir. Regresyon modelini oluşturmak için kurulacak olan deneme düzenlerini genellikle bu iki kriter belirler.

Faktöriyel denemelerde birden çok faktörün değişik seviyeleri, aynı anda incelenmekte ve bir faktörün durumu, diğer faktör veya faktörlerin değişik seviyelerinde ele alınabilmektedir. Denenen kombinasyonlardan hiç birisi en iyisi olmayabilir. Başka bir deyişle en yüksek verimi sağlayan kombinasyon denenenlerin arasında veya dışında bulunabilir. Bu nedenle faktöriyel denemelerde, çok sayıda faktör kombinasyonuna ihtiyaç vardır. Ancak böyle denemeler yapmak pahalı olduğu gibi, çok da zaman alır. Ayrıca faktör sayısı arttıkça tüm kombinasyonların denenebilmesi için gerekli olan homojen deneme materyalini bulmak da zorlaşır. Bu nedenle en uygun faktör kombinasyonunu bulmak için bütün kombinasyonları içeren denemelerin yürütülmesini gerektirmeyen istatistik yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler temelde, daha önce yapılan çalışmalardan veya benzer denemelerden yararlanarak nispeten sınırlı bir deneme alanı tasarlamak ve yalnız bu alandaki noktaları belirleyecek kombinasyonlarla ilk denemeyi yürütmektedir. Bu deneme sonuçlarından ilk önce en yüksek verimi sağlayan faktör seviyelerine ait nokta tahmin edilmekte, sonra gerçek optimum noktanın olduğu yere ulaşacak şekilde veya ilk deneme sonuçlarına ait 1. derece yüzey yanıt fonksiyonunun katsayılarından yararlanıp (steepest ascent yöntemi) ardı ardına denemeler yapılarak en yüksek verimi sağlayan kombinasyon bulunmaya çalışılmaktadır.

Deneysel tasarım yöntemleri bilimsel araştırmalarda ve endüstride birçok farklı amaçla kullanılır. Bütün deneme düzenlerinde temel amaç üzerinde durulan yanıt değişkenine etkisi olabileceği düşünülen faktörlerin dikkate alınması ve böylelikle denemenin hatasının minimuma indirilmesidir. Bilimsel araştırmalarda ise araştırmacılar, değişken üzerine etkisi olduğu düşünülen faktörlerin etkisinin istatistiksel olarak anlamlılığını ortaya koymaya çalışırlar. Böyle bir amaçla yola çıkan bir araştırmacının aklına gelecek iki temel soru vardır. Birincisi çalışmalarına

en uygun deneme düzeninin nasıl oluşturulacağı, ikincisi ise deneyin sonuçlarının nasıl analiz edileceğidir (Tunçmen, 2011).

### **1.5.3. ANOVA (analysis of variance) analizi**

ANOVA, deneysel sonuçların analizinde kullanılan istatistiksel bir yöntemdir. Test edilen grupların ortalama performansındaki değişimi belirlemek için kullanılmaktadır. ANOVA ile hangi proses sonuç parametresi üzerinde hangi faktörlerin ne derecede önemli oldukları istatistiksel olarak ortaya konur. Ayrıca elde edilen sonuçların istatistiksel olarak güvenilirliği test edilir. ANOVA, ortogonal dizinler kullanılarak minimum tekrarlarla gerçekleştirilen deney ve karakteristik özellikler üzerine değişkenlerin etkisini tahmin edebilen bir yöntemdir (Mousavi ve diğ., 2007; Özçelep, 2009).

Taguchi uygulayıcıları değişkenlerin sonuçlar ve S/N oranı üzerindeki etkilerini belirlemek için genellikle ANOVA kullanmaktadır. ANOVA, sonuç parametrelerinin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını görmek için yapılmaktadır. Herhangi bir değişken için hesaplanan F değeri, o değişkenin proses performans parametreleri üzerindeki etkisinin önemli ya da önemsiz olduğunun belirlenmesinde kullanılır. En büyük F değerine sahip değişkenin, genellikle proses performans parametreleri üzerindeki etkisi de en büyüktür. F değeri, istatistiksel tablolardan %95 ve/veya %99 güven düzeyinde pay için değişkenin, payda için ise hatanın serbestlik derecesi göz önüne alınarak belirlenen  $F_{kritik}$  değeri ile karşılaştırılır. Hesaplanan F değeri,  $F_{kritik}$  değerinden büyük ise değişkenin sonuç parametresi üzerindeki etkisinin önemli, değilse önemsiz olduğuna karar verilmektedir (Montgomery, 1991; Ross, 1996; Safarzadeh ve diğ., 2008). Membran uygulamalarında istatistiksel analiz olarak ANOVA kullanıldığında; değişkenlerin giderim verimi ve süzüntü akısı gibi proses performans parametreleri üzerindeki etkisi karşılaştırmalı olarak belirlenebilmektedir (Aydiner ve diğ., 2006; Gönder ve diğ., 2011).

## 2. MALZEME VE YÖNTEM

### 2.1. Malzeme

#### 2.1.1. Membranlar

Bu çalışmada kentsel ve evsel atıksuların ileri arıtımı için literatürde etkinlikleri bilinen (Sahar ve diğ., 2011; Bunani ve diğ., 2013; Lau ve diğ., 2013; Michael ve diğ., 2013; Yaşar ve diğ., 2013; Can Doğan ve diğ., 2015) üçer tip UF (UC010, UC030 ve UP150), NF (NP010, NF90 ve NF270) ve TO (LFC3, CPA ve TFC) membranı kullanılmıştır. Membranların özellikleri Tablo 2.1’ de verilmektedir.

Tablo 2.1. Membranlara ilişkin teknik bilgiler

Ticari Adı	Üretici Firma	Membran Materyali	MWCO (Da)	Akı	pH	En Yüksek Sıcaklık (°C)	Giderim Verimi (%)
UC010 <sup>1</sup>	Microdyn-Nadir	Rejenere Selüloz	10.000	93,8 L/m <sup>2</sup> .sa	1-11	95	-
UC030 <sup>1</sup>	Microdyn-Nadir	Rejenere Selüloz	30.000	508,3 L/m <sup>2</sup> .sa	1-11	95	-
UP150 <sup>1</sup>	Microdyn-Nadir	Polietersülfon	150.000	582,9 L/m <sup>2</sup> .sa	0-14	95	-
NP010 <sup>2</sup>	Microdyn-Nadir	Polietersülfon (PES)	-	> 200 (40bar, 20°C)	-	-	35-75 Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
NF90-3001 <sup>3</sup>	Dow Film Tech	Poliamid ince film kompozit (PTFC)	~200-400	8,7-11,4 (L/m <sup>2</sup> .sa.bar)	2-11	-	99 NaCl
NF270-3001 <sup>3</sup>			~200-400	13,7-18,6 (L/m <sup>2</sup> .sa.bar)	2-11	-	99,2 NaCl, 99,2 MgSO <sub>4</sub>
LFC3 <sup>4</sup>	Hydranautics	Kompozit Polyamid	-	36 m <sup>3</sup> /gün	3-10	-	99,7
CPA3 <sup>5</sup>	Hydranautics	Kompozit Polyamid	-	41,6 m <sup>3</sup> /gün	2-10,8	-	99,7
TFC-HR4 <sup>6</sup>	Koch	İnce film kompozit	-	8,6 m <sup>3</sup> /gün	4-11	-	99,55

<sup>1</sup> Can Doğan ve diğ., 2015

<sup>2</sup> [http://www.microdyn-nadir.com/userfiles/files/downloads/catalogue\\_2014.p](http://www.microdyn-nadir.com/userfiles/files/downloads/catalogue_2014.p)

<sup>3</sup> <http://www.sterlitech.com/membrane-process-development/flat-sheet-membranes/nanofiltration-nf-membrane.html>

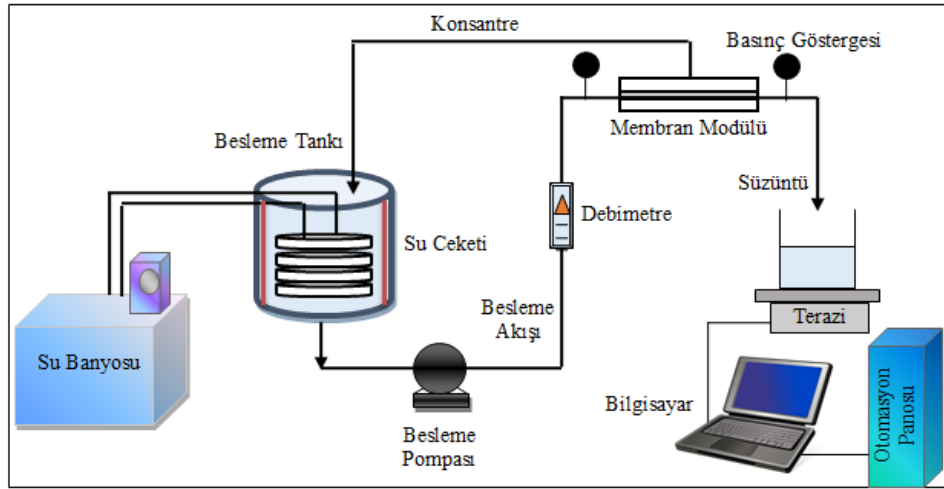
<sup>4</sup> [http://www.eurosan.com.tr/dosyalar/urunler/hydranautics\\_membranlar/LFC3.pdf](http://www.eurosan.com.tr/dosyalar/urunler/hydranautics_membranlar/LFC3.pdf)

<sup>5</sup> [http://www.eurosan.com.tr/dosyalar/urunler/hydranautics\\_membranlar/CPA3.pdf](http://www.eurosan.com.tr/dosyalar/urunler/hydranautics_membranlar/CPA3.pdf)

<sup>6</sup> <http://www.lennotech.com/products/Koch,-Fluid-Systems/8484000/TFC/HR4-/-High-Rejection-/-Low-Pressure-/-4040-HR-T/index.html>

### 2.1.2. Çapraz akış membran ünitesi

Çalışmada deney düzeneği olarak 80 cm<sup>2</sup> ve/veya 140 cm<sup>2</sup> efektif alana sahip düz plaka membran modülü içeren ve şematik olarak Şekil 2.1’ de gösterilen laboratuvar ölçekli çapraz akış membran ünitesi kullanılmıştır. Çapraz akış membran ünitesi, su ceketine sahip besleme tankı, su banyosu (Jeio-Tech-RW-125G), pompa ve teçhizatı, elektromanyetik debimetre (Krohne), iletkenlik ve sıcaklık ölçer (Antech-Omnicon), hassas terazi (AND EJ-6100), bilgisayar, otomasyon panosu ve sistem şasesinden oluşmaktadır. Filtrasyon prosesi su geri kazanımının sağlanması amacıyla yönelik olarak konsantrasyon modunda gerçekleştirilmiştir. Sistemde istenen akış hızı ve basınç değişkenleri üniteye bağlı otomasyon panosu üzerinden ayarlanmıştır. Besleme tankı, sıcaklığın sabit tutulması için su banyosu ile irtibatlandırılmıştır. İşletme sırasında hassas terazi üzerindeki kapta biriktirilen süzüntü miktarı, bilgisayarda RsKey Ver.1.34 (A&D Comp.Ltd., Japan) programı ile kaydedilmiş, daha sonra Excel programı ile süzüntü akıları hesaplanmıştır.

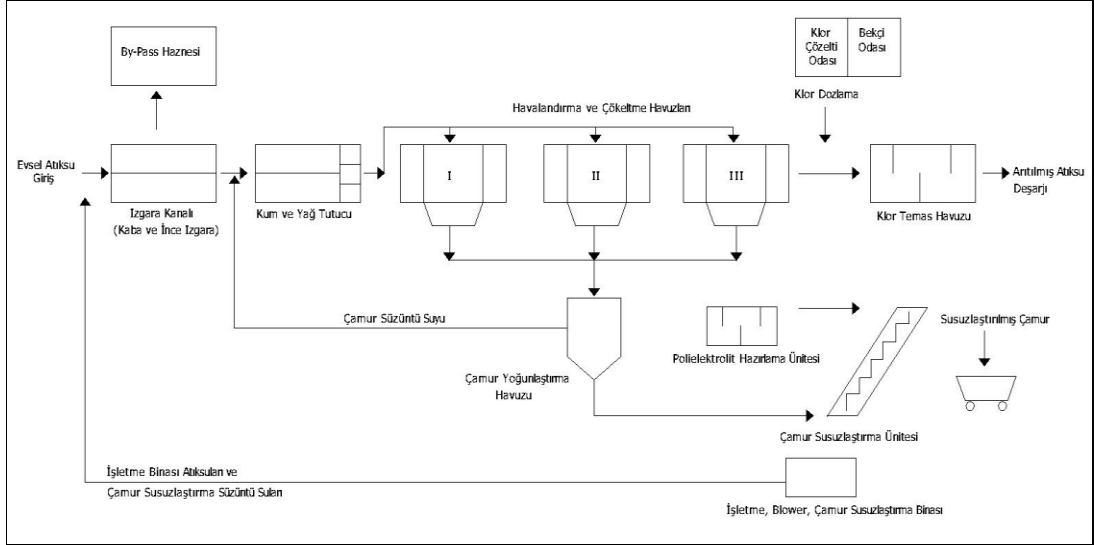


Şekil 2.1. Deney düzeneği-çapraz akış membran ünitesi

### 2.1.3. Kentsel arıtılmış atıksu ve su tüketimi

Membran filtrasyon deneylerinde kullanılan kentsel arıtılmış atık su, Şekil 2.2’ de akım şeması gösterilen, 3000 m<sup>3</sup>/gün kapasiteye sahip uzun havalandırmalı aktif çamur sistemi esasına göre çalışan Kocaeli Üniversitesi Umuttepe Yerleşkesi Atıksu Arıtma Tesisi ikincil arıtma çıkış sularıdır. Yaklaşık 30.000 kişilik bir nüfusu

barındıran Yerleşkedeki atıksu kaynakları baz alındığında tesis, kentsel atıksu arıtma tesisi olarak nitelendirilebilir.



Şekil 2.2. Kocaeli Üniversitesi Umuttepe Yerleşkesi Atıksu Arıtma Tesisi (AAT) akım şeması

Yerleşkedeki su tüketimi 2013 yılı verilerine göre Tablo 2.2' de verilmiştir. Yaz mevsiminde su tüketiminin şebeke suyunun sulama amaçlı kullanımından dolayı artması hem Üniversite açısından ciddi bir maddi yük oluşturmakta hem de doğal kaynakların doğrudan tüketilmesi gündeme gelmektedir.

Tablo 2.2. Kocaeli Üniversitesi Umuttepe Yerleşke' sinde su tüketimleri, 2013

AYLAR	YAVUZ SELİM ÖĞRENCİ YURDU (m <sup>3</sup> )	TIP FAKÜLTESİ VE ARAŞTIRMA VE UYGULAMA HASTANESİ (m <sup>3</sup> )	KYK ERKEK ÖĞRENCİ YURDU (m <sup>3</sup> )	YERLEŞKE (m <sup>3</sup> )
OCAK	13858	9839	143	20673
ŞUBAT	13201	12821	394	19932
MART	18701	13402	751	20960
NİSAN	19100	15113	780	19997
MAYIS	20170	15585	833	17944
HAZİRAN	15379	15053	555	22813
TEMMUZ	8170	15100	122	30220
AĞUSTOS	8895	15650	113	30668
EYLÜL	12665	15656	522	24220
EKİM	14773	15034	559	30311
KASIM	30162	27084	1323	25939
ARALIK	10503	8984	465	16143
<b>ORTALAMA (m<sup>3</sup>/gün)</b>	501,56	484,65	17,73	756,27
<b>ORTALAMA (%)</b>	0,28	0,28	0,01	0,43
<b>GENEL SU TÜKETİMİ ORTALAMA (m<sup>3</sup>/gün)</b>			<b>1760,0</b>	

1760 m<sup>3</sup>/gün su tüketimine sahip Yerleşkede 44,2 ha yeşil alanın sulanması için 700 m<sup>3</sup>/gün sulama suyuna ihtiyaç duyulmakta ve bu ihtiyacın büyük bir bölümü şebekeden karşılanmaktadır (Can Doğan ve diğ., 2015).

## 2.2. Yöntem

### 2.2.1. Kentsel ham ve arıtılmış atıksu karakterizasyonu

Ülkemizde sulamada tekrar kullanılacak arıtılmış atıksularda aranan özellikler AATTUT' nde detaylı olarak belirtilmiştir. Karakterizasyon çalışmasında tebliğde belirtilen parametreler esas alınmıştır. 2011-2013 yılları arasında ayda iki kez farklı günlerde alınan 2 saatlik kompozit numunelerde yapılan analiz sonuçlarına göre kentsel arıtılmış atıksu karakterizasyonu Tablo 2.3' te verilmiştir. Karakterizasyon çalışması sonuçlarına göre; mevcut atıksu arıtma tesisinin konvansiyonel parametreler BOİ<sub>5</sub>, KOİ, AKM ve pH açısından yüksek performans gösterdiği belirlenmiştir. Ancak tesis çıkış suyunun, minimum ve maksimum değerlere bakıldığında AATTUT-Tablo E7.1 ve Tablo E7.2' de belirtilen sulama suyu kriterleri bakımından, bulanıklık, fekal koliform, AKM, TN, TP, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, sodyum, klorür, iletkenlik, TÇM, SAR parametreleri için istenen düzeylerde olmadığı tespit edilmiştir. Mikrobiyolojik analiz sonuçları da tesis çıkış suyunun doğrudan kullanımının AATTUT-Tablo E7.1' e göre halk sağlığı bakımından uygun olmadığını göstermektedir. Parametrelerde minimum ve maksimum değerler arasındaki değişkenlik, Yerleşke' deki çalışma saatleri, mevsimsel nüfus yoğunluğu ve tesis işletmesinden kaynaklanmaktadır.

Çalışmada ayrıca AATTUT-Tablo E7.7' de belirtilen 16 ağır metal ve toksik element (Al, As, Be, Cd, Cr, Co, Cu, Fe, Pb, Li, Mn, Mo, Ni, Se, V, Zn) ile tebliğde yer almayan, ancak literatürde hastane atıksuyu içerikli atıksularda mevcut olduğu belirtilen 10 mikrokirletici de (Hg, Rb, Sr, Ag, Sn, Sb, Ba, U238, Pt ve Gd) izlenmiştir. Arıtma tesisi ham atıksu ve ikincil arıtma çıkış suyunda Hg dışındaki tüm kirleticilere ait Tablo 2.4' te belirtilen konsantrasyonların, ulusal ve uluslararası limit değerler ile uyumlu olduğu görülmektedir. Hg konsantrasyonunun, hem ham atıksuda hem de kentsel ikincil arıtılmış atıksuda (USEPA, 2004)' te suyun yeniden kullanımı için verilen sınır değer 1 µg/L' nin üzerinde olduğu görülmektedir.

Tablo 2.3. Kentsel arıtılmış atıksu karakterizasyonu

Parametreler	Birim	Ham Atıksu	Kentsel Arıtılmış Atıksu		
			Minimum	Maksimum	Ortalama
<b>Bulanıklık</b>	NTU	-	0,55	4,1	1,7±0,85
<b>İletkenlik</b>	µS/cm	927±183	692	1399	892,6±152,02
<b>TÇM</b>	mg/L	-	100	793	490,4±155,7
<b>SAR</b>	-	-	0,5	14,7	7,2±4,1
<b>Toplam-P</b>	mg/L	0,92±0,35	0,03	1,6	0,8±0,5
<b>Toplam-N</b>	mg/L	148,2 ± 71,8	14	104,5	27,8±19,3
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N</b>	mg/L	0,996 ± 0,52	1,9	66,8	15,9±13,9
<b>Sodyum</b>	mg/L		32,3	52,2	43,5±6,07
<b>Klorür</b>	mg/L	186,3 ± 161,2	85,5	460	149±86,6
<b>Bor</b>	mg/L	-	0,3	0,5	0,44±0,1
<b>Bakiye Klor</b>	mg/L	-	0,03	0,03	0,03
<b>BOİ<sub>5</sub></b>	mg/L	348 ± 148,6	7,5	34,7	21,3 ± 10,04
<b>KOİ</b>	mg/L	741 ± 276,4	26	88	53±14,1
<b>AKM</b>	mg/L	259 ± 135,6	0,25	25	8,7±6,08
<b>pH</b>	-	7,7–8,4	6,6	7,7	-
<b>Fekal Koliform</b>	kob/100 mL	-	<1	3x10 <sup>4</sup>	-
<b>Toplam Koliform</b>	kob/100 mL	-	<1	3,9x10 <sup>5</sup>	-



Tablo 2.4. Kentsel atıksu arıtma tesisi giriş ve çıkış suyunda ağır metal ve toksik element konsantrasyonları, 2012

Parametre (µg/L)	Ham Atıksu <sup>a</sup>	İkincil Arıtma Çıkış Suyu <sup>b</sup>	Türkiye <sup>c</sup>	USEPA <sup>d</sup>		Parametre (µg/L)	Ham Atıksu <sup>a</sup>	İkincil Arıtma Çıkış Suyu <sup>b</sup>	Türkiye <sup>c</sup>	USEPA <sup>d</sup>	
				Uzun sürelili	Kısa sürelili					Uzun sürelili	Kısa sürelili
Al	81,2±40,9	69,8±33,9	5000	5000	20,000	Se	0,259±0,268	0,149±0,154	20	20	20
As	1,3±0,9	1,1±0,6	100	100	2000	V	2,6±1,1	2,2±1,2	100	100	1000
Be	0,03±0,01	0,015±0,0147	100	100	500	Zn	175,6±69,3	171,8±79,8	2000	2000	10,000
Cd	0,4±0,2	0,3±0,2	10	10	50	Hg	1,99±2,39	1,098±0,85	- <sup>f</sup>	<1 <sup>g</sup>	
Cr	10,9±8,9	3,7±3,4	100	100	1000	Rb	13,9±2,8	11,5±1,4	- <sup>h</sup>		
Co	0,44±0,18	0,39±0,19	50	50	5000	Sr	176,9±85,2	192,1±117,7			
Cu	18,1±13,4	9,4±8,4	200	200	5000	Ag	0,47±0,44	0,21±0,22			
Fe	182,8±84,8	116,5±83,6	5000	5000	20,000	Sn	1,30±1,22	0,765±0,762			
Pb	9,56±7,99	12,4±11,7	5000	5000	10,000	Sb	0,2±0,07	0,2±0,1			
Li	- <sup>e</sup>	1,5±0,3	2500	2500	2500	Ba	34,2±10,4	35,6±17,8			
Mn	35,33±9,03	22,7±10,3	200	200	10,000	U238	0,14±0,08	0,025±0,018			
Mo	1,74±1,69	0,8±0,4	10	10	50	Pt	0,19±0,26	0,14±0,05			
Ni	4,6±1,4	2,6±0,8	200	200	2000	Gd	0,45±0,4	2,26±1,02			

<sup>a</sup> 19 örnekleme sonucudur

<sup>b</sup> 24 örnekleme sonucudur

<sup>c</sup> AATTUT, Ek 7-Tablo E7.7. Her türlü zeminde sürekli sulama yapılması durumunda sınır değerler (ÇŞB, 2010)

<sup>d</sup> Tablo 2-7. Sulama için arıtılmış sulardaki bileşenler için tavsiye edilen sınır değerler (USEPA, 2004)

<sup>e</sup> Ölçüm yapılamamıştır

<sup>f</sup> (ÇŞB, 2010)' a göre sınır değeri belirtilmemiştir

<sup>g</sup> Tablo 8-3. Suyun yeniden kullanımı için ilgili su kalite parametreleri özeti (USEPA, 2004)

<sup>h</sup> (USEPA, 2004)' e göre sınır değeri belirtilmemiştir

### 2.2.2. Analitik yöntemler

Tez çalışmasında konvansiyonel parametrelerden BOI<sub>5</sub>, KOI, AKM, TN, TP ve bakiye (serbest) klor parametreleri standart metotlara göre (APHA&AWWA, 2005) analiz edilmiştir. AOAC Official Method 966.24 metoduna göre membran filtrasyon yöntemi kullanılarak da fekal/toplam koliform analizleri yapılmıştır. pH, iletkenlik ve TÇM parametreleri HACH/HQ40d/Multi cihazı, bulanıklık ise HACH/2100Q turbimetre cihazı ile ölçülmüştür. B, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>+2</sup>, Mg<sup>+2</sup>, K<sup>+</sup> ile ağır metal ve toksik element analizlerinde Perkin-Elmer ELAN DRC-e endüktif eşleşmiş plazma-kütle spektrometresi (ICP-MS), Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ve NO<sub>2</sub><sup>-</sup> parametrelerinin analizinde ise DIONEX-ICS-1100 iyon kromatografi kullanılmıştır. HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> ve CO<sub>3</sub><sup>-2</sup> analizleri, normalitesi belli H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ile titrasyonu takip eden alkalinite hesaplamaları ile gerçekleştirilmiştir. SAR değeri Eşitlik (2.1)' e göre hesaplanmıştır;

$$SAR = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{[Ca^{+2}] + [Mg^{+2}]}{2}}} \quad (2.1)$$

Eşitlik (2.1)' de; SAR=sodyum adsorpsiyon oranı, [Na<sup>+</sup>]=sodyum konsantrasyonu (meq/L), [Ca<sup>+2</sup>]=kalsiyum konsantrasyonu (meq/L), [Mg<sup>+2</sup>]=magnezyum konsantrasyonu (meq/L)' dur.

### 2.2.3. Proses performans analizleri

Çalışmada UF ve NF deneyleri için esas alınan proses performans parametreleri; “süzüntü akıları” ile sulama sularında izlenmesi gereken iletkenlik, SAR, bulanıklık, TN, TP ve NO<sub>3</sub><sup>-</sup> parametrelerine ait süzüntüdeki “kirletici madde konsantrasyonu / kirletici madde giderim verimleri” dir. Süzüntü akısının belirlenmesi için bilgisayara bağlı hassas terazi ile süzüntü miktarı birer dakika aralıkla ağırlık cinsinden ölçülmüştür. Dakikada bir alınan tartım sonucu bilgisayarda RsKey Ver.1.34 (A&D Comp.Ltd., Japan) programı ile kaydedilmiş, daha sonra Excel programı ile “süzüntü akıları” Eşitlik (2.2)' ye göre hesaplanmıştır;

$$J = \frac{1}{A} \frac{dV}{dt} \quad (2.2)$$

Bu eşitlikte J=süzüntü akısı (L/m<sup>2</sup>.sa), A=etkili membran alanı (m<sup>2</sup>), V=toplam süzüntü hacmi (m<sup>3</sup>), t=filtrasyon süresi'dir.

Besleme akımını konsantre etme şartlarında gerçekleştirilen tüm deneysel çalışmalarda kullanılan hacim azalma faktörü (VRF) Eşitlik (2.3)' e göre hesaplanmıştır.

$$VRF = \frac{V_f}{V_r} \quad (2.3)$$

Bu eşitlikte VRF= hacim azalma faktörünü, V<sub>f</sub> = Başlangıçtaki besleme hacmini (L) ve V<sub>r</sub> : Filtrasyon sırasındaki konsantre hacmi (L)' ni ifade etmektedir. UF ve NF filtrasyon deneyleri, süzüntü ve konsantre akımları besleme tankına geri devredilerek gerçekleştirilmiş, kararlı hal süresi sonunda alınan süzüntü ve konsantre örnekleri analiz edilmiştir. UF/TO, NF<sub>gevşek</sub>/TO, UF/NF<sub>gevşek</sub> ve UF/NF<sub>sıkı</sub> bütünleşik membran sistemleri deneyleri ise, besleme akımını konsantre etme şartlarında, yeterli miktarda süzüntü elde edilene kadar ve her bir deneyde geri kazanım oranı esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Bütünleşik membran sistemleri deneylerinde deney başında, membran kararlı hal aldıktan sonra deney sonunda süzüntü ve konsantre örnekleri alınarak analiz edilmiştir.

Tüm deneylerde süzüntüdeki kirletici madde konsantrasyonu (C<sub>s</sub>) ve besleme çözeltisindeki kirletici madde konsantrasyonu (C<sub>b</sub>) esas alınarak Eşitlik (2.4)' e göre de "kirletici madde giderim verimleri-R(%)", hesaplanmıştır;

$$R(\%) = \left(1 - \frac{C_s}{C_b}\right) \times 100 \quad (2.4)$$

#### **2.2.4. Deneysel tasarım çözümlenmeleri**

##### **2.2.4.1. Taguchi deneysel tasarım çözümlenmeleri**

UF ve NF deneyleri, elde edilen sonuçların istatistikî yöntemlerle değerlendirilmesi amacıyla Taguchi deneysel tasarım yöntemi çerçevesinde planlanmıştır. Bu doğrultuda membran tipi (M<sub>T</sub>), çapraz akış hızı (v), sıcaklık (T), membran geçiş basıncı (ΔP) olmak üzere 4 farklı değişkenin ve değişken seviyelerinin, UF ve NF proseslerinin teknik performansları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Minitab 16

yazılımı kullanılarak 3 seviyeli 4 değişken için  $L_9$  ( $3^4$ ) ortogonal dizinine göre belirlenen, proses değişken seviyeleri Tablo 2.5’ te, Taguchi deneysel tasarım tablosu ise Tablo 2.6’ da verilmiştir.

Tablo 2.5. UF ve NF prosesleri için proses değişken seviyeleri

Değişken	Parametre	Sembol	Birim	Seviye (a)			
				Düşük (1)	Orta (2)	Yüksek (3)	
X1	Membran tipi	$M_T$	-	UC010	UC030	UP150	<b>UF</b>
				NP010	NF90	NF270	<b>NF</b>
X2	Çapraz akış hızı	$v$	(L/sa)	200	400	600	
X3	Sıcaklık	T	$^{\circ}\text{C}$	15	22,5	30	
X4	Membran geçiş basıncı	$\Delta P$	bar	2	3	4	<b>UF</b>
				5	10	15	<b>NF</b>

Tablo 2.6. UF ve NF proseslerinde uygulanan  $L_9$  Taguchi deneysel tasarım tablosu

Deney No	Değişkenler				
	$M_T$ (-) (X1)	$v$ (L/sa) (X2)	$T$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) (X3)	$\Delta P$ (bar) (X4)	
				UF	NF
1	UC010 / NP010	200	15	2	5
2	UC010 / NP010	400	22,5	3	10
3	UC010 / NP010	600	30	4	15
4	UC030 / NF90	200	22,5	4	15
5	UC030 / NF90	400	30	2	5
6	UC030 / NF90	600	15	3	10
7	UP150 / NF270	200	30	3	10
8	UP150 / NF270	400	15	4	15
9	UP150 / NF270	600	22,5	2	5

Taguchi yönteminde, deneysel sonuçların analiz edilmesi için S/N (Signal/Noise-İşaret/Gürültü) oranı kullanılmaktadır. Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde en yüksek S/N oranına sahip olan değer en iyi performansı vermektedir (Sharma ve diğ., 2005; Safarzadeh ve diğ., 2008; Gönder ve diğ., 2011). Bu çalışmada küçük değer iyi (hedef en küçük değere ulaşmaktır) ve yüksek değer iyi (hedef en yüksek değere ulaşmaktır) olmak üzere 2 temel kategori esas alınmış, bu kategoriler için sırasıyla

Eşitlik (2.5) ve (2.6)'daki formüllere göre S/N oranları Minitab yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır;

$$S/N \text{ (dB)} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{a=1}^n y_a^2 \right) \quad (2.5)$$

$$S/N \text{ (dB)} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{a=1}^n \frac{1}{y_a^2} \right) \quad (2.6)$$

Eşitliklerde n=i sayılı deneye ait tekrar sayısını,  $y_a=a$  sayılı deneye ait deney sonucunu ifade etmektedir.

Çalışma kapsamında UF deneylerinde süzüntü akısı için “en yüksek değer iyi” ve süzüntüdeki kirletici madde konsantrasyonları için “en küçük değer iyi” yaklaşımları, NF deneylerinde ise süzüntü akısı ve kirletici madde giderim verimleri için “en yüksek değer iyi” yaklaşımı esas alınarak optimum değerlerin hesabı yapılmıştır. S/N oranlarından hareketle en iyi değişken-seviye kombinasyonunun belirlenmesi için, performans karakteristiğinin optimum değeri Eşitlik (2.7)'ye göre hesaplanmaktadır (Ross, 1996; Safarzadeh ve diğ., 2008; Gönder ve diğ., 2011);

$$Y_{opt} = \frac{T}{N} + \left[ \overline{(X1)}_a - \frac{T}{N} \right] + \left[ \overline{(X2)}_b - \frac{T}{N} \right] + \left[ \overline{(X3)}_c - \frac{T}{N} \right] \left[ \overline{(X4)}_d - \frac{T}{N} \right] \quad (2.7)$$

Bu eşitlikte  $Y_{opt}$ =optimum koşullarda hesaplanan performans istatistiği değerini, T=tüm deney sonuçlarının toplam değerini, N=toplam deney sayısını,  $\overline{(X1)}_a=X1$  değişkeninin a seviyesindeki deney sonuçlarının ortalamasını,  $\overline{(X2)}_b=X2$  değişkeninin b seviyesindeki deney sonuçlarının ortalamasını,  $\overline{(X3)}_c=X3$  değişkeninin c seviyesindeki deney sonuçlarının ortalamasını,  $\overline{(X4)}_d=X4$  değişkeninin d seviyesindeki deney sonuçlarının ortalamasını, a,b,c,d ise sırasıyla X1, X2, X3, X4 değişkenleri için optimum seviyeleri ifade etmektedir.

Performans istatistiği değerinin anlamlı olup olmadığını belirlemek için güven aralığı hesaplanmalıdır. Güven aralığı, performans istatistiği değeri için maksimum ve minimum değerler aralığıdır (Gönder ve diğ., 2011). Optimum değer hesabından sonra güven aralığı hesabı yapılmıştır. Eşitlik (2.8)'deki G.A=güven aralığını, F=istenen güvenilirlik düzeyi için F tablosundaki değeri,  $\alpha$ =güvenilirlik düzeyini,

$sd_e$ =hatanın serbestlik derecesini,  $V_e$ =hataya ait varyansı,  $m$ =tüm faktörlerin serbestlik dereceleri toplamını,  $S$ =doğrulama deneyindeki tekrar sayısını,  $N$ =toplam deney sayısını ifade etmektedir;

$$G.A = \sqrt{F_{\alpha(1, sd_e)} V_e \left[ \left( \frac{1+m}{N} \right) + \left( \frac{1}{S} \right) \right]} \quad (2.8)$$

Deneysel olarak bulunan performans istatistiği değerinin Eşitlik (2.9)' da verilen aralıkta olması beklenmektedir (Gönder ve diğ., 2011).

$$Y_{opt} - G.A. \leq \text{performans istatistiği değeri} \leq Y_{opt} + G.A. \quad (2.9)$$

Eğer deneylerden elde edilen sonuçlar yüzdellik değerler (%) şeklinde ise Eşitlik (2.7) ve (2.8) hesaplanmadan önce Eşitlik (2.10)'a göre yüzdellik değerlerin omega dönüşümleri yapılır. Daha sonra ilgilenilen değerler aynı eşitlik yardımıyla ters dönüşüm yapılarak belirlenir (Safarzadeh ve diğ., 2008; Gönder ve diğ., 2011);

$$\Omega(\text{dB}) = -10 \log \left( \frac{1}{P} - 1 \right) \quad (2.10)$$

Burada;  $\Omega(\text{dB})$ =yüzdellik değerlerin omega dönüşümü ile bulunan desibel değeri ve  $P$ =deney sonucunun yüzdellik değeridir. Performans istatistiği değerleri, NF deneylerinde süzüntüdeki kirletici madde giderim verimleri için yüzde olarak verildiğinden, yüzde değerlerin omega dönüşümleri yapılmıştır.

#### 2.2.4.2. Yüzey yanıt yöntemi ve ANOVA hesaplamaları

Doktora tezi kapsamında Taguchi deneysel tasarımı ile belirlenmiş UF ve NF deneyleri sonucunda proses performans parametrelerine ilişkin en iyi filtrasyon koşulları belirlendikten sonra yüzey yanıt yöntemi aracılığıyla Minitab 16 yazılımı ve 2. bölümde belirtilen eşitlikler kullanılarak ANOVA analizleri yapılmıştır. ANOVA, yani varyans analizi, bir grup değişkenin ortalama performansa kıyasla oluşturduğu farkı (değişkenliği) incelemek şeklinde tanımlanmaktadır. Toplam değişkenliği bileşenlerine ayıran matematiksel bir tekniktir ve kareler toplamı, serbestlik derecesi, varyans, F oranı, %p gibi değerlerin hesaplanmasıyla gerçekleştirilir (Aydiner, 2006; Özçelep, 2009). Bu çalışmada tam kuadratik olarak

yapılan ANOVA analizleri ile elde edilen sonuçlardan hareketle, değişkenlerin önem düzeyleri ve proses performans parametreleri (süzüntü akıları ve kirletici madde konsantrasyonları/giderim verimleri) üzerine rölatif etkileri birbirleri ile kıyaslamalı olarak incelenmiştir.

Hesaplamalara ilişkin kullanılan eşitlikler X1 değişkeni için aşağıda verilmektedir. Diğer değişkenler ve hata için de hesaplamalar aynı şekilde yapılmıştır. ANOVA veri analiz yöntemi kullanılarak, tasarım deneylerinde elde edilen proses performans parametreleri değerlerinden hareketle ve her bir sonuç parametresi için ayrı ayrı olmak üzere, ilk olarak her bir değişkene ait kareler toplamı (SS-Sum of Squares) Eşitlik (2.11)' deki gibi hesaplanmıştır (Ross, 1996; Aydın 2006; Özçelep, 2009);

$$SS_{(X1)} = \left( \sum_{a=1}^{k(X1)} \frac{(X1)_a^2}{n_{(X1)_a}} \right) - \frac{T^2}{N} \quad (2.11)$$

Bu eşitlikte;  $SS_{(X1)}$ =X1 değişkeninin kareler toplamını,  $k_{(X1)}$ =X1 değişkeninin seviye sayısını,  $(X1)_a$ =X1 değişkeninin a seviyesindeki deney sonuçlarının toplamını,  $n_{(X1)_a}$ =X1 değişkeninin a seviyesindeki deney sayısını, T=tüm deney sonuçlarının toplamını, N=toplam deney sayısını ifade etmektedir.

Değişkenlere ait kareler toplamı hesaplandıktan sonra Eşitlik (2.12)' ye göre toplam kareler toplamı ( $SS_T$ ), daha sonra Eşitlik (2.13)' e göre hataya ait kareler toplamı ( $SS_e$ ) hesaplanır;

$$SS_T = \left( \sum_{a=1}^N y_a^2 \right) - \frac{T^2}{N} \quad (2.12)$$

$$SS_e = SS_T - (SS_{(X1)} + SS_{(X2)} + SS_{(X3)} + SS_{(X4)}) \quad (2.13)$$

Serbestlik derecesi (sd) bir sonuca varabilmek için yapılması gereken bağımsız karşılaştırmaların sayısı olarak tanımlanmaktadır. Herhangi bir değişkenin serbestlik derecesi, o değişkenin deneysel tasarımdaki toplam seviye sayısının 1 eksiğine eşittir. Toplam serbestlik derecesi ise deneysel tasarımdaki toplam deney sayısının 1 eksiğidir (Özçelep, 2009). Proses performans parametrelerinin her biri için ayrı ayrı

olmak üzere, her bir değişkene ait hesaplanan kareler toplamı kullanılarak ortalama kareler toplamı ( $MSS_{(X1)}$ ) Eşitlik 2.14' e göre hesaplanabilir;

$$MSS_{(X1)} = \frac{SS_{(X1)}}{sd_{(X1)}} \quad (2.14)$$

Bu eşitlikte  $MSS_{(X1)}$  değişkenine ait ortalama kareler toplamını,  $sd_{(X1)}$  değişkenine ait serbestlik derecesini ve  $SS_{(X1)}$  değişkeninin kareler toplamını ifade etmektedir.

Ortalama kareler toplamı hesaplandıktan sonra F değeri hesaplanmaktadır. X1 değişkenine ait F değerinin hesabına ilişkin formül Eşitlik (2.15)' te verilmiştir (Aydiner, 2006; Özçelep, 2009).

$$F_{(X1)} = \frac{MSS_{(X1)}}{MSS_e} \quad (2.15)$$

Bu eşitlikte ise  $F_{(X1)}$  değişkeninin F oranını,  $MSS_{(X1)}$  değişkenine ait ortalama kareler toplamını,  $MSS_e$  hatanın ortalama kareler toplamını göstermektedir. Herhangi bir değişken için hesaplanan F değeri, o değişkenin proses performans parametreleri üzerindeki etkisinin önemli ya da önemsiz olduğunun belirlenmesinde kullanılır. Bu duruma karar verebilmek için hesaplanan F değeri, istatistiksel tablolardan %95 ve/veya %99 güven düzeyinde pay için değişkenin, payda için ise hatanın serbestlik derecesi göz önüne alınarak belirlenen  $F_{kritik}$  değeri ile karşılaştırılır. Hesaplanan F değeri,  $F_{kritik}$  değerinden büyük ise değişkenin sonuç parametresi üzerindeki etkisinin önemli, değilse önemsiz olduğuna karar verilmektedir (Montgomery, 1991; Ross, 1996). Tablo 2.7' de %95 güven seviyesi için F tablosu verilmektedir.

F değerleri belirlendikten sonra değişkenlerin proses performans parametreleri üzerindeki rölatif etki (%p) değerlerinin belirlenmesi için öncelikle değişkenlere ait saf toplam (P-pure sum) değerleri Eşitlik (2.16)'ya göre, P değeri kullanılarak her bir değişken için %p değeri de Eşitlik (2.17)'de belirtilen formül kullanılarak hesaplanmıştır (Aydiner, 2006; Özçelep, 2009);

$$P_{(X1)} = SS_{(X1)} - (MSS_e \cdot sd_{(X1)}) \quad (2.16)$$



$$\%p_{(X1)} = \frac{P_{(X1)}}{SS_T} \quad (2.17)$$

Bu iki eşitlikte ise  $P_{(X1)}=X1$  değişkeninin saf toplamını (P değerini),  $SS_{(X1)}=X1$  değişkeninin kareler toplamını,  $MSS_e$ =hatanın ortalama kareler toplamını,  $sd_{(X1)}=X1$  değişkenine ait serbestlik derecesini,  $\%p_{(X1)}=X1$  değişkeninin rölatif etki değerini,  $SS_T$ =toplam kareler toplamını ifade etmektedir.

Tablo 2.7. %95 güven seviyesi için F tablosu ( $\alpha=0,05$ ) (Özçelep, 2009)

		$F_{[0,05(V1-V2)]}$ %95 Güvenilirlik Seviyesi ( $\alpha=0,05$ )									
		Pay İçin Serbestlik Derecesi (V1)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Payda İçin Serbestlik Derecesi (V2)	1	161	200	216	225	230	234	237	239	241	242
	2	18,50	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35	19,37	19,38	19,40
	3	10,10	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79
	4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96
	5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74
	6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06
	7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64
	8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,35
	9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14
	10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98

Doktora tezi kapsamında yapılan ANOVA analizlerinde Minitab yazılımı aracılığıyla hesaplanan kareler toplamı (SS) ile birlikte düzeltilmiş kareler toplamı (Adj SS- Adjusted Sum of Squares) ve düzeltilmiş ortalama kareler toplamı (Adj MS- Adjusted Mean Squares) değerleri de verilmiştir. Düzeltilmiş kareler toplamı model içindeki değişkenlerin sırasına bağlı değildir. Düzeltilmiş ortalama kareler toplamı, düzeltilmiş kareler toplamını serbestlik derecesine bölerek hesaplanmaktadır. Her ikisi de model içindeki değişkenlerin sırasına bakılmaksızın modeldeki tüm değişkenler varsayılarak bir değişken aracılığıyla açıklanabilen kareler toplamı regresyonunun bir bölümüdür (URL-5, 2015). Tüm proses performans parametreleri için düzeltilmiş kareler toplamı düşük olan değişkenlerin etkisi göz ardı edilmiş ve o değişkenlere ait düzeltilmiş kareler toplamı ve serbestlik dereceleri hataya aktarılmıştır. Bu olay literatürde birleştirme (pooling) olarak ifade edilmektedir (Aydın, 2006; Mousavi ve diğ., 2007; Özçelep, 2009). Deneysel tasarım çalışması ışığında, süzüntü akıları ve diğer proses performans parametrelerin ANOVA analizi sonuçlarının değerlendirilmesi F,  $F_{kritik}$  ve %p değerleri bazında yapılmıştır.

### 2.2.5. Akı kayıpları ve membran kirlenme direnci ile ilgili hesaplamalar

Çalışmada UF ve NF prosesleri için Taguchi deneysel tasarım yöntemine göre belirlenen en iyi filtrasyon şartlarında ve bu şartlara göre gerçekleştirilerek en iyi geri kazanım oranı ve süzüntü akısı elde edilen UF/TO,  $NF_{\text{gevşek}}/TO$ ,  $UF/NF_{\text{gevşek}}$  ve  $UF/NF_{\text{sıkı}}$  bütünleşik membran sistemleri deneylerinde kullanılan membranlar için akı kayıpları ve kirlenme direnci hesapları yapılmıştır. Bu doğrultuda membranların saf su ve atıksu ile işlem görmesi sonucu elde edilen toplam akı kaybı Eşitlik (2.18)'e göre hesaplanmıştır;

$$\text{Toplam Akı Kaybı (\%)} = \frac{J_0 - J}{J_0} \quad (2.18)$$

Bu eşitlikte;  $J_0$ =temiz membranın saf su akısı ( $L/m^2.sa$ ) ve  $J$ =deney sonunda elde edilen atıksu akısı ( $L/m^2.sa$ )'dır.

Darcy kanunlarına göre yapılan kirlenme dirençleri hesaplamalarında; öncelikle Eşitlik (2.19)'a göre temiz membranlar saf sudan geçirilerek membran dirençleri belirlenmiştir. Daha sonra membranlar atıksudan geçirilmiş ve Eşitlik (2.20)'ye göre her bir membrana ait toplam dirençler hesaplanmıştır. Deneylerde bir membran için kirlenme direnci hesapları Eşitlik (2.21)'e göre yapılmıştır (Meng ve diğ., 2006; Rai ve diğ., 2007; Guo ve diğ., 2012).

$$R_m = \frac{\Delta P}{\mu \cdot J_0} \quad (2.19)$$

$$R_T = \frac{\Delta P}{\mu \cdot J} \quad (2.20)$$

$$R_T = R_k + R_m \quad (2.21)$$

Bu eşitliklerde;  $R_m$ =membran direncini ( $m^{-1}$ ),  $R_T$ =membran filtrasyonun toplam direncini ( $m^{-1}$ ),  $R_k$ =membran filtrasyonu sonucunda oluşan membran kirlenme direncini ( $m^{-1}$ ),  $\Delta P$ = membran geçiş basıncını (Pa),  $\mu$ =süzüntünün viskozitesini (Pa.sn),  $J_0$ = temiz membranın saf su akısını ( $m^3/m^2.sn$ ) ve  $J$ =deney sonunda elde edilen atıksu akısını ( $m^3/m^2.sn$ ) ifade etmektedir.

### **3. BULGULAR VE TARTIŞMA**

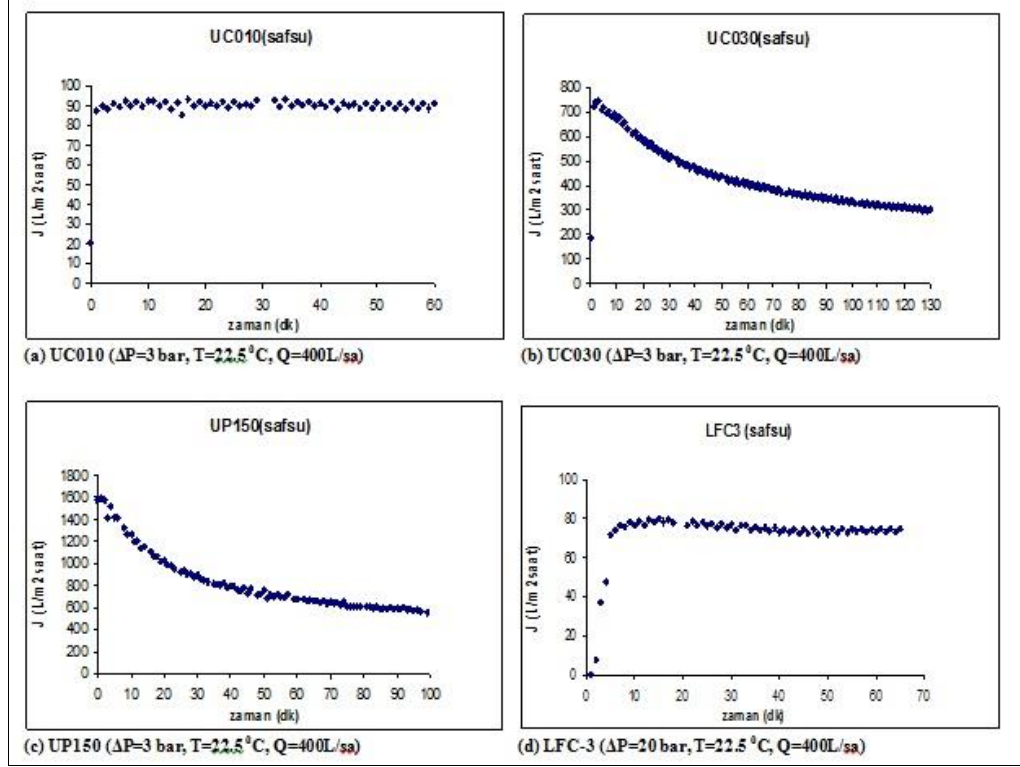
#### **3.1. Ön Deneysel Çalışmalara Ait Bulgular**

Doktora tezinde, deneysel tasarım esasları doğrultusunda planlanan UF ve NF deneyleri öncesinde, kentsel atıksu arıtma tesisi ikincil arıtma çıkış sularının membran prosesler kullanılarak sulama suyu amacıyla geri kazanımı için ön deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

UF ve sonrasında TO prosesini içeren UF/TO bütünleşik membran sistemleri kullanılarak yürütülen ön deneysel çalışmalarda, 3 farklı düz plaka ticari UF membranı (UC010, UC030 ve UP150) ile 1 adet düz plaka ticari TO membranının (LFC3) arıtılmış kentsel atıksuların sulama suyu amacıyla geri kazanımı açısından performansı araştırılmıştır. UF/TO bütünleşik membran sistemleri ile iyi kalitede su geri kazanıldığı ve bu suyun sulama amacıyla kullanılabileceği belirlenmiştir.

UF deneyleri, 22,5 °C sıcaklık, 3 bar membran geçiş basıncı, 400 L/sa çapraz akış hızı, 8 L başlangıç besleme hacmi ve besleme akımını konsantre etme şartlarında, VRF 2 olacak şekilde ve 4 saatlik deney sürelerinde gerçekleştirilmiştir. UF membran süzöntülerinin işlem gördüğü ve SI (UC010/LFC3), SII (UC030/LFC3) ve SIII (UP150/LFC3) bütünleşik membran sistemleri olarak adlandırılan TO deneyleri ise, aynı sıcaklık ve çapraz akış hızı ile 20 bar membran geçiş basıncı altında, 4 L başlangıç besleme hacminde ve 1 saatlik sürelerde yürütülmüştür.

Çalışma kapsamında kullanılan her bir UF membranı ve LFC3 TO membranının saf su için akı-zaman değişimleri Şekil 3.1' de verilmiştir.

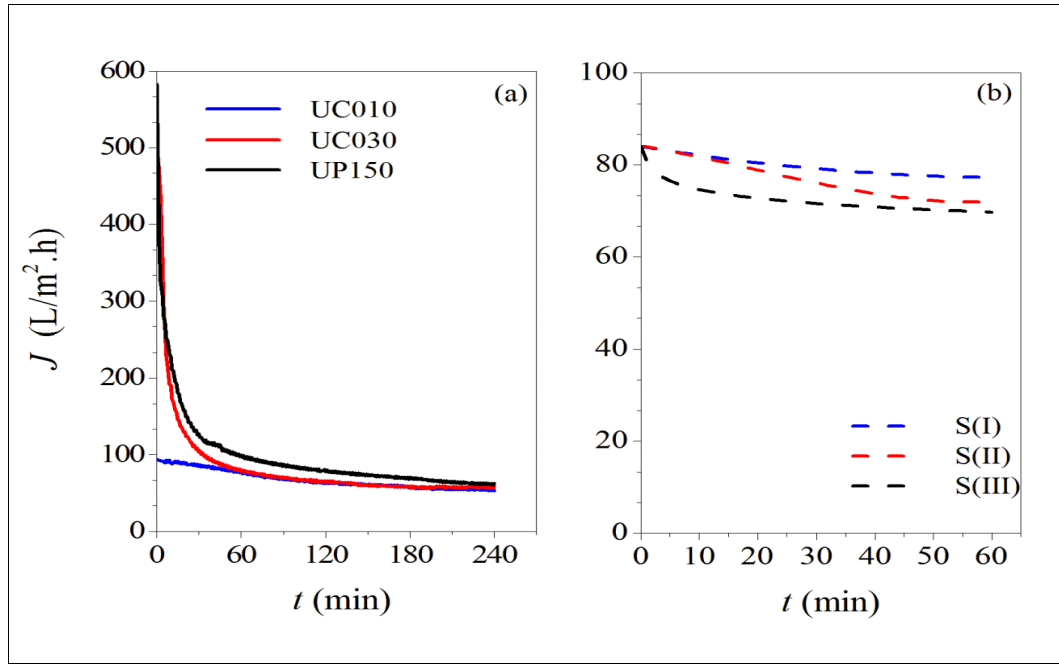


Şekil 3.1. Ön deneysel çalışmalarda UF membranlarında ve LFC3 TO membranında saf su için zamana karşı akı değişimleri

Saf su deneyleri sonrasında kentsel atıksu arıtma tesisi ikincil arıtma çıkış suyunun, UF membranlarından geçirilmesi sonucu elde edilen akı-zaman değişimleri Şekil 3.2 (a)' da, SI, SII ve SIII bütünlük membran sistemlerinden geçirilmesi sonucu elde edilen akı-zaman değişimleri Şekil 3.2 (b)' de gösterilmektedir. UC010, UC030 ve UP150 membranları için elde edilen atıksu akıları sırasıyla 54,1, 57,8 ve 61  $L/m^2.sa$  olup, her bir UF membranı süzütüsünün LFC3 membranından geçirilmesi sonucu elde edilen atıksu akıları ise 76,9, 71,7 ve 68,5  $L/m^2.sa'$  tir.

Çalışmanın bu aşamasında UF ve TO membranların atıksu akı performanslarının yaklaşık %11 oranında değiştiği görülmektedir. TO membranlarda UF membranlardan daha yüksek akı elde edilmesine rağmen, değişen UF membran uygulamalarının TO membranlarının akı performansları üzerine çok da önemli bir etkisinin olmadığı görülmektedir. UF' deki 54,1  $L/m^2.sa$  düşük akı değerine karşılık UF çıkışı elde edilen süzütü 76,9  $L/m^2.sa'$  lik daha yüksek TO akısına neden olmuştur. Buradan TO öncesi UF ile yapılan perdelemenin TO performansını arttırdığı söylenebilir. UF membranlarda moleküler boyut artışı ile (10.000, 30.000, 150.000 D) birlikte akı performans değerleri de artmaktadır fakat UF akısının artması

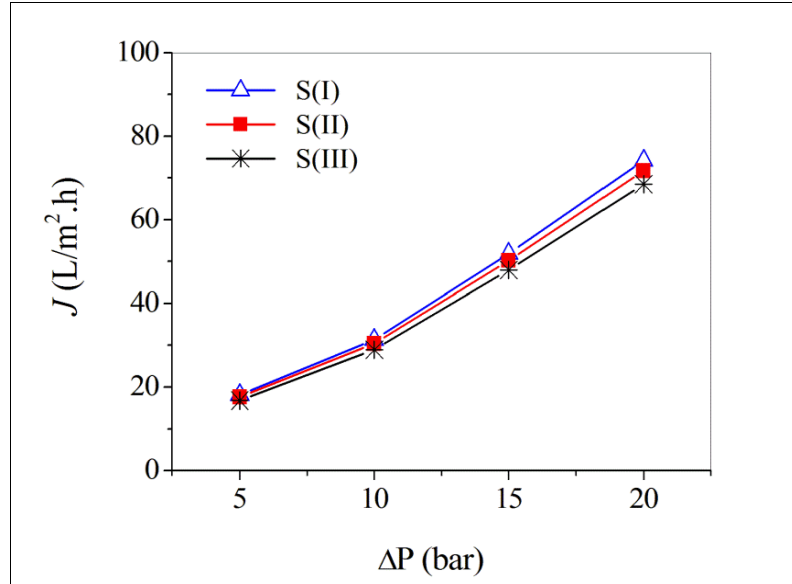
düşük ağırlıktaki moleküler organiklerin geçmesini arttırdığı için, UF' den geçen organik maddeler TO' nun akısının düşmesine yani TO' nun daha çabuk tıkanmasına neden olmaktadır. Bu durumda TO membranının yüzeyinde ve gözeneklerinde kirletici miktarı artmakta ve TO performansı %15 oranında değişmektedir. Moleküler boyut artışı ile KOİ gideriminin artması da, TO akı performansının düşmesini desteklemektedir. Buradan, akıda meydana gelen düşüşün organik kaynaklı olduğu söylenebilir de bu konu saha uygulamaları öncesinde daha detaylı araştırılmalıdır.



Şekil 3.2. Kentsel atıksu arıtma tesisi ikincil arıtma çıkış suları için zamana karşı akı değişimleri, (a) UF membranları, (b) SI, SII ve SIII bütünleşik membran sistemleri

TO, daha çok yüksek basınç gerektiren bir prosestir. Doktora tezi kapsamında UF/TO deneyleri sonrasında sistemdeki süzüntü değiştirilmeden ve sabit akımda LFC3 TO membranı ile düşük basınçlarda da çalışılmıştır. Farklı basınçlarda gerçekleştirilen TO membranlarla yürütülen deneyler sonrasında TO membran akılarında önemli değişimler meydana gelmediği buna karşın basınç arttıkça TO membran akılarının da arttığı Şekil 3.3' ten görülmektedir. Su geçirimsizliği 5, 10, 15 ve 20 bar basınç altında sırasıyla 3,52, 3,02, 3,33 ve 3,58 L/m<sup>2</sup>.sa.bar'dır. Özellikle 10 barda, TO membran geçirgenliğinde azalma meydana gelmekte ve buradan düşük basınç TO işletiminin daha yüksek akı performansı gösterdiği anlaşılmaktadır. Düşük basınçlarda organik ve inorganik çözünmüş maddelerin membran içerisine daha az

nüfuz etmesi ve bu nedenle de daha düşük membran kirlenmesinin oluşması nedeniyle düşük basınçlı TO membranlar ile daha yüksek akı performanslarında işleme olanak sağlanmaktadır.



Şekil 3.3. LFC3 membranı ile farklı basınçlarda yapılan deneylerde elde edilen J-ΔP değişimleri

SI, SII ve SIII bütünleşik membran sistemleri kullanılarak, kentsel atıksu arıtma tesisi ikincil arıtma çıkış sularının sulama suyu olarak yeniden kullanılabilirliğini değerlendirmek amacıyla; deneysel çalışmalar sonrasında gerçekleştirilen makro ve mikrokirleticilere ait analiz sonuçları Tablo 3.1’ de gösterilmektedir. Analiz sonuçları AATTUT (ÇŞB, 2010), (USEPA, 2004), (FAO, 1992) ve (WHO, 2006)’ da belirtilen sulama ile ilgili kriterlere göre değerlendirilmiştir (Tablo 1.2-Tablo 1.5). AATTUT’ ne göre sulama sularında izlenmesi gereken parametrelerden iletkenlik, TÇM, SAR, Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, B, TP, TN, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, pH, bulanıklık, AKM, Ca<sup>+2</sup>, Mg<sup>+2</sup> ve fekal koliform parametreleri ölçülmüştür. Tebliğ dışında ise literatürde ve sonuçların değerlendirildiği diğer standartlarda yer alan NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N, K<sup>+</sup>, PO<sub>4</sub>-P, SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, KOİ ve toplam koliform parametreleri analiz edilmiştir.

Deneysel sonuçlarında ikincil arıtma çıkış suyu ile UF membran çıkışında yapılan analizlerde, UC030 membranının diğer iki UF membranına göre daha iyi KOİ, bulanıklık ve iletkenlik giderim verimi sağladığı tespit edilmiştir. LFC3 membranının performansına bakıldığında ise KOİ ve bulanıklık için; SII sistemi sonrası en iyi giderimin sağlandığı, iletkenlik için ise; SIII sistemi sonrası daha iyi

giderim verimi elde edildiği görülmüştür. Atıksuların sulama suyu olarak yeniden kullanım standartlarında KOİ parametresi ile ilgili bir sınır değeri olmamasına rağmen, ikincil arıtma çıkış suyu ortalama KOİ değeri için; SI, SII ve SIII sistemlerinde elde edilen giderim verimleri sırasıyla %29,6, %91,1 ve %83,2' dir.

Tüm parametreler açısından üç sistemi karşılaştırdığımızda; SI sisteminde NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N ve PO<sub>4</sub>-P için en yüksek giderim verimi değerleri elde edilmiştir. SII sisteminde Cl<sup>-</sup>, bulanıklık ve SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> için sırasıyla elde edilen giderim verimleri %98,5, %96,4, %99,4' tür. SIII sisteminde ise iletkenlik, TÇM, SAR, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>+2</sup> ve Mg<sup>+2</sup> parametreleri için diğer sistemlere kıyasla daha iyi giderim verimi elde edilmiştir. AKM açısından üç sistemde de %100 giderim verimi sağlanırken, bor ve pH ikincil arıtma çıkış suyunda olduğu gibi her üç sistem uygulandığında da uygun sınır değerlerdedir.

KOİ, bulanıklık ve iletkenlik gideriminin en iyi sağlandığı SII sisteminde tekrarlanan deneylerden elde edilen örneklerde TN, TP ve koliform analizleri yapılmıştır. TN ve TP açısından elde edilen giderim verimleri sırasıyla %29,8 ve %97,7' dir. Fekal koliform ve toplam koliform açısından elde edilen analiz sonuçları AATTUT, (USEPA, 2004), (WHO, 2006) ve (FAO, 1992) standartları dikkate alındığında SII sisteminin sulama suyu geri kazanımı bakımından uygulanabilir olduğunu göstermektedir.

Tablo 3.1. Konvansiyonel parametreler için SI, SII ve SIII sistemleri sonrasında elde edilen analiz sonuçları ve giderim verimi değerleri

Parametre ve Birim	İkincil Arıtma Çıkış (Ortalama)	UF Membran Çıkış			SI (UC010/LFC3)		SII (UC030/LFC3)		SIII (UP150/LFC3)		Türkiye <sup>a</sup>			
		UC010	UC030	UP150	Çıkış	R (%)	Çıkış	R (%)	Çıkış	R (%)	1.Sınıf	2.Sınıf	3.Sınıf	
İletkenlik (µS/cm)	753	720	583	685	21,24	97,2	24,09	96,8	13,56	98,2	<700	700-3000	>3000	
TÇM (mg/L)	316,3	316,3	293,3	291,7	11,9	96,2	9,0	97,2	5,5	98,3	<500	500-2000	>2000	
SAR	0-3	3,24	3,24	3,24	2,97	1,489	54,0	1,495	53,8	1,33	59,0	EC≥0,7 ≥1,2 ≥1,9 ≥2,9 ≥5,0	EC=0,7-0,2 1,2-0,3 1,9-0,5 2,9-1,3 5,0-2,9	EC<0,2 <0,3 <0,5 <1,3 <2,9
	3-6													
	6-12													
	12-20													
	20-40													
Na <sup>+</sup> (mg/L)	Yüzey Sulaması	72,7	67,2	68,4	62,6	3,5	95,2	4,3	94,1	2,5	96,6	<3	3-9	>9
	Damlatmalı Sulama											<70	>70	sy
Klorür (mg/L)	Yüzey Sulaması	79,6	79,6	75,3	73,1	3,1	96,1	1,2	98,5	1,3	98,3	<140	140-350	>350
	Damlatmalı Sulama											<100	>100	sy
Bor (mg/L)	0,001	0,0003	0,0004	0,001	<0,001	-	<0,001	-	<0,001	-	<0,7	0,7-3,0	>3,0	
Toplam N (mg/L)	6,1	öy	6,0	öy	öy	-	4,28	29,8	öy	-	<1 <sup>b</sup>			
Toplam P (mg/L)	4,75	öy	4,7	öy	öy	-	0,11	97,7	öy	-	2-12 <sup>c</sup>			
											<0,05 <sup>b</sup>			
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N (mg/L)	16,4	15,9	16,4	16,4	0,8	95,2	11,2	32	10,6	35,1	<2 <sup>c</sup>			
											<1 <sup>b</sup>			
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N (mg/L)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	-	0,3	-	0,3	-	1-10 <sup>c</sup>			
											sy			
pH	7,5-7,7	8,3	7,7	8,3	7,9	-	6,8	-	6,6	-	6-9 <sup>d,e</sup>			
Bulanıklık (NTU)	3,39	0,39	0,31	0,45	0,16	95,4	0,12	96,4	0,13	96,2	<2 <sup>d</sup>			
AKM (mg/L)	8	0	0	0	0	100	0	100	0	100	<5 <sup>d</sup>			
											<30 <sup>e</sup>			
Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	28,9	24,2	25,8	25,3	0,1	99,8	0,1	99,8	0,05	99,8	sy			
K <sup>+</sup> (mg/L)	18	18	12,9	13,9	2,5	85,9	0,5	97,2	0,4	98	sy			
Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	5,7	5	4,6	5	0,2	96,1	0,3	94	0,1	97,6	sy			
PO <sub>4</sub> -P (mg/L)	6,9	6	4	6,9	0,1	98	0,3	96,2	6,9	-	sy			
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> (mg/L)	37,5	33,7	32,7	27,7	0,5	98,8	0,2	99,4	0,3	99,1	sy			



Tablo 3.1.(Devam) Konvansiyonel parametreler için SI, SII ve SIII sistemleri sonrasında elde edilen analiz sonuçları ve giderim verimi değerleri

Parametre ve Birim	İkincil Arıtma Çıkış (Ortalama)	UF Membran Çıkış			SI (UC010/LFC3)		SII (UC030/LFC3)		SIII (UP150/LFC3)		Türkiye <sup>a</sup>		
		UC010	UC030	UP150	Çıkış	R (%)	Çıkış	R (%)	Çıkış	R (%)	1.Sınıf	2.Sınıf	3.Sınıf
KOİ (mg/L)	41,2	41,2	14,9	22,7	29	29,6	3,7	91,1	6,9	83,2	sy		
Fekal Koliform (kob/100 mL)	5x10 <sup>4</sup>	öy	1,1x10 <sup>2</sup>	öy	öy	-	0	-	öy	-	0 <sup>d</sup>		
Toplam Koliform (kob/100 mL)	2,8x10 <sup>5</sup>	öy	öy	öy	öy	-	12	-	öy	-	<200 <sup>e</sup>		
BOİ <sub>5</sub> (mg/L)	öy	öy	öy	öy	öy	-	öy	-	öy	-	<20 <sup>d</sup>		
Serbet Klor (mg/L)	öy	öy	öy	öy	öy	-	öy	-	öy	-	<30 <sup>e</sup>		
											>1 <sup>d,e</sup>		

<sup>a</sup> AATTUT, Ek 7 (ÇŞB, 2010)

<sup>b</sup> Tablo E7.9. BNR+MF+TO+Dezenfeksiyon içeren bir proses için sınır değerler (ÇŞB, 2010)

<sup>c</sup> Tablo E7.9. BNR+Filtrasyon+Dezenfeksiyon içeren bir proses için sınır değerler (ÇŞB, 2010)

<sup>d</sup> Tablo E7.1. Sınıf A/a-Tarımsal sulama: Ticari olarak işlenmeyen gıda ürünleri, b-Kentsel alanların sulanması (ÇŞB, 2010)

<sup>e</sup> Tablo E7.1. Sınıf B/a-Tarımsal sulama: Ticari olarak işlenen gıda ürünleri, b-Girişi kısıtlı sulama alanları, c-Tarımsal sulama: Gıda ürünü olmayan bitkiler (ÇŞB, 2010)

sy: İlgili standartta sınır değer yoktur, öy: Ölçüm yapılamamıştır

Türkiye'deki 1. sınıf sulama suyu sınır değerlerine göre kıyaslama yaptığımızda; sodyum parametresi kriteri her üç bütünleşik membran sisteminde de damlatmalı sulama için sağlanmış, yüzey sulaması için yalnızca SIII sisteminde elde edilen süzüntü uygun bulunmuştur. Klorür ise üç sistemde de hem damlatmalı hem de yüzey sulaması için 1. sınıf sulama suyu sınır değerleri ile uyumludur.

Sulama suyunun kimyasal kalitesinin değerlendirilmesinde toprak bünyesindeki suda ve sulama suyunda sodyumun baskın iyon olduğu durumu gösteren SAR değeri önemli bir parametredir. Arıtma çıkışında 3,24 oranında olan SAR değeri SI, SII, SIII bütünleşik membran sistemlerinde sırasıyla 1,49, 1,49 ve 1,33 değerlerine kadar düşmüştür. İkincil arıtma ve UF çıkışlarında 2. sınıf sulama suyu ile uyumlu olan SAR değeri, TO' nun mikrobiyal kirliliğin giderimi için gerekliliği bilinmesine karşın (Norton-Brandao ve diğ., 2013), SI, SII ve SIII bütünleşik membran sistemlerinde elde edilen süzüntülerde 3. sınıftır. AATTUT-Tablo E7.2' de SAR bakımından 2. sınıf sulama suyu üretmek için SAR'ın 0-3 ve iletkenliğin 200-700  $\mu\text{S}/\text{cm}$  olduğu limit değeri elde etmek gerekmektedir. Bu nedenle TO membran çıkış suyuna KCl ilavesiyle iletkenliği hedef değere getirerek 2. sınıf su elde etmek mümkündür (Can Doğan ve diğ., 2015).

Çalışma kapsamında kentsel atıksu arıtma tesisi ikincil arıtma çıkış suyunda analizleri gerçekleştirilen ve AATTUT' ne göre sulama sularında izlenmesi gereken parametrelerden olan ağır metaller ve toksik elementlere ait arıtma çıkış suyu ortalama değerleri ile UF ve UF/TO bütünleşik membran sistemleri sonrasında elde edilen konsantrasyonlar ve giderim verimi değerleri Tablo 3.2'de verilmiştir. (USEPA, 2004), (WHO, 2006) ve AATTUT' ne göre bu sonuçlar kıyaslandığında ikincil arıtma çıkış suyu ortalama değerleri standartları sağlamaktadır. Ağır metal ve toksik elementlerin düşük konsantrasyonlarda bile alıcı ortama deşarj edildiğinde birikim oluşturduğu düşünüldüğünde; UF/TO bütünleşik membran sistemleri sonrasında bu elementlerin %99' lara kadar giderildiği görülmektedir. Ayrıca bu elementler yüksek konsantrasyonlarda alındığında, bitkilerde yaprakların zarar görmesi veya büyümede gerileme gibi etkiler görülebilmektedir (ÇŞB, 2010). Bu bakımdan kullanılan bütünleşik membran sistemleri, kentsel atıksularda bulunan ağır metal ve toksik elementlerin alıcı ortamlarda birikim oluşturma riskini minimuma indirgediği gibi, bitkilerin zarar görmesinin de önüne geçmiştir.

AATTUT' ne göre arıtılmış atıksuların sulama suyu amaçlı yeniden kullanımında Hg için herhangi bir sınır değeri verilmemiştir. (USEPA, 2004)' te verilen ve Lazarova, 2001; Metcalf ve Eddy, 1991; Pettygrove ve Asano, 1985' ten adapte edilen Tablo 8-3' e göre ise suyun yeniden kullanımı için arıtma hedefi sonunda Hg için sınır değeri  $<1 \mu\text{g/L}$  olarak belirtilmektedir. Tablo 2.4' te verilen ikincil arıtma çıkışı Hg ortalama değeri ( $1.098 \mu\text{g/L}$ ) bu sınır değerinin üzerindedir ve Tablo 3.2.'de görüldüğü gibi SI ve SII bütünleşik membran sistemleri sonrasında sırasıyla  $0.03 \mu\text{g/L}$  ve  $0,2 \mu\text{g/L}$  değerlerine ulaşarak (USEPA, 2004)' te verilen sınır değeri sağlanmıştır.

### **3.2. UF ve NF Proseslerinde En İyi Filtrasyon Şartlarının Belirlenmesi**

Ön deneysel çalışmaların devamında, UF ve NF prosesleri için Taguchi deneysel tasarım esaslarına göre belirlenen, Tablo 2.6' da verilen plan çerçevesinde yürütülen deneylerde, her bir proses için 4 değişkenin tek tek proses performans parametreleri üzerindeki etkileri incelenerek, en iyi filtrasyon şartları belirlenmiştir. Daha sonra ANOVA analizleri yapılmıştır. Tam kuadratik olarak yapılan ANOVA analizlerinde değişkenler ve bu değişkenlerin iç etkileşimlerinin önem düzeyleri ve rölatif etkileri birbirleri ile kıyaslanarak değişkenlerin sonuçlar üzerinde ne derece önemli etkiye sahip olduğu istatistiksel olarak ortaya konmuştur. Ardından deneysel tasarım yöntemi çerçevesinde yapılmış, ANOVA analiz yöntemi ile sonuçları değerlendirilmiş bulunan UF ve NF deneylerine ait deneysel tasarım sonuçlarının doğrulaması için en iyi filtrasyon koşullarında UF için UP150 membranı ile bir, NF için NP010 ve NF90 membranları ile iki doğrulama deneyi gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.2. Ağır metal ve toksik elementler için SI, SII ve SIII sistemleri sonrasında elde edilen analiz sonuçları ve giderim verimleri

Parametre	İkincil Arıtma Çıkış Ort. (mg/L)	UC010	UC030	UP150	SI	R (%)	SII	R (%)	SIII	R (%)	Türkiye <sup>1</sup> (mg/L)	USEPA <sup>2</sup> (mg/L)		WHO <sup>3</sup> (mg/L)
												Uzun Süreli	Kısa Süreli	Tavsiye Edilen Max. Konsantrasyon
Al	0,03	0,03	0,03	0,02	0,003	89,6	0,01	53,1	0,005	83,5	5,0	5,0	20	5,0
As	0,002	0,001	0,0004	0,001	0,00001	99,1	0,00003	97,9	0,00005	97,0	0,1	0,1	2,0	0,1
Be	0,0002	0,0002	0,0001	0,00001	0,0002	0,0	0,0002	0,0	0,0002	0,0	0,1	0,1	0,5	0,1
Cd	0,00003	0,00003	0,00003	0,00003	0,000002	92,2	0,00003	0,0	0,000003	89,3	0,01	0,01	0,05	0,01
Cr	0,004	0,004	0,003	0,002	0,001	81,4	0,001	74,0	0,001	72,9	0,1	0,1	1,0	0,1
Co	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,000004	97,8	0,00001	90,7	0,00001	94,9	0,05	0,05	5,0	0,05
Cu	0,006	0,01	0,01	0,01	0,002	62,9	0,001	85,9	0,006	0,0	0,2	0,2	5,0	0,2
Fe	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,00001	94,1	0,00002	87,0	0,00001	94,8	5,0	5,0	20,0	5,0
Pb	0,0009	0,001	0,001	0,001	0,0002	72,7	0,001	0,0	0,0004	59,6	5,0	5,0	10,0	5,0
Li	0,001	0,001	0,001	0,001	0,0001	95,4	0,0002	88,5	0,0001	93,6	2,5	2,5	2,5	2,5
Mn	0,03	0,03	0,03	0,02	0,001	97,7	0,002	94,2	0,001	97,9	0,2	0,2	10,0	0,2
Mo	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,00002	87,7	0,00003	82,1	0,00003	83,3	0,01	0,01	0,05	0,01
Ni	0,007	0,01	0,01	0,01	0,003	62,2	0,001	92,3	0,01	0,0	0,2	0,2	2,0	0,2
Se	0,0004	0,0003	0,0004	0,0004	0,00001	96,5	0,0001	81,3	0,0002	60,0	0,02	0,02	0,02	0,02
V	0,0007	0,001	0,001	0,001	0,0002	79,5	0,0002	70,3	0,0002	74,1	0,1	0,1	1,0	0,1
Zn	0,09	0,09	0,09	0,09	0,022	75,7	0,03	67,0	0,07	23,2	2,0	2,00	10,0	2,0
Hg	1,1	öy	öy	öy	0,03	97,3	0,2	81,8	öy	-	sy	<1x10 <sup>-3a</sup>		sy
F	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,0	0,05	0,0	0,05	0,0	1,0	1,0	15,0	1,0

<sup>1</sup> AATTUT, Ek 7, E7.7. Her türlü zeminde sürekli sulama yapılması durumunda sınır değerler (ÇŞB, 2010)

<sup>2</sup> Tablo 2-7. Sulama için arıtılmış sularındaki bileşenler için tavsiye edilen sınır değerler (USEPA, 2004)

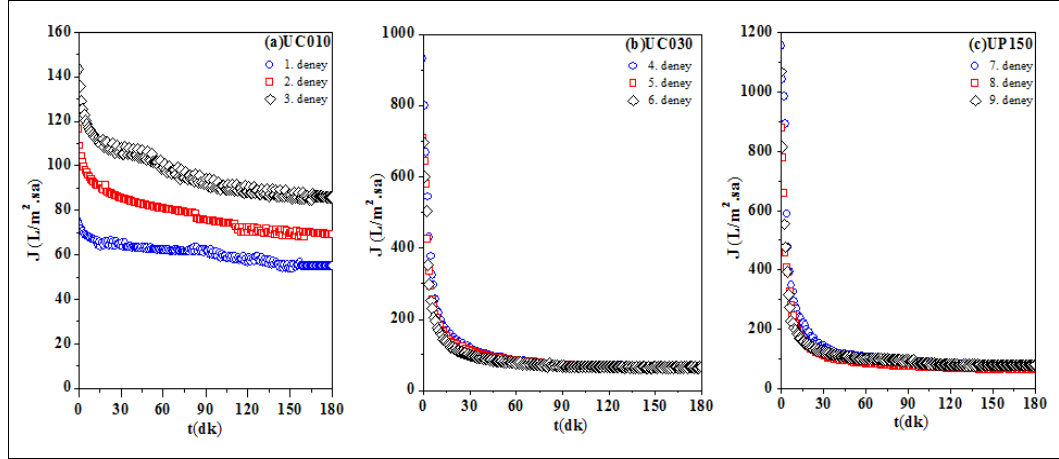
<sup>3</sup> Tablo A1.2. Bitkisel üretim için eser element eşik seviyeleri (WHO, 2006)

<sup>a</sup> Tablo 8-3. Suyun yeniden kullanımı için ilgili su kalite parametreleri özeti (USEPA, 2004)

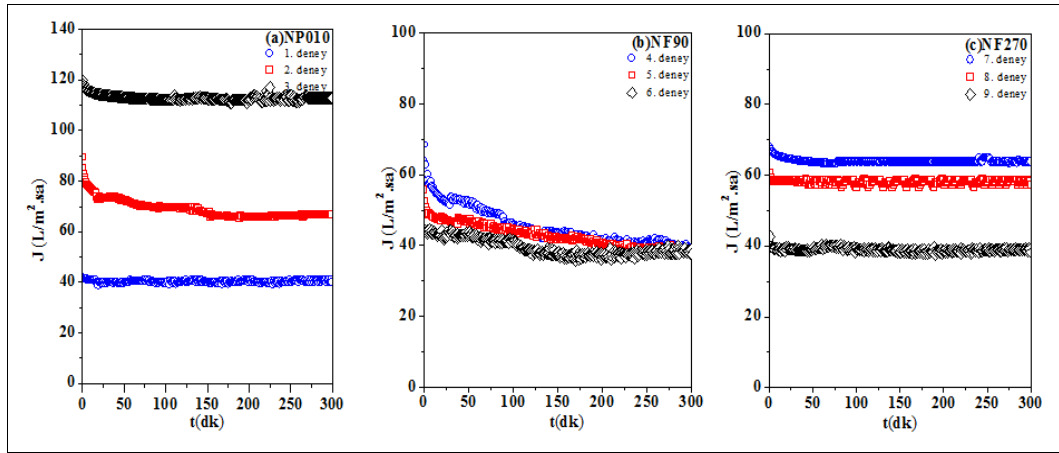
sy: İlgili standartta sınır değer yoktur, öy: ölçüm yapılamamıştır

### 3.2.1. UF ve NF deneylerinde akı-zaman değişimleri

UF ve NF deneyleri, deney sırasına bağlı kalınlıksızın, her bir deneyde saf suda bekletilmiş temiz membran kullanılarak ve kararlı hal süresi (1-2 saat) esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Akı-zaman değişimleri, 3 farklı UF ve NF membranı için Şekil 3.4' te verilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 3.4. UF ve NF deneylerinde akı-zaman değişimleri (a) UF Deneyleri, (b) NF Deneyleri

UC030 ve UP150 membranları ile yapılan deneylerde Şekil 3.4 (a)' da görüldüğü gibi süzüntü akısı 0-40 dakika aralığında hızla azalmış, daha sonra kararlı hale gelmiştir. UC010 membranı ile yapılan deneylerde ise akı 0-80 dakika aralığında yavaş yavaş azalmış ve daha sonra sabitlenerek kararlı hale ulaşmıştır. Proseste en yüksek deney sonu akı değeri 86,3 L/m<sup>2</sup>.sa ile 3. deneyde UC010 membranı ile elde edilmiştir. Aynı membran ile gerçekleştirilen 1. deneyde elde edilen en düşük deney

sonu akı değeri ise 55,1 L/m<sup>2</sup>.sa' tir. En iyi filtrasyon sağlanan UP150 membranı ile 7, 8 ve 9. deneylerde elde edilen akılar sırasıyla 80,0, 65,9, 80,1 L/m<sup>2</sup>.sa' tir. Atıksu deneyleri öncesinde yapılan saf su deneylerinde 9 deney için sırasıyla elde edilen saf su akıları; 75,0, 116,5, 143,5, 931,3, 707,6, 696,0, 1153,0, 878,0, 1068,0 L/m<sup>2</sup>.sa' tir.

Kentsel atıksu arıtma çıkışı ile yapılan atıksu deneylerinde Şekil 3.4 (b)' de görüldüğü gibi NF membranlarının üçünde de deney başında akının ani düşüş göstermediği, NP010 ve NF90 membranlarının 2 saat deney süresinin sonunda ve NF270 membranının ise 1 saat deney süresinin sonunda kararlı hale geçmeye başladığı tespit edilmiştir. Atıksu deneyleri öncesinde yapılan saf su deneylerinde 9 deney için sırasıyla elde edilen saf su akıları; 42,0, 89,5, 119,9, 68,4, 55,7, 44,2, 67,9, 60,7, 42,6 L/m<sup>2</sup>.sa' tir. NF prosesinde atıksu deneylerinde elde edilen en yüksek deney sonu akı değeri NP010 membranı ile 3. deneyde 112,8 L/m<sup>2</sup>.sa olarak belirlenmiştir. 5. ve 6. deneylerde ise en iyi filtrasyon sağlanan NF90 membranı ile elde edilen en düşük deney sonu akı değeri 38,5 L/m<sup>2</sup>.sa iken, 4 nolu deneye ait süzüntü akısı 39,6 L/m<sup>2</sup>.sa' tir.

### 3.2.2. Taguchi sonuçları

UF deneylerinde kirletici madde konsantrasyonları açısından proses performansını değerlendirmek için iletkenlik, SAR, bulanıklık, TN, TP ve NO<sub>3</sub><sup>-</sup> parametreleri seçilerek, akı ve seçilen parametrelere ait konsantrasyonlara göre S/N oranları hesaplanmıştır. Süzüntü akılarına ait S/N oranları hesaplanırken “en yüksek değer iyi” yaklaşımı benimsenmiştir. Diğer parametreler için AATTUT' nde belirtilen sınır değerlerin sağlanması hedeflendiğinden “en küçük değer iyi” yaklaşımı esas alınmıştır.

NF deneylerinde ise kirletici madde giderim verimleri açısından proses performansını değerlendirmek için iletkenlik, bulanıklık, TN ve TP parametreleri seçilmiştir. NF prosesi ile tüm proses performans parametrelerinde AATTUT' nde belirtilen sınır değerlerin sağlanması beklendiği için, akı ve giderim verimleri bakımından S/N oranları hesaplanırken “en yüksek değer iyi” yaklaşımı benimsenmiştir. Tüm deneylerde süzüntü akıları ile seçilen parametrelere ait kirletici madde konsantrasyonları / giderim verimleri birlikte değerlendirilerek elde edilen

analiz sonuçları ve hesaplanan S/N oranları sırasıyla Tablo 3.3 ve 3.4'te verilmektedir.

Tablo 3.3. UF ve NF deneylerinde elde edilen sonuçlar

Deney No	UF							NF				
	Akı	Kirlenici Madde Konsantrasyonları						Akı	Kirlenici Madde Giderim Verimleri			
	J	EC	SAR	Bulanıklık	TN	TP	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	J	EC	Bulanıklık	TN	TP
	(L/m <sup>2</sup> .sa)	(µS/cm)	(-)	(NTU)	(mg/L)			(L/m <sup>2</sup> .sa)	(%)			
1	55,1	634,6	3,18	0,24	2,69	2,65	9,20	40,4	14,01	80,33	7,06	52,22
2	69,6	634,7	2,98	0,37	4,52	2,65	7,51	66,4	21,01	84,35	25,16	58,91
3	86,3	623,3	3,02	0,09	5,04	2,44	9,20	112,8	21,50	94,30	20,90	70,45
4	66,0	605,3	3,18	0,23	5,57	2,02	4,60	39,6	92,36	89,89	66,49	94,64
5	67,4	604,0	3,07	0,25	4,51	2,07	6,87	38,5	89,56	84,47	61,29	93,86
6	65,1	604,9	3,02	0,13	5,60	2,00	9,20	38,5	95,70	91,96	35,63	99,46
7	80,0	622,7	2,97	0,33	7,27	2,33	8,23	63,7	52,71	28,57	25,71	96,94
8	65,9	594,5	3,14	0,33	6,19	2,07	9,20	58,1	67,15	86,50	10,85	99,35
9	80,1	593,5	3,02	0,16	7,27	2,19	4,65	39,0	59,97	88,48	16,59	99,53

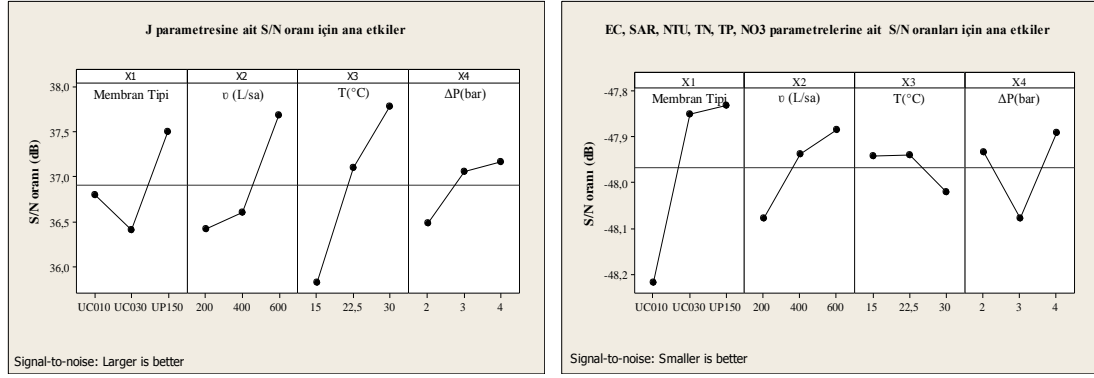
Tablo 3.4. UF ve NF deneylerinde proses performans parametrelerine göre S/N oranları

Deney No	S/N Oranı (dB)			
	UF Deneyleri		NF Deneyleri	
	J	Diğer Proses Performans Parametreleri <sup>1</sup>	J	Tüm Proses Performans Parametreleri <sup>2</sup>
1	34,82	-48,27	32,13	22,79
2	36,85	-48,27	36,44	30,46
3	38,72	-48,11	41,05	30,14
4	36,39	-47,86	31,95	36,14
5	36,57	-47,84	31,71	35,79
6	36,27	-47,85	31,71	34,46
7	38,06	-48,10	36,08	31,61
8	36,38	-47,70	35,28	27,33
9	38,07	-47,69	31,82	30,18

<sup>1</sup> UF Deneylerinde iletkenlik, SAR, bulanıklık, TN, TP ve NO<sub>3</sub><sup>-</sup> parametreleri birlikte değerlendirildiğinde S/N oranları.

<sup>2</sup> NF Deneylerinde süzüntü akıları ile iletkenlik, bulanıklık, TN ve TP giderim verimleri birlikte değerlendirildiğinde S/N oranları.

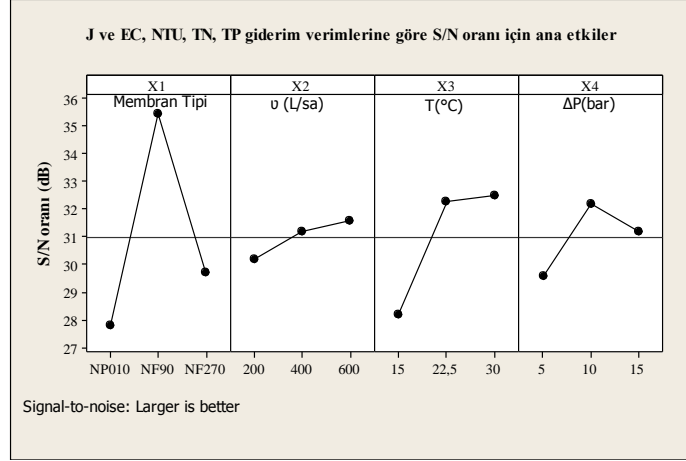
Bir sonraki aşamada bütün parametrelere ilişkin her bir değişkenin her bir seviyesi için ana etkileri incelenmiş ve UF deneylerinde Şekil 3.5' deki, NF deneylerinde ise Şekil 3.6' daki grafikler elde edilmiştir.



Şekil 3.5. UF deneylerinde süzüntü akıları (J) ve kirletici madde konsantrasyonlarına ilişkin değişken seviyelerinin ana etkileri

Şekil 3.5' e göre UF deneylerinde süzüntü akılarına ilişkin “En Büyük Değer İyi” yaklaşımı esas alındığında elde edilen S/N oranı yanıt tablosunda X1 (membran tipi), X2 (çapraz akış hızı), X3 (sıcaklık) ve X4 (membran geçiş basıncı) değişkenlerinin en iyi seviyeleri için ortalama S/N oranları sırasıyla 37,5, 37,69, 37,79, 37,16 olarak belirlenmiştir. Buna göre UF deneylerinde akının en yüksek değer olması için değişkenlere ait etki sıralaması sıcaklık>çapraz akış hızı>membran tipi>membran geçiş basıncı şeklindedir. Ayrıca en yüksek değer değişimi sıcaklık değişkeninde 1,96, en düşük değer değişimi ise membran geçiş basıncı değişkeninde 0,67 olarak belirlenmiştir. Kirletici madde konsantrasyonlarına ilişkin “En Küçük Değer İyi” yaklaşımı esas alındığında elde edilen S/N oranı yanıt tablosunda ise membran tipi, çapraz akış hızı, sıcaklık ve membran geçiş basıncı değişkenlerinin en iyi seviyeleri için ortalama S/N oranları sırasıyla -47,83, -47,89, -47,94, -47,89 olarak belirlenmiştir. Buna göre UF deneylerinde kirletici madde konsantrasyonlarının en küçük değer olması için değişkenlere ait etki sıralaması membran tipi>çapraz akış hızı>membran geçiş basıncı>sıcaklık şeklindedir. Ayrıca en yüksek değer değişimi membran tipi değişkeninde 0,39, en düşük değer değişimi ise sıcaklık değişkeninde 0,08 olarak belirlenmiştir.





Şekil 3.6. NF deneylerinde süzüntü akıları ile kirletici madde giderim verimlerine ilişkin değişken seviyelerinin ana etkileri

Farklı filtrasyon koşullarındaki NF deneylerinde elde edilen süzüntü akıları ile iletkenlik, bulanıklık, TN ve TP parametrelerine ait giderim verimleri yine Taguchi yöntemi kullanılarak birlikte değerlendirilmiş ve S/N oranları hesaplanmıştır. Şekil 3.6' ya göre "En Büyük Değer İyi" yaklaşımı esas alınarak hesaplanan S/N oranı yanıt tablosunda, membran tipi, akış hızı, sıcaklık ve basınç değişkenlerinin en iyi seviyeleri sırasıyla 35,46, 31,59, 32,51, 32,18 dB' dir. Proses performans parametrelerinin en yüksek değer olması için değişkenlere ait etki sıralamasının membran tipi>sıcaklık>membran geçiş basıncı>çapraz akış hızı şeklinde olduğu görülmektedir. Bu sıralama, NF deneylerinde performansı en çok etkileyen değişkenin membran tipi olduğunu göstermektedir. Membran tipi için en yüksek değer değişimi 7,67' dir. Etkisi en düşük olan değişken, değer değişimi 31,59 dB ile çapraz akış hızıdır.

### 3.2.3. Değişkenlerin proses performansı üzerindeki etkisi

#### 3.2.3.1. UF deneylerinde değişkenlerin etkisi

Membran tipi değişkeninin, proses performans parametreleri için etkisi Şekil 3.5' teki iki grafikte incelendiğinde, S/N oranlarının en yüksek olduğu seviye 3. seviyede UP150 membranı için belirlenmiştir. Buna göre UC010 ve UC030' a göre UP150 membranında hem en yüksek akıya ulaşılmış, hem de kirletici madde konsantrasyonları açısından en düşük değer elde edilmiştir. En yüksek akı elde edilen diğer membranlar sırasıyla UC010 ve UC030 membranlarıdır. Ancak kirletici madde

konsantrasyonları açısından bakıldığında UP150 membranından sonra sırasıyla UC030 ve UC010 membranlarında etkili giderim sağlanmıştır.

Çapraz akış hızı için S/N oranlarının en yüksek olduğu seviye, 600 L/sa akış hızında gerçekleşmiştir. Bu durumda akı ve kirlenici madde konsantrasyonları açısından en iyi performansın 3. seviyede meydana geldiğini söylemek mümkündür. Çapraz akış hızı, 600L/sa>400L/sa>200L/sa sırasına göre azaldıkça, proses performansı bakımından S/N oranları da azalmaktadır.

Süzüntü akılarına ilişkin değişken seviyelerinin ana etkileri incelendiğinde sıcaklık arttıkça akının da artması tüm membran proseslerde beklenen bir durumdur. Çalışmada 15>22,5>30°C sırasına göre S/N oranları da artış göstermiş olup, bu sıcaklık sıralamasına göre S/N oranı ortalamaları 35,82>37,11>37,79 şeklindedir. Kirlenici madde konsantrasyonları açısından elde edilen ana etkilere bakıldığında ise bu durum farklılık göstermiş, 30°C' de S/N oranı en küçük değerde tespit edilmiştir. Sıcaklık, kirlenici madde konsantrasyonları bakımından 22,5°C seviyesinde en iyi performansı göstermiştir. Bu seviyede akı için S/N oranı ortalaması 37,11 olduğundan ve bu değer 30°C'deki ortalama değere (37,79) yakın olduğundan, sıcaklık için 2. seviye en iyi filtrasyon şartı olarak tercih edilmiştir.

2, 3 ve 4 bar olmak üzere çalışılan farklı basınç değerlerinin proses performans parametreleri üzerindeki etkisine bakıldığında; S/N oranlarının en yüksek değer aldığı seviye 4 bar olarak belirlenmiştir. S/N oranının en düşük olduğu seviyenin akı için 2 barda, kirlenici madde konsantrasyonları için ise 3 barda olduğu gözlemlenmiştir.

Süzüntü akıları ve kirlenici madde konsantrasyonlarına ait S/N oranları birlikte değerlendirildiğinde UF prosesi için en iyi filtrasyon koşulları; membran tipi değişkeni için UP150 membranı; çapraz akış hızı değişkeni için 600L/sa akış hızı; sıcaklık değişkeni için 22,5°C ve basınç için 4 bar olarak belirlenmiştir.

### **3.2.3.2. NF deneylerinde değişkenlerin etkisi**

Membran tipi değişkeninin, proses performans parametrelerine ilişkin etkisi incelendiğinde S/N oranlarının en yüksek olduğu seviye Şekil 3.6' da görüldüğü gibi

NF90 membranı için belirlenmiştir. En yüksek akı ve giderim veriminin elde edildiği diğer membranlar sırasıyla NF270 ve NP010' dur.

Deneyleerde çapraz akış hızı 600L/sa>400L/sa>200L/sa sırasına göre azaldıkça, S/N oranı ile birlikte süzüntü akısı ve kirletici madde giderim verimleri de azalmaktadır. Sıcaklık değışkeni için 30>22,5>15°C sıralamasına göre elde edilen S/N oranları sırasıyla 32,51>32,26>28,19 dB şeklindedir. Buna göre çapraz akış hızında olduğu gibi sıcaklık azaldıkça S/N oranı da azalmaktadır. NF deneyleri için 3. Seviye, çapraz akış hızı ve sıcaklık değışkenlerinin her ikisinde de, S/N oranlarının en yüksek olduğu seviyedir. Bu durum proses performansı bakımından 600 L/sa akış hızı ve 30°C sıcaklıkta en iyi filtrasyonun sağlandığını göstermektedir.

5, 10 ve 15 barda olmak üzere NF deneylerinde çalışılan farklı basınç değerlerine ait S/N oranları sırasıyla 29,59, 32,18, 31,20 dB' dir. Buna göre en iyi filtrasyon sağlanan membran geçiş basıncı 10 bar olarak belirlenmiştir. S/N oranının dolayısıyla süzüntü akıları ve kirletici madde giderim verimlerinin en düşük olduğu seviye 5 bar iken, 10 bardan sonra S/N oranının azalma nedeni, membran gözeneklerinin basınç artışıyla hızla tıkanarak performansın azalması şeklinde yorumlanabilir.

Bu sonuçlara göre NF deneyleri için en iyi filtrasyon koşulları; membran tipi değışkeni için NF90 membranı; çapraz akış hızı değışkeni için 600L/sa akış hızı; sıcaklık değışkeni için 30°C ve membran geçiş basıncı değışkeni için 10 bar olarak belirlenmiştir.

#### **3.2.4. UF ve NF deneylerinde yüzey yanıt yöntemi-ANOVA analizleri**

Doktora tezi kapsamında deneysel tasarımıla belirlenmiş UF ve NF deneyleri sonucunda elde edilen süzüntü akıları ve kirletici madde konsantrasyonlarına / kirletici madde giderim verimlerine ilişkin en iyi filtrasyon koşulları belirlendikten sonra yüzey yanıt yöntemi aracılığıyla Minitab 16 yazılımı kullanılarak tam kuadratik olarak ANOVA analizleri yapılmıştır. ANOVA analizi ile elde edilen sonuçlardan hareketle, değışkenlerin ve iç etkileşimlerinin önem düzeyleri ile proses performans parametreleri üzerindeki rölâtif etkileri incelenmiştir.

### 3.2.4.1. UF deneylerinde yüzey yanıt yöntemi -ANOVA analizleri

UF deneyleri ANOVA analizlerinde 4 değişken ve bu değişkenler için seçilen seviyelerin; süzüntü akıları (J) ve iletkenlik, SAR, bulanıklık, TN, TP ve  $\text{NO}_3^-$  konsantrasyonları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar her bir parametre için Tablo 3.5-3.11’de ayrı ayrı verilmektedir.

Tablo 3.5’te verilen süzüntü akıları (J) için ANOVA analizi sonuçlarına bakıldığında; her bir değişkenin ve her değişkenin iç etkileşimlerinin serbestlik dereceleri yazılım aracılığıyla 1 olarak hesaplanmıştır. Hataya aktarılan serbestlik derecesi ise 3’ tür. Bu durumda  $F_{\text{kritik}}$  değeri %95 güven aralığı için ( $F_{\text{kritik}[0.05(1-3)]}$ ) 10,10 olarak belirlenmiştir. Membran tipi (X1) değişkeni ile bu değişkenin X1xX1 iç etkileşimine ait F değerleri  $F_{\text{kritik}}$  değerinden büyük olduğundan akı değerleri için membran tipi ve iç etkileşiminin etkisinin önemli olduğu söylenebilir. Değişkenlerin ve iç etkileşimlerinin akı değerleri üzerindeki rölatif etki sıralaması ise X1xX1>X1>X2xX2>X3>X2 şeklindedir. Bu noktadan hareketle UF prosesi için en iyi performansın sağlandığı akı değerini elde etmek bakımından, membran tipi değişkenin rölatif etkisini çapraz akış hızı ve sıcaklık değişkenleri rölatif etkileri izlemektedir.

Tablo 3.5. UF deneylerinde akı (J) değerleri için ANOVA analizi sonuçları

Değişken	SD	Kareler Toplamı	Düzeltilmiş Kareler Toplamı	Ortalama Kareler Toplamı	F	P	%p <sup>a</sup>	$F_{\text{kritik}} [0,05(1-3)]$
X1(M <sub>T</sub> )	1	37,50	71,51	71,51	10,68	64,82	23,96	10,10
X2(v)	1	154,03	20,06	20,06	3,00	13,37	4,94	
X3(T)	1	377,63	30,05	30,05	4,49	23,36	8,63	
X4 <sup>b</sup> (ΔP)	1	40,56	8,50	8,50	1,27	1,81	0,67	
X1xX1	1	88,89	88,89	88,89	13,27	82,19	30,38	
X2xX2	1	39,90	39,90	39,90	5,96	33,21	12,28	
X3xX3 <sup>b</sup>	1	7,48	7,48	7,48	1,12	0,78	0,29	
X4xX4 <sup>b</sup>	1	4,11	4,11	4,11	0,61	-2,59	-0,96	
Hata	3	52,15	20,09	6,70	1,00		18,85	
Toplam	8	750,09	270,51				100,00	

<sup>a</sup> Negatif %p (rölatif etki) değerleri (0) olarak kabul edilmiştir.

<sup>b</sup> Düzeltilmiş kareler toplamı düşük olan değişkenlere ait düzeltilmiş kareler toplamı ve serbestlik dereceleri hataya aktarılmıştır.

İletkenlik parametresi için Tablo 3.6’da belirtilen analiz sonuçlarına göre; her bir değişkenin ve her değişkenin iç etkileşimlerinin serbestlik dereceleri 1 iken, hataya

aktarılan serbestlik derecesi ise 2' dir. Bu durumda  $F_{kritik}$  değeri %95 güven aralığı için ( $F_{kritik[0.05(1-2)]}$ ) 18,50 olarak belirlenmiştir. Membran tipi (X1), membran geçiş basıncı (X4) ile bu değişkenlerin iç etkileşimleri X1xX1, X4xX4 için hesaplanan F değerleri  $F_{kritik}$  değerinden büyük olduğundan iletkenlik parametresi için membran tipi ve membran geçiş basıncı değişkenleri ile bu değişkenlerin iç etkileşimlerinin etkisi önemlidir. İletkenlik parametresi üzerindeki rölafetki sıralamasının ANOVA tablosundan X1>X1xX1>X4xX4>X4>X2>X2xX2 şeklinde olduğu görülmektedir.

Tablo 3.6. UF deneylerinde iletkenlik için ANOVA analizi sonuçları

Değişken	SD	Kareler Toplamı	Düzeltilmiş Kareler Toplamı	Ortalama Kareler Toplamı	F	P	%p <sup>a</sup>	$F_{kritik}$ [0,05(1-2)]
X1(M <sub>T</sub> )	1	1120,92	495,40	495,40	39,13	482,74	34,29	18,50
X2(v)	1	277,36	42,82	42,82	3,38	30,16	2,14	
X3 <sup>b</sup> (T)	1	42,25	9,24	9,24	0,73	-3,42	-0,24	
X4	1	13,62	246,25	246,25	19,45	233,59	16,59	
X1xX1	1	311,72	311,72	311,72	24,62	299,06	21,24	
X2xX2	1	17,70	17,70	17,70	1,40	5,04	0,36	
X3xX3 <sup>b</sup>	1	16,08	16,08	16,08	1,27	3,42	0,24	
X4xX4	1	268,56	268,56	268,56	21,21	255,90	18,18	
Hata	2	58,33	25,32	12,66	1,00		6,95	
Toplam	8	2068,21	1407,77				100,00	

<sup>a</sup> Negatif %p (rölafetki) değerleri (0) olarak kabul edilmiştir.

<sup>b</sup> Düzeltilmiş kareler toplamı düşük olan değişkenlere ait düzeltilmiş kareler toplamı ve serbestlik dereceleri hataya aktarılmıştır.

Kullanılan kentsel ikincil arıtma çıkış suyunda, AATTUT' nde SAR için belirlenen sınıf 2. Sınıf sulama suyudur. Bu sınıfın yapılan deneylerde UF prosesi ile korunduğu görülmektedir. SAR bakımından ANOVA analiz sonuçları göstermektedir ki tüm değişkenler ve etkileşimleri için serbestlik dereceleri 1, hataya aktarılan serbestlik derecesi ise 2' dir. F değerlerine göre SAR parametresi için düzeltilmiş kareler toplamı ve serbestlik derecesi hataya aktarılan X2xX2 ve X3xX3 iç etkileşimlerinin dışında tüm değişkenler ve diğer iç etkileşimlerin etkisi önemlidir. Ayrıca en küçük SAR değeri için rölafetki sıralaması X4xX4>X4>X1xX1>X1>X3>X2 şeklindedir. Tablo 3.7'deki F ve %p değerlerine göre SAR parametresi bakımından membran geçiş basıncının rölafetkisinin, diğer değişkenlere kıyasla çok daha fazla olduğu belirtilebilir.

Tablo 3.8'de verilen bulanıklık parametresi için ANOVA analizi sonuçlarına bakıldığında; değişkenler ve iç etkileşimlerinin serbestlik dereceleri 1 olarak

hesaplanmıştır. Sıcaklık (X3) değişkeni ve bu değişkenin X3xX3 iç etkileşimine ait hataya aktarılan serbestlik derecesi ise 2' dir. %95 güven aralığı için ( $F_{kritik[0,05(1-2)]}$ ) 18.50 olarak belirlenen  $F_{kritik}$  değeri, değişkenler için hesaplanan F değerleri ile kıyaslandığında; sadece X2xX2 iç etkileşiminin önemli etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca X2 (çapraz akış hızı) değişkeni için hesaplanan F değeri de  $F_{kritik}$  ' e çok yakındır. Bu nedenle bulanıklık parametresi için AATTUT' nde belirtilen 1. sınıf sulama suyu sınır değerinin sağlanması bakımından, çapraz akış hızı ve iç etkileşiminin etkisi önemlidir. Aynı parametre için rölatif etki sıralaması ise X2xX2>X2>X4xX4>X4>X1xX1>X1 şeklindedir. Bu sıralamaya göre rölatif etkisi daha az olan değişkenler sırasıyla membran geçiş basıncı ve membran tipidir.

Tablo 3.7. UF deneylerinde SAR için ANOVA analizi sonuçları

Değişken	SD	Kareler Toplamı	Düzeltilmiş Kareler Toplamı	Ortalama Kareler Toplamı	F	P	%p <sup>a</sup>	$F_{kritik}$ [0,05(1-2)]
X1(M <sub>T</sub> )	1	0,00055	0,00309	0,00309	618,80	0,00309	5,70	18,50
X2(v)	1	0,01157	0,00025	0,00025	49,80	0,00024	0,45	
X3(T)	1	0,01324	0,00039	0,00039	77,00	0,00038	0,70	
X4(ΔP)	1	0,00099	0,02251	0,02251	4502,40	0,02251	41,55	
X1xX1	1	0,00355	0,00355	0,00355	709,60	0,00354	6,54	
X2xX2 <sup>b</sup>	1	0,00000	0,00000	0,00000	0,00	-0,00001	-0,01	
X3xX3 <sup>b</sup>	1	0,00001	0,00001	0,00001	2,00	0,00001	0,01	
X4xX4	1	0,02438	0,02438	0,02438	4875,00	0,02437	44,99	
Hata	2	0,00001	0,00001	0,00001	1,00		0,06	
Toplam	8	0,054265	0,05417				100	

<sup>a</sup> Negatif %p (rölatif etki) değerleri (0) olarak kabul edilmiştir.

<sup>b</sup> Düzeltilmiş kareler toplamı düşük olan değişkenlere ait düzeltilmiş kareler toplamı ve serbestlik dereceleri hataya aktarılmıştır.

Tablo 3.8. UF deneylerinde bulanıklık için ANOVA analizi sonuçları

Değişken	SD	Kareler Toplamı	Düzeltilmiş Kareler Toplamı	Ortalama Kareler Toplamı	F	P	%p <sup>a</sup>	$F_{kritik}$ [0,05(1-2)]
X1(M <sub>T</sub> )	1	0,00276	0,00350	0,00350	2,86	0,00228	3,12	18,50
X2(v)	1	0,03000	0,01982	0,01982	16,20	0,01859	25,47	
X3 <sup>b</sup> (T)	1	0,00011	0,00116	0,00116	0,95	-0,00007	-0,09	
X4(ΔP)	1	0,00001	0,00725	0,00725	5,93	0,00603	8,26	
X1xX1	1	0,00454	0,00454	0,00454	3,71	0,00331	4,54	
X2xX2	1	0,02796	0,02796	0,02796	22,86	0,02674	36,64	
X3xX3 <sup>b</sup>	1	0,00129	0,00129	0,00129	1,05	0,00007	0,09	
X4xX4	1	0,00748	0,00748	0,00748	6,11	0,00625	8,57	
Hata	2	0,00140	0,00245	0,00122	1,00		13,32	
Toplam	8	0,074138	0,07299				100	

<sup>a</sup> Negatif %p (rölatif etki) değerleri (0) olarak kabul edilmiştir.

<sup>b</sup> Düzeltilmiş kareler toplamı düşük olan değişkenlere ait düzeltilmiş kareler toplamı ve serbestlik dereceleri hataya aktarılmıştır.

TN parametresi için ANOVA analizi sonuçlarına göre; membran tipi (X1) değişkeni ve bu değişkene ait iç etkileşim için hesaplanmış en düşük düzeltilmiş kareler toplamı ve serbestlik derecelerinin hataya aktarılması ile elde edilen F değerlerine bakıldığında, değişkenlerin hiçbirinin etkisinin önemli olmadığı sonucuna varılmıştır. Bunun yanında Tablo 3.9’da belirtilen TN parametresi üzerindeki rölatif etki sıralaması  $X4 > X3 > X4 \times X4 > X3 \times X3 > X2 \times X2 > X2$  şeklinde olup, membran geçiş basıncı ve sıcaklık değişkenlerinin rölatif etkisinin diğer değişkenlere kıyasla daha fazla olduğu belirtilebilir. Çapraz akış hızı ve iç etkileşiminin rölatif etkisi ise basınç ve sıcaklığa yakın bir etki göstermektedir.

Tablo 3.9. UF deneylerinde TN için ANOVA analizi sonuçları

Değişken	SD	Kareler Toplamı	Düzeltilmiş Kareler Toplamı	Ortalama Kareler Toplamı	F	P	%p <sup>a</sup>	F <sub>kritik</sub> [0,05(1-2)]
X1 <sup>b</sup> (M <sub>T</sub> )	1	11,975	0,013	0,013	0,16	-0,067	-1,64	18,50
X2(v)	1	0,940	0,318	0,318	3,96	0,238	5,79	
X3(T)	1	0,915	0,880	0,880	10,96	0,800	19,45	
X4(ΔP)	1	0,911	0,910	0,910	11,33	0,830	20,18	
X1xX1 <sup>b</sup>	1	0,148	0,148	0,148	1,84	0,067	1,64	
X2xX2	1	0,504	0,504	0,504	6,28	0,424	10,31	
X3xX3	1	0,656	0,656	0,656	8,16	0,576	14,00	
X4xX4	1	0,683	0,683	0,683	8,50	0,602	14,64	
Hata	2	12,123	0,161	0,080	1,00		13,99	
Toplam	8	16,732	4,113				100	

<sup>a</sup> Negatif %p (rölatif etki) değerleri (0) olarak kabul edilmiştir.

<sup>b</sup> Düzeltilmiş kareler toplamı düşük olan değişkenlere ait düzeltilmiş kareler toplamı ve serbestlik dereceleri hataya aktarılmıştır.

Tablo 3.10’daki ANOVA analizi sonuçlarını değerlendirmek gerekirse TP parametresi için etkisi önemli olan değişken, akı değerleri ANOVA sonuçları ile benzerlik göstermektedir. UF prosesinde TP parametresinin beklenen sulama suyu standardını sağlaması bakımından etkisinin önemli olduğu değişken membran tipidir. Rölatif etki sıralaması açısından  $X1 > X1 \times X1 > X4 \times X4 > X4 > X3 > X3 \times X3 > X2$  şeklinde bir sıralama yapılırsa dahi, TP için sınır değer sağlanması bakımından diğer değişkenler çok fazla bir rölatif etkiye sahip değildir.

Tablo 3.10. UF deneylerinde TP için ANOVA analizi sonuçları

Değişken	SD	Kareler Toplamı	Düzeltilmiş Kareler Toplamı	Ortalama Kareler Toplamı	F	P	%p <sup>a</sup>	F <sub>kritik</sub> [0,05(1-1)]
X1(M <sub>T</sub> )	1	0,22135	0,32923	0,32923	1936,62	0,329	52,99	161,00
X2(v)	1	0,02194	0,00116	0,00116	6,83	0,001	0,16	
X3(T)	1	0,00232	0,00190	0,00190	11,20	0,002	0,28	
X4(ΔP)	1	0,02412	0,00997	0,00997	58,66	0,010	1,58	
X1xX1	1	0,26196	0,26196	0,26196	1540,94	0,262	42,16	
X2xX2 <sup>b</sup>	1	0,00017	0,00017	0,00017	1,00	0,000	0,00	
X3xX3	1	0,00138	0,00138	0,00138	8,11	0,001	0,19	
X4xX4	1	0,01521	0,01521	0,01521	89,46	0,015	2,42	
Hata	1	0,00017	0,00017	0,00017	1,00		0,22	
Toplam	8	0,548455	0,62098				100	

<sup>a</sup> Negatif %p (rölatif etki) değerleri (0) olarak kabul edilmiştir.

<sup>b</sup> Düzeltilmiş kareler toplamı düşük olan değişkenlere ait düzeltilmiş kareler toplamı ve serbestlik dereceleri hataya aktarılmıştır.

Nitrat parametresi için Tablo 3.11’de belirtilen analiz sonuçlarına göre; her bir değişkenin ve iç etkileşimlerinin serbestlik dereceleri 1 iken, hataya aktarılan serbestlik derecesi ise 2’ dir. Sıcaklık (X3) değişkeni ve bu değişkenin iç etkileşimi X3xX3 için hesaplanan F değerleri, F<sub>kritik</sub>[0,05(1-2)] değeri 18,50’ den büyüktür. Nitrat parametresi üzerindeki rölatif etki sıralamasının ANOVA tablosundan X3>X3xX3>X1>X1xX1=X4>X4xX4 şeklinde olduğu görülmektedir. Buna göre UF prosesi için AATTUT’ nde nitrat parametresinin beklenen sulama suyu standardını sağlaması bakımından etkisinin önemli olduğu tek değişken sıcaklıktır.

Tablo 3.11. UF deneylerinde nitrat için ANOVA analizi sonuçları

Değişken	SD	Kareler Toplamı	Düzeltilmiş Kareler Toplamı	Ortalama Kareler Toplamı	F	P	%p <sup>a</sup>	F <sub>kritik</sub> [0,05(1-2)]
X1(M <sub>T</sub> )	1	2,43330	3,14990	3,14990	11,85	2,884	5,83	18,50
X2 <sup>b</sup> (v)	1	0,17410	0,29390	0,29390	1,11	0,028	0,06	
X3(T)	1	1,81270	20,05030	20,05030	75,43	19,785	39,97	
X4(ΔP)	1	0,86320	2,45940	2,45940	9,25	2,194	4,43	
X1xX1	1	2,45880	2,45880	2,45880	9,25	2,193	4,43	
X2xX2 <sup>b</sup>	1	0,23770	0,23770	0,23770	0,89	-0,028	-0,06	
X3xX3	1	18,74750	18,74750	18,74750	70,53	18,482	37,34	
X4xX4	1	2,10370	2,10370	2,10370	7,91	1,838	3,71	
Hata	2	0,41180	0,53160	0,26580	1,00		4,24	
Toplam	8	28,8309	49,50120				100	

<sup>a</sup> Negatif %p (rölatif etki) değerleri (0) olarak kabul edilmiştir.

<sup>b</sup> Düzeltilmiş kareler toplamı düşük olan değişkenlere ait düzeltilmiş kareler toplamı ve serbestlik dereceleri hataya aktarılmıştır.

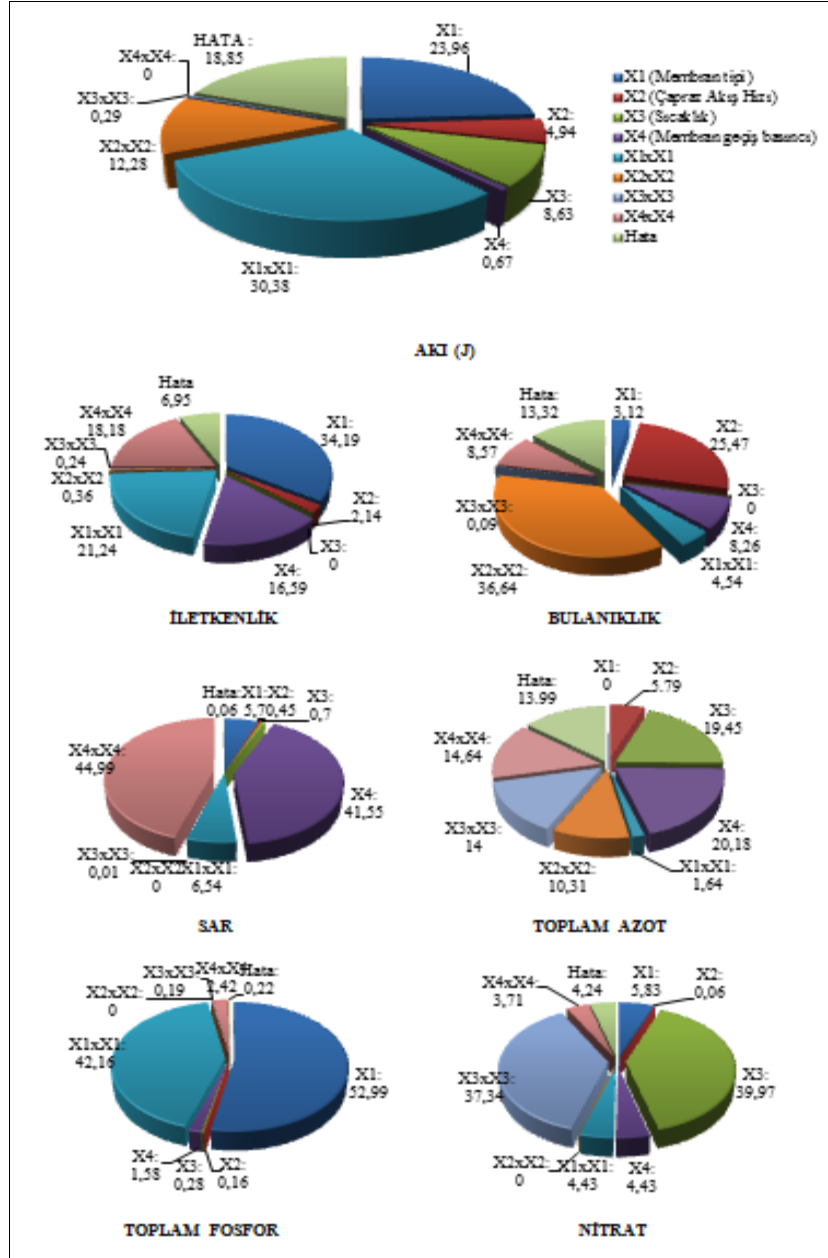


Tablo 3.5-3.11’de verilen tüm ANOVA analizleri sonuçlarına göre bir değerlendirme yapılacak olursa; UF prosesinde yüksek akılarda ve düşük iletkenlik, SAR ve TP değerlerinde sulama suyu elde edebilmek bakımından, membran tipi değişkeni oldukça önemli bir etkiye sahiptir. Düşük bulanıklık, TN ve  $\text{NO}_3^-$  değerleri için membran tipinin etkisi önemsizdir. SAR ve bulanıklık parametreleri için çapraz akış hızı etkisinin önemli olduğu belirlenmiştir. Diğer taraftan SAR ve  $\text{NO}_3^-$  parametreleri için sıcaklığın etkisi önemliyken, SAR ve iletkenlik parametreleri için membran geçiş basıncının etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sonuçlar göstermektedir ki; UF ile sulama suyu elde edilmesi bakımından SAR’ ın istenen seviyede tutulması için tüm değişkenler önemli oranda etki göstermekte iken, değişkenlerin tümünün önemsiz etki gösterdiği tek parametre TN olarak belirlenmiştir. Tüm değişkenlerin rölatif etkilerini gösteren grafikler Şekil 3.7’ de verilmektedir.

#### **3.2.4.2. NF deneylerinde yüzey yanıt yöntemi -ANOVA analizleri**

UF deneylerinde olduğu gibi NF deneyleri sonucunda elde edilen akı değerleri ile iletkenlik, bulanıklık, TN ve TP parametreleri giderim verimlerine ilişkin en iyi filtrasyon koşulları belirlendikten sonra ANOVA analizleri yapılmıştır. NF deneylerinde 4 değişkenin süzüntü akıları ile ve kirletici madde giderim verimleri üzerindeki etkilerinin önemli olup olmadığını gösteren analiz sonuçları Tablo 3.12-3.16’da verilmektedir.

Tablo 3.12’de verilen akı (J) değerleri için ANOVA analizi sonuçlarına bakıldığında; her bir değişkenin ve her değişkenin iç etkileşimlerinin serbestlik dereceleri yazılım aracılığıyla 1 olarak hesaplanmıştır. Hataya aktarılan serbestlik derecesi ise 3’ tür. Tabloda hesaplanan tüm sonuçlara göre membran tipi (X1), sıcaklık (X3) ve membran geçiş basıncı (X4) değişkenleri ile iç etkileşimler  $X1 \times X1$  ve  $X3 \times X3$ ’ e ait F değerleri  $F_{\text{kritik}}$  değerinden büyüktür. Bu bakımdan en iyi akı değerleri için etkisi önemli olan değişkenler sırasıyla membran tipi, sıcaklık ve membran geçiş basıncıdır. Değişkenlerin ve iç etkileşimlerinin akı değerleri üzerindeki rölatif etki sıralaması ise  $X1 > X1 \times X1 > X3 \times X3 > X3 > X4$  şeklindedir.



Şekil 3.7. UF deneylerinde değişkenler ve iç etkileşimlerinin rölatif etkileri

Tablo 3.12. NF deneylerinde akı (J) değerleri için ANOVA analizi sonuçları

Değişken	SD	Kareler Toplamı	Düzeltilmiş Kareler Toplamı	Ortalama Kareler Toplamı	F	P	%p <sup>a</sup>	F <sub>kritik</sub> [0,05(1-3)]
X1(M <sub>T</sub> )	1	576,24	1426,48	1426,48	498,19	1423,62	47,36	10,10
X2 <sup>a,b</sup> (v)	1	361,93	0,73	0,73	0,25	-2,13	-0,07	
X3(T)	1	1014,00	98,30	98,30	34,33	95,44	3,17	
X4(ΔP)	1	1429,13	55,55	55,55	19,40	52,69	1,75	
X1xX1	1	1203,77	1203,77	1203,77	420,41	1200,91	39,95	
X2xX2 <sup>b</sup>	1	3,56	3,56	3,56	1,24	0,70	0,02	
X3xX3	1	213,56	213,56	213,56	74,58	210,70	7,01	
X4xX4 <sup>b</sup>	1	4,30	4,30	4,30	1,50	1,44	0,05	
Hata	3	369,79	8,59	2,86	1,00		0,69	
Toplam	8	4806,48	3006,25				100	

<sup>a</sup> Negatif %p (rölatif etki) değerleri (0) olarak kabul edilmiştir.

<sup>b</sup> Düzeltilmiş kareler toplamı düşük olan değişkenlere ait düzeltilmiş kareler toplamı ve serbestlik dereceleri hataya aktarılmıştır.

İletkenlik giderim verimi için Tablo 3.13'te belirtilen analiz sonuçlarına göre; her bir değişkenin ve her değişkenin iç etkileşimlerinin serbestlik dereceleri 1 iken, hataya aktarılan serbestlik derecesi 2' ye göre F<sub>kritik</sub> değeri, %95 güven aralığı için (F<sub>kritik</sub>[0,05(1-2)]) 18,50' dir. Membran tipi (X1), çapraz akış hızı (X2) ile bu değişkenlerin iç etkileşimleri X1xX1, X2xX2 için hesaplanan F değerleri, F<sub>kritik</sub> değerinden büyük olduğundan iletkenlik giderim verimi için membran tipi ve çapraz akış hızı değişkenlerinin etkisi önemlidir. İletkenlik giderim verimi üzerindeki rölatif etki sıralamasının ANOVA tablosundan X1>X1xX1>X2>X2xX2>X3xX3>X4xX4 şeklinde olduğu görülmektedir. Bu değerlendirmede sıcaklık ve basınç değişkenleri ve bunların iç etkileşimleri için hesaplanan %p değerleri sıfır olduğundan ihmal edilmiştir.

Tablo 3.13. NF deneylerinde iletkenlik giderim verimi için ANOVA analizi sonuçları

Değişken	SD	Kareler Toplamı	Düzeltilmiş Kareler Toplamı	Ortalama Kareler Toplamı	F	P	%p	F <sub>kritik</sub> [0,05(1-2)]
X1(M <sub>T</sub> )	1	2534,84	6655,86	6655,86	25599,46	6655,60	53,85	18,50
X2(v)	1	54,56	30,62	30,62	117,77	30,36	0,25	
X3 <sup>a</sup> (T)	1	28,59	0,42	0,42	1,62	0,16	0,00	
X4 <sup>a</sup> (ΔP)	1	50,84	0,1	0,10	0,38	-0,16	0,00	
X1xX1	1	5649,31	5649,31	5649,31	21728,12	5649,05	45,70	
X2xX2	1	20,47	20,47	20,47	78,73	20,21	0,16	
X3xX3	1	2,02	2,02	2,02	7,77	1,76	0,01	
X4xX4	1	1,8	1,8	1,80	6,92	1,54	0,01	
Hata	2	79,43	0,52	0,26	1,00		0,02	
Toplam	8	8342,44	12360,6				100	

<sup>a</sup> Düzeltilmiş kareler toplamı düşük olan değişkenlere ait düzeltilmiş kareler toplamı ve serbestlik dereceleri hataya aktarılmıştır.

Tablo 3.14'te verilen bulanıklık giderim verimi için ANOVA analizi sonuçlarına bakıldığında; değişkenler ve iç etkileşimlerinin serbestlik dereceleri 1 olarak hesaplanmıştır. Burada sadece X2xX2 (çapraz akış hızı) ve X3 (sıcaklık) değişkenlerine ait serbestlik dereceleri hataya aktarılmıştır. %95 güven aralığı için 18,50 olarak belirlenen  $F_{\text{kritik}}$  ( $F_{\text{kritik}[0,05(1-2)]}$ ) değeri, değişkenler için hesaplanan F değerleri ile kıyaslandığında; değişkenlerin hiçbirinin bulanıklık giderimi üzerine etkisinin önemli olmadığı sonucuna varılmıştır.

Tablo 3.14. NF deneylerinde bulanıklık giderim verimi için ANOVA analizi sonuçları

Değişken	SD	Kareler Toplamı	Düzeltilmiş Kareler Toplamı	Ortalama Kareler Toplamı	F	P	%p	$F_{\text{kritik}} [0,05(1-2)]$
X1(M <sub>T</sub> )	1	511,94	172,30	172,30	1,78	75,41	3,16	18,50
X2(v)	1	961,45	171,12	171,12	1,77	74,23	3,11	
X3 <sup>b</sup> (T)	1	441,26	117,37	117,37	1,21	20,48	0,86	
X4(ΔP)	1	50,54	656,65	656,65	6,78	559,76	23,45	
X1xX1	1	273,17	273,17	273,17	2,82	176,28	7,39	
X2xX2 <sup>a,b</sup>	1	76,41	76,41	76,41	0,79	-20,48	-0,86	
X3xX3	1	195,39	195,39	195,39	2,02	98,50	4,13	
X4xX4	1	724,52	724,52	724,52	7,48	627,63	26,29	
Hata	2	517,67	193,78	96,89	1,00		32,47	
Toplam	8	3234,68	2386,93				100	

<sup>a</sup> Negatif %p (rölatif etki) değerleri (0) olarak kabul edilmiştir.

<sup>b</sup> Düzeltilmiş kareler toplamı düşük olan değişkenlere ait düzeltilmiş kareler toplamı ve serbestlik dereceleri hataya aktarılmıştır.

Bunun yanında bulanıklık giderim verimi açısından rölatif etki sıralaması X4xX4>X4>X1xX1>X3xX3>X1>X2 şeklinde olup, membran geçiş basıncı ve onun iç etkileşimi belirgin bir şekilde daha fazla rölatif etkiye sahiptir. Diğer değişkenlerin bulanıklık giderim verimi açısından rölatif etkisi ise yok denecek kadar azdır.

Tablo 3.15'teki ANOVA analizi sonuçlarını değerlendirmek gerekirse NF prosesinde TN parametresi için etkisi önemli olan değişkenler membran tipi (X1) ve sıcaklık (X3) ile onların iç etkileşimleridir. Rölatif etki açısından X1xX1>X1>X3>X3xX3>X2xX2>X2 şeklinde bir sıralama yapılırsa dahi, TN giderim verimi bakımından çapraz akış hızı ve membran geçiş basıncı değişkenlerinin rölatif etkisi fazla değildir.

Tablo 3.15. NF deneylerinde TN giderim verimi için ANOVA analizi sonuçları

Değişken	SD	Kareler Toplamı	Düzeltilmiş Kareler Toplamı	Ortalama Kareler Toplamı	F	P	%p <sup>a</sup>	F <sub>kritik</sub> [0,05(1-2)]
X1(M <sub>T</sub> )	1	0,00	2647,65	2647,65	638,76	2643,51	45,39	18,50
X2(v)	1	113,92	13,38	13,38	3,23	9,24	0,16	
X3(T)	1	492,57	256,38	256,38	61,85	252,24	4,33	
X4 <sup>a,b</sup> (ΔP)	1	29,40	2,55	2,55	0,62	-1,60	-0,03	
X1xX1	1	2702,60	2702,60	2702,60	652,01	2698,46	46,33	
X2xX2	1	27,42	27,42	27,42	6,62	23,28	0,40	
X3xX3	1	168,34	168,34	168,34	40,61	164,20	2,82	
X4xX4 <sup>b</sup>	1	5,74	5,74	5,74	1,38	1,60	0,03	
Hata	2	35,14	8,29	4,15	1,00		0,54	
Toplam	8	3539,98	5824,06				100	

<sup>a</sup> Negatif %p (rölatif etki) değerleri (0) olarak kabul edilmiştir.

<sup>b</sup> Düzeltilmiş kareler toplamı düşük olan değişkenlere ait düzeltilmiş kareler toplamı ve serbestlik dereceleri hataya aktarılmıştır.

TP giderim verimi için Tablo 3.16’da belirtilen analiz sonuçlarına göre; her bir değişkenin ve iç etkileşimlerinin serbestlik dereceleri 1 iken, X2 ve X4xX4’ e ait hataya aktarılan serbestlik derecesi ise 2’ dir. Membran tipi (X1) değişkeni ve iç etkileşimi X1xX1 ile çapraz akış hızı değişkeni iç etkileşimi X2xX2 için hesaplanan F değerleri, F<sub>kritik</sub>[0,05(1-2)] değerinden büyüktür. Buna göre TP giderim verimi bakımından membran tipi ve çapraz akış hızı dışında diğer değişkenlerin etkisinin önemli olmadığını söylemek mümkündür. Bununla birlikte TP giderim verimi üzerindeki rölatif etki sıralamasının ANOVA tablosundan X1>X1xX1>X2xX2>X3xX3>X4>X3 şeklinde olduğu görülmektedir.

Tablo 3.16. NF deneylerinde TP giderim verimi için ANOVA analizi sonuçları

Değişken	SD	Kareler Toplamı	Düzeltilmiş Kareler Toplamı	Ortalama Kareler Toplamı	F	P	%p <sup>a</sup>	F <sub>kritik</sub> [0,05(1-2)]
X1(M <sub>T</sub> )	1	2175,42	578,85	578,85	3046,58	578,66	51,34	18,50
X2 <sup>b</sup> (v)	1	109,63	0,36	0,36	1,89	0,17	0,02	
X3(T)	1	17,41	0,69	0,69	3,63	0,50	0,04	
X4(ΔP)	1	59,04	1,52	1,52	8,00	1,33	0,12	
X1xX1	1	539,19	539,19	539,19	2837,84	539,00	47,82	
X2xX2	1	4,48	4,48	4,48	23,58	4,29	0,38	
X3xX3	1	2,08	2,08	2,08	10,95	1,89	0,17	
X4xX4 <sup>a,b</sup>	1	0,02	0,02	0,02	0,11	-0,17	-0,02	
Hata	2	109,65	0,38	0,19	1,00		0,12	
Toplam	8	2907,27	1127,19				100	

<sup>a</sup> Negatif %p (rölatif etki) değerleri (0) olarak kabul edilmiştir.

<sup>b</sup> Düzeltilmiş kareler toplamı düşük olan değişkenlere ait düzeltilmiş kareler toplamı ve serbestlik dereceleri hataya aktarılmıştır.

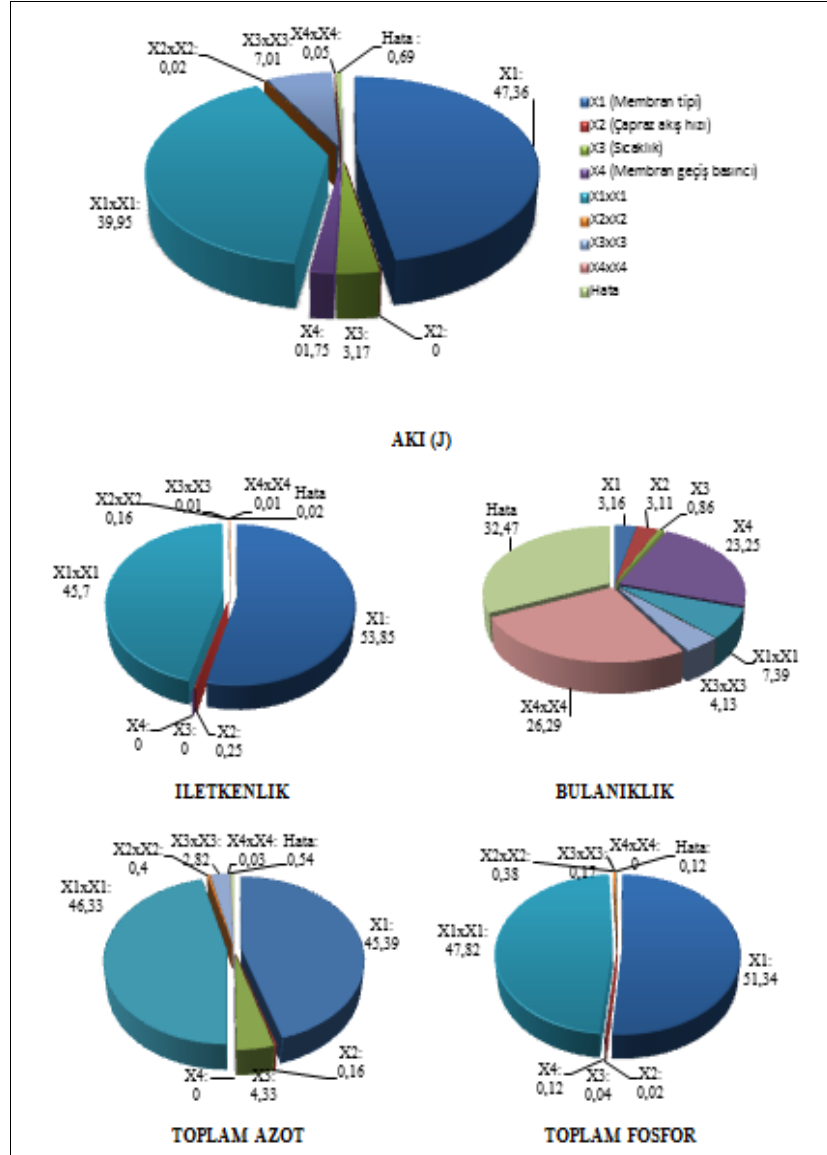
Tablo 3.12-3.16’da verilen tüm ANOVA analizleri sonuçlarına ilişkin genel bir değerlendirme yapıldığında; NF prosesinde yüksek akılarda ve yüksek iletkenlik, TN ve TP giderim verimlerinde sulama suyu elde edebilmek bakımından membran tipi en önemli etkiye sahiptir. ANOVA sonuçlarında membran tipinin, bulanıklık giderim verimi açısından etkisi önemsiz olmasına rağmen, rölatif etki bakımından diğer değişkenlere göre daha yüksek etkiye sahip olduğu görülmektedir. İletkenlik ve TP giderim verimleri için, membran tipi ile çapraz akış hızı etkisinin önemli olduğu belirlenmiştir. Yüksek akı ve TN giderim verimi bakımından sıcaklığın etkisi önemliyken, membran geçiş basıncının önemli etki gösterdiği tek parametre akı olmuştur. Bu sonuçlara göre; NF ile yüksek akı değerlerinde sulama suyu elde etmek için çapraz akış hızı dışında tüm değişkenler önemli oranda etki göstermektedir. En yüksek akı değerleri için etkisi önemli olan diğer değişkenler sırasıyla sıcaklık ve membran geçiş basıncıdır. Süzüntü akıları ve diğer proses performans parametrelerine ilişkin rölatif etki grafikleri Şekil 3.8’de verilmektedir.

### **3.2.5. Doğrulama deneyleri**

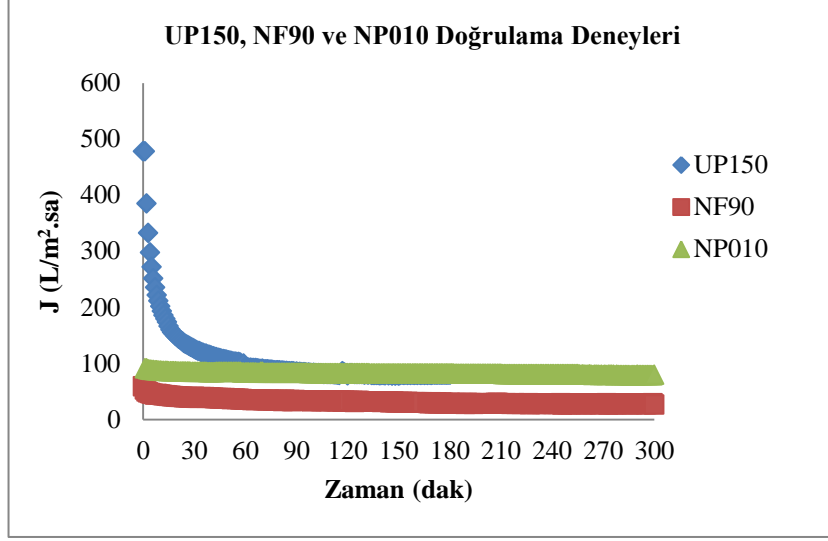
Doktora tezinin bu aşamasında UF deneylerinde Taguchi ile elde edilen en iyi filtrasyon koşullarına göre (X1:  $M_T=UP150$ , X2:  $v=600L/sa$ , X3:  $T=22,5^{\circ}C$  ve X4:  $\Delta P=4$  bar) UP150 membranı ile 1 doğrulama deneyi yapılmıştır.

NF deneylerinde ise en iyi filtrasyon şartlarına göre (X1:  $M_T=NF90$ , X2:  $v=600L/sa$ , X3:  $T=30^{\circ}C$  ve X4:  $\Delta P=10$  bar) NF90 membranı ile doğrulama deneyi gerçekleştirilmiştir. Tez çalışması kapsamında bulunan UF/NF bütünleşik membran sistemleri deneylerinde, UF sonrası hem gevşek hem de sıkı NF membranları kullanılması planladığından, ayrıca NF/TO bütünleşik membran sistemleri deneylerinde gevşek NF membranı kullanılması gerektiğinden NF prosesi için NP010 membranı ile de aynı koşullarda 2. doğrulama deneyi gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.9’ da en iyi filtrasyon şartlarında UP150, NF90 ve NP010 membranları ile yapılan doğrulama deneylerine ait akı-zaman değişimleri verilmektedir.



Şekil 3.8. NF deneylerinde değişkenler ve iç etkileşimlerinin rölatif etkileri



Şekil 3.9. UP150, NF90 ve NP010 membranları doğrulama deneylerine ait akı-zaman değişimleri

UP150 membranı ile gerçekleştirilen doğrulama deneyi sonucunda elde edilen atıksu akısı ortalama  $79,1 \text{ L/m}^2 \cdot \text{sa}$ ' tir. Deney sonunda en iyi filtrasyon şartları için deneysel olarak bulunan değerler ile Eşitlik 2.7'ye göre hesaplanan  $Y_{opt}$  değerlerinin Tablo 3.17'de görüldüğü gibi birbirleri ile uyumlu olduğu ve sonuçların Eşitlik 2.8 ve 2.9' a göre hesaplanan %95 güven aralığı içerisinde kaldığı görülmektedir.

Doğrulama deneyleri sonucunda NF90 ve NP010 membranlarından atıksu geçirilmesi halinde elde edilen akı değerleri sırasıyla  $27,8$  ve  $79,2 \text{ L/m}^2 \cdot \text{sa}$ ' tir. Tablo 3.17'de görüldüğü gibi en iyi filtrasyon şartları için NF90 ve NP010 membranları ile gerçekleştirilen doğrulama deneylerinde bulunan kirletici madde giderim verimleri ile hesaplanan  $Y_{opt}$  değerlerinin birbirleri ile uyumlu olduğu ve sonuçların Eşitlik 2.8 ve 2.9' a göre hesaplanan %95 güven aralığı içerisinde kaldığı görülmektedir. Ancak yapılan istatistiksel değerlendirmede süzüntü akısı bakımından elde edilen deney sonuçlarının, hesaplanan değerler ile uyumlu olmadığı belirlenmiştir. Buna göre her iki NF membranı ile değişken karakterdeki ikincil arıtma çıkış suyundan doğrudan sulama suyu elde edilmesi bakımından istenen süzüntü akısında çalışma performansı sağlamak mümkün görülmemektedir. Daha yüksek akılarda süzüntü elde etmek için kentsel ikincil arıtma çıkış suyunun, NF öncesinde UF membrandan geçirilmesi önerilebilir.



Tablo 3.17. Doğrulama deneyi sonuçları, hesaplanan değerler ve güven aralıkları

Membran Tipi	Parametre	Birim	Hesaplanan değer ( $Y_{opt}$ )	Deneysel olarak bulunan değer	Güven aralığı
UP150	J	(L/m <sup>2</sup> .sa)	85,3	79,1	73,7-96,9
	İletkenlik	(μS/cm)	590,5	590,1	568,8-612,1
	SAR	-	3,05	3,04	3,03-3,07
	Bulanıklık	(NTU)	0,16	0,07	0-0,4
	TN	mg/L	8,05	6,39	6,3-9,8
	TP		2,07	1,85	1,8-2,3
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		5,4	6,0	2,3-8,5
NF90	J	(L/m <sup>2</sup> .sa)	64,5	<b>27,8</b>	56,9-72,1
	R <sub>İletkenlik</sub>	%	92,2	80,0	27,5-99,9
	R <sub>Bulanıklık</sub>		84,3	88,8	78,3-88,9
	R <sub>TN</sub>		52,8	34,7	13,7-88,8
	R <sub>TP</sub>		97,8	75,7	54,6-99,9
NP010	J	(L/m <sup>2</sup> .sa)	98,8	<b>79,2</b>	91,2-106,4
	R <sub>İletkenlik</sub>	%	18,1	19,5	0,7-87,4
	R <sub>Bulanıklık</sub>		81,1	86,1	74,2-86,5
	R <sub>TN</sub>		16,8	58,5	2,8-58,8
	R <sub>TP</sub>		73,9	66,5	7,2-99,0

### 3.2.6. UF ve NF proseslerinin değerlendirilmesi

Doktora tez çalışmasında arıtılmış atıksuların sulamada yeniden kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi amacıyla, Taguchi deneysel tasarım yöntemi doğrultusunda UF ve NF prosesleri için belirlenen en iyi filtrasyon koşullarında gerçekleştirilen doğrulama deneylerinde elde edilen membran süzüntüleri kullanılmıştır. Bunun için AATTUT'ne göre izlenmesi gereken iletkenlik, TÇM, SAR, Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, B, TN, TP, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ve NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, pH, bulanıklık, AKM, Ca<sup>+2</sup>, Mg<sup>+2</sup>, BOİ<sub>5</sub>, fekal koliform, bakiye klor parametreleri ile 17 ağır metal ve toksik element ölçülmüştür. Tebliğ dışında ise literatürde ve bir kısmı uluslararası standartlarda yer alan NO<sub>2</sub><sup>-</sup> ve NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N, K<sup>+</sup>, PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, KOİ, Hg ve toplam koliform parametreleri de çalışma sırasında analiz edilmiştir. Konvansiyonel parametreler bakımından yapılan analizlere ait sonuçlar Tablo 3.18'de verilmiştir.

Tablo 3.18. UF ve NF proseslerinin ulusal standartlara göre konvansiyonel parametreler bakımından karşılaştırılması

Parametre	UP150			NF90			NP010			Türkiye <sup>a</sup>			
	Giriş	Çıkış	R(%)	Giriş	Çıkış	R(%)	Giriş	Çıkış	R(%)	1.Sınıf	2.Sınıf	3.Sınıf	
İletkenlik (µS/cm)	638	590	7,5	889	178	80,0	1110	893	19,5	<700	700-3000	>3000	
TÇM (mg/L)	453	418	7,7	437	84,8	80,6	549	437	20,4	<500	500-2000	>2000	
SAR	0-3 3-6 6-12 12-20 20-40	3,02	3,04	-	3,31	3,43	-	4,06	4,27	-	EC≥0,7 ≥1,2 ≥1,9 ≥2,9 ≥5,0	EC=0,7-0,2 1,2-0,3 1,9-0,5 2,9-1,3 5,0-2,9	EC<0,2 <0,3 <0,5 <1,3 <2,9
Na <sup>+</sup> (mg/L)	Yüzey Sulaması Damlatmalı Sulama	70,3	67,7	3,7	94,9	18,8	80,2	123,1	112,3	8,8	<3 <70	3-9 >70	>9 sy
Cl <sup>-</sup> (mg/L)	Yüzey Sulaması Damlatmalı Sulama	148,5	147,7	0,5	142,0	16,8	88,2	208,4	186,1	10,7	<140 <100	140-350 >100	>350 sy
B (mg/L)		0,5	0,5	0,0	0,5	0,5	0	0,5	0,5	0	<0,7	0,7-3,0	>3,0
TN (mg/L)		7,3	6,4	12,1	33,9	22,2	34,7	76,0	31,5	58,5	2-12 <sup>b</sup>		
TP (mg/L)		2,7	1,9	30,1	3,9	0,95	75,7	2,85	0,95	66,5	<2 <sup>b</sup>		
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N (mg/L)		2,1	1,3	35,0	16,2	6,5	60,2	5,4	5,1	4,2	1-10 <sup>b</sup>		
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)		9,2	6,0	35,0	71,8	28,6	60,2	23,7	22,7	4,2	sy		
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/L)		3,0	2,9	3,3	0,6	0,3	50,0	0,9	0,6	33,3	sy		
pH		7,52	7,51	-	7,54	6,02	-	8,34	7,10	-	6-9 <sup>c,d</sup>		
Bulanıklık (NTU)		2,0	0,07	96,6	5,2	0,6	88,9	7,9	1,1	86,1	<2 <sup>c</sup>		
AKM (mg/L)		23,6	1,0	95,8	5,3	0,0	100,0	6,4	2,0	68,8	<5 <sup>c</sup> , <30 <sup>d</sup>		
Ca <sup>2+</sup> (mg/L)		33,3	30,3	8,9	52,2	1,97	96,2	59,9	44,7	25,4	sy		
K <sup>+</sup> (mg/L)		15,1	13,6	9,9	15,3	6,9	55,0	12,8	12,4	3,4	sy		
Mg <sup>2+</sup> (mg/L)		4,8	4,5	5,9	6,1	0,2	96,9	5,98	4,7	21,4	sy		
PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> (mg/L)		8,0	6,1	23,8	11,2	0,5	95,5	7,1	3,5	50,7	sy		
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> (mg/L)		43,1	29,7	31,1	42,0	0,5	98,8	14,4	13,4	69,8	sy		
BOİ <sub>5</sub> (mg/L)		21	7,5	64,3	4,0	2,0	50,0	2,0	1,0	50,0	<20 <sup>c</sup> , <30 <sup>d</sup>		
KOİ (mg/L)		134,0	104,0	22,4	25,6	2,5	90,2	37,3	14,0	62,5	sy		
Toplam Klor (mg/L)		0,25	0,025	90,0	0,13	0,025	80,5	0,13	0,025	80,2	sy		
Serbest (Bakiye) Klor (mg/L)		0,15	0,025	83,0	0,16	0,025	84,3	0,097	0,025	74,2	>1 <sup>c,d</sup>		
Fekal Koliform (kob/100 mL)		2x10 <sup>3</sup>	tem	-	2x10 <sup>3</sup>	tem	-	2x10 <sup>2</sup>	tem	-	0 <sup>c</sup> , <200 <sup>d</sup>		
Toplam Koliform (kob/100 mL)		2x10 <sup>4</sup>	tem	-	9x10 <sup>3</sup>	tem	-	5x10 <sup>3</sup>	tem	-	sy		

<sup>a</sup> AATTUT, Ek 7 (ÇŞB, 2010)

<sup>b</sup> Tablo E7.9, BNR+Filtrasyon+Dezenfeksiyon içeren bir proses için sınır değerler (ÇŞB, 2010)

<sup>c</sup> Tablo E7.1. Sınıf A, <sup>d</sup> Tablo E7.1. Sınıf B (ÇŞB, 2010)

sy: İlgili standartta sınır değeri yoktur, öy: ölçüm yapılamamıştır, tem: tespit edilememiştir

Tüm parametreler, giderim verimi bakımından değerlendirildiğinde NF90 membranının UP150 ve NP010 membranlarına göre daha iyi performans sağladığı görülmektedir. Atıksuların sulama suyu olarak yeniden kullanımı ile ilgili ulusal ve uluslararası standartlarda (USEPA haricinde) KOİ parametresi ile ilgili bir sınır değer olmamasına rağmen, ikincil arıtma çıkış suyu KOİ değeri için; UP150, NF90 ve NP010 membranlarında elde edilen giderim verimleri sırasıyla %22,4, %90,2 ve %62,5'tir.

pH, bulanıklık, BOİ<sub>5</sub>, AKM ve fekal koliform parametreleri için, AATTUT-Tablo E7.1'de belirtilen Sınıf A ve Sınıf B kalitesinde tarımsal, kentsel ve girişi kısıtlı sulama alanları bakımından tüm membranlarda sınır değerlerin sağlandığı belirlenmiştir. Arıtılmış atıksular ile tarımsal ve kentsel alanların sulanması halk sağlığı açısından risk teşkil ettiğinden, özellikle içeriğindeki fekal/toplam koliformun giderilmesi her iki proses verimi açısından da önemlidir. Bakiye (serbest) klor için AATTUT-Tablo E7.1'de sınır değer >1 mg/L'dir. Her iki membran proseste bakiye klor değeri 1 mg/L'nin altında ölçülmüştür. Bu bakımdan çıkış süzüntülerine uygun dozlarda klor ilave edilmesi önerilebilir.

Sulama suyu amaçlı yeniden kullanım için Tablo 1.5'te belirtilen (WHO, 2006), ve (FAO, 1992) ve (USEPA, 2004) uluslararası standartlarında BOİ<sub>5</sub>, AKM, fekal koliform ve bakiye klor ile ilgili kriterlerin tüm proseslerde sağlandığı belirlenmiştir. pH, NF90 membranı haricinde diğer membranlarda (WHO, 2006)'da istenen seviyededir. UP150 ve NP010 membranları ile elde edilen süzüntülerin (FAO, 1992)'ye göre pH için kullanımda kısıtlanma derecesi "Hafif ve Orta" olarak belirlenmişken, NF90 membran süzüntüsünün kısıtlanma derecesi "Yok"tur. Bununla beraber tüm membran süzüntülerinde (USEPA, 2004)'te pH ve bulanıklık için verilen sınır değerlerin sağlandığı görülmektedir. Ancak bulanıklık için (FAO, 1992)' de verilen 0-0,2 mg/L aralığı yalnızca UP150 membranında sağlanmıştır.

Sulama suyunun kimyasal kalitesinin değerlendirilmesinde toprak bünyesindeki suda ve sulama suyunda sodyumun baskın iyon olduğu durumu gösteren SAR değeri önemli bir parametredir (ÇŞB, 2010). SAR parametresi için AATTUT-Tablo E7.2'ye göre UP150 ve NP010 membran süzüntülerinde 2.sınıf, NF90 membran süzüntüsünde ise 3. sınıf sulama suyu elde edildiği görülmektedir. Benzer şekilde

(WHO, 2006) ve (FAO, 1992) standartlarına göre SAR parametresi için kullanımda kısıtlanma derecesi, UP150 ve NP010 membran süzütülerinde “Hafif ve Orta” iken, NF90 membran süzütüsünde “Şiddetli” olarak belirlenmiştir. NF90 membran çıkış suyuna ön deneysel çalışmalardaki gibi KCl ilavesiyle SAR bakımından daha iyi kalitede süzüntü sağlanabilir. Her iki proseste elde edilen SAR değerleri 2-8 arasındadır. AATTUT-Tablo E7.4’te bu değer aralığında bulunan sulama suyunun yaprak döken meyve ağaçları, turuncgiller ve avokado bitki türleri için yaprakta yanma etkisi gösterdiği görülmektedir. NF90 membran süzütüsünün kimyasal ilavesi ile sulama suyu sınıfının iyileştirilmesi durumunda ise sulanacak diğer bitki toleranslarına da dikkat edilmelidir.

TÇM ve bor parametrelerini her iki proseste karşılaştırdığımızda; membran süzütüleri AATTUT’ne göre 1. sınıf sulama suyu ile eşdeğerdir. Benzer şekilde (WHO, 2006) ve (FAO, 1992) standartlarına göre her iki parametre için kullanımda kısıtlanma derecesi, üç membran süzütüsünde de “Yok” olarak belirlenmiştir. İletkenlik bakımından NP010 çıkışında 2. sınıf, diğer membran çıkışlarında 1. sınıf sulama suyu elde edilmiştir. (USEPA, 2004)’e göre iletkenlik için sınır değer verilmemiş, TÇM ve bor için verilen sınır değerlerin altında sulama suyu üretilmiştir. AATTUT-Tablo E7.3’e göre bitkilerin tuzluluğa olan hassaslıkları bakımından, TÇM konsantrasyonları 500 mg/L’ den küçük olduğu için tüm membran süzütüleri, tarımsal yeniden kullanıma uygundur. Bor konsantrasyonları da tüm membran süzütülerinde 0,5 mg/L olduğundan, AATTUT-Tablo E7.6’da bitkilerin bora karşı dayanıklılık dereceleri bakımından fasulye, yer fıstığı, buğday, soğan, arpa, börülce ve meyveli ağaçlar için “Hassas” sınıfta sulama suyu üretilmiştir.

AATTUT’ne göre sodyum parametresi için UP150 ve NF90 membranlarında damlatmalı sulama bakımından 1. sınıf, yüzey sulaması bakımından 3. sınıf sulama suyu kriteri sağlandığından elde edilen süzütüler damlatmalı sulamaya daha elverişlidir. NP010 membranında ise damlatmalı sulama için 2. sınıf, yüzey sulaması için 3. sınıf süzüntü elde edilebilmektedir. Cl parametresi için UP150 ve NP010 membranlarında elde edilen süzüntü her iki sulama türünde 2. sınıf, NF90 süzütüsü ise 1. sınıf sulama suyu ile eşdeğerdir.

Sodyum ve klorür parametreleri için (WHO, 2006) ve (FAO, 1992) standartlarında sprinkler ve yüzey sulaması için verilen sınır değerler aynıdır. Her iki standarda göre sodyum için UP150 ve NF90 membran süzütülerinin kullanımda kısıtlanma derecesi “Yok” iken, NP010 membranında “Hafif ve Orta” kısıtlanma derecesine sahip süzütü elde edilmiştir. Klorür için UP150 ve NP010 membran süzütülerinin kullanımda kısıtlanma derecesi “Hafif ve Orta”, NF90 membran süzütüsünün ise “Yok”tur. AATTUT-Tablo E7.5’e göre bitkilerin yapraklarına zarar veren klorür konsantrasyonları bakımından UP150 ve NF90 membran süzütüleri badem, kayısı ve erik bitkileri için hassas, NP010 membran süzütüsü ise üzüm, biber, patates ve domates bitkileri için orta hassas sınıftadır.

Geri kazanılmış atıksu, sulama için faydalı olan 3 ana nütrient (azot, fosfor ve potasyum) içermektedir. Azot ve fosfor atıksuda yeterli miktarlarda bulunurken bitki büyümesini etkilemektedir. Potasyum ise bitki büyümesinde daha az etkilidir (ÇŞB, 2010). İlgili standartlarda bir sınır değer belirtilmemesine rağmen analiz edilen UP150, NF90 ve NP010 membran süzütülerindeki potasyum konsantrasyonları sırasıyla 13,6, 6,9, 12,4 mg/L düzeyindedir. AATTUT-Tablo E7.9’da TN, TP ve  $\text{NO}_3^-$ -N parametreleri için geri kazanılmış atıksuda olabilecek nütrient seviyeleri verilmiştir (ÇŞB, 2010). Buna göre UP150 membran süzütüsünde beklenen tüm nütrient seviyeleri elde edilmiştir. NF90 ve NP010 membran süzütülerinde ise TP ve  $\text{NO}_3^-$ -N nütrient seviyeleri sulama suyu için uygun niteliktedir. Ancak TN giriş konsantrasyonu yüksek olduğundan beklenen sınır değer üzerinde süzütü elde edilmiştir. Bu nedenle yüksek TN konsantrasyonundaki NF90 ve NP010 membran süzütülerinin bitki büyümesi açısından kontrollü olarak sulamada kullanılması önerilebilir.

Uluslararası standartlardan (WHO, 2006)’ da TN için, (FAO, 1992)’ de ise  $\text{NO}_3^-$ -N için sınır değer verilmiştir. (WHO, 2006)’ ya göre UP150 ve NF90 membran süzütülerinin TN açısından kullanımda kısıtlanma derecesi “Hafif ve Orta” iken NP010 membranında “Şiddetli” kısıtlanma derecesine sahip süzütü elde edilmiştir. (FAO, 1992)’ ye göre ise  $\text{NO}_3^-$ -N açısından NF90 ve NP010 membran süzütüleri “Hafif ve Orta” kısıtlanma derecesine sahipken, UP150 membran süzütüsünde kısıtlanma “Yok” tur.

Tablo 3.19’da en iyi filtrasyon şartlarında elde edilen UP150, NF90 ve NP010 membran süzüntülerindeki ağır metal ve toksik element konsantrasyonları ile giderim verimleri ulusal ve uluslararası standartlar ile birlikte gösterilmektedir. Eser elementler, ortamda çok düşük konsantrasyonlarda bulunan elementlerdir. Bunların bitkiler üzerindeki etkisi, konsantrasyonuna bağlı olarak değişmektedir. Türkiye’ de AATTUT-Tablo E7.7’de sulama sularında izin verilebilen maksimum ağır metal ve toksik elementlerin konsantrasyonları verilmiştir. Uluslararası standartlarda ise (WHO, 2006)-Tablo A1.2’de bitkisel üretim için eser element eşik seviyeleri ve (USEPA, 2004)-Tablo 2-7’de sulama için arıtılmış sulardaki bileşenler için tavsiye edilen sınır değerler uzun ve kısa süreli olarak verilmektedir.

Bu standartlara göre eser elementler için değerlendirme yapıldığında; hem membran filtrasyon girişinde kullanılan kentsel arıtılmış atıksu çıkış sularının hem de membran çıkış süzüntülerinin, her türlü zeminde sürekli sulama yapıldığında belirtilen sınır değerlerin altında olduğu görülmektedir. Geri kazanılmış atıksuların sulamada kullanımında içeriğinde bulunan eser elementlerin bitki büyümesi bakımından en az düzeye indirilmesi gerekmektedir. En iyi filtrasyon şartlarında UP150 membranı ile %1-68,9, NF90 membranı ile %0-99,7 ve NP010 membranı ile %0-89,1 aralığında giderim verimi elde edilmiştir. Buna göre, eser elementlerin en az düzeye indirilmesi için NF prosesi UF prosesine göre daha iyi giderim sağlamaktadır.

UP150, NF90, NP010 membran girişinde Hg konsantrasyonları sırasıyla 1,34, 8,11, 1,18 µg/L, membran çıkışında ise 1,04, 0,18, 0,73 µg/L olarak belirlenmiştir. Buna göre NF90 ve NP010 membran süzüntülerinde (USEPA, 2004)’te belirtilen sınır değer sağlanmıştır. Ayrıca Hg için NF90 membranında %97,7, NP010 membranında ise %38,1 giderim verimi elde edilmiştir.

Tablo 3.19. UF ve NF proseslerinin ulusal ve uluslararası standartlara göre ağır metal ve toksik elementler bakımından karşılaştırılması

Parametre	UP150			NF90			NP010			Türkiye <sup>1</sup> (mg/L)	USEPA <sup>2</sup> (mg/L)		WHO <sup>3</sup> (mg/L)
	Giriş	Çıkış	R(%)	Giriş	Çıkış	R(%)	Giriş	Çıkış	R(%)		Uzun Süreli	Kısa Süreli	Tavsiye Edilen Max. Konsantrasyon
Al	0,025	0,0247	1,22	0,0468	0,0078	83,41	0,06	0,03	48,33	5,0	5,0	20	5,0
As	0,0012	0,0012	3,39	0,0011	0,0002	79,51	0,0015	0,0011	24,05	0,1	0,1	2,0	0,1
Be	0,000014	0,000005	64,29	0,000014	0,000005	64,29	0,000014	0,000013	7,14	0,1	0,1	0,5	0,1
Cd	0,00008	0,00006	25,00	0,00002	0,00001	50,00	0,000022	0,000014	36,36	0,01	0,01	0,05	0,01
Cr	0,0072	0,0057	21,26	0,011	0,005	54,65	0,0081	0,0053	35,14	0,1	0,1	1,0	0,1
Co	0,00133	0,00126	4,98	0,00036	0,00003	92,98	0,00046	0,00014	69,87	0,05	0,05	5,0	0,05
Cu	0,062	0,034	44,62	0,017	0,001	91,31	0,025	0,007	73,20	0,2	0,2	5,0	0,2
Fe	0,061	0,057	6,78	0,159	0,001	99,69	0,18	0,04	80,23	5,0	5,0	20,0	5,0
Pb	0,0027	0,002	27,11	0,0031	0,0003	90,00	0,0041	0,0004	89,11	5,0	5,0	10,0	5,0
Li	0,0022	0,002	9,93	0,0020	0,0007	63,46	0,0023	0,0021	7,64	2,5	2,5	2,5	2,5
Mn	0,045	0,037	16,62	0,037	0,003	91,96	0,046	0,031	33,43	0,2	0,2	10,0	0,2
Mo	0,0025	0,0015	39,29	0,00075	0,00063	16,58	0,0019	0,0012	37,08	0,01	0,01	0,05	0,01
Ni	0,103	0,076	25,98	0,025	0,002	91,85	0,039	0,013	65,95	0,2	0,2	2,0	0,2
Se	0,0004	0,0001	68,92	0,000214	0,000208	2,80	0,0004	0,0002	55,68	0,02	0,02	0,02	0,02
V	0,0014	0,0013	5,20	0,0015	0,0004	75,12	0,0015	0,0013	13,28	0,1	0,1	1,0	0,1
Zn	0,114	0,068	40,09	0,09	0,04	54,30	0,049	0,012	74,91	2,0	2,00	10,0	2,00
Hg	0,00134	0,0011	21,47	0,00811	0,00018	97,73	0,00118	0,00073	38,14	sy	<1x10 <sup>-3</sup> a		sy
F	0,3	0,2	33,33	0,1	0,1	0,00	0,2	0,2	0,00	1,0	1,0	15,0	1,0

<sup>1</sup> AATTUT, Ek 7, Tablo E7.7. Her türlü zeminde sürekli sulama yapılması durumunda sınır değerler (ÇŞB, 2010)

<sup>2</sup> Tablo 2-7. Sulama için arıtılmış sularındaki bileşenler için tavsiye edilen sınır değerler (USEPA, 2004)

<sup>3</sup> Tablo A1.2. Bitkisel üretim için eser element eşik seviyeleri (WHO, 2006)

<sup>a</sup> Tablo 8-3. Suyun yeniden kullanımı için ilgili su kalite parametreleri özeti (USEPA, 2004)

sy: İlgili standartta sınır değeri yoktur

Daha önce Tablo 1.5’te verilen ve (FAO, 1992)-Tablo 27’de belirtilen kriterlere göre damlatmalı sulama sistemlerinde su kalitesi ve tıkanma potansiyeli açısından Fe ve Mn konsantrasyonları, sulama suyu amaçlı yeniden kullanımda kısıtlanma derecelerine göre sınırlandırılmıştır. Aynı sınırlandırma (WHO, 2006) kriterlerinde de yer almaktadır. Buna göre en iyi filtrasyon koşullarında elde edilen tüm membran süzüntülerinde Fe ve Mn konsantrasyonları, her iki standart için istenen düzeydedir.

### **3.3. Bütünleşik Membran Sistemleri Deneyleri**

Tez çalışmasının bu bölümünde, UF ve NF deneylerinde deneysel tasarım şartlarında en iyi filtrasyon sağlanan UF (UP150), NF<sub>sıkı</sub> (NF90) ve NF<sub>gevşek</sub> (NP010) membranları ile üç farklı TO membranı kullanılarak (LFC3, CPA3 ve TFC) UF/TO, NF<sub>gevşek</sub>/TO, UF/NF<sub>gevşek</sub> ve UF/NF<sub>sıkı</sub> bütünleşik membran sistemleri deneysel çalışma planı yürütülmüştür. Çalışmanın bu kısmında su geri kazanımı esasında uygulanabilir bir atıksu yönetimi yaklaşımı ortaya koymak için UF veya NF sonrası TO ile UF sonrası NF membranların etkinliğinin ve en iyi bütünleşik membran sistemi/sistemlerinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

Ön deneysel çalışmada iyi kalitede su geri kazanımı sağlanan UF/TO bütünleşik membran sistemlerinde, 10 bar ve üzeri basınçta TO membran geçirgenliğinde azalma meydana geldiğinden ve düşük basınç TO işletiminin daha yüksek akı performansı göstermesinden dolayı; bütünleşik membran sistemleri deneyleri TO için üç farklı basınç yerine 10 barda gerçekleştirilmiştir. Basınç haricinde çapraz akış hızı ve sıcaklık değişkenleri için işletme şartları, UF ve NF deneylerinde istatistiksel olarak belirlenen en iyi filtrasyon koşullarına göre sağlanmıştır.

Bütünleşik membran sistemleri süzüntülerinin sulamada yeniden kullanılabilirliği, sulama suları için izlenmesi gereken her bir parametrenin sistem çıkışındaki konsantrasyon değeri ulusal ve uluslararası mevzuatlarda belirtilen limit değerler ile karşılaştırılarak incelenmiştir.

#### **3.3.1. UF/TO bütünleşik membran sistemleri deneyleri**

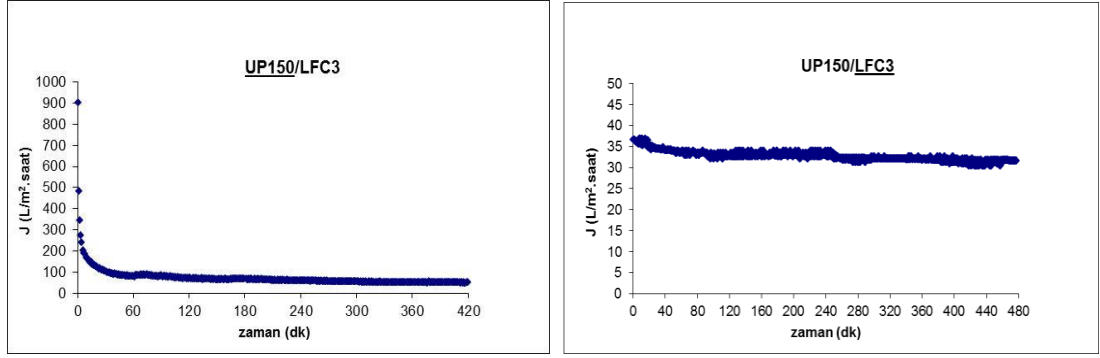
UF/TO bütünleşik membran sistemleri deneylerinde öncelikle UP150 membranı ile TO deneyleri için yeterli süzüntü elde etmek amacıyla uzun süreli UF deneyleri



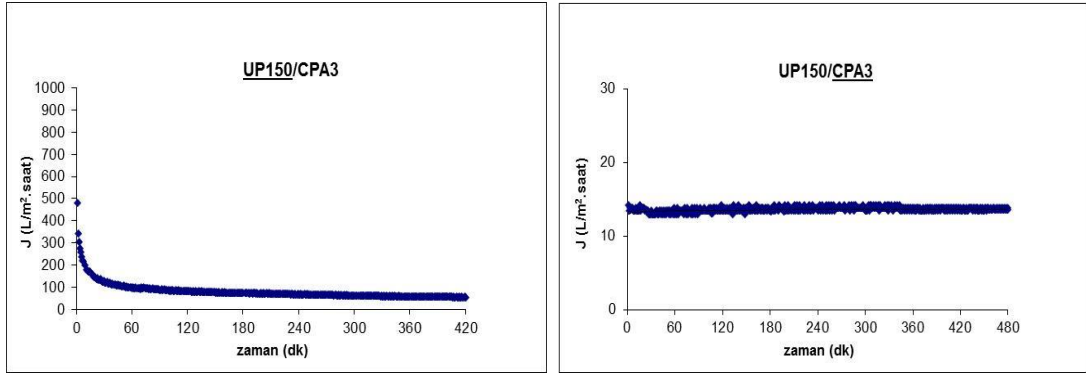
yürütülmüştür. Yapılan üç ayrı deney, UF deneylerinde en iyi filtrasyon koşullarının sağlandığı 22,5°C sıcaklık, 4 bar membran geçiş basıncı, 600L/sa çapraz akış hızı ve 10 L başlangıç besleme hacminde gerçekleştirilmiştir. UF deneyleri, besleme akımını konsantre etme şartlarında ve minimum %75 geri kazanım sağlanana kadar sürdürülmüştür. Bu orana bağlı olarak ortalama 7'şer saat süren üç ayrı deneyde elde edilen ortalama süzüntü akısı 57,2 L/m<sup>2</sup>.sa, geri kazanım oranı %82,1 olarak belirlenmiş, VRF değeri ise 4,4-8,1 arasında değişkenlik göstermiştir. Şekil 3.10' da UF/TO bütünleşik membran sistemleri deneylerindeki akı-zaman değişimleri verilmektedir.

UP150 membranı ile gerçekleştirilen her bir UF deneyi sonunda toplanan kompozit süzüntü daha sonra LFC3, CPA3 ve TFC TO membranlarından geçirilmiştir. 5L başlangıç besleme hacminde gerçekleştirilen TO deneyleri, minimum %70 geri kazanım sağlanana kadar, aynı sıcaklık ve çapraz akış hızı ile 10 bar membran geçiş basıncında yürütülmüştür. Deney sonunda UP150/LFC3, UP150/CPA3, UP150/TFC bütünleşik membran sistemlerinde sırasıyla 31,5, 13,6, 30,5 L/m<sup>2</sup>.sa' lik akı elde edilmiştir. Aynı sistemlerde belirlenen geri kazanım oranları sırasıyla %72,4, %30,5, %71,7; VRF değerleri ise 3,6, 1,4, 3,5 şeklindedir.

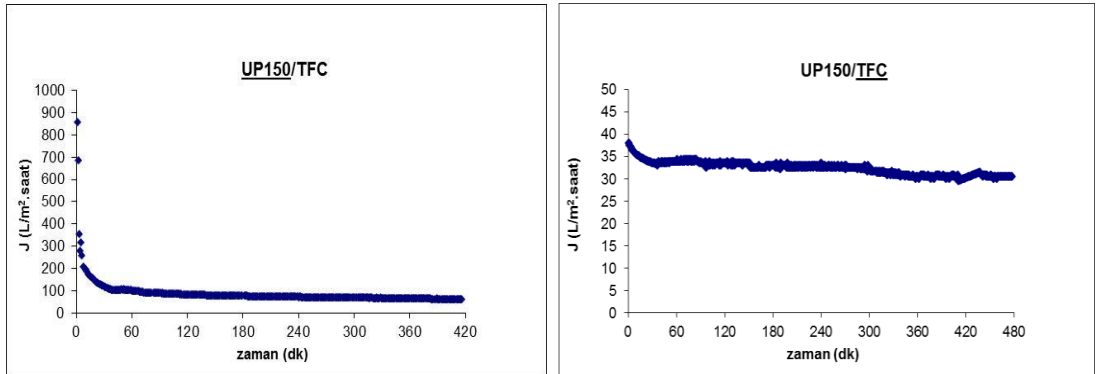
Performans bakımından değerlendirme yapıldığında; 8' er saat yürütülen TO deneylerinde, UP150/CPA3 bütünleşik membran sistemi ile hedeflenen geri kazanım oranının sağlanamadığı görülmektedir. Ayrıca UP150/LFC3 sisteminde UP150/TFC sistemine göre aynı süre ve şartlarda daha iyi geri kazanım oranı, süzüntü akısı ve VRF değeri elde edilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.10. UF/TO bütünleşik membran sistemleri deneylerinde akı-zaman değişimleri (a) UP150/LFC3, (b) UP150/CPA3, (c) UP150/TFC

UF ve NF proseslerinde olduğu gibi en iyi filtrasyon koşullarında gerçekleştirilen UF/TO bütünleşik membran sistemleri deneylerinde, deney başında ( $t_0$ ) ve deney sonunda ( $t_{son}$ ) membran girişinden ve çıkışından alınan anlık numunelerde Tablo 3.20’de belirtilen parametreler analiz edilmiştir.

Tablo 3.20. UF/TO bütünleşik membran sistemlerinde deney başı ( $t_0$ ) ve deney sonu ( $t_{son}$ ) elde edilen analiz sonuçları ve giderim verimleri

Parametre	Birim	UP150						UP150/LFC3				UP150/CPA3				UP150/TFC			
		$t_0$			$t_{son}$			$t_0$		$t_{son}$		$t_0$		$t_{son}$		$t_0$		$t_{son}$	
		Giriş Ortalama	Çıkış Ortalama	R(%) Ortalama	Giriş Ortalama	Çıkış Ortalama	R(%) Ortalama	Çıkış	R(%)	Çıkış	R(%)	Çıkış	R(%)	Çıkış	R(%)	Çıkış	R(%)	Çıkış	R(%)
Al	µg/L	50,62	39,49	21,99	59,10	41,64	29,55	16,73	57,6	13,62	67,3	5,90	85,1	1,31	96,8	11,33	71,3	3,92	90,6
As		0,74	0,74	0,00	1,07	0,90	16,24	0,11	84,5	0,04	95,6	0,74	0,0	0,08	91,4	0,74	0,0	0,06	92,9
Be		0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,0	0,01	0,0	0,01	0,0	0,01	0,0	0,01	0,0	0,01	0,0
Cd		0,05	0,04	22,62	0,19	0,11	39,14	0,00	95,1	0,01	95,2	0,01	81,3	0,01	93,4	0,02	50,9	0,02	86,7
Cr		10,03	9,55	4,79	15,00	10,20	31,95	2,51	73,8	1,65	83,9	2,37	75,2	1,86	81,8	6,70	29,8	10,20	0,0
Co		0,42	0,35	15,08	0,81	0,38	52,88	0,01	95,8	0,03	91,4	0,05	85,7	0,02	95,1	0,05	84,9	0,01	98,3
Cu		25,01	21,29	14,89	155,83	79,00	49,31	1,50	93,0	1,73	97,8	2,50	88,3	1,36	98,3	2,22	89,6	1,79	97,7
Fe		72,75	66,87	8,08	179,85	37,67	79,05	0,62	99,1	8,78	76,7	21,42	68,0	0,11	99,7	0,22	99,7	0,08	99,8
Pb		2,64	2,33	11,54	10,59	4,71	55,56	0,42	82,0	1,75	62,8	0,71	69,6	0,24	94,9	0,31	86,8	0,49	89,6
Li		1,79	1,77	0,80	2,04	1,94	5,13	0,29	83,5	0,18	90,6	-	-	-	-	-	-	-	-
Mn		37,18	36,91	0,72	34,48	30,15	12,56	1,17	96,8	5,81	80,7	1,36	96,3	0,31	99,0	1,02	97,3	0,16	99,5
Mo		0,53	0,43	18,70	1,72	1,23	28,72	0,04	91,4	0,04	96,4	0,14	68,4	1,23	0,0	0,08	81,2	0,04	96,4
Ni		20,29	12,21	39,82	48,58	19,94	58,95	0,43	96,4	0,15	99,2	2,03	83,4	0,66	96,7	0,56	95,4	0,24	98,8
Se		0,34	0,19	42,96	0,35	0,30	14,30	0,03	85,3	0,06	81,4	0,05	76,0	0,00	100,0	0,11	40,9	0,19	38,1
V		1,03	0,99	3,71	1,35	1,17	13,69	0,16	84,3	0,09	92,0	0,13	86,7	0,16	86,1	0,12	87,7	0,05	95,4
Zn		169,74	138,82	18,22	142,21	56,99	59,93	43,73	68,5	19,57	65,7	42,36	69,5	5,21	90,9	32,45	76,6	7,39	87,0
B		mg/L	0,50	0,50	0,00	0,50	0,50	0,00	0,50	0,0	0,50	0,0	0,01	97,7	0,40	20,2	0,03	94,6	0,24
Hg	µg/L	0,44	0,32	27,69	3,01	0,94	68,93	0,17	46,8	0,06	93,8	0,09	72,7	0,11	88,0	0,20	35,3	0,33	64,5
F <sup>-</sup>	mg/L	0,20	0,14	29,78	0,19	0,18	4,99	0,02	87,5	0,01	91,7	0,04	72,9	0,04	79,6	0,04	73,0	0,04	78,6
Cl <sup>-</sup>		95,49	95,40	0,09	96,45	96,22	0,23	4,96	94,8	2,25	97,7	4,92	94,8	2,76	97,1	4,38	95,4	1,94	98,0
Na <sup>+</sup>		82,79	80,23	3,09	97,56	86,19	11,65	4,52	94,4	2,37	97,2	6,57	91,8	4,33	95,0	5,92	92,6	3,41	96,0

Tablo 3.20.(Devam) UF/TO bütünleşik membran sistemlerinde deney başı ( $t_0$ ) ve deney sonu ( $t_{son}$ ) elde edilen analiz sonuçları ve giderim verimleri

Parametre	Birim	UP150						UP150/LFC3				UP150/CPA3				UP150/TFC			
		$t_0$			$t_{son}$			$t_0$		$t_{son}$		$t_0$		$t_{son}$		$t_0$		$t_{son}$	
		Giriş Ortalama	Çıkış Ortalama	R(%) Ortalama	Giriş Ortalama	Çıkış Ortalama	R(%) Ortalama	Çıkış	R(%)	Çıkış	R(%)	Çıkış	R(%)	Çıkış	R(%)	Çıkış	R(%)	Çıkış	R(%)
Ca <sup>+2</sup>	mg/L	47,85	45,74	4,40	57,75	48,43	16,15	5,74	87,5	1,53	96,8	1,53	96,7	0,61	98,7	2,44	94,7	0,20	99,6
Mg <sup>+2</sup>		5,32	5,23	1,81	6,30	5,54	12,05	0,25	95,3	0,06	98,9	0,26	95,0	0,12	97,9	0,21	96,0	0,04	99,2
SAR	-	3,03	3,00	-	3,25	3,13	-	0,50	-	0,51	-	1,29	-	1,33	-	0,98	-	1,79	-
Sülfat	mg/L	44,48	37,61	15,44	74,05	51,27	30,76	1,64	95,6	0,60	98,8	3,44	90,9	1,18	97,7	2,84	92,4	2,24	95,6
Fosfat		7,28	5,35	26,54	10,05	7,25	27,87	0,29	94,5	0,44	93,9	0,34	93,6	0,50	93,1	0,29	94,6	0,24	96,7
K <sup>+</sup>		16,47	15,05	8,59	18,67	16,61	11,03	1,66	89,0	1,51	90,9	1,46	90,3	1,22	92,6	2,35	84,4	0,69	95,9
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		12,91	4,40	65,96	11,01	10,60	3,74	0,34	92,3	0,59	94,4	0,07	98,3	1,03	90,2	0,86	80,5	0,59	94,5
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N		2,91	0,99	65,96	2,49	2,39	3,74	0,08	92,3	0,13	94,4	0,02	98,3	0,23	90,2	0,19	80,5	0,13	94,5
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>		1,34	0,79	40,72	3,13	2,18	30,29	0,07	91,4	0,07	96,7	0,09	88,7	0,17	92,1	0,09	89,0	0,10	95,5
TN		18,07	9,38	48,06	17,42	12,08	30,64	1,47	84,3	1,15	90,5	3,04	67,6	1,57	87,0	0,95	89,8	2,20	81,7
TP		2,68	2,23	16,98	4,22	2,31	45,33	0,08	96,3	0,01	99,6	0,06	97,1	0,04	98,1	0,07	96,7	0,06	97,5
pH	-	6,54-7,92	6,00-8,05	-	7,55-8,03	7,55-8,37	-	6,38	-	8,56	-	6,00	-	6,15	-	6,47	-	6,60	-
İletkenlik	µS/cm	822,67	791,04	3,84	921,00	833,25	9,53	47,17	94,0	25,43	96,9	57,22	92,8	30,60	96,3	45,00	94,3	30,13	96,4
Bulanıklık	NTU	4,10	0,46	88,81	17,33	0,32	98,14	0,10	77,7	0,02	94,9	0,16	64,0	0,02	94,7	0,11	76,5	0,01	97,2
AKM	mg/L	9,06	0,79	91,32	26,17	3,72	85,77	0,00	100,0	0,00	100,0	0,20	75,0	0,00	100,0	0,11	86,0	0,00	100,0
TÇM		404,00	387,16	4,17	452,33	408,28	9,74	22,15	94,3	11,60	97,2	27,60	92,9	14,13	96,5	21,47	94,5	13,89	96,6
KOİ		48,57	22,75	53,15	86,93	18,81	78,36	6,66	70,7	2,42	87,2	17,70	22,2	3,31	82,4	2,47	89,1	2,35	87,5
CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	mg/LCaCO <sub>3</sub>	0,00	0,00	-	0,00	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	100,0
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		143,27	138,53	3,31	172,50	157,41	8,75	15,44	88,9	16,40	89,6	18,29	86,8	7,25	95,4	15,34	88,9	8,19	94,8
Fekal Koliform	(kob/100mL)	-	-	-	2x10 <sup>3</sup>	nd	-	-	-	nd	-	-	-	nd	-	-	-	nd	-
Toplam Koliform		-	-	-	2x10 <sup>4</sup>	nd	-	-	-	nd	-	-	-	nd	-	-	-	nd	-

UP150/LFC3, UP150/CPA3 ve UP150/TFC bütünleşik membran sistemlerini karşılaştırdığımızda konvansiyonel parametreler bakımından  $t_0$  için sırasıyla %70,7-100, %22,2-98,3, %76,5-96,7 aralıklarında giderim verimleri elde edildiği görülmektedir.  $t_{son}$  için elde edilen giderim verimleri ise aynı sıralamaya göre %87,2-100, %82,4-100, %81,7-100 şeklindedir. Buna göre performans bakımından en iyi geri kazanım oranı ve süzüntü akısı elde edilen UP150/LFC3 sisteminde, konvansiyonel parametreler için giderim verimi bakımından da diğer sistemlere kıyasla daha iyi kalitede süzüntü sağlandığı belirlenmiştir. Bu nedenle en iyi performans sağlanan UP150/LFC3 bütünleşik membran sistemi süzüntüsüne göre hem kentsel hem de tarımsal sulama suyu kalitesi değerlendirilmiştir.

AATTUT-Tablo E7.1'e göre Sınıf A ve Sınıf B kalitesinde, ayrıca (USEPA, 2004)'e göre girişi kısıtlı sulama alanı ile kentsel ve tarımsal yeniden kullanım bakımından, pH değerinin 6-9 arasında olması beklenmektedir. Bu iki mevzuata göre UP150/LFC3 bütünleşik membran sistemi çıkışında pH değeri hem deney başında hem de deney sonunda istenen seviyededir. (WHO, 2006)'ya göre deney sonunda pH için istenen sınır değerinin bir miktar üzerinde süzüntü elde edilmiştir. (FAO, 1992)'ye göre ise UP150/LFC3 sistemi çıkış suyunun deney sonunda pH açısından damlatmalı sulama sistemleri için kullanımda kısıtlanma derecesi "Şiddetli"dir. Bu nedenle (FAO, 1992)'ye göre UP150/LFC3 sistemi süzüntüsünün damlatmalı sulama için kullanımında pH ayarlaması yapılması gerekmektedir.

AKM ve bulanıklık konsantrasyonları UP150/LFC3 bütünleşik membran sistemi çıkışında deney başı ve sonunda AATTUT-Tablo E7.1, (USEPA, 2004), (WHO, 2006) ve (FAO, 1992) kriterlerine göre istenen düzeydedir. Deney başında ve sonunda elde edilen KOİ çıkış konsantrasyonları sırasıyla 6,66 ve 2,42 mg/L' dir. Bu değerlere göre BOİ<sub>5</sub> konsantrasyonunun da (USEPA, 2004) ve AATTUT mevzuatlarında belirtilen kentsel ve tarımsal yeniden kullanım kriterlerinin altında olması beklenmektedir.

UF/TO bütünleşik membran sistemi deneylerinde ikincil arıtılmış atıksuda yapılan mikrobiyolojik analizlerde fekal ve toplam koliform miktarları sırasıyla ortalama  $2 \times 10^3$  ve  $2 \times 10^4$  kob/100mL olarak belirlenmiştir. Tüm UF/TO bütünleşik sistem deneyleri sonunda ise UF ve TO süzüntülerinde bu mikroorganizmalar tespit

edilemez miktardadır. Bu bakımdan fekal koliform için bu çalışmada yer alan mevzuatlardaki sınır değerler sağlanmıştır. Ancak (USEPA, 2004)'e göre bazı durumlarda virüs ve parazitleri inaktif hale getirmek için daha yüksek kalıntı klor ve/veya temas süresi önerilmektedir. Ayrıca sulama amaçlı geri kazanılmış suda patojen kirliliğin ölçülebilir düzeyde olup olmadığını belirlemek bakımından fekal koliformun günlük olarak izlenmesi gerekmektedir.

SAR değeri ikincil arıtma çıkışında 3,03 ve deney sonunda UP150 membran süzütüsünde 3,13 iken, UP150/LFC3, UP150/CPA3 ve UP150/TFC bütünleşik membran sistemleri süzütülerinde sırasıyla 0,51, 1,33, 1,79'dur. SAR parametresi için ön deneysel çalışmalar ile UF ve NF proseslerinde elde edilen sonuçlar benzerlik göstermektedir. AATTUT-Tablo E7.2' ye göre ikincil arıtma çıkışı ve UF çıkışında SAR bakımından 2. sınıf, UP150/LFC3 bütünleşik membran sistemi çıkışında ise 3. sınıf sulama suyu üretilebilmiştir. Benzer şekilde (WHO, 2006) ve (FAO, 1992) standartlarına göre SAR parametresi için sulama suyunun kullanımda kısıtlanma derecesi aynı sistem için "Şiddetli" olarak belirlenmiştir. Ön deneysel çalışmalarda olduğu gibi UP150/LFC3 sistemi çıkış suyuna KCl ilavesiyle iletkenliği hedef değere getirerek 2. sınıf su elde etmek mümkündür. UP150/LFC3 bütünleşik membran sistemi çıkışında SAR değeri AATTUT-Tablo E7.4'te verilen aralıkların altında kaldığından, kimyasal ilavesi ile sulama suyu sınıfının iyileştirilmesi esnasında sulanacak bitki toleranslarına dikkat etmek gerekmektedir.

AATTUT-Tablo E7.2'ye göre kentsel ikincil arıtma çıkış suyu ve deney sonu UP150 membran süzütüsü, iletkenlik ve TÇM parametreleri bakımından sırasıyla 2. ve 1. sınıf sulama suyu ile eşdeğerdir. UP150/LFC3 bütünleşik membran sisteminde ise deney sonunda iletkenlik için 1. sınıf sulama suyu üretilirken, TÇM için sulama suyu sınıfı aynı kalmıştır. AATTUT-Tablo E7.3'te bitkilerin tuzluluğa olan hassaslıkları açısından bakıldığında; UP150/LFC3 sistemi deney sonu süzütüsü TÇM değeri 500 mg/L' den küçüktür. Bu nedenle tarımsal yeniden kullanımda bitkiler için olumsuz tuzluluk etkisinden söz edilemez. Bor parametresi açısından da TÇM sonuçları benzerlik göstermektedir. (WHO, 2006) ve (FAO, 1992) standartlarına göre UP150/LFC3 bütünleşik membran sistemi deney sonu süzütüsünün, bor parametresi bakımından kullanımda kısıtlanma derecesi "Yok"tur. Bor konsantrasyonu 0,5 mg/L olan UP150/LFC3 bütünleşik membran sistemi deney sonu süzütüsü, AATTUT-

Tablo E7.6’da bitkilerin bora karşı dayanıklılık dereceleri bakımından sadece fasulye, yer fıstığı, buğday, soğan, arpa, börülce ve meyveli ağaçlar için “Hassas” sınıfa girmektedir.

UP150/LFC3 bütünleşik membran sisteminde sodyum parametresi giderim verimi, deney başında %94,4 iken deney sonunda %97,2’ya ulaşarak artış göstermiştir.  $Cl^-$  giderim verimi ise %94,8’den %97,7’e ulaşmıştır. Deney sonu TO süzütüsündeki  $Na^+$  ve  $Cl^-$  konsantrasyonları, hem yüzey sulaması hem de damlatmalı sulama bakımından AATTUT-Tablo E7.2’ye göre 1. sınıfa eşdeğerde sulama suyu üretilebildiğini göstermektedir. Deney sonu süzütüsünün, aynı parametreler için (WHO, 2006) ve (FAO, 1992) standartlarına göre, sulama suyu bakımından kullanımda kısıtlanma derecesi “Yok”tur. AATTUT-Tablo E7.5’te verilen bitkilerin yapraklarına zarar veren klorür konsantrasyonları bakımından; UP150/LFC3 deney sonu süzütüsünde tespit edilen 2,25 mg/L  $Cl^-$  konsantrasyonu, sadece hassas sınıftaki badem, kayısı ve erik bitkileri için etkili olmaktadır.

UP150/LFC3 bütünleşik membran sisteminde TN, TP ve  $NO_3^-$ -N nütrientleri bakımından elde edilen deney sonu giderim verimleri sırasıyla %90,5, %99,6 ve %92,3’ tür. AATTUT-Tablo E7.9’ da verilen BNR+MF+TO+dezenfeksiyon içeren bir proses için geri kazanılmış atıksuda olabilecek nütrient seviyeleri bakımından TP ve  $NO_3^-$ -N konsantrasyonları UP150/LFC3 bütünleşik membran sistemi deney sonu süzütüsünde beklenen düzeydedir. Süzütüdeki 1,15 mg/L TN konsantrasyonu ise AATTUT’ ne göre beklenen düzeyin (<1mg/L) bir miktar üzerinde belirlenmiştir. Ancak elde edilen değer (WHO, 2006)’ya göre sulama için kullanımda kısıtlanma olmayan TN konsantrasyonu <5mg/L’nin altındadır. (FAO, 1992)’ye göre ise  $NO_3^-$ -N için kullanımda kısıtlanma derecesi “Yok” tur.

$Ca^{+2}$ ,  $Mg^{+2}$ ,  $SO_4^{-2}$ ,  $PO_4^{-3}$ ,  $K^+$ ,  $NO_2^-$  ve  $HCO_3^-$  parametreleri için UP150/LFC3 bütünleşik membran sisteminde elde edilen deney sonu giderim verimleri sırasıyla %96,8, %98,9, %98,8, %93,9, %90,9, %96,7 ve %89,6 şeklindedir.

UP150/LFC3, UP150/CPA3 ve UP150/TFC bütünleşik membran sistemlerinde Tablo 3.20’de belirtilen tüm ağır metal ve toksik elementler için deney sonunda elde edilen giderim verimleri sırasıyla %0-99,2; %0-100 ve %0-99,8 arasındadır. Sulama suyu kalitesinin değerlendirilmesi için uygun görülen UP150/LFC3 bütünleşik

membran sisteminde her bir membran çıkışındaki ağır metal ve toksik element konsantrasyonları, AATTUT’nde her türlü zeminde sürekli sulama yapılması durumu için belirtilen sınır değerlerin altındadır. Bitki büyümesi için topraktaki eser element miktarının en aza indirilmesi gerekli olmakla birlikte, ön deneysel çalışmalarda olduğu gibi UP150/LFC3 sistemi deney sonunda da %99,2’ye kadar ağır metal ve toksik element giderim verimi elde edilmiştir. Ayrıca (WHO, 2006) ve (FAO, 1992) kriterlerine göre Fe ve Mn konsantrasyonları açısından UP150/LFC3 sistemi deney sonu süzütüsünün, damlatmalı sulama için kısıtlanma derecesi “Yok” olarak belirlenmiştir.

### 3.3.2. NF<sub>gevşek</sub>/TO bütünleşik membran sistemleri deneyleri

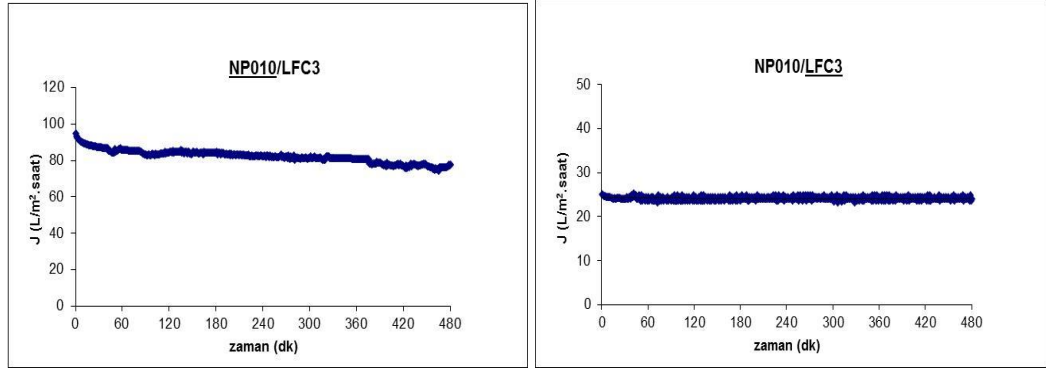
NF<sub>gevşek</sub>/TO bütünleşik membran sistemleri deneylerinde öncelikle NP010 membranı ile TO deneyleri için yeterli süzütü elde etmek amacıyla uzun süreli NF deneyleri yürütülmüştür. NF deneylerinde en iyi filtrasyon koşullarının sağlandığı 30°C sıcaklık, 10 bar membran geçiş basıncı, 600L/sa çapraz akış hızı ve 10 L başlangıç besleme hacminde üç ayrı deney gerçekleştirilmiştir. Besleme akımını konsantre etme şartlarında, minimum %55 geri kazanım sağlanana kadar bu deneyler sürdürülmüştür. 8’ er saat süren üç ayrı deneyde elde edilen ortalama süzütü akısı 85,5 L/m<sup>2</sup>.sa, geri kazanım oranı %57,3 olarak belirlenmiş, VRF değeri ise 2,23-2,42 arasında değişkenlik göstermiştir.

NP010 membranı ile gerçekleştirilen her bir NF deneyi sonunda toplanan kompozit süzütü daha sonra üç farklı TO membranından geçirilmiştir. NF<sub>gevşek</sub> sonrasında 5L başlangıç besleme hacminde gerçekleştirilen TO deneyleri de minimum %55 geri kazanım sağlanana kadar, aynı sıcaklık, çapraz akış hızı ve membran geçiş basıncında yürütülmüştür. Deney sonunda NP010/LFC3, NP010/CPA3, NP010/TFC bütünleşik membran sistemlerinde sırasıyla 23,5, 29,6, 39,4 L/m<sup>2</sup>.sa’ lik akı elde edilmiştir. Aynı sistemlerde belirlenen geri kazanım oranları sırasıyla %55,3, %59,8, %64,2; VRF değerleri ise 2,24, 2,79, 2,80 şeklindedir.

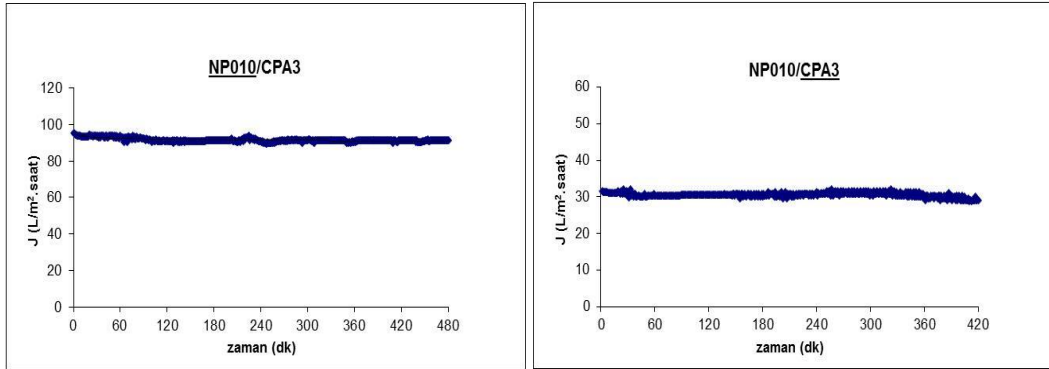
Performans bakımından değerlendirme yapıldığında; NP010/LFC3, NP010/CPA3 ve NP010/TFC bütünleşik membran sistemlerinde TO deneyleri, hedeflenen geri kazanım oranına bağlı olarak sırasıyla 8, 7 ve 5,5 saatlik sürelerde yürütülmüştür.



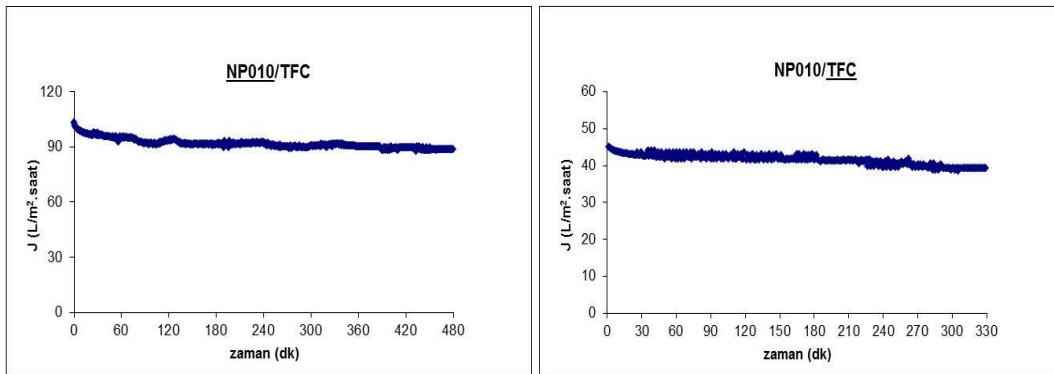
Hedeflenen %55'lik geri kazanım oranı her üç sistemde de sağlanmıştır. Ancak NP010/TFC sisteminde diğer sistemlere göre daha kısa sürede ve yüksek akıda daha iyi geri kazanım oranı elde edildiği belirlenmiştir. Şekil 3.11' de  $NF_{\text{gevşek}}/TO$  bütünlük membran sistemleri deneylerindeki akı-zaman değişimleri verilmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.11.  $NF_{\text{gevşek}}/TO$  bütünlük membran sistemleri deneylerinde akı-zaman değişimleri (a) NP010/LFC3, (b) NP010/CPA3, (c) NP010/TFC

$NF_{\text{gevşek}}/TO$  bütünlük membran sistemleri deneylerinde, deney başında ( $t_0$ ) ve deney sonunda ( $t_{\text{son}}$ ) membran girişinden ve çıkışından alınan anlık numunelerde

Tablo 3.21’de belirtilen parametreler analiz edilmiştir. NP010/LFC3, NP010/CPA3 ve NP010/TFC bütünleşik membran sistemlerini karşılaştırdığımızda konvansiyonel parametreler bakımından elde edilen giderim verimleri sırasıyla  $t_0$  için %0-100, %46,4-100, %63,6-100,  $t_{son}$  için %10,3-100, %64,6-100, %81,6-100 şeklindedir. Buna göre performans bakımından en iyi geri kazanım oranı ve süzüntü akışı elde edilen NP010/TFC sisteminde, konvansiyonel parametreler için giderim verimi bakımından da diğer sistemlere kıyasla daha iyi kalitede süzüntü sağlandığı belirlenmiştir. Bu nedenle en iyi performans sağlanan NP010/TFC bütünleşik membran sistemi süzüntüsüne göre hem kentsel hem de tarımsal sulama suyu kalitesi değerlendirilmiştir.

AATTUT-Tablo E7.1’e göre Sınıf A ve Sınıf B kalitesinde, ayrıca (USEPA, 2004)’e göre girişi kısıtlı sulama alanı ile kentsel ve tarımsal yeniden kullanım bakımından, NP010/TFC bütünleşik membran sistemi çıkışında pH değeri, hem deney başında hem de deney sonunda istenen seviyededir. (WHO, 2006)’ya göre de deney sonunda elde edilen süzüntünün pH’ı istenen sınır değer 6,5-8 arasındadır. (FAO, 1992)’ye göre ise pH açısından kullanımda kısıtlanma derecesi “Yok”tur. Bu durum damlatmalı sulama bakımından önemlidir.

NP010/TFC bütünleşik membran sistemi çıkışında deney başı ve sonunda AKM ve bulanıklık konsantrasyonları, AATTUT-Tablo E7.1, (USEPA, 2004) kriterlerine göre hem kentsel hem de tarımsal yeniden kullanım için istenen düzeydedir. AKM için (WHO, 2006) kriteri de sağlanmıştır. KOİ çıkış konsantrasyonları ise deney başında ve sonunda sırasıyla 4,26 ve 2,51 mg/L’ dir. Bu değerlere göre BOİ<sub>5</sub> konsantrasyonunun da (USEPA, 2004) ve AATTUT mevzuatlarında belirtilen kentsel ve tarımsal yeniden kullanım kriterlerinin altında olması beklenmektedir.

Tablo 3.21. NF<sub>gevşek</sub>/TO bütünleşik membran sistemlerinde deney başı (t<sub>0</sub>) ve deney sonu (t<sub>son</sub>) elde edilen analiz sonuçları ve giderim verimleri

Parametre	Birim	NP010						NP010/LFC3				NP010/CPA3				NP010/TFC			
		t <sub>0</sub>			t <sub>son</sub>			t <sub>0</sub>		t <sub>son</sub>		t <sub>0</sub>		t <sub>son</sub>		t <sub>0</sub>		t <sub>son</sub>	
		Giriş Ortalama	Çıkış Ortalama	R(%) Ortalama	Giriş Ortalama	Çıkış Ortalama	R(%) Ortalama	Çıkış	R(%)	Çıkış	R(%)	Çıkış	R(%)	Çıkış	R(%)	Çıkış	R(%)	Çıkış	R(%)
Al	µg/L	30,79	16,91	45,1	41,12	23,10	43,8	5,30	68,7	12,34	46,6	7,88	53,4	5,47	76,3	13,29	21,4	4,61	80,1
As		1,01	0,88	13,3	1,16	0,86	25,4	0,11	87,8	0,07	91,4	0,11	87,0	0,06	92,6	0,12	86,3	0,05	93,7
Be		0,01	0,01	0,0	0,01	0,01	38,7	0,01	0,0	0,00	61,5	0,01	0,0	0,01	0,0	0,01	0,0	0,01	0,0
Cd		0,03	0,02	22,1	0,05	0,03	42,9	0,01	68,4	0,00	96,5	0,02	0,0	0,01	81,3	0,02	0,0	0,02	31,6
Cr		8,01	6,65	17,0	12,37	7,35	40,5	2,93	56,0	3,35	54,5	1,56	76,5	0,80	89,1	2,39	64,1	0,75	89,8
Co		0,40	0,22	44,6	0,68	0,23	66,5	0,01	95,0	0,00	98,4	0,02	91,9	0,01	96,5	0,04	83,9	0,00	97,9
Cu		7,17	5,27	26,5	22,96	10,00	56,5	0,51	90,4	0,34	96,6	1,09	79,3	0,12	98,8	0,74	86,0	0,15	98,5
Fe		140,23	27,74	80,2	171,97	18,31	89,4	0,51	98,2	18,31	0,0	4,95	82,2	0,38	97,9	6,04	78,2	0,31	98,3
Pb		0,92	0,70	23,8	2,67	1,44	46,2	0,08	88,8	0,19	87,1	0,19	72,8	0,07	95,3	0,70	0,0	0,67	53,6
Li		1,96	1,77	9,9	2,07	1,79	13,8	0,17	90,5	0,11	93,6	0,34	81,0	0,11	93,8	0,20	88,5	0,15	91,7
Mn		43,46	29,88	31,2	42,27	25,48	39,7	1,68	94,4	1,43	94,4	0,78	97,4	0,32	98,8	2,01	93,3	0,24	99,1
Mo		0,39	0,39	0,0	0,91	0,61	33,2	0,09	76,3	0,04	93,4	0,12	68,7	0,06	89,5	0,08	78,9	0,04	92,9
Ni		11,12	8,95	19,5	25,88	8,83	65,9	0,29	96,8	0,09	99,0	0,54	94,0	0,16	98,2	1,34	85,1	0,23	97,4
Se		0,25	0,17	35,1	0,31	0,23	26,1	0,09	43,3	0,23	0,0	0,05	67,5	0,04	81,6	0,07	60,1	0,15	34,3
V		1,33	1,20	9,6	1,38	1,22	11,4	0,21	82,6	0,18	85,1	0,18	84,7	0,08	93,7	0,17	85,4	0,12	90,0
Zn		74,43	61,25	17,7	83,26	49,91	40,1	19,69	67,9	21,09	57,7	6,65	89,1	4,42	91,1	41,66	32,0	10,38	79,2
B	mg/L	0,50	0,50	0,0	0,50	0,50	0,0	0,50	0,0	0,50	0,0	0,50	0,0	0,50	0,0	0,50	0,0	0,50	0,0
Hg	µg/L	2,24	1,08	51,7	4,15	1,00	75,9	0,81	25,4	0,06	93,6	0,82	24,7	0,23	77,1	0,39	63,9	0,22	78,1
F <sup>-</sup>	mg/L	0,17	0,14	16,7	0,17	0,14	16,7	0,02	87,5	0,01	91,7	0,02	87,5	0,01	91,7	0,02	87,5	0,01	93,8
Cl <sup>-</sup>		97,13	92,21	5,1	103,93	98,83	4,9	3,78	95,9	1,89	98,1	5,01	94,6	2,11	97,9	4,08	95,6	1,91	98,1
Na <sup>+</sup>		84,69	74,51	12,0	95,19	80,06	15,9	3,08	95,9	2,80	96,5	4,99	93,3	3,16	96,0	5,45	92,7	4,05	94,9

Tablo 3.21.(Devam)  $NF_{\text{gevşek}}/TO$  bütünleşik membran sistemlerinde deney başı ( $t_0$ ) ve deney sonu ( $t_{\text{son}}$ ) elde edilen analiz sonuçları ve giderim verimleri

Parametre	Birim	NP010						NP010/LFC3				NP010/CPA3				NP010/TFC			
		$t_0$			$t_{\text{son}}$			$t_0$		$t_{\text{son}}$		$t_0$		$t_{\text{son}}$		$t_0$		$t_{\text{son}}$	
		Giriş Ortalama	Çıkış Ortalama	R(%) Ortalama	Giriş Ortalama	Çıkış Ortalama	R(%) Ortalama	Çıkış	R(%)	Çıkış	R(%)	Çıkış	R(%)	Çıkış	R(%)	Çıkış	R(%)	Çıkış	R(%)
$Ca^{+2}$	mg/L	45,79	35,86	21,7	56,89	42,68	25,0	0,80	97,8	0,49	98,9	1,31	96,3	0,45	99,0	1,06	97,0	0,17	99,6
$Mg^{+2}$		5,83	4,62	20,8	6,98	5,08	27,3	0,09	98,0	0,04	99,2	0,15	96,7	0,04	99,3	0,22	95,2	0,03	99,5
SAR	-	3,13	3,11	-	3,17	3,08	-	0,87	-	1,03	-	1,10	-	1,22	-	1,26	-	2,39	-
Sülfat	mg/L	48,10	20,39	57,6	78,07	31,79	59,3	0,76	96,3	0,42	98,7	1,00	95,1	0,65	98,0	0,95	95,3	0,48	98,5
Fosfat		9,07	4,74	47,7	12,03	6,24	48,2	0,03	99,3	0,22	96,5	0,05	99,0	0,18	97,1	0,13	97,2	0,11	98,3
$K^+$		15,46	12,43	19,6	15,81	13,11	17,1	0,77	93,8	1,10	91,6	1,22	90,2	0,58	95,6	0,37	97,0	0,51	96,1
$NO_3^-$		47,93	46,51	3,0	51,73	49,70	3,9	1,94	95,8	1,62	96,7	3,16	93,2	4,44	91,1	3,98	91,5	2,22	95,5
$NO_3^-N$		10,82	10,50	3,0	11,68	11,35	2,8	0,44	95,8	0,37	96,7	0,71	93,2	1,01	91,1	0,90	91,5	0,51	95,5
$NO_2^-$		0,32	0,27	13,3	0,58	0,56	4,8	0,27	0,0	0,05	91,7	0,03	87,5	0,03	94,4	0,02	91,7	0,02	97,1
TN		30,93	13,57	56,1	31,27	22,36	28,5	0,66	95,2	0,98	95,6	2,81	79,3	5,22	76,7	1,76	87,0	4,11	81,6
TP		2,71	1,21	55,3	4,29	1,90	55,7	0,01	99,1	0,01	99,6	0,02	98,7	0,03	98,6	0,02	98,4	0,003	99,8
pH	-	7,39-7,50	7,18-7,99	-	7,20-8,19	7,33-8,22	-	6,00	-	6,11	-	6,53	-	7,05	-	6,45	-	6,92	-
İletkenlik	$\mu S/cm$	872,67	715,68	18,0	981,67	797,57	18,8	27,60	96,1	21,31	97,3	40,79	94,3	31,80	96,0	40,79	94,3	28,76	96,4
Bulanıklık	NTU	5,87	0,68	88,4	7,75	0,60	92,3	0,11	84,3	0,03	94,5	0,25	63,6	0,03	95,3	0,09	87,3	0,03	95,4
AKM	mg/L	11,67	2,76	76,3	12,33	3,96	67,9	0,00	100,0	0,00	100,0	0,00	100,0	0,00	100,0	0,00	100,0	0,00	100,0
TÇM		427,00	350,70	17,9	485,00	389,25	19,7	13,04	96,3	9,71	97,5	19,22	94,5	14,33	96,3	19,22	94,5	13,30	96,6
KOİ		34,78	11,71	66,3	64,47	18,20	71,8	8,50	27,4	16,32	10,3	6,27	46,4	6,45	64,6	4,26	63,6	2,51	86,2
$CO_3^{2-}$	mg/LCaCO <sub>3</sub>	0,00	0,00	-	0,00	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	100,0
$HCO_3^-$		148,44	122,54	17,4	169,63	137,28	19,1	7,71	93,7	17,49	87,3	13,18	89,2	11,48	91,6	11,05	91,0	10,09	92,6
Fekal Koliform	(kob/ 100mL)	-	-	-	$1 \times 10^2$	nd	-	-	-	nd	-	-	-	nd	-	-	-	nd	-
Toplam Koliform		-	-	-	$3 \times 10^3$	nd	-	-	-	nd	-	-	-	nd	-	-	-	nd	-

NF<sub>gevşek</sub>/TO bütünleşik membran sistemi deneylerinde ikincil arıtılmış atıksuda yapılan mikrobiyolojik analizlerde fekal ve toplam koliform miktarları sırasıyla ortalama  $1 \times 10^2$  ve  $3 \times 10^3$  kob/100mL olarak belirlenmiştir. Tüm bütünleşik sistem deneyleri sonunda ise NF<sub>gevşek</sub> ve TO süzüntülerinde bu mikroorganizmalar tespit edilemez miktardadır. Bu bakımdan fekal koliform için bu çalışmada yer alan mevzuatlardaki sınır değerler sağlanmıştır. Ancak sulamada kullanılacak geri kazanılmış suda AATTUT-Tablo E7.1 ve (USEPA, 2004)'e göre fekal koliformun günlük olarak izlenmesi gerekmektedir.

SAR değeri ikincil arıtma çıkışında 3,13 ve deney sonunda NP010 membran süzüntüsünde 3,08 iken, NP010/LFC3, NP010/CPA3 ve NP010/TFC bütünleşik membran sistemleri süzüntülerinde sırasıyla 1,03, 1,22, 2,39' dur. Ön deneysel çalışmalar, UF ve NF prosesleri ile UF/TO bütünleşik membran sistemlerinde elde edilen sonuçlara benzer olarak; ikincil arıtma çıkışında ve NP010 membran süzüntüsünde AATTUT-Tablo E7.2' ye göre SAR bakımından 2. sınıf, NP010/TFC bütünleşik membran sistemi çıkışında ise 3. sınıf sulama suyu üretilebilmiştir. Benzer şekilde aynı sistem çıkışında (WHO, 2006) ve (FAO, 1992) standartlarına göre SAR parametresi için sulama suyunun kullanımda kısıtlanma derecesi "Şiddetli" olarak belirlenmiştir. SAR bakımından 2. sınıf su elde etmek için NP010/TFC sistemi çıkış suyuna da KCl ilave edilmesi önerilebilir. Ancak NP010/TFC bütünleşik membran sistemi çıkışında SAR değeri AATTUT-Tablo E7.4'te verilen aralıkların altında kaldığından, sulama suyu sınıfının iyileştirilmesi esnasında sulanacak bitki toleranslarına dikkat etmek gerekmektedir.

AATTUT-Tablo E7.2'ye göre kentsel ikincil arıtma çıkış suyu ve deney sonu NP010 membran süzüntüsü, iletkenlik ve TÇM parametreleri bakımından sırasıyla 2. ve 1. sınıf sulama suyu ile eşdeğerdir. NP010/TFC bütünleşik membran sisteminde ise deney sonunda iletkenlik için 1. sınıf sulama suyu üretilirken, TÇM için sulama suyu sınıfı korunmuştur. Bu sistemde de UP150/LFC sisteminde olduğu gibi TÇM konsantrasyonu 500 mg/L'nin altında olduğundan, AATTUT-Tablo E7.3'e göre tarımsal yeniden kullanımda bitkiler için olumsuz etki söz konusu değildir. Bor parametresi açısından da TÇM sonuçları benzerdir. (WHO, 2006) ve (FAO, 1992) standartlarına göre ise NP010/TFC bütünleşik membran sistemi deney sonu süzüntüsünün, bor parametresi bakımından kullanımda kısıtlanma derecesi "Yok"tur.

UP150/LFC3 sistemi süzütüsünde olduğu gibi bor konsantrasyonu 0,5 mg/L olan NP010/TFC bütünleşik membran sistemi deney sonu süzütüsü de, AATTUT-Tablo E7.6'da bitkilerin bora karşı dayanıklılık dereceleri bakımından aynı bitkiler için "Hassas" sınıfa girmektedir.

NP010/TFC bütünleşik membran sisteminde Na<sup>+</sup> parametresi giderim verimi, deney süresince %92,7' den %94,9' a kadar artmıştır. Cl<sup>-</sup> giderim verimi ise deney sonunda %98,1' e ulaşmıştır. Aynı sistemde deney sonunda elde edilen Na<sup>+</sup> ve Cl<sup>-</sup> konsantrasyonları sırasıyla 4,05 ve 1,91 m/L' dir. AATTUT-Tablo E7.2' ye göre Na<sup>+</sup> parametresi bakımından NP010/TFC sisteminde yüzey sulaması için 2. sınıf, damlatmalı sulama için 1.sınıf kalitesinde süzütü üretilebilmiştir. Cl<sup>-</sup> parametresi bakımından ise hem yüzeysel hem de damlatmalı sulama için deney sonu süzütüsü 1. sınıf sulama suyu ile eşdeğerdir. NP010/TFC bütünleşik membran sistemi deney sonu süzütüsünde Cl<sup>-</sup> konsantrasyonu 1,91 mg/L'dir. Bu nedenle bu sistemde elde edilen süzütü de AATTUT-Tablo E7.5'te verilen bitkilerin yapraklarına zarar veren klorür konsantrasyonları bakımından sadece badem, kayısı ve erik bitkileri için hassas olarak nitelendirilebilir.

TN, TP ve NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N nütientleri bakımından NP010/TFC bütünleşik membran sisteminde elde edilen deney sonu giderim verimleri sırasıyla %81,6, %99,8 ve %95,5' tir. AATTUT-Tablo E7.9'da verilen nütient seviyeleri bakımından TP ve NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N konsantrasyonları UP150/LFC3 sisteminde olduğu gibi NP010/TFC sistemi deney sonu süzütüsünde de beklenen düzeydedir. NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N konsantrasyonu (FAO, 1992) kriterini de sağlamaktadır. Süzütüdeki 4,11 mg/L TN konsantrasyonu (WHO, 2006)'ya göre sulama için kullanımda kısıtlanma derecesi "Yok" şeklinde belirlenen düzeyin altındadır. Ca<sup>+2</sup>, Mg<sup>+2</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>, K<sup>+</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup> ve HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> parametreleri için NP010/TFC bütünleşik membran sisteminde elde edilen deney sonu giderim verimleri sırasıyla %99,6, %99,5, %98,5, %98,3, %96,1, %97,1 ve %92,6 şeklindedir.

NP010/LFC3, NP010/CPA3 ve NP010/TFC bütünleşik membran sistemlerinde Tablo 3.21'de belirtilen tüm ağır metal ve toksik elementler için deney sonunda elde edilen giderim verimleri sırasıyla %0-99,0; %0-98,8 ve %0-99,1 arasındadır. Bu elementlerden yalnızca Hg parametresi NP010 membran girişinde (USEPA, 2004)'te

belirtilen sınır değerin üzerindedir. Diğer ağır metal ve toksik elementler için membran giriş ve çıkış konsantrasyonlarının, AATTUT ve (USEPA, 2004)' te belirtilen sınır değerlerin altında olduğu görölmektedir. Sulama suyu kalitesinin değerlendirilmesi için uygun görölen NP010/TFC bütünleşik membran sistemine bakıldığında; Hg giderim veriminin deney sonunda %63,9' dan %78,1' e kadar arttığı belirlenmiştir. Elde edilen 0,22 mg/L Hg konsantrasyonu ise (USEPA, 2004)'te verilen sınır değeri sağlamaktadır. (WHO, 2006) ve (FAO, 1992) kriterlerinde yer alan Fe ve Mn konsantrasyonları açısından, NP010/TFC sisteminde elde edilen süzöntü damlatmalı sulamada kullanıma uygun niteliktedir.

### 3.3.3. UF/ NF<sub>gevşek</sub> ve UF/ NF<sub>sıkı</sub> bütünleşik membran sistemleri deneyleri

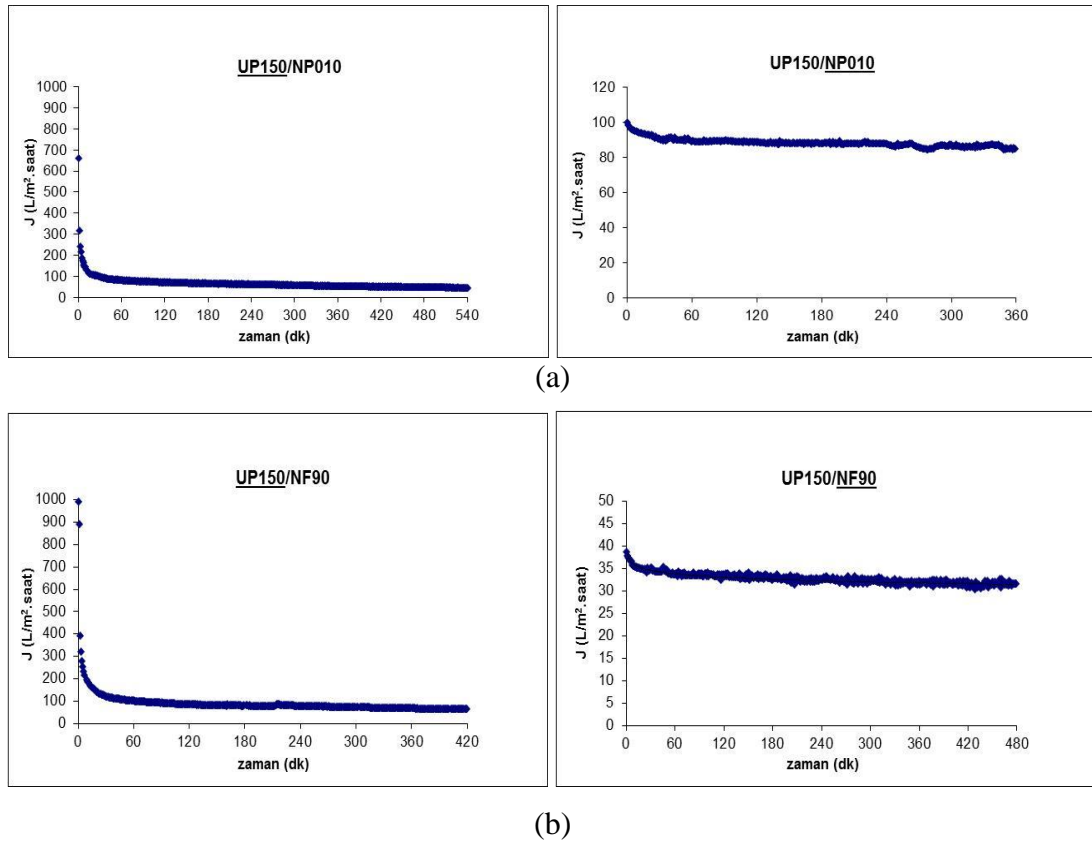
UF/NF<sub>gevşek</sub> ve UF/NF<sub>sıkı</sub> bütünleşik membran sistemleri deneylerinde öncelikle deney sonunda minimum %75 geri kazanım oranı sağlanacak şekilde 22,5°C sıcaklık, 4 bar membran geçiş basıncı, 600L/sa çapraz akış hızı ve 10 L başlangıç besleme hacminde UP150 membranı ile uzun süreli UF deneyleri yürütölmüştür. UF sonrasında aynı sıcaklık ve çapraz akış hızı ile 10 bar membran geçiş basıncında, 8L başlangıç besleme hacminde NF<sub>gevşek</sub> ve NF<sub>sıkı</sub> membranları ile gerçekleştirilen NF deneyleri, minimum %55 geri kazanım sağlanacak şekilde sürdürölmüştür.

UF/NF<sub>gevşek</sub> bütünleşik membran sisteminde, ikincil arıtılmış atıksuyun UP150 membranından geçirilerek NP010 membranı ile yapılacak deneyde yeterli miktarda kompozit süzöntü elde edilmesi için 9 saatlik süre harcanmıştır. Deney sonunda UP150 membranı ile %84,4 oranında geri kazanım sağlanırken, elde edilen VRF değeri ise 6,4' tür. Daha sonra kompozit süzöntünün NP010 membranından 6 saat süre ile geçirilmesi sonucunda elde edilen geri kazanım oranı %56,4 ve VRF değeri ise 2,3 olarak belirlenmiştir.

UF/NF<sub>sıkı</sub> bütünleşik membran sisteminde, ikincil arıtılmış atıksuyun UP150 membranından geçirilerek NF90 membranı ile yapılacak deneyde yeterli miktarda kompozit süzöntü elde edilmesi için harcanan süre 7 saattir. UF/NF<sub>gevşek</sub> bütünleşik membran sistemi UF deneyine göre bu sürenin daha kısa oluşunun atıksu karakterizasyonu ile ilgili olduğu düşünölmektedir. Deney sonunda UP150 membranı ile 61,4 L/m<sup>2</sup>.sa süzöntü akışı, %85,3 oranında geri kazanım sağlanırken, elde edilen VRF değeri ise 6,8' dir. UF sonrası elde edilen kompozit süzöntünün NF90

membranından 8 saat süre ile geçirilmesi sonucunda elde edilen süzüntü akısı 31,5 L/m<sup>2</sup>.sa, geri kazanım oranı %26,1, VRF değeri ise 1,35' tir. Bu verilere göre UF/NF<sub>gevşek</sub> bütünlük membran sisteminde, UF/NF<sub>sıkı</sub> sistemine göre daha kısa sürede ve yüksek akıda daha iyi geri kazanım oranı elde edildiği belirlenmiştir. Şekil 3.12' de UF/NF<sub>gevşek</sub> ve UF/NF<sub>sıkı</sub> bütünlük membran sistemleri deneylerindeki akı-zaman değişimleri verilmektedir.

UP150/NP010 ve UP150/NF90 bütünlük membran sistemleri deneylerinde, deney başında (t<sub>0</sub>) ve deney sonunda (t<sub>son</sub>) membran girişinden ve çıkışından alınan anlık numunelerde Tablo 3.22'de belirtilen parametreler analiz edilmiştir. Konvansiyonel parametreler bakımından t<sub>son</sub> için UP150/NP010 sisteminde %1,6-100, UP150/NF90 sisteminde %35,2-100 arasında giderim verimi elde edilmiştir. Tüm ağır metal ve toksik elementler bakımından t<sub>son</sub> için elde edilen giderim verimleri ise sistemlerin ikisinde de %0-99,8 arasındadır.



Şekil 3.12. UF/NF<sub>gevşek</sub> ve UF/NF<sub>sıkı</sub> bütünlük membran sistemleri deneylerinde akı-zaman değişimleri (a) UP150/NP010, (b) UP150/NF90



Tablo 3.22. UF/NF<sub>gevşek</sub> ve UF/NF<sub>sıkı</sub> bütünleşik membran sistemlerinde deney başı (t<sub>0</sub>) ve deney sonu (t<sub>son</sub>) elde edilen analiz sonuçları ve giderim verimleri

Parametre	Birim	UP150						UP150/NP010				UP150/NF90			
		t <sub>0</sub>			t <sub>son</sub>			t <sub>0</sub>		t <sub>son</sub>		t <sub>0</sub>		t <sub>son</sub>	
		Giriş Ortalama	Çıkış Ortalama	R(%) Ortalama	Giriş Ortalama	Çıkış Ortalama	R(%) Ortalama	Çıkış	R(%)	Çıkış	R(%)	Çıkış	R(%)	Çıkış	R(%)
Al	µg/L	53,88	37,67	30,10	83,64	50,45	39,67	21,20	43,7	33,63	33,3	29,48	21,7	6,85	86,4
As		0,65	0,65	0,00	0,84	0,70	16,16	0,65	0,0	0,55	21,1	0,65	0,0	0,12	82,6
Be		0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,0	0,01	0,0	0,01	0,0	0,01	0,0
Cd		0,04	0,04	10,64	0,15	0,07	54,27	0,02	44,2	0,02	74,2	0,00	88,2	0,04	38,5
Cr		3,49	2,79	20,00	9,75	2,86	70,72	1,74	37,7	1,41	50,7	1,89	32,1	1,46	49,0
Co		0,25	0,19	22,58	0,65	0,27	57,90	0,07	65,9	0,09	66,1	0,01	96,2	0,00	98,6
Cu		17,85	17,78	0,38	202,53	55,75	72,47	4,29	75,8	10,34	81,4	2,91	83,7	2,40	95,7
Fe		124,72	90,17	27,70	445,67	191,78	56,97	0,20	99,8	0,30	99,8	0,06	99,9	0,46	99,8
Pb		1,80	1,80	0,00	11,50	2,68	76,65	0,04	97,8	0,55	79,5	0,34	81,2	0,25	90,7
Li		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mn		38,69	36,71	5,13	30,29	24,89	17,80	26,86	26,8	17,37	30,2	1,43	96,1	0,52	97,9
Mo		0,46	0,34	26,76	0,78	0,77	1,22	0,14	60,0	0,28	64,3	0,17	49,1	0,15	80,2
Ni		11,15	5,48	50,87	28,81	10,15	64,76	1,81	67,0	3,56	64,9	0,54	90,2	0,13	98,8
Se		0,26	0,13	50,42	0,33	0,30	10,95	0,06	50,5	0,17	43,3	0,09	33,3	0,14	53,4
V		1,13	1,07	5,63	1,39	1,21	13,20	0,91	15,1	0,97	19,4	0,33	69,5	0,21	82,4
Zn		122,40	104,62	14,52	165,74	66,66	59,78	45,11	56,9	20,32	69,5	26,84	74,3	11,22	83,2
B	mg/L	0,088	0,071	19,47	0,089	0,088	1,07	0,071	0,0	0,09	0,0	0,06	13,4	0,05	44,6
Hg	µg/L	1,01	0,46	54,55	0,58	0,33	42,43	0,26	44,0	0,08	76,2	0,33	28,8	0,07	80,0
F <sup>-</sup>	mg/L	0,18	0,12	30,74	0,18	0,14	20,42	0,10	14,7	0,12	15,0	0,04	64,0	0,05	64,6
Cl <sup>-</sup>		91,99	91,48	0,55	90,30	90,30	0,00	84,72	7,4	88,88	1,6	14,06	84,6	13,40	85,2
Na <sup>+</sup>		85,60	84,05	1,81	101,05	91,01	9,93	69,73	17,0	74,12	18,6	13,23	84,3	14,09	84,5

Tablo 3.22.(Devam) UF/NF<sub>gevşek</sub> ve UF/NF<sub>sıkı</sub> bütünleşik membran sistemlerinde deney başı (t<sub>0</sub>) ve deney sonu (t<sub>son</sub>) elde edilen analiz sonuçları ve giderim verimleri

Parametre	Birim	UP150						UP150/NP010				UP150/NF90			
		t <sub>0</sub>			t <sub>son</sub>			t <sub>0</sub>		t <sub>son</sub>		t <sub>0</sub>		t <sub>son</sub>	
		Giriş Ortalama	Çıkış Ortalama	R(%) Ortalama	Giriş Ortalama	Çıkış Ortalama	R(%) Ortalama	Çıkış	R(%)	Çıkış	R(%)	Çıkış	R(%)	Çıkış	R(%)
Ca <sup>+2</sup>	mg/L	44,85	43,80	2,34	56,75	47,67	16,00	29,60	32,4	32,48	31,9	0,68	98,4	0,26	99,5
Mg <sup>+2</sup>		5,23	4,96	5,07	6,08	5,39	11,43	3,86	22,2	4,00	25,7	0,14	97,1	0,09	98,3
SAR	-	3,22	3,21	-	3,40	3,33	-	3,20	-	3,26	-	3,81	-	6,12	-
Sülfat	mg/L	45,69	35,93	21,36	86,52	55,95	35,33	12,32	65,7	19,85	64,5	1,31	96,4	1,64	97,1
Fosfat		4,22	3,79	10,23	7,95	4,96	37,68	1,70	55,2	2,15	56,7	0,78	79,3	0,66	86,7
K <sup>+</sup>		16,64	14,49	12,88	20,37	16,83	17,37	11,22	22,6	13,36	20,6	1,86	87,1	2,12	87,4
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		0,56	0,28	49,01	0,61	0,45	25,80	0,17	40,7	0,29	35,3	0,13	53,0	0,22	50,3
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N		0,13	0,06	49,01	0,14	0,10	25,80	0,04	40,7	0,07	35,3	0,03	53,0	0,05	50,3
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>		0,83	0,43	48,90	3,03	0,92	69,54	0,39	8,3	0,85	8,2	0,14	67,8	0,29	68,8
TN		26,28	21,66	17,57	36,43	24,79	31,93	12,84	40,7	9,05	63,5	14,18	34,5	9,27	62,6
TP		2,09	1,16	44,30	4,05	1,80	55,53	0,49	58,2	0,73	59,7	0,53	54,3	0,04	97,6
pH	-	7,90-7,97	7,88-7,91	-	8,19-8,30	8,09-8,57	-	7,96	-	8,30	-	6,60	-	7,67	-
İletkenlik	µS/cm	941,50	866,55	7,96	1035,50	919,54	11,20	684,85	21,0	717,72	21,9	118,77	86,3	134,36	85,4
Bulanıklık	NTU	5,91	0,12	98,01	35,55	0,30	99,15	0,01	91,7	0,02	92,1	0,06	48,2	0,20	35,2
AKM	mg/L	13,50	2,43	81,97	46,00	4,81	89,53	0,00	100,0	0,00	100,0	0,00	100,0	0,00	100,0
TÇM		461,50	425,58	7,78	510,50	451,52	11,55	335,70	21,1	351,30	22,2	55,53	87,0	63,28	86,0
KOİ		56,00	28,05	49,92	151,20	33,18	78,05	23,86	14,9	15,01	54,8	12,12	56,8	3,50	89,4
CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	mg/L CaCO <sub>3</sub>	0,00	0,00	-	0,00	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	100,0
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		223,15	209,49	6,12	262,55	250,83	4,46	157,17	25,0	195,65	22,0	23,23	88,9	38,10	84,8
Fekal Koliform	(kob/ 100mL)	-	-	-	4x10 <sup>4</sup>	nd	-	-	-	nd	-	-	-	nd	-
Toplam Koliform		-	-	-	5x10 <sup>5</sup>	nd	-	-	-	nd	-	-	-	nd	-

Her iki bütünleşik membran sistemi çıkışında hem deney başında hem de deney sonunda pH değeri, AATTUT-Tablo E7.1 ve (USEPA, 2004)'e göre kentsel ve tarımsal yeniden kullanım ayrıca girişi kısıtlı sulama alanları bakımından istenen seviyededir. (WHO, 2006)'ya göre deney sonunda UP150/NP010 sisteminde elde edilen süzütünün pH'ı istenen sınır değer bir miktar üzerinde iken UP150/NF90 sisteminde bu kriter sağlanmıştır.

AKM ve bulanıklık konsantrasyonları bakımından her iki sistemde de deney başı ve sonunda AATTUT-Tablo E7.1, (USEPA, 2004), (WHO, 2006) ve (FAO,1992) kriterlerine uygun süzütüler elde edilmiştir. UP150/NP010 ve UP150/NF90 bütünleşik membran sistemlerinde deney sonu KOİ çıkış konsantrasyonları sırasıyla 15,01 ve 3,5 mg/L ve giderim verimleri %54,8 ve %89,4 değerindedir. Bu değerlere göre BOİ<sub>5</sub> konsantrasyonunun da (USEPA, 2004) ve AATTUT kriterlerinin altında olması beklenmektedir.

UP150/NP010 ve UP150/NF90 bütünleşik membran sistemleri deneylerinde ikincil arıtılmış atıksuda yapılan mikrobiyolojik analizlerde fekal ve toplam koliform miktarları sırasıyla ortalama  $4 \times 10^4$  ve  $5 \times 10^5$  kob/100mL olarak belirlenmiştir. Her iki bütünleşik sistem deneyleri sonunda ise UF ve NF süzütülerinde bu mikroorganizmalar tespit edilemez miktardadır. Bu bakımdan fekal koliform için bu çalışmada yer alan mevzuatlardaki sınır değerler sağlanmıştır. Ancak sulamada kullanılacak geri kazanılmış suda AATTUT-Tablo E7.1 ve (USEPA, 2004)'e göre fekal koliformun günlük olarak izlenmesi gerekmektedir.

SAR değeri ikincil arıtma çıkışında 3,22 ve deney sonunda UP150 membran süzütüsünde 3,33 iken, UP150/NP010 ve UP150/NF90 bütünleşik membran sistemleri deney sonu süzütülerinde sırasıyla 3,26 ve 6,12'dir. AATTUT-Tablo E7.2'ye göre ikincil arıtma çıkışında ve UP150 membran süzütüsünde SAR bakımından 2. sınıf, UP150/NP010 ve UP150/NF90 bütünleşik membran sistemleri çıkışında ise sırasıyla 2. ve 3. sınıf sulama suyu üretilebilmiştir. Tüm sistemler kıyaslandığında SAR değeri bakımından 2. sınıf kalitesinde sulama suyu üretilebilen tek sistem UP150/NP010 bütünleşik membran sistemidir. Her iki bütünleşik membran sistemi çıkışında SAR değerleri AATTUT-Tablo E7.4'te verilen 2-8 arasındadır. Bu aralıkta SAR değerine sahip sulama suyu yaprak döken meyve

ağaçları, turunçgiller ve avokado bitki türleri için yaprakta yanma etkisi göstermektedir. Kimyasal ilavesi ile sulama suyu sınıfının iyileştirilmesi durumunda sulanacak diğer bitki toleranslarına da dikkat etmek gerekmektedir.

AATTUT-Tablo E7.2'ye göre deney sonu UP150 membran süzütüsü, iletkenlik ve TÇM parametreleri bakımından sırasıyla 2. ve 1. sınıf sulama suyu ile eşdeğerdir. UP150/NP010 bütünleşik membran sistemi deney sonunda her iki parametre için sulama suyu sınıfları korunurken, UP150/NF90 bütünleşik membran sistemi deney sonunda iletkenlik ve TÇM parametreleri bakımından 1. sınıf sulama suyu elde edilmiştir. Diğer en iyi bütünleşik membran sistemlerinde olduğu gibi bu iki sistemde de elde edilen süzütüler, AATTUT-Tablo E7.3'e bitkilerin tuzluluğa hassasiyeti göre bakımından tarımsal sulamaya elverişlidir. İki sistemde de membran giriş ve çıkışlarında bor parametresi için tüm ulusal ve uluslararası limitler sağlanmıştır.

AATTUT-Tablo E7.2'ye göre Na<sup>+</sup> parametresi bakımından her iki sistem çıkışında yüzey sulaması için 3. sınıf su elde edilmiştir. Damlatmalı sulama için UP150/NP010 ve UP150/NF90 sistemleri çıkışında sırasıyla 2. ve 1. sınıf kalitesinde süzütü üretilebilmiştir. Cl<sup>-</sup> parametresi bakımından da her iki sisteme ait deney sonu süzütüleri, hem damlatmalı hem de yüzey sulaması için 1. sınıf sulama suyu sınır değerleri ile uyumludur. AATTUT-Tablo E7.5'te verilen bitkilerin yapraklarına zarar veren klorür konsantrasyonları bakımından; UP150/LFC3 ve NP010/TFC sistemlerine benzer şekilde badem, kayısı ve erik bitkileri dışında diğer bitkiler için hassas bir durum söz konusu değildir.

UP150/NP010 bütünleşik membran sisteminde deney sonunda TN, TP ve NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N giderim verimleri sırasıyla %63,5, %59,7 ve %35,3'tür. UP150/NF90 bütünleşik membran sistemi deney sonunda ise aynı parametreler için sırasıyla %62,6, %97,6 ve %50,3 giderim verimi elde edilmiştir. AATTUT-Tablo E7.9'da verilen BNR+filtrasyon+dezenfeksiyon içeren bir proses için beklenen nütrient seviyeleri bakımından TN ve TP konsantrasyonu membran girişinde sınır değerlerin üzerindedir. Tebliğe göre deney sonunda her iki sistem süzütüsünde beklenen düzeyde TN, TP ve NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N konsantrasyonu tespit edilmiştir. Her iki sistemde deney sonu süzütülerinin sulama amacıyla kullanımda kısıtlanma derecesi, (WHO,

2006)'ya göre TN konsantrasyonu bakımından "Hafif ve Orta" iken, (FAO, 1992)'ye göre  $\text{NO}_3^-$ -N konsantrasyonu bakımından "Yok" şeklindedir.

$\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{PO}_4^{-3}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NO}_2^-$  ve  $\text{HCO}_3^-$  parametreleri için UP150/NP010 bütünleşik membran sisteminde elde edilen deney sonu giderim verimleri sırasıyla %31,9, %25,7, %64,5, %56,7, %20,6, %35,3 ve %22,0 şeklindedir. UP150/NF90 bütünleşik membran sisteminde ise aynı parametreler için daha yüksek (%99,5, %98,3, %97,1, %86,7, %87,4, %50,3 ve %84,8) giderim verimleri elde edilmiştir.

UP150/NP010 ve UP150/NF90 bütünleşik membran sistemlerinde analiz edilen ağır metal ve toksik elementlerden yalnızca Hg parametresi UP150 membran girişinde (USEPA, 2004)'te belirtilen sınır değerinin üzerindedir. Deney sonundaki Hg giderim verimi; UP150/NP010 sisteminde %76,2, UP150/NF90 sisteminde ise %80 olarak belirlenmiştir. Hg konsantrasyonu her iki sistemdeki çıkış süzüntülerinde (USEPA, 2004)'te verilen sınır değeri sağlamaktadır. Fe ve Mn konsantrasyonları açısından da sistem çıkış süzüntüleri (WHO, 2006) ve (FAO, 1992) kriterlerinde yer alan damlatmalı sulama kriterlerine uygundur.

### 3.3.4. Bütünleşik membran sistemlerinin karşılaştırılması

UF/TO,  $\text{NF}_{\text{gevşek}}/\text{TO}$ ,  $\text{UF}/\text{NF}_{\text{gevşek}}$  ve  $\text{UF}/\text{NF}_{\text{sıkı}}$  bütünleşik membran sistemlerinin tümünü Tablo 3.23' e göre kıyasladığımızda; UF/TO bütünleşik membran sistemleri deneylerinde hedeflenen geri kazanım oranı %70 olup; UP150/LFC3, UP150/CPA3 ve UP150/TFC sistemleri ile 8 saat sürede performans bakımından elde edilen geri kazanım oranları sırasıyla %72,4, %30,5 ve %71,7, süzüntü akıları ise 31,5, 13,6 ve 30,5  $\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{sa}$  şeklindedir. Bu sistemler içinde geri kazanım oranı ve süzüntü akısı bakımından performansı en iyi olan sistemin UP150/LFC3 olduğu görülmektedir.

$\text{NF}_{\text{gevşek}}/\text{TO}$  bütünleşik membran sistemleri deneylerinde ise; NP010/LFC3, NP010/CPA3 ve NP010/TFC bütünleşik membran sistemlerinin tümünde sırasıyla 8, 7 ve 5,5 saat sürelerde hedeflenen minimum %55' lik geri kazanım oranı sağlanmıştır. Deneylerde elde edilen süzüntü akısı üç sistemde sırasıyla 23,5, 29,6 ve 39,4  $\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{sa}$  tir. NP010/TFC sisteminde diğer sistemlere göre daha kısa sürede ve daha yüksek akıda %64,2' lik geri kazanım oranı ile en iyi performans elde edilmiştir. UP150/LFC3 ve NP010/TFC sistemlerini karşılaştırmak için aynı süre

sonunda ne kadar geri kazanım oranı sağlandığını bilmek gerekir. Yapılan hesaplamada UP150/LFC3 sistemi ile 5,5 saat sürede %50,4 geri kazanım oranı sağlandığı belirlenmiştir. Buna göre hem geri kazanım oranı hem de süzüntü akısı bakımından NP010/TFC sistemi, UP150/LFC3 sistemine göre daha iyi performans göstermiştir.

Tablo 3.23. Bütünleşik membran sistemlerinin performans bakımından karşılaştırılması

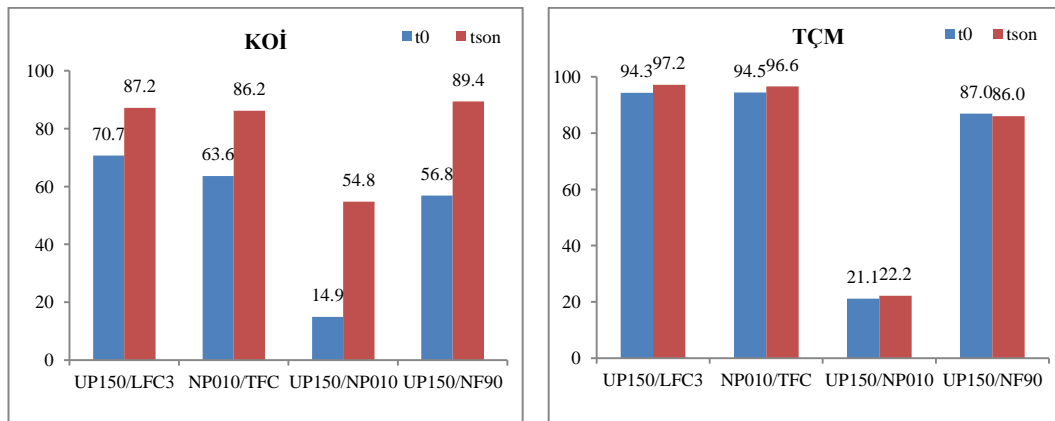
Bütünleşik membran sistemi	Deney süresi (sa)	Süzüntü akısı (L/m <sup>2</sup> .sa)	Geri kazanım oranı (GKO)(%)	VRF	%R t <sub>son</sub> Konvansiyonel parametreler	%R t <sub>son</sub> Ağır metal ve toksik elementler
UP150/LFC3	8 (5,5)	31,5	72,4 (50,4)	3,6	87,2-100	99,2
UP150/CPA3	8	13,6	30,5	1,4	82,4-100	100
UP150/TFC	8	30,5	71,7	3,5	81,7-100	99,8
NP010/LFC3	8	23,5	55,3	2,24	10,3-100	99
NP010/CPA3	7	29,6	59,8	2,79	64,6-100	98,8
NP010/TFC	5,5	39,4	64,2	2,8	81,6-100	99,1
UP150/NP010	6	85,5	56,4	2,3	1,6-100	99,8
UP150/NF90	8	31,5	26,1	1,35	35,2-100	99,8

UF/NF<sub>gevşek</sub> ve UF/NF<sub>sıkı</sub> bütünleşik membran sistemleri deneylerinde; %55 geri kazanım oranı hedeflenmiştir. UP150/NP010 sisteminde 6 saatlik sürede %56,4 geri kazanım oranı, UP150/NF90 sisteminde 8 saat sonunda %26,1 geri kazanım oranı sağlanabilmiştir. NF90 membranın NP010 membranına kıyasla daha sıkı yapıda olmasından ötürü, UF sonrası hedeflenen geri kazanım oranının UP150/NF90 sisteminde sağlanamadığı, UP150/NP010 sisteminde ise, daha kısa sürede ve yüksek akıda daha iyi geri kazanım oranı elde edildiği görülmektedir. Ayrıca NP010/TFC ve UP150/NP010 bütünleşik membran sistemlerinde yaklaşık aynı sürelerde elde edilen geri kazanım oranı performanslarının birbirlerine yakın olduğu belirlenmiştir.

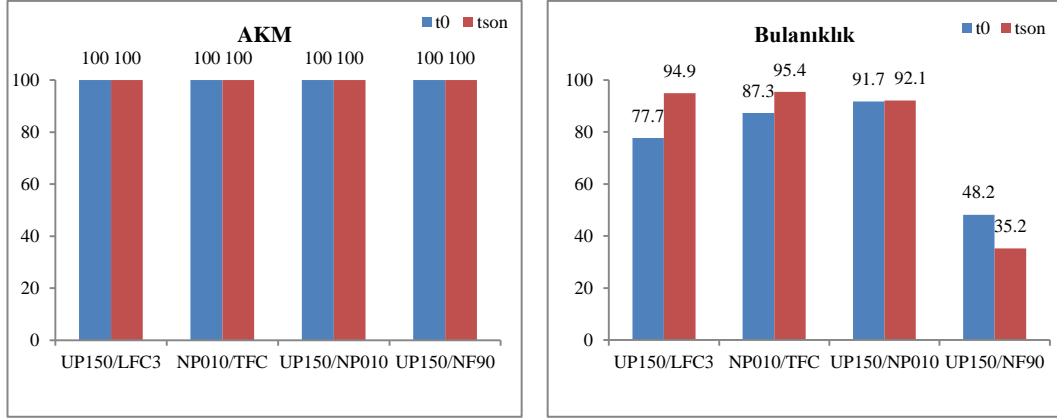
Bütünleşik membran sistemlerini geri kazanım oranı ve elde edilen süzüntü akılarının yanısıra sulama suyu ile ilgili standartlarda yer alan/almayan kirletici maddelere ait giderim verimleri bakımından da karşılaştırmak gerekmektedir. UP150/LFC3, UP150/CPA3 ve UP150/TFC-UF/TO bütünleşik membran sistemlerini karşılaştırdığımızda; deney başında elde edilen konvansiyonel parametrelere ait giderim verimleri sırasıyla %70,7-100, %22,2-98,3, %76,5-96,7; deney sonunda ise %87,2-100, %82,4-100, %81,7-100 arasında değişmektedir.

Konvansiyonel parametrelere ait giderim verimleri NP010/LFC3, NP010/CPA3 ve NP010/TFC-  $NF_{\text{gevşek}}/TO$  sistemlerinde sırasıyla deney başında %0-100, %46,4-100, %63,6-100; deney sonunda ise %10,3-100, %64,6-100, %81,6-100 şeklindedir. UP150/LFC3 sistemine göre geri kazanım oranının daha yüksek olduğu belirlenen NP010/TFC sisteminde deney sonu giderim verimlerinin UP150/LFC3 sistemi ile birbirine çok yakın olduğu görülmektedir.  $UF/NF_{\text{gevşek}}$  ve  $UF/NF_{\text{sıkı}}$  bütünleşik membran sistemlerinde ise konvansiyonel parametreler bakımından deney başında ve sonunda sırasıyla UP150/NP010 sistemi için %7,4-100 ve %1,6-100; UP150/NF90 sistemi için de %34,5-100 ve %35,2-100 arasında giderim verimleri elde edilmiştir.

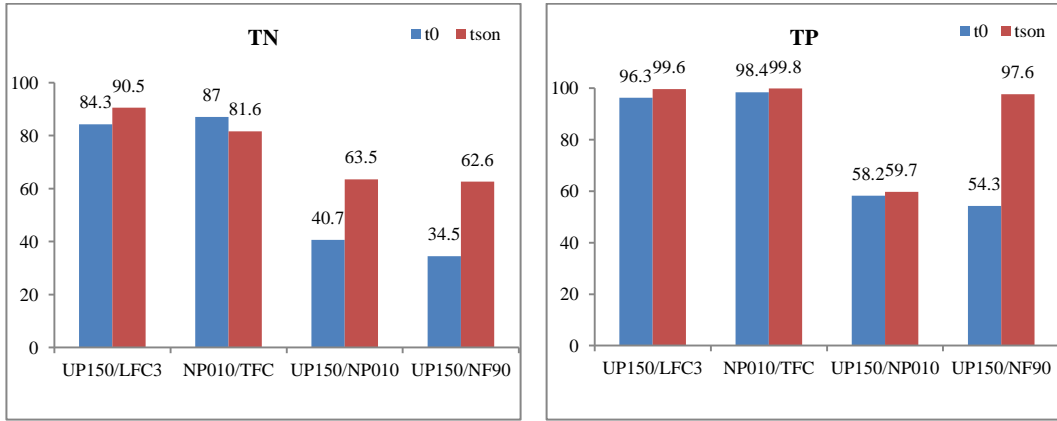
Şekil 3.13-Şekil 3.15' te KOİ, TÇM, AKM, bulanıklık, TN ve TP parametreleri için deney başında ve sonunda bütünleşik membran sistemlerinde elde edilen giderim verimleri gösterilmektedir. Grafiklerden görüldüğü gibi AKM için tüm sistemlerde %100 giderim sağlanırken, KOİ ve TP için deney sonunda deney başına göre giderim verimleri artmıştır. TÇM ve bulanıklık için UP150/NF90 sisteminde deney sonunda deney başına göre elde edilen giderim çok az miktar daha düşüktür. TN için de aynı şekilde NP010/TFC sisteminde deney başında %87 deney sonunda ise %81,6 giderim sağlanmıştır. Ayrıca tüm parametreler için UP150/NP010 ve UP150/NF90 sistemine kıyasla diğer iki sistemde de birbirine yakın giderimler elde edilmiştir.



Şekil 3.13. Bütünleşik membran sistemlerinde KOİ ve TÇM giderim verimleri



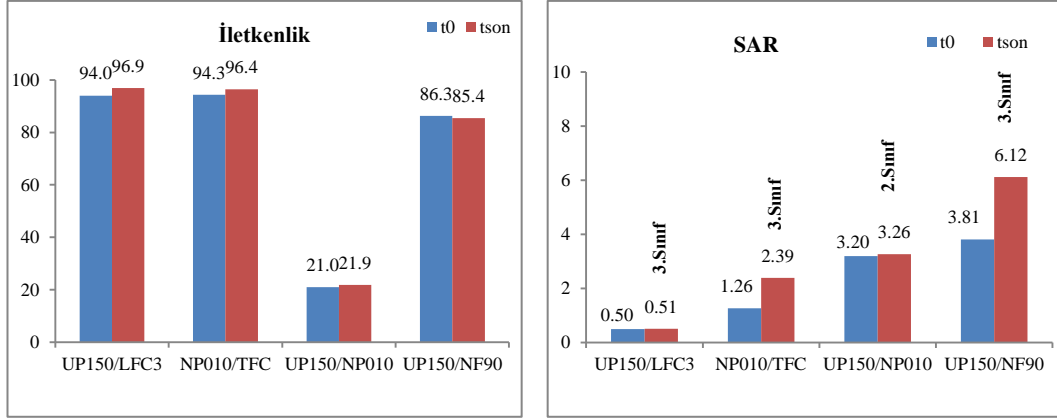
Şekil 3.14. Bütünleşik membran sistemlerinde AKM ve bulanıklık giderim verimleri



Şekil 3.15. Bütünleşik membran sistemlerinde TN ve TP giderim verimleri

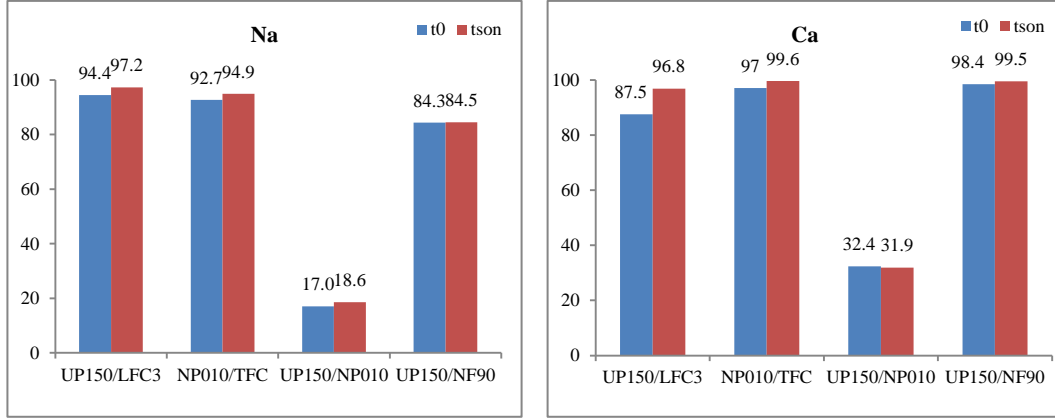
Şekil 3.16' da tüm bütünleşik sistemlerde elde edilen iletkenlik giderim verimleri ve SAR değerleri gösterilmektedir. Deney sonunda tüm sistemlerde en yüksek iletkenlik giderim verimi UP150/LFC3 (%96,9) sisteminde elde edilmiştir. İletkenlik deney sonu çıkış suyu değerleri ile SAR oranları arasındaki ilişkiye göre sadece UP150/NP010 sisteminde SAR bakımından 2. Sınıf kalitede süzüntü elde edilirken, diğer sistemlerde elde edilen 3. Sınıf kalitede süzüntünün iyileştirilmesi için kimyasal ilavesi gerekmektedir.



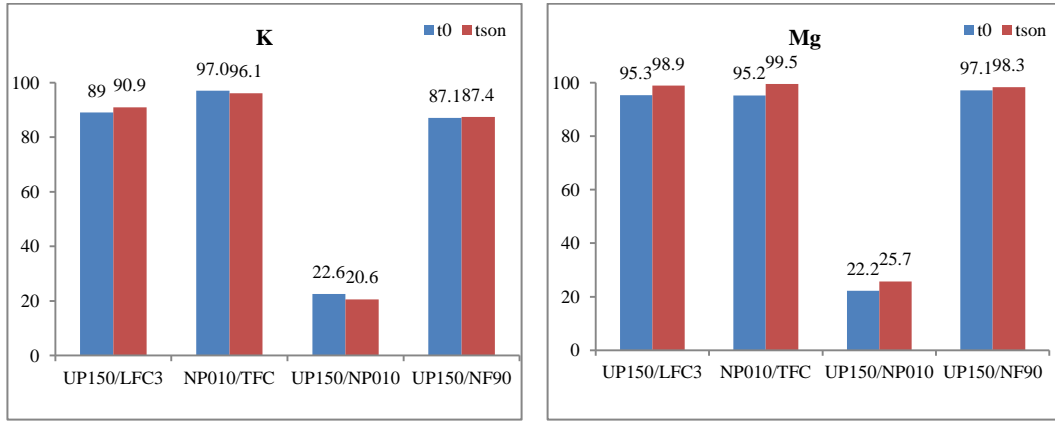


Şekil 3.16. Bütünleşik membran sistemlerinde iletkenlik giderim verimleri ve SAR değerleri

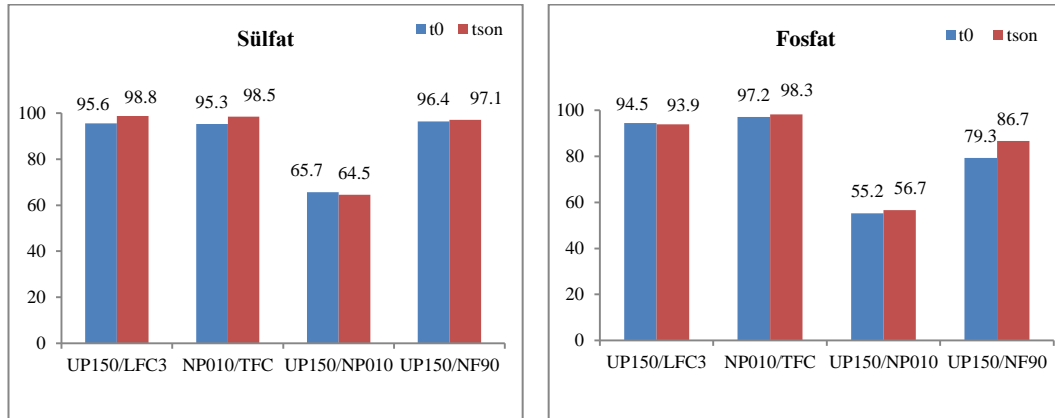
Şekil 3.17-Şekil 3.21' e göre deney başında sodyum ve nitrat azotu için UP150/LFC; potasyum, fosfat, nitrit, klorür ve civa için NP010/TFC; kalsiyum, magnezyum ve sülfat için UP150/NF90 sistemlerinde en iyi giderim verimleri elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre; UP150/NF90 sistemi ile çift değerli iyonları tutma özelliğinden ötürü kalsiyum, magnezyum ve sülfat deney başında yüksek oranda giderilmiş, deney sonunda ise bu sistemlerdeki giderimleri azalmıştır. Deney sonunda sodyum, sülfat ve civa için UP150/LFC3; kalsiyum, potasyum, magnezyum, fosfat, nitrat azotu, nitrit ve klorür için NP010/TFC sistemlerinde en iyi giderim verimleri sağlanmıştır. Ayrıca AATTUT'nde kentsel arıtılmış sulama sularında dikkat edilmesi gereken TN, TP ve nitrat azotu nütrientleri bakımından UP150/LFC3 ve NP010/TFC sistemlerinde en iyi giderimlerin elde edildiği belirlenmiştir. Ticari olarak işlenen ve işlenmeyen ürünler ile yenmeyen gıda ürünlerinin tarımsal sulamasında yüksek nütrient seviyeleri bitki büyümesi sürecini olumsuz etkileyeceğinden (USEPA, 2004)'e göre bu nütrient seviyelerine dikkat edilmesi önem teşkil etmektedir.



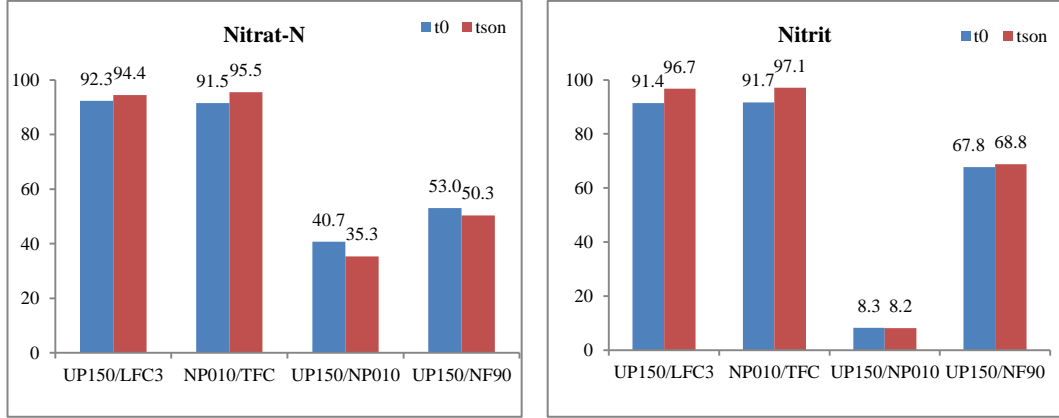
Şekil 3.17. Bütünleşik membran sistemlerinde sodyum ve kalsiyum giderim verimleri



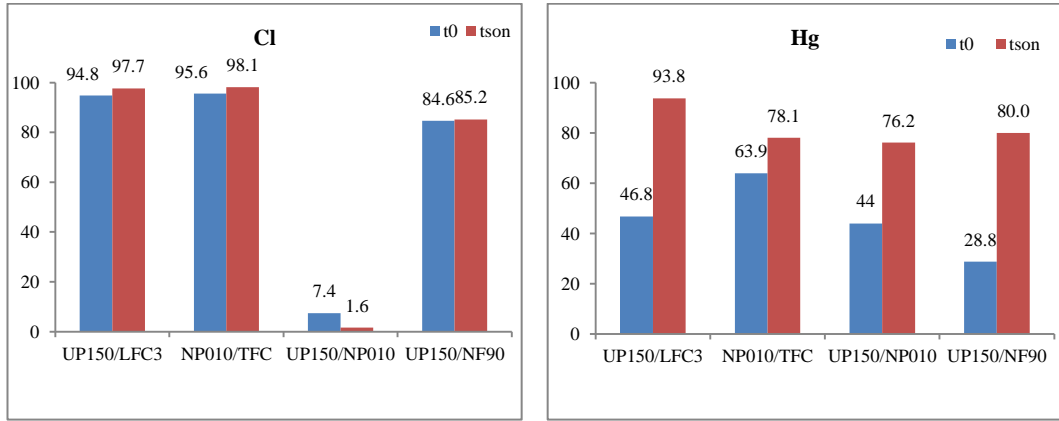
Şekil 3.18. Bütünleşik membran sistemlerinde potasyum ve magnezyum giderim verimleri



Şekil 3.19. Bütünleşik membran sistemlerinde sülfat ve fosfat giderim verimleri



Şekil 3.20. Bütünleşik membran sistemlerinde nitrat azotu ve nitrit giderim verimleri



Şekil 3.21. Bütünleşik membran sistemlerinde klorür ve civa giderim verimleri

### 3.4. Akı Kayıpları ve Membran Kirlenme Dirençlerinin Belirlenmesi

Çalışmanın son aşamasında akı kayıpları ve membran kirlenme dirençleri hesaplanmıştır. Hesaplamalar öncelikle deneysel tasarım yöntemi ile belirlenen en iyi filtrasyon şartlarında gerçekleştirilen doğrulama deneylerinde kullanılan UP150, NP010 ve NF90 membranları için yapılmıştır. Daha sonra en iyi geri kazanım oranı ve süzüntü akısı sağlanan UF/TO,  $NF_{\text{gevşek}}/TO$ ,  $UF/NF_{\text{gevşek}}$  ve  $UF/NF_{\text{sıkı}}$  bütünleşik membran sistemlerinde kullanılan LFC3, TFC, NP010 ve NF90 membranları için akı kayıpları ve kirlenme dirençleri hesaplanmıştır. Tablo 3.24'te yapılan hesaplamalara göre elde edilen akı kayıpları ve membran kirlenme dirençleri verilmektedir.

Tablo 3.24. UF ve NF prosesleri ile bütünleşik membran sistemlerinde en iyi filtrasyon koşullarındaki akı kayıpları ve membran kirlenme dirençleri

Membran Tipi	Saf su akısı ( $J_0$ ) ( $L/m^2.sa$ )	Atıksu Akısı ( $J$ ) ( $L/m^2.sa$ )	Toplam Akı Kaybı ( $J_0-J$ )/ $J_0$ (%)	Membran Direnci $R_m$ ( $m^{-1}$ )	Kirlenme Direnci $R_K=R_T-R_m$ ( $m^{-1}$ )	Toplam Kirlenme Direnci $R_T$ ( $m^{-1}$ )
<b>UP150</b>	478,0	79,1	83,46	$3,01 \times 10^{12}$	$1,52 \times 10^{13}$	$1,82 \times 10^{13}$
<b>NP010</b>	90,8	79,2	12,73	$3,96 \times 10^{13}$	$5,78 \times 10^{12}$	$4,54 \times 10^{13}$
<b>NF90</b>	58,9	27,8	52,89	$6,11 \times 10^{13}$	$6,86 \times 10^{13}$	$1,30 \times 10^{14}$
<b>UP150/LFC3</b>	38,2	31,5	17,54	$9,42 \times 10^{13}$	$2,00 \times 10^{13}$	$1,14 \times 10^{14}$
<b>NP010/TFC</b>	45,9	39,4	14,09	$7,85 \times 10^{13}$	$1,29 \times 10^{13}$	$9,14 \times 10^{13}$
<b>UP150/NP010</b>	99,8	85,5	14,29	$3,61 \times 10^{13}$	$6,02 \times 10^{12}$	$4,21 \times 10^{13}$
<b>UP150/NF90</b>	38,5	31,5	18,21	$9,34 \times 10^{13}$	$2,08 \times 10^{13}$	$1,14 \times 10^{14}$

Saf su ve atıksu ile en iyi filtrasyon şartlarında gerçekleştirilen UF ve NF doğrulama deneylerinde; UP150 membranı ile %83,46, NP010 membranı ile %12,73 ve NF90 membranı ile %52,89 akı kaybı olduğu gözlenmiştir. Bütünleşik membran sistemleri deneylerinde ise en yüksek akı kaybı (%18,21) UP150/NF90 sisteminde, en düşük akı kaybı NP010/TFC sisteminde elde edilmiştir.

Membran dirençlerini belirlemek amacıyla UF ve NF prosesleri için gerçekleştirilen saf su deneylerine ilişkin hesaplamalardan görüldüğü gibi NF90 membranı direncinin UP150 ve NP010 membranlarına göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. NF90 membranı diğer iki membrana göre daha sıkı özellikte olduğu için membran direnci de daha yüksektir. Bütünleşik membran sistemleri deneylerinde, UP150/NF90 sisteminde UP150/NP010 sisteminde kullanılan NF membranlarından NF90 membranı direncinin NP010 membranı direncine göre daha yüksek olduğu görülmektedir. LFC3 ve TFC ile gerçekleştirilen bütünleşik membran sistemlerinde ise sırasıyla  $9,42 \times 10^{13}$ ,  $7,85 \times 10^{13} m^{-1}$  membran direnci elde edilmiştir.

Kirlenme dirençlerinin belirlenmesi amacıyla UF ve NF prosesleri için yapılan atıksu deneylerinde kirlenme direncinin en yüksek olduğu membran yine NF90 membranı olmuştur. Bütünleşik membran sistemleri deneylerinde ise UP150/NF90 ve

UP150/LFC3 sistemlerinde NF90 ve LFC3 membran kirlenme dirençleri birbirlerine oldukça yakındır. UP150/NP010 sisteminde kullanılan NP010 membran kirlenme direnci diğer sistemlere kıyasla en düşüktür.

NF90 membranı ve UP150/NF90 bütünleşik membran sistemini kıyasladığımızda, NF90 öncesi UF prosesi uygulanarak, toplam akı kaybı ve kirlenme direncinin azaldığı tespit edilmiştir. NP010 membranı ve UP150/NP010 bütünleşik membran sistemini kıyasladığımızda ise NP010 öncesi UF prosesi ile toplam akı kaybının ve kirlenme direncinin çok değişmediği belirlenmiştir.

UP150 membranı atıksuya doğrudan uygulandığında; UP150/LFC3 bütünleşik membran sistemine göre daha fazla akı kaybı meydana gelmiştir. Kirlenme direnci bakımından ise birbirine çok yakın değerler elde edilmiştir. Bu durum, UP150 membranının moleküler boyutundan ötürü süzüntüye bir miktar organik madde geçişi ile birlikte UP150/LFC3 sisteminde TO membranı yüzeyinde ani kirlenme nedeniyle açıklanabilir. Akı kaybı ve kirlenme direnci bakımından, NP010 membranı atıksuya doğrudan uygulandığında ve NP010/TFC bütünleşik membran sisteminde de birbirine yakın değerler elde edilmiştir.

#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Biyolojik olarak ikincil arıtılmış kentsel atıksulardan kentsel ve tarımsal sulama suyu eldesi ve etkin su geri kazanımı sağlanması amaçlanan bu çalışmada, kentsel arıtılmış atıksulara farklı UF, NF ve TO membranları, ayrı ayrı ve bütünleşik olarak uygulandığında elde edilen deneysel veriler iyi kalitede su geri kazanıldığını göstermiştir. Bunun yanında ulusal ve uluslararası mevzuata göre kentsel arıtılmış atıksulara membran filtrasyon uygulanarak kentsel ve tarımsal sulama amacıyla farklı sınıflarda sulama suyu üretilbildiği belirlenmiştir.

Çalışmanın birinci aşamasında, doktora tezi kapsamındaki bütünleşik membran sistemlerinin etkinliğini belirlemek için düz plaka ticari UC010, UC030 ve UP150 UF membranları ile LFC3 TO membranı kullanılarak oluşturulan UF/TO bütünleşik membran sistemleri ön deneysel çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Ön deneysel çalışma sonuçlarına göre UF/TO bütünleşik membran sistemleri ile iyi kalitede su geri kazanıldığı ve bu suyun sulama amacıyla kullanılabileceği belirlenmiştir.

Tüm parametreler açısından ön deneysel çalışmalarda uygulanan üç UF/TO bütünleşik membran sistemini karşılaştırdığımızda; SI sisteminde  $\text{NO}_3^-$ -N ve  $\text{PO}_4$ -P için en yüksek giderim verimi değerleri elde edilmiştir. SII sisteminde  $\text{Cl}^-$ , bulanıklık ve  $\text{SO}_4^{2-}$  için sırasıyla elde edilen giderim verimleri %98,5, %96,4, %99,4' tür. SIII sisteminde ise iletkenlik, TÇM, SAR,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$  ve  $\text{Mg}^{+2}$  parametreleri için diğer sistemlere kıyasla daha iyi giderim verimi elde edilmiştir. AKM açısından üç sistemde de %100 giderim verimi sağlanırken, bor ve pH ikincil arıtma çıkış suyunda olduğu gibi her üç sistem uygulandığında da uygun sınır değerlerdedir. SII sisteminde TN ve TP açısından elde edilen giderim verimleri sırasıyla %29,8 ve %97,7' dir. Fekal koliform ve toplam koliform açısından AATTUT, (USEPA, 2004), (WHO, 2006) ve (FAO, 1992) standartları dikkate alındığında SII sisteminin sulama suyu geri kazanımında uygulanabilir nitelikte olduğu belirlenmiştir.

İkinci aşamada, kentsel ikincil arıtma çıkış suları, ön deneysel çalışmalarda kullanılan üç farklı UF membranı ve üç farklı NF membranı (NP010, NF90, NF270)

ile ayrı ayrı filtrasyon işlemine tabi tutulmuştur. Taguchi deneysel tasarım şartlarında yürütülen UF ve NF deneylerinde, membran tipi, çapraz akış hızı, sıcaklık ve membran geçiş basıncı proses değişkenlerinin proses performans parametreleri üzerine etkileri incelenmiş, bu doğrultuda her bir proses için optimum filtrasyon koşulları belirlenmiştir. Proses performans parametreleri olarak, UF deneylerinde süzüntü akıları ve kirletici madde konsantrasyonları, NF deneylerinde ise süzüntü akıları ve kirletici madde giderim verimleri esas alınmıştır. Daha sonra yüzey yanıt yöntemi aracılığıyla tam kuadratik olarak yapılan ANOVA analizlerinde değişkenler ve bu değişkenlerin iç etkileşimlerinin önem düzeyleri ve rölatif etkileri birbirleri ile kıyaslanarak, değişkenlerin sonuçlar üzerinde ne derece önemli etkiye sahip olduğu istatistiksel olarak ortaya konmuştur. Ardından deneysel tasarım yöntemi çerçevesinde planlanmış ve yapılmış, ANOVA analiz yöntemi ile sonuçları değerlendirilmiş bulunan UF ve NF deneylerine ait deneysel tasarım sonuçlarının doğrulaması için en iyi filtrasyon koşullarında doğrulama deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Proses performanslarını değerlendirmek için UF deneylerinde iletkenlik, SAR, bulanıklık, TN, TP ve  $\text{NO}_3^-$  parametreleri; NF deneylerinde ise iletkenlik, bulanıklık, TN ve TP parametreleri seçilerek yazılım aracılığıyla S/N oranları hesaplanmıştır. S/N oranları hesaplanırken UF deneylerinde akı için “en yüksek değer iyi”, kirletici madde konsantrasyonları için “en küçük değer iyi” yaklaşımları, NF deneylerinde ise tüm proses performans parametreleri için “en yüksek değer iyi” yaklaşımı esas alınmıştır. Bu doğrultuda tüm değişkenlerin etkileri incelendiğinde; UF prosesinde süzüntü akısı ve kirletici madde konsantrasyonları açısından membran işletme performansını en çok etkileyen değişkenler sırasıyla sıcaklık ve membran tipi olarak belirlenmiştir. NF prosesinde ise akı ve giderim verimi bakımından performansı en çok etkileyen değişken membran tipi olmuştur.

UF deneylerinde süzüntü akıları ve kirletici madde konsantrasyonlarına ait S/N oranları birlikte değerlendirildiğinde UF prosesi için en iyi filtrasyon koşulları; membran tipi değişkeni için UP150 membranı; çapraz akış hızı değişkeni için 600L/sa akış hızı; sıcaklık değişkeni için 22,5°C ve basınç için 4 bar olarak belirlenmiştir. NF deneylerinde ise en iyi filtrasyon koşulları; membran tipi değişkeni için NF90 membranı; çapraz akış hızı değişkeni için 600L/sa akış hızı; sıcaklık

değişkeni için 30°C ve membran geçiş basıncı değişkeni için 10 bar olarak tespit edilmiştir.

Optimum filtrasyon koşullarının belirlenmesinin ardından ANOVA analizlerine göre UF prosesinde yüksek akılarda ve düşük iletkenlik, SAR ve TP değerlerinde sulama suyu elde edebilmek bakımından, membran tipi değişkeninin etkisinin önemli olduğu sonucu doğrulanmıştır. Düşük bulanıklık, TN ve NO<sub>3</sub><sup>-</sup> değerleri için membran tipinin etkisi ise önemsiz olarak belirlenmiştir. SAR ve bulanıklık parametreleri için etkisinin önemli olduğu değişkenlerden biri çapraz akış hızıdır. Diğer taraftan SAR ve NO<sub>3</sub><sup>-</sup> parametreleri için sıcaklığın önemli etkisi doğrulanırken, SAR ve iletkenlik parametreleri için membran geçiş basıncının etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sonuçlar göstermektedir ki; UF ile sulama suyu elde edilmesi bakımından SAR'ın istenen seviyede tutulması için tüm değişkenler önemli oranda etki göstermekte iken, değişkenlerin tümünün önemsiz etki gösterdiği tek parametre TN olarak belirlenmiştir.

ANOVA analizlerine göre NF prosesinde yüksek akılarda ve yüksek iletkenlik, TN ve TP giderim verimlerinde sulama suyu elde edebilmek bakımından membran tipinin önemli etkisi doğrulanmıştır. ANOVA sonuçlarında membran tipinin, bulanıklık giderim verimi açısından etkisi önemsiz olmasına rağmen, rölatif etki bakımından diğer değişkenlere göre daha yüksek etkiye sahip olduğu görülmektedir. İletkenlik ve TP giderim verimleri için, membran tipi ile çapraz akış hızı etkisinin önemli olduğu belirlenmiştir. Yüksek akı ve TN giderim verimi bakımından sıcaklığın etkisi önemliyken, membran geçiş basıncının önemli etki gösterdiği tek parametre akı olmuştur. Bu sonuçlara göre; NF ile yüksek akı değerlerinde sulama suyu elde etmek için çapraz akış hızı dışında tüm değişkenlerin önemli oranda etki gösterdiği tespit edilmiştir. En yüksek akı değerleri için etkisi önemli olan diğer değişkenler sırasıyla sıcaklık ve membran geçiş basıncıdır.

ANOVA analizleri ile değişkenlerin sonuçlar üzerinde ne derece önemli etkiye sahip olduğu istatistiksel olarak ortaya konduktan sonra, UP150 membranı ile gerçekleştirilen doğrulama deneyinde en iyi filtrasyon şartları için deneysel olarak bulunan değerler ile Y<sub>opt</sub> değerlerinin hesaplanan %95 güven aralığında kaldığı belirlenmiştir. NF90 ve NP010 membranları doğrulama deneylerinde ise akı



haricinde kirletici madde giderim verimleri bakımından en iyi filtrasyon şartları için deneysel olarak bulunan değerler ile hesaplanan  $Y_{opt}$  değerleri %95 güven aralığında kalmıştır. Buna göre her iki NF membranları ile değişken karakterdeki ikincil arıtma çıkış suyundan doğrudan sulama suyu elde edilmesi bakımından istenen süzüntü akısında çalışma performansı sağlamak mümkün görülmemektedir. Daha yüksek akılarda süzüntü elde etmek için kentsel ikincil arıtma çıkış suyunun, NF öncesinde UF membrandan geçirilmesi önerilebilir.

Kentsel ikincil arıtma çıkış sularından Taguchi deneysel tasarımı ile belirlenen optimum işletme şartlarında doğrulama deneylerinde elde edilen UF ve NF membran süzüntülerinin, kentsel ve tarımsal sulama için belirlenen ulusal ve uluslararası standartlara genel olarak uygun olduğu görülmüştür. Her iki proseste de AATTUT'nde ve diğer standartlarda verilen her bir parametre için farklı sınıflarda sulama suyu üretmek mümkündür. Ayrıca UF prosesinde NF prosesine göre daha yüksek süzüntü akısı sağlanmıştır.

Çalışmanın üçüncü aşamasında, ikinci aşamada UF ve NF için belirlenen optimum koşullar esas alınarak üç farklı TO membranı ile (LFC3, CPA3 ve TFC) UF/TO,  $NF_{gevşek}/TO$ , ayrıca  $UF/NF_{gevşek}$  ve  $UF/NF_{sıkı}$  bütünlük membran sistemleri deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sonrasında bütünlük sistemler ile elde edilen süzüntülerin ulusal ve uluslararası mevzuatlara göre kentsel ve tarımsal sulama suyu geri kazanımında teknolojik uygulanabilirliği araştırılmıştır.

UF/TO bütünlük membran sistemleri deneylerinde; 8 saatte performans bakımından UP150/CPA3 sistemi ile hedeflenen minimum %70'lik geri kazanım oranının sağlanamadığı belirlenmiştir. Ayrıca UP150/LFC3 sisteminde UP150/TFC sistemine göre aynı süre ve şartlarda daha iyi geri kazanım oranı (%72,4) ve süzüntü akısı ( $31,5 \text{ L/m}^2 \cdot \text{sa}$ ) sağlanmıştır. UP150/LFC3, UP150/CPA3 ve UP150/TFC bütünlük membran sistemlerini karşılaştırdığımızda; konvansiyonel parametreler bakımından deney başında sırasıyla %70,7-100, %22,2-98,3, %76,5-96,7; deney sonunda ise %87,2-100, %82,4-100, %81,7-100 giderim verimleri elde edilmiştir. UP150/LFC3, UP150/CPA3 ve UP150/TFC bütünlük membran sistemlerinde tüm ağır metal ve toksik elementler için deney sonunda elde edilen giderim verimleri ise sırasıyla %0-99,2; %0-100 ve %0-99,8 arasındadır. Kentsel ve tarımsal alanların sulama suyu

kalitesinin değerlendirilmesi için uygun görülen UP150/LFC3 bütünleşik membran sisteminde her bir membran çıkışındaki ağır metal ve toksik element konsantrasyonları, AATTUT' nde her türlü zeminde sürekli sulama yapılması durumu için belirtilen sınır değerlerin altındadır. Performans ve giderim verimleri bakımından diğer UF/TO sistemlerine göre en iyi süzüntü elde edilen UP150/LFC3 sisteminde AATTUT ve (USEPA, 2004)' e göre yüksek kalitede kentsel ve tarımsal sulama suyu üretilmiştir. Ancak (WHO, 2006) ve (FAO, 1992)' ye göre damlatmalı sulama bakımından çıkış suyuna uygun kimyasallar ile pH ayarlaması yapılması gerekmektedir. Ayrıca SAR parametresi bakımından TO çıkış suyu 3. sınıf olduğundan, TO membran çıkış suyuna KCl ilave edilerek 2. sınıf su sağlanması önerilebilir. Bu aşamada sulanacak bitki toleranslarına dikkat etmek gerekmektedir. Bununla birlikte AATTUT ve (USEPA, 2004)'e göre arıtılmış atıksuların sulama amaçlı geri kazanımında patojen kirliliğin ölçülebilir düzeyde olup olmadığını belirlemek bakımından fekal koliform miktarı mutlaka günlük olarak izlenmelidir.

$NF_{\text{gevşek}}/TO$  bütünleşik membran sistemleri deneylerinde; NP010/LFC3, NP010/CPA3 ve NP010/TFC bütünleşik membran sistemlerinin üçünde de hedeflenen minimum %55' lik geri kazanım oranı sağlanmıştır. Ancak NP010/TFC sisteminde diğer sistemlere göre daha kısa sürede (5,5 saat) ve yüksek akıda (39 L/m<sup>2</sup>.sa) daha iyi geri kazanım oranı (%64,2) elde edilmiştir. NP010/LFC3, NP010/CPA3 ve NP010/TFC sistemlerini karşılaştırdığımızda; konvansiyonel parametreler bakımından kirlenici madde giderim verimleri sırasıyla deney başında %0-100, %46,4-100, %63,6-100; deney sonunda ise %10,3-100, %64,6-100, %81,6-100 şeklindedir. NP010/LFC3, NP010/CPA3 ve NP010/TFC bütünleşik membran sistemlerinde tüm ağır metal ve toksik elementler için deney sonunda elde edilen giderim verimleri ise sırasıyla %0-99,0, %0-98,8 ve %0-99,1 arasındadır. Bu elementlerden yalnızca Hg parametresi NP010 membran girişinde (USEPA, 2004)' te belirtilen sınır değer üzerinde. NP010/TFC bütünleşik membran sistemi Hg giderim veriminin deney sonunda %63,9' dan %78,1' e kadar arttığı, 0,22 mg/L Hg konsantrasyonunun sulama için gerekli kriteri sağladığı belirlenmiştir. Buna göre performans ve giderim verimleri bakımından diğer  $NF_{\text{gevşek}}/TO$  sistemlerine göre en iyi süzüntü elde edilen NP010/TFC sisteminde de hem ulusal hem de uluslararası mevzuatlara göre yüksek kalitede sulama suyu üretilmiştir. Bu sistemde ayrıca

standartlarda sınır değeri bulunmayan  $Ca^{+2}$ ,  $Mg^{+2}$ ,  $PO_4^{-3}$ ,  $K^+$  ve  $NO_2^-$  parametreleri için UP150/LFC3 sistemine kıyasla daha yüksek giderim verimleri elde edilmiştir. UP150/LFC3 sisteminde olduğu gibi NP010/TFC sisteminde de SAR parametresi bakımından elde edilen süzüntü 3. sınıf olduğundan, 2. sınıf su elde etmek için sistem çıkış suyuna da KCl ilave edilmesi önerilebilir. Ancak NP010/TFC bütünleşik membran sistemi çıkışında SAR değeri AATTUT-Tablo E7.4'te verilen aralıkların altında kaldığından, bu aşamada sulanacak bitki toleranslarına dikkat etmek gerekmektedir. Bununla birlikte sulamada kullanılacak geri kazanılmış suda AATTUT-Tablo E7.1 ve (USEPA, 2004)'e göre fekal koliform miktarı mutlaka günlük olarak izlenmelidir.

UF/NF<sub>gevşek</sub> bütünleşik membran sistemi deneyinde; UP150/NP010 sisteminde 6 saatte elde edilen geri kazanım oranı %56,4 ve VRF değeri ise 2,3 olarak belirlenmiştir. UF/NF<sub>sıkı</sub> bütünleşik membran sistemi deneyinde; UP150/NF90 sisteminde 8 saat sonunda %26,1 geri kazanım oranı ve 1,35 VRF değeri elde edilmiştir. Bu verilere göre UF/NF<sub>gevşek</sub> bütünleşik membran sisteminde, UF/NF<sub>sıkı</sub> sistemine göre daha kısa sürede ve yüksek akıda daha iyi geri kazanım oranı sağlanmıştır. Konvansiyonel parametreler bakımından deney başında ve sonunda sırasıyla UP150/NP010 sisteminde %7,4-100 ve %1,6-100, UP150/NF90 sisteminde ise %34,5-100 ve %35,2-100 arasında giderim verimi elde edilmiştir. Tüm ağır metal ve toksik elementler bakımından deney sonunda elde edilen giderim verimleri ise her iki sistemde %0-99,8 arasındadır. Buna göre tüm parametreler esas alındığında her iki sistemde hem ulusal hem de uluslararası mevzuata göre iyi kalitede sulama suyu üretilmiştir. Yalnızca SAR değeri bakımından UP150/NP010 bütünleşik membran sistemi çıkış suyu UP150/NF90 sistemi çıkış suyuna göre daha iyi kalitededir ve kimyasal ilavesi gerektirmemektedir.

UF/TO, NF<sub>gevşek</sub>/TO, UF/NF<sub>gevşek</sub> ve UF/NF<sub>sıkı</sub> bütünleşik membran sistemlerinin tümünü kıyasladığımızda; en iyi filtrasyon sağlanan bütünleşik membran sistemlerinde elde edilen geri kazanım oranları UP150/LFC3 sisteminde, 8 saat sürede %72,4; NP010/TFC sisteminde, 5,5 saat sürede %64,2; UP150/NP010 sisteminde, 6 saatlik sürede %56,4; UP150/NF90 sisteminde ise 8 saat sonunda %26,1 olarak belirlenmiştir. UP150/LFC3 sistemi NP010/TFC sistemi ile aynı sürede %50,4 geri kazanım oranı sağladığından hem geri kazanım oranı hem de süzüntü

akısı bakımından NP010/TFC sistemi, UP150/LFC3 sistemine göre daha iyi performans göstermiştir. UP150/NP010 sisteminde ise UP150/NF90 sistemine göre daha kısa sürede ve yüksek akıda daha iyi geri kazanım oranı elde edildiği görülmektedir. Ayrıca NP010/TFC ve UP150/NP010 bütünleşik membran sistemlerinde yaklaşık aynı sürelerde elde edilen geri kazanım oranı performanslarının birbirlerine yakın olduğu belirlenmiştir. UP150/NP010 sistemi dışında diğer bütünleşik membran sistemlerinde SAR parametresi bakımından 2. sınıf sulama suyu elde etmek için çıkış suyuna kimyasal ilavesi gerekmektedir. Çalışmada yer alan ulusal/uluslararası mevzuatlara göre incelenen parametreler bakımından UP150/LFC3 ve NP010/TFC bütünleşik membran sistemlerinde elde edilen giderim verimlerinin, UP150/NP010 ve UP150/NF90 bütünleşik membran sistemlerine kıyasla daha iyi olduğu tespit edilmiştir. UP150/NF90 giderim verimleri ise UP150/NP010 sistemine göre daha yüksektir. Kentsel ve tarımsal yeniden kullanımda hem halk sağlığı hem de ekolojik denge bakımından maksimum kalitede sulama suyu kullanımı gerektiğinden, özellikle TO içeren bütünleşik membran sistemlerinin bu alandaki etkinliğinin uygulama ölçeğinde değerlendirilmesi önem teşkil etmektedir. En iyi filtrasyon sağlanan tek kademe UF ve NF prosesleri ile bütünleşik membran sistemlerinde elde edilen süzüntülerin, AATTUT'nde belirtilen sulama kriterlerine uygunluğu Tablo 4.1'de özetlenmiştir.

Çalışmanın son aşamasında; akı kayıpları ve membran kirlenme dirençleri hesaplanmıştır. Deneysel tasarımla belirlenen en iyi filtrasyon şartlarında gerçekleştirilen UF ve NF doğrulama deneylerinde en yüksek akı kaybı UP150 membranında gözlenmiştir. Hem membran hem de kirlenme direncinin en yüksek olduğu membran ise NF90' dır. En iyi geri kazanım oranı ve süzöntü akısı sağlanan UF/TO (UP150/LFC3),  $NF_{\text{gevşek}}/TO$  (NP010/TFC),  $UF/NF_{\text{gevşek}}$  (UP150/NP010) ve  $UF/NF_{\text{sıkı}}$  (UP150/NF90) bütünleşik membran sistemleri deneylerinde en yüksek akı kaybı ve kirlenme direnci UP150/NF90 sisteminde gerçekleşmiştir. Membran direncinin en yüksek olduğu sistem UP150/LFC3 sistemidir.

Tablo 4.1. Tek kademe ve bütünleşik membran sistemlerinin AATTUT sulama suyu kriterleri açısından değerlendirilmesi

Parametre	UP150	NP010	UP150/LFC3	NP010/TFC	UP150/NP010	UP150/NF90	Açıklama/Öneri
<b>pH</b>	Sınıf A/B	Sınıf A/B	Sınıf A/B	Sınıf A/B	Sınıf A/B	Sınıf A/B	Haftalık olarak izlenmelidir.
<b>Bulanıklık</b>	Sınıf A/B	Sınıf A/B	Sınıf A/B	Sınıf A/B	Sınıf A/B	Sınıf A/B	Sürekli olarak izlenmelidir.
<b>AKM</b>	Sınıf A/B	Sınıf A/B	Sınıf A/B	Sınıf A/B	Sınıf A/B	Sınıf A/B	Günlük olarak izlenmelidir.
<b>BOİ<sub>5</sub></b>	Sınıf A/B	Sınıf A/B	Sınıf A/B	Sınıf A/B	Sınıf A/B	Sınıf A/B	Tüm sistem süzüntülerinde KOİ konsantrasyonuna göre sınıflandırılmıştır. Haftalık olarak izlenmelidir.
<b>Fekal Koliform</b>	Sınıf A/B	Sınıf A/B	Sınıf A/B	Sınıf A/B	Sınıf A/B	Sınıf A/B	Günlük olarak izlenmelidir.
<b>EC</b>	2.sınıf	2.sınıf	1.sınıf	1.sınıf	2. sınıf	1. sınıf	-
<b>TÇM</b>	1. sınıf	1. sınıf	1.sınıf	1.sınıf	1. sınıf	1. sınıf	TÇM<500 mg/L olduğundan Tablo E7.3'te bitkilerin tuzluluğa olan hassaslıkları açısından tarımsal sulamaya elverişli süzüntü elde edilmiştir.
<b>SAR</b>	2.sınıf	2.sınıf	3.sınıf	3.sınıf	2.sınıf	3.sınıf	3. sınıf için KCl ilavesi ile daha iyi kalitede süzüntü elde edilebilir. Bu durumda Tablo E7.4'te belirtilen bitkilerin SAR toleranslarına dikkat edilmelidir.
<b>Na<sup>+</sup></b>	Yüzeysel:3.sınıf	Yüzeysel:3.sınıf	Yüzeysel:1.sınıf	Yüzeysel:2.sınıf	Yüzeysel:3.sınıf	Yüzeysel:3. sınıf	-
	Damlatmalı:2.sınıf	Damlatmalı:2.sınıf	Damlatmalı:1.sınıf	Damlatmalı:1.sınıf	Damlatmalı:2.sınıf	Damlatmalı:1. sınıf	

us: Standardda Uygun Seviyede, sy: İlgili Standartta Sınır Değer Yoktur, ys: Standarttan Yüksek Seviyede, as: Standarttan Alt Seviyede

Tablo 4.1.(Devam) Tek kademe ve bütünleşik membran sistemlerinin AATTUT sulama suyu kriterleri açısından değerlendirilmesi

Parametre	UP150	NP010	UP150/LFC3	NP010/TFC	UP150/NP010	UP150/NF90	Açıklama/Öneri
<b>Cl</b>	Yüzeysel:1.sınıf	Yüzeysel:1.sınıf	Yüzeysel:1.sınıf	Yüzeysel:1.sınıf	Yüzeysel:1.sınıf	Yüzeysel:1.sınıf	Tüm sistem süzüntüleri, Tablo E7.5'te verilen bitkilerin yapraklarına zarar veren klorür konsantrasyonları bakımından badem, kayısı ve erik bitkileri için "Hassas" sınıftadır.
	Damlatmalı:1.sınıf	Damlatmalı:1.sınıf	Damlatmalı:1.sınıf	Damlatmalı:1.sınıf	Damlatmalı:1.sınıf	Damlatmalı:1.sınıf	
<b>B</b>	1.sınıf	1.sınıf	1.sınıf	1.sınıf	1.sınıf	1.sınıf	Tüm sistem süzüntüleri, Tablo E7.6'da verilen fasulye, yer fıstığı, buğday, soğan, arpa, börülce ve meyve ağaçları için "Hassas" sınıftadır.
<b>TN</b>	ys	ys	us	ys	us	us	TN, NP010/TFC sistem süzüntüsünde beklenen seviyeden yüksek konsantrasyondadır, ancak %81,6 rejeksiyonla konsantrasyonu azaltılmıştır.
<b>TP</b>	ys	us	us	us	us	us	Nutrient içeriğinin yüksek olması durumunda bitki büyümesi açısından sulamada dikkat edilmelidir.
<b>NO<sub>3</sub>-N</b>	ys	ys	us	us	us	us	
<b>Tüm ağır metaller</b>	us	us	us	us	us	us	Min seviyeye indirmek gerekmekte olup, yüksek rejeksiyon elde edilmiştir.

us: Standarda Uygun Seviyede, sy: İlgili Standartta Sınır Değer Yoktur, ys: Standarttan Yüksek Seviyede, as: Standarttan Alt Seviyede

NF90 membranı ve UP150/NF90 bütünleşik membran sistemini kıyasladığımızda, NF90 öncesi UF prosesi uygulanarak, toplam akı kaybı ve kirlenme direncinin azaldığı tespit edilmiştir. Bu nedenle NF90 membranı öncesinde akı kaybının en aza indirilmesi ve istenen seviyelerde süzüntü akısı elde edilmesi bakımından UF prosesinin uygulanması gerekmektedir. NP010 membranı ve UP150/NP010 bütünleşik membran sistemini kıyasladığımızda ise NP010 öncesi UF prosesi ile toplam akı kaybının ve kirlenme direncinin çok az miktarda arttığı belirlenmiştir. Bundan dolayı akı kaybı ve kirlenme direnci bakımından NP010 membranı atıksuya hem doğrudan hem de UP150 membranı ile bütünleşik olarak uygulanabilir.

UP150 membranı atıksuya doğrudan uygulandığında; UP150/LFC3 bütünleşik membran sistemine göre daha fazla akı kaybı meydana gelmektedir. Ancak kirlenme direnci bakımından birbirine çok yakın değerler elde edilmiştir. Bu nedenle güvenilir kalitede sulama suyu elde etmek için özellikle mikrobiyal kirliliğin ve organik kirleticilerin giderimi bakımından etkin bir bariyer olarak UF sonrası TO prosesi mutlaka uygulanmalıdır. Akı kaybı ve kirlenme direnci bakımından NP010 membranı atıksuya doğrudan uygulandığında ve NP010/TFC bütünleşik membran sisteminde de birbirine çok yakın değerler elde edilmiştir. Bu nedenle sulama suyu eldesi bakımından NF ve TO prosesleri doğrudan ve/veya bütünleşik olarak kentsel arıtılmış atıksulara uygulandığında iyi kalitede su geri kazanımı sağlamak mümkündür.

Doktora tezi kapsamında gerçekleştirilen tüm deneysel çalışma sonuçlarını değerlendirdiğimizde; kentsel ve tarımsal sulama için kentsel arıtılmış atıksulara UF ve NF prosesleri tek kademede uygulanarak UF prosesi ile sodyum parametresi yüzeysel sulama sınıfı haricinde asgari 2. sınıf, NF prosesi ile de asgari 3. sınıf kalitede sulama suyu üretilebilmektedir. UF/TO ve NF/TO bütünleşik membran sistemlerinde ise asgari 3. sınıf kalitede sulama suyu üretilmekte, özellikle SAR parametresi bakımından daha iyi kalitede sulama suyu üretmek için kimyasal ilavesi gerekmektedir. UF/NF<sub>gevşek</sub> bütünleşik membran sisteminde sodyum parametresi yüzeysel sulama sınıfı haricinde asgari 2. sınıf, UF/NF<sub>sıkı</sub> bütünleşik membran sisteminde ise asgari 3. sınıf kalitede sulama suyu üretilebilmektedir. SAR parametresi bakımından 2. sınıf sulama suyu, tek kademe UF prosesinde ve UF/NF<sub>gevşek</sub> bütünleşik membran sisteminde elde edilmiştir. Kentsel atıksu arıtma

tesisleri çıkış sularında konvansiyonel sistemlerle yeterli miktarda giderilemeden alıcı ortamlara deşarj edilen, µg/L hatta ng/L seviyesinde bile çevrede toksik etki yaratabilen farmasotik, kişisel bakım ürünleri ve endokrin bozucular gibi farklı birçok dirençli yapıdaki mikrokirleticinin sulama öncesinde en yüksek seviyede giderimleri için NF ve TO içeren bütünleşik sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Tek kademe UF prosesi uygulaması bu tür kirleticilerin giderimi için yeterli olmadığından, kentsel arıtılmış atıksulardan sulama suyu elde edilmesi için UF sonrası NF ve TO prosesleri bütünleşik olarak uygulanmalıdır. Ayrıca topraktaki bitki besin dengesi bakımından arıtılmış kentsel atıksuların yüksek nütrient içeriğinin azaltılarak sulamaya uygun hale getirilmesi önem teşkil etmektedir. Bununla birlikte, arıtılmış kentsel atıksuyun organik ve inorganik kirletici kalitesi bakımından toprakta yaratacağı yükün de en az indirilmesi ve mikrobiyal kirliliğın tamamıyla giderilmesi gerekmektedir.

Bu nedenlerle, tek kademede UF ile her ne kadar asgari 2. sınıf kalitede sulama suyu üretilse de halk sağlığına zarar vermeyecek ve ekolojik dengeyi koruyacak düzeyde sulama amaçlı kullanım için arıtılmış kentsel atıksulara UF ile birlikte NF ve TO proseslerini içeren bütünleşik sistemlerin uygulandığı üçüncül arıtma uygulamalarını zaruri olarak nitelendirmek gerekmektedir. Literatürde sayısı günden güne artan çalışmalar da konunun önemini desteklemektedir.



## KAYNAKLAR

Acero J. L., Benitez F. J., Leal A. I., Real F. J., Teva F., Membrane Filtration Technologies Applied to Municipal Secondary Effluents for Potential Reuse, *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **177**, 390-398.

Agrafioti E. and Diamadopoulou E., A Strategic Plan for Reuse of Treated Municipal Wastewater for Crop Irrigation on the Island of Crete, *Agricultural Water Management*, 2012, **105**, 57-64.

Akgül D., Türkiye’de Ters Ozmoz ve Nanofiltrasyon Sistemleri ile İçme ve Kullanma Suyu Üretiminin Maliyet Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006, 222164.

Aküzüm T., Çakmak B., Gökalp Z., Evaluation of Water Resources Management in Turkey, *Journal of Agricultural Science*, 2010, **3**, 1.

APHA, AWWA, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewaters*, 21th ed., American Public Health Association Publication, Washington, USA, 2005.

Arı H., Türkiye’de İçme Suyu Amaçlı Büyük Kapasiteli Membran Sistemleri Maliyet Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009, 251864.

AWWA, *Water Treatment Membrane Processes*, American Water Works Association Research Foundation, Lyonnaise des Eaux, and Water Research Commission of South Africa, McGraw-Hill, USA, 1996.

AWWA, *Reverse Osmosis and Nanofiltration*, Manuel of Water Supply Practices-M46, Second Edition, American Water Works Association, Denver, USA, 1999.

Aydiner C., Hibrit Sistem Toz Aktif Karbon/Çapraz Akış Mikrofiltrasyon Teknolojisi ile Sulu Ortamdan Ağır Metal Giderimi ve Modellenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006, 216812.

Aydiner C., Bayramoğlu M., Kara S., Keskinler B., İnce O., Nickel Removal from Waters Using a Surfactant-Enhanced Hybrid PAC/MF Process. I. The Influence of System Component Variables, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2006, **45**, 3926-3933.

Aydiner C., Bayramoğlu M., Keskinler B., İnce O., Nickel Removal from Waters Using a Surfactant-Enhanced Hybrid Powdered Activated Carbon/Microfiltration Process. II. The Influence of Process Variables, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2009, **48**(2), 903-913.

Azais A., Mendret J., Gassara S., Petit E., Deratani A., Brosillon S., Nanofiltration for Water Reuse: Counteractive Effects of Fouling and Matrice on the Rejection of Pharmaceutical Active Compounds, *Separation and Purification Technology*, 2014, **133**, 313-327.

Bakopoulou S., Emmanouil C., Kungolos A., Assessment of Wastewater Effluent Quality in Thessaly Region, Greece, for Determining its Irrigation Reuse Potential, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2011, **74**, 188-194.

Başkan T., Arıtılmış Kentsel Atıksuların Tarımda Sulama Amaçlı Yeniden Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006, 223064.

Baynal K., Çok Yanıtlı Kalite Karakteristiklerinin Eşzamanlı Eniyilemesinde Taguchi Yöntemi ve Otomotiv Endüstrisinde Bir Uygulama, *Makine Mühendisleri Odası Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 2005, **16**, 2-18.

Bhattacharya P., Ghosh S., Mukhopadhyay A., Efficiency of Combined Ceramic Microfiltration and Biosorbent Based Treatment of High Organic Composite Wastewater: An Approach for Agricultural Reuse, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2013, **1**, 38-49.

Bixio D., Thoeve C., De Koning J., Joksimovic D., Savic D., Wintgens T., Melin T., Wastewater Reuse in Europe, *Desalination*, 2006, **187**(1-3), 89-101.

Bunani S., Yörükoğlu E., Sert G., Yüksel Ü., Yüksel M., Kabay N., Application of Nanofiltration for Reuse of Municipal Wastewater and Quality Analysis, *Desalination*, 2013, **315**, 33-36.

Bunani S., Yörükoğlu E., Yüksel Ü., Kabay N., Yüksel M., Sert G., Application of Reverse Osmosis for Reuse of Secondary Treated Urban Wastewater in Agricultural Irrigation, *Desalination*, 2015, **364**, 68-74.

Blstakova A., Bodik I., Dancova L., Jacubcova Z., Domestic Wastewater Treatment with Membrane Filtration – Two Years Experience, *Desalination*, 2009, **240**, 160-169.

Bonnelye V., Gueya L., Del Castillo J., UF/MF as RO Pre-treatment: The Real Benefit, *Desalination*, 2008, **222**, 59-65.

Büyükdere A., Tekstil Endüstrisi Atıksularının Membran Teknolojileri İle İleri Arıtılması ve Geri Kazanılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2008, 223934.

Can Doğan E., Yaşar A., Şen Ü., Aydın C., Water Recovery from Treated Urban Wastewater by Ultrafiltration and Reverse Osmosis for Landscape Irrigation, *Urban Water Journal*, DOI: 10.1080/1573062X.2014.992917.

Cardew P. T. and Le M. S., Chapter 1 - Overview, Cardew P. T., *Membrane processes: A technology guide*, Royal Society of Chemistry, England, 1.1-1.5, 1998.

Cazurra T., Water Reuse of South Barcelona's Wastewater Reclamation Plant, *Desalination*, 2008, **218**, 1-3, 43-51.

Chen J. P., Mou H., Wang L. K. and Matsuura T., Membrane Filtration (Section 7), Editors: Wang L. K., Hung Y-T., Shammass N. K., *Handbook of Environmental Engineering, Volume 4: Advanced Physicochemical Treatment Processes*, Humana Press, Totowa, New Jersey, USA, 2006.

Cheryan M., *Ultrafiltration and Microfiltration Handbook*, Second Edition, CRC Press, USA, 1998.

Chon K., Sarp S., Lee S., Lee J-H., Lopez- Ramirez J. A., Cho J., Evaluation of a Membrane Bioreactor and Nanofiltration for Municipal Wastewater Reclamation: Trace Contaminant Control and Fouling Mitigation, *Desalination*, 2011, **272**, 128-134.

Chon, K., Kim, S. J., Moon, J., Cho, J., Combined Coagulation-Disk Filtration Process as a Pretreatment of Ultrafiltration and Reverse Osmosis Membrane for Wastewater Reclamation: An Autopsy Study of a Pilot Plant, *Water Research*, 2012, **46**, 1803-1816.

Çevik N., Tekstil Boyar Maddelerinin Membran Filtre Uygulamasını ile Giderimi, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 2006, 202323.

ÇŞB, R.G. Tarih-No: 20.03.2010-27527, Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği, Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği Ek:7, *Çevre ve Şehircilik Bakanlığı*, Ankara, Türkiye, 2010.

ÇŞB, R.G. Tarih-No: 08.01.2006-26047, Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği, *Çevre ve Şehircilik Bakanlığı*, Ankara, Türkiye, 2006.

ÇŞB, R.G. Tarih-No: 31.12.2004-25687, Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği, *Çevre ve Şehircilik Bakanlığı*, Ankara, Türkiye, 2004.

Dere T., Kentsel Atıksuyun Membran Biyoreaktör ile Arıtılması ve Modellenmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2010, 274684.

El Tokhy M., Shaalan H. F., Sharaky A. M., Abd El-Monem N. M. and Al Bazedı G. A., Performance Analysis of Upgrading of Secondary Treated Wastewater by Nanofiltration, *World Applied Sciences Journal*, 2013, **25** (3), 384-390.

Eriksson P., Nanofiltration Extends the Range of Membrane Filtration, *Environmental Progress*, 1988, **7**(1), 58-62.

Escher B. I., Baumgartner R., Koller M., Treyer K., Lienert J., McArđell C. S., Environmental Toxicology and Risk Assessment of Pharmaceuticals from Hospital Wastewater, *Water Research*, 2011, **45**, 75-92.

Fan L., Nguyen T., Roddick F. A., Harris J. L., Low Pressure Membrane Filtration of Secondary Effluent in Water Reuse: Pre-treatment for Fouling Reduction. *Journal of Membrane Science*, 2008, **320**, 135-142.

FAO, *Wastewater Treatment and Use in Agriculture*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, M.B. Pescod, Rome, 1992.

Gao, D., Li Z., Wen Z., Ren N., Occurrence and Fate of Phthalate Esters in Full-Scale Domestic Wastewater Treatment Plants and Their Impact on Receiving Waters along the Songhua River in China, *Chemosphere*, 2014, **95**, 24-32.

Garcia-Figueruelo C., Bes-Pia A., Mendoza-Roca J. A., Lora-Garcia J., Cuartas-Urbe B., Reverse Osmosis of the Retentate from the Nanofiltration of Secondary Effluents, *Desalination*, 2009, **240**, 274-279.

Goodman N. B., Taylor R. J., Xie Z., Gozukara Y., Clements A., A Feasibility Study of Municipal Wastewater Desalination Using Electrodialysis Reversal to Provide Recycled Water for Horticultural Irrigation, *Desalination*, 2013, **317**, 77-83.

Gönder B. Z., Arayıcı S., Barlas H., Advanced Treatment of Pulp and Paper Mill Wastewater by Nanofiltration Process: Effects of Operating Conditions on Membrane Fouling, *Separation and Purification Technology*, 2011, **76**, 292-302.

Guo W., Ngo H-H., Li J., A Mini Review on Membrane Fouling, *Bioresource Technology*, 2012, **122**, 27-34.

Hacıfettahoğlu A., Biyodizel Üretim Tesisi Atıksularının Membran Filtrasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2009, 232758.

Hepşen R., Süt Endüstrisi Atıksularının Membran Teknolojisi ile Geri Kazanımı ve Deneysel Tasarım Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010, 282740.

Jin P., Jin X., Wang X. C., Shi X., An Analysis of the Chemical Safety of Secondary Effluent for Reuse Purposes and the Requirement for Advanced Treatment, *Chemosphere*, 2013, **91**, 558-562.

Judd S. and Jefferson B., *Membranes for Industrial Wastewater Recovery and Reuse*, 1st Edition, Elsevier Ltd, Oxford, UK, 2003.

Kajenthira A., Siddiqi A., Anadon L. D., A New Case for Promoting Wastewater Reuse in Saudi Arabia: Bringing Energy into the Water Equation, *Journal of Environmental Management*, 2012, **102**, 184-192.

Kaleli B., Atıksuların İleri Arıtımında Membran Proseslerinin Kullanımının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006, 182528.

Kaya Y., Gönder Z. B., Vergili İ., Barlas H., The Effect of Transmembrane Pressure and pH on Treatment of Paper Machine Process Waters by Using a Two-Step Nanofiltration Process: Flux Decline Analysis, *Desalination*, 2010, **250**, 150-157.

Kimura K., Iwase T., Kita S., Watanabe Y., Influence of Residual Organic Macromolecules Produced in Biological Wastewater Treatment Processes on Removal of Pharmaceuticals by NF/RO Membranes, *Water Research*, 2009, **43**, 3751-3758.

Koyuncu İ., Nanofiltrasyon Membranları ile Tuz Gideriminde Organik İyon Etkisi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2001, 112233.

Köseoğlu H., Hibrit Siyanürleme ve Yüksek Basınçlı Membran Prosesleriyle Madencilik Atıksularından Gümüş Geri Kazanımı-Sentetik Su Deneyleri, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2005, 172511.

Kurt E., Tekstil Endüstrisi Ayrılmış Atıksularının Pilot Ölçekli Membran Sistemi İle Arıtımı ve Geri Kazanımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012, 315243.

Lau W. J., Ismail A. F., Firdaus S., Car Wash Industry in Malaysia: Treatment of Car Wash Effluent Using Ultrafiltration and Nanofiltration Membranes, *Separation and Purification Technology*, 2013, **104**, 26-31.

Loos R., Carvalho R., Antonio D. C., Comero S., Locoro G., Tavazzi S., Paracchini B., Ghiani M., Lettieri T., Blaha L., Jarosova B., Voorspoels S., Servaes K., Haglund P., Fick J., Lindberg R. H., Schwesig D., Gawlik B. M., EU-Wide Monitoring Survey on Emerging Polar Organic Contaminants in Wastewater Treatment Plant Effluents, *Water Research*, 2013, **47**, 6475-6487.

Metcalf and Eddy, *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*, McGraw-Hill, 4th edition/revised by Tchobanoglous G., L-Burton F., Stensel H. D., North America, 2003.

Meng F., Zhang H., Yang F., Zhang S., Li Y., Zhang X., Identification of Activated Sludge Properties Affecting Membrane Fouling in Submerged Membrane Bioreactors, *Separation and Purification Technology*, 2006, **51**, 95-103.

Michael I., Rizzo L., Mc Ardell C. S., Manaia C. M., Merlin C., Schwartz T., Dagot C., Fatta-Kassinos D., Urban Wastewater Treatment Plants as Hotspots for the Release of Antibiotics in the Environment: A review, *Water Research*, 2013, **47**(3), 957-995.

Mizyed N. R., Challenges to Treated Wastewater Reuse in Arid and Semi-Arid Areas, *Environmental Science Policy*, 2013, **25**, 186-195.

Montgomery D. C., *Design and Analysis of Experiments*, 5th.ed., John Wiley, New York, 1991.

Mulder M., *Basic Principles of Membrane Technology*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1991.

Mohammadi T., Kazemimoghadam M., Saabadi M., Modeling of Membrane Fouling and Flux Decline in Reverse Osmosis During Separation of Oil in Water Emulsions, *Desalination*, 2003, **157**, 369-375.

Mousavi S. M., Yaghmaei S., Jafari A., Vossughi M., Ghobadi Z., Optimization of Ferrous Biooxidation Rate in a Packed Bed Bioreactor Using Taguchi Approach, *Chemical Engineering Processing*, 2007, **46**, 935-940.

Mrayed S. M., Sanciolò P., Zou L., Leslie G., An Alternative Membrane Treatment Process to Produce Low-Salt and High-Nutrient Recycled Water Suitable for Irrigation Purposes, *Desalination*, 2011, **274**, 144-149.

Murtaza G., Ghafoor A., Qadir M., Irrigation and Soil Management Strategies for Using Saline-Sodic Water in a Cotton-Wheat Rotation, *Agricultural Water Management*, 2006, **81**, 98-114.

Myers R. H., Montgomery D. C., Anderson-Cook C. M., *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, 3rd.ed., John Wiley & Sons. Inc. Hoboken, New Jersey, Canada, 2009.

Nghiem L. D., Hawkes S., Effects of Membrane Fouling on the Nanofiltration of Pharmaceutically Active Compounds (PhACs): Mechanisms and Role of Membrane Pore Size, *Separation and Purification Technology*, 2007, **57**, 176-184.

Norton-Brandao D., Scherrenberg S. M., van Lier J. B., Reclamation of Used Urban Waters for Irrigation Purposes - A Review of Treatment Technologies, *Journal of Environmental Management*, 2013, **122**, 85-98.

Özçelep B., Kağıt Endüstrisi Atıksularının Membran Prosesleriyle İleri Arıtımı, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009, 282844.

Öztürk İ., Timur H., Koşkan U., *Atıksu Arıtımının Esasları-Evsel, Endüstriyel Atıksu Arıtımı ve Arıtma Çamurlarının Kontrolü*, Çevre ve Orman Bakanlığı, Ankara, 223-226, 2005.

Park C., Hong S-W., Hak Chung T., Choi Y-S., Performance Evaluation of Pretreatment Processes in Integrated Membrane System for Wastewater Reuse, *Desalination*, 2010, **250**, 673-676.

Pauwels B., Verstraete W., The Treatment of Hospital Wastewater: An Appraisal, *Journal of Water and Health*, 2006, **04.4**, 405-476.

Pedrero F., Kalavrouziotis I., Alarcon J. J., Koukoulakis P., Asano T., Use of Treated Municipal Wastewater in Irrigated Agriculture-Review of Some Practices in Spain and Greece, *Agricultural Water Management*, 2010, **97**, 1233-1241.

Radjenovic J., Petrovic M., Ventura F., Barcelo D., Rejection of Pharmaceuticals in Nanofiltration and Reverse Osmosis Membrane Drinking Water Treatment, *Water Research*, 2008, **42**, 3601-3610.

Rai P., Majumdar G. C., Das Gupta S., De S., Effect of Various Pretreatment Methods on Permeate Flux and Quality During Ultrafiltration of Mosambi Juice, *Journal of Food Engineering*, 2007, **78**, 561-568.

Ripperger S. and Altmann J., Crossflow Microfiltration-State of Art, *Seperation and Purification Technology*, 2002, **26**, 19-31.

Ross P. J., *Taguchi Techniques for Quality Engineering*, Second Edition, McGraw-Hill, New York, 1996.

Rygaard M., Binning P. J. and Albrechtsen H. - J., Increasing Urbanwater Self-Sufficiency: Newera, New Challenges, *Journal of Environmental Management*, 2011, **92**, 185-194.

Safarzadeh S. M., Moradkhani D., Ilkhchi O. M., Golshan H. N., Determination of the Optimum Conditions for the Leaching of Cd-Ni Residues from Electrolytic Zinc Plant Using Statistical Design of Experiments, *Seperation and Purification Technology*, 2008, **58**, 367-376.

Sahar E., David I., Gelman Y., Chikurel H., Aharoni A., Messalem R., Brenner A., The Use of RO to Remove Emerging Micropollutants Following CAS/UF or MBR Treatment of Municipal Wastewater, *Desalination*, 2011, **273**(1), 142-147.

Scott K. and Hughes R., *Industrial Membrane Seperation Technology*, First Edition, Blackie Academic & Professional, Great Britain, 1996.

Shravani D., Lakshmi P. K., Balasubramaniam J., Preparation and Optimization of Various Parameters of Enteric Coated Pellets Using the Taguchi L9 Orthogonal Array Design and Their Characterization, *Acta Pharmaceutica Sinica B*, 2011, **1**(1), 56-63.

Sharma P., Verma A., Sidhu K. R., Pandey P. O., Process Parameter Selection for Strontium Ferrite Sintered Magnets Using Taguchi L9 Orthogonal Design, *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, **168**, 147-151.

Sousa M. A., Gonçalves C., Vilar V. J. P., Boaventura R. A. R., Alpendurada M. F., Suspended TiO<sub>2</sub>-Assited Photocatalytic Degradation of Emerging Contaminants in a Municipal WWTP Effluent Using a Solar Pilot Plant with CPCs, *Chemical Engineering Journal*, 2012, **198-199**, 301-309.

Tam L. S., Tang T. W., Lau G. N., Sharma K. R., Chen G. H., A Pilot Study for Wastewater Reclamation and Reuse with MBR/RO and MF/RO Systems, *Desalination*, 2007, **202**, 106-113.

Torunoğlu P., Türkiye’ de Kurulabilecek Tuz Gideren Membran Teknolojisi Sistemleri İçin Bilimsel Esaslı Tasarıma Dayalı Maliyet Analizlerinin Yapılması, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009, 293704.

Tunmen H., Bazı Kinolonların LC ile Ayrılma ve Tayinlerinin Deneysel Tasarım Tekniği Kullanılarak Optimizasyonu, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2011, 295106.

USEPA, EPA/625/R-04/108, Guidelines for Water Reuse, *U.S. Environmental Protection Agency*, U.S. Agency for International Development, Washington, DC, 167, 250, 2004.

URL-1: <http://www.sterlitech.com/membrane-process-development/flat-sheet-membranes/nanofiltration-nf-membrane.html>, (Ziyaret tarihi: 17 Şubat 2015).

URL-2:  
[http://www.eurosan.com.tr/dosyalar/urunler/hydranautics\\_membranlar/LFC3.pdf](http://www.eurosan.com.tr/dosyalar/urunler/hydranautics_membranlar/LFC3.pdf), (Ziyaret tarihi: 17 Şubat 2015).

URL-3: [http://www.microdyn-nadir.com/userfiles/files/downloads/catalogue\\_2014.pdf](http://www.microdyn-nadir.com/userfiles/files/downloads/catalogue_2014.pdf), (Ziyaret tarihi: 17 Şubat 2015).

URL-4 [www.eurosan.com.tr/dosyalar/urunler/hydranautics\\_membranlar/CPA3.pdf](http://www.eurosan.com.tr/dosyalar/urunler/hydranautics_membranlar/CPA3.pdf), (Ziyaret tarihi: 17 Şubat 2015).

URL-5: <http://support.minitab.com/en-us/minitab/17/topic-library/modeling-statistics/anova/anova-statistics/understanding-sums-of-squares/>, (Ziyaret tarihi: 04 Eylül 2015).

URL-6: <http://www.lenntech.com/products/Koch,-Fluid-Systems/8482000/TFC-HR4-/-4040-HR/index.html>, (Ziyaret tarihi: 10 Eylül 2015).

Urtiaga A. M., Perez G., Ibanez R., Ortiz I., Removal of Pharmaceuticals from a WWTP Secondary Effluent by Ultrafiltration/Reverse Osmosis Followed by Electrochemical Oxidation of the RO Concentrate, *Desalination*, 2013, **331**, 26-34.

Van Der Bruggen B., Mänttäre M., Nystrom M., Drawbacks of Applying Nanofiltration and How to Avoid Them: A Review, *Separation and Purification Technology*, 2008, **63**, 251-263.

Vela M. C. V., Blanco S. A., Garcia J. L., Rodriguez E. B., Analysis of Membrane Pore Blocking Models Applied to the Ultrafiltration of PEG, *Separation and Purification Technology*, 2008, **62**, 489-498.

WHO, *Health Guidelines for the Use of Wastewater in Agriculture and Aquaculture*, Report of a World Health Organization Scientific Group, Geneva, 1989.



WHO, Annex 1: Good Irrigation Practice, World Health Organization, *WHO Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater, Volume II: Wastewater Use in Agriculture*, Geneva, 177-180, 2006.

Xie R. J., Gomez M. J., Xing Y. J., Understanding Permeability Decay of Pilot-Scale Microfiltration in Secondary Effluent Reclamation, *Desalination*, 2008, **219**, 26-39.

Xu P., Bellona C., Drewes J. E., Fouling of Nanofiltration and Reverse Osmosis Membranes During Municipal Wastewater Reclamation: Membrane Autopsy Results from Pilot Scale Investigations, *Journals of Membrane Science*, 2010, **353**, 111-121.

Yaşar A., Can Doğan E., Köseoğlu-İmer Y. D., Aydın C., Bütünleşik membran sistemi kullanılarak sulama suyu geri kazanımı, *3. Ulusal Membran Teknolojileri ve Uygulamaları Sempozyumu*, Elazığ, Türkiye, 26-27 Eylül 2013.

Yaşar A., Can Doğan E., Ayberk H. S., Aydın C., Kentsel Arıtılmış Atıksulardan Sulama Suyu Geri Kazanımında Ultrafiltrasyon ve Nanofiltrasyon Proseslerinin Etkinliklerinin Belirlenmesi, *11. Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi*, Bursa, Türkiye, 15-17 Ekim 2015.

Yıldız D., Bazı Metal İyonlarının Bulutlanma Noktası Ekstraksiyonu ile Zenginleştirilerek AAS ile Tayini ve Analiz Koşullarının Deneysel Tasarım ile Optimizasyonu, Doktora Tezi, Adnan Menderes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aydın, 2011, 300123.

Zaidi A, Simms K, Kok S, The Use of Microfiltration and Ultrafiltration for the Removal of Oil and Suspended Solids from Oil Field Brine, *Water Science Technology*, 1992, **25**, 163-176.

Zanetti F., De Luca G., Sacchetti R., Performance of a Full-Scale Membrane Bioreactor System in Treating Municipal Wastewater for Reuse Purposes, *Bioresource Technology*, 2010, **101**, 3768-3771.

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

**Fiş A.**, Evsel Katı Atık Toplama ve Bertaraf Yöntemleri, *MITAGED Yerel Dünya İdari-Teknik-Siyasi Dergi*, 2005, 1, 22-25.

Arslan A., Can Doğan E., Veli S., **Yaşar A.**, Kocaeli Üniversitesi Umuttepe Yerleşkesi'nde Su Kullanımı, Atıksu Özellikleri ve Arıtımı, *9. Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi*, Samsun, Türkiye, 05-08 Ekim 2011.

Can Doğan E., **Yaşar A.**, Arslan A., Hastane Atıksuyu İçerikli Kentsel Atıksu Arıtma Tesisi Çıkış Sularının Yeniden Kullanımının Araştırılması, *1. Ulusal Disiplinlerarası Çevre Kongresi*, Sakarya, Türkiye, 14-16 Mayıs 2012.

**Yaşar A.**, Can Doğan E., Arslan A., Hastane Atıksularında Makro ve Mikro Kirlenimler ve Arıtma Seçenekleri, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2013, **29**(2), 144-158.

**Yaşar A.**, Can Doğan E., Köseoğlu-İmer Y. D., Aydın C., Bütünleşik membran sistemi kullanılarak sulama suyu geri kazanımı, *3. Ulusal Membran Teknolojileri ve Uygulamaları Sempozyumu*, Elazığ, Türkiye, 26-27 Eylül 2013.

Can Doğan E., **Yaşar A.**, Şen Ü., Aydın C., Water Recovery from Treated Urban Wastewater by Ultrafiltration and Reverse Osmosis for Landscape Irrigation, *Urban Water Journal*, 2015, DOI: 10.1080/1573062X.2014.992917.

**Yaşar A.**, Can Doğan E., Ayberk H. S., Aydın C., Kentsel Arıtılmış Atıksulardan Sulama Suyu Geri Kazanımında Ultrafiltrasyon ve Nanofiltrasyon Proseslerinin Etkinliklerinin Belirlenmesi, *11. Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi*, Bursa, Türkiye, 15-17 Ekim 2015.

## ÖZGEÇMİŞ

1976 yılında Samsun'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Sinop'ta tamamladı. 1993 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nü 1997 yılında birincilikle bitirdi. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda aynı yıl başladığı Yüksek Lisans eğitimini 1999 yılında tamamladı. 1997-2000 yılları arasında İzmit Saraybahçe Belediyesi Temizlik İşleri Müdürlüğü'nde Çevre Mühendisi olarak çalıştı. Bu sırada devam ettiği yüksek lisans eğitimi tez çalışmasında, "Saraybahçe Belediyesi'nde Eysel Katı Atık Kompozisyon Araştırması"nı yürüttü. 2000 yılı Ağustos ayında Kocaeli Üniversitesi Yapı İşleri Teknik Daire Başkanlığı'nda Kontrol Mühendisi olarak göreve başladı. Kocaeli Üniversitesi Umuttepe Yerleşkesi' nin yeniden yapılanma sürecinden bugüne kadar, Umuttepe Merkez Kampüsü'nde içmesuyu, atıksu, yağmursuyu, tesisat galerisi, arıtma tesisi vb. gibi altyapı sistemlerinin etüt proje, imalat ve işletme aşamalarında görev aldı. Halen aynı birimde Kontrol Mühendisi olarak görevini sürdürmektedir.