

Kentsel Atıksu Arıtma Tesisi İkinci Arıtma Çıkış Suyundan Nanofiltrasyon Prosesi İle Su Geri Kazanımı

Esra Can Doğan^{1,*}, Ali Oğuzhan Narcı², Aynur Yaşar³, Eylem Topkaya⁴, Ayla Arslan⁵, Sevil Veli⁶

^{1,2,4,5,6}Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye

³Kocaeli Üniversitesi Umutepe Yerleşkesi, Yapı İşleri Daire Başkanlığı, Kocaeli, Türkiye

Makale Tarihiçesi

Gönderim: 03.09.2022

Kabul: 25.12.2022

Yayın: 30.06.2023

Araştırma Makalesi

Öz – Son yıllarda suyun kıt olduğu ve dolayısıyla suyun ekonomik değer taşıdığı yörelerde arıtılmış atıksulardan su geri kazanımına ve suyun yeniden kullanımına ilgi giderek artmaktadır. Bu çalışmada, kentsel ikincil arıtma çıkış sularına laboratuvar ölçeğinde NF (Nanofiltrasyon) prosesi uygulanarak, çıkış suyunun çeşitli amaçlar için geri kazanımında yüksek oranda organik/inorganik madde gideriminin yanısıra mikrobiyal kirliliğin de giderimi ile etkili bir su yönetimi yaklaşımı ortaya konması amaçlanmıştır. Deneysel çalışmalar “Taguchi Deneysel Tasarım” uygulaması ile planlanmıştır. Çalışmada transmembran basıncı (5; 7.5; 10 bar), VRF (hacim azaltma faktörü: 2; 3; 4) ve membran tipi (NP030; NF270; NF90) değişkenleri ve değişken seviyelerinin NF prosesi için “Yanıt Yüzey Yöntemi” ile optimizasyonu gerçekleştirilmiş olup en iyi performans 5 bar ve 2 VRF işletme şartları ile NF90 membran olarak belirlenmiştir. Doğrulama deneyi sonuçlarına göre çıkış suyunda toplam koliform değeri 6.8×10^6 kob/100 mL’den tespit edilemez düzeye kadar düşürülmüş, Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) 14 mg/L ve Toplam Çözünmüş Katı (TÇK) 86 mg/L olarak tespit edilmiştir. Deney sonrası elde edilen NF süzüntü suyunun yeniden kullanılabilirliği, ulusal ve uluslararası mevzuatlara göre değerlendirilmiş, pH 6.5, Biyolojik Oksijen İhtiyacı (BOİ₅) 9.6 mg/L olarak bulunmuş ve süzüntü suyunda fekal koliform ile Askıda Katı Madde (AKM)’ye rastlanmamıştır. Buradan elde edilen süzüntü suyunun sulama amaçlı kullanıma uygun olduğu, ayrıca endüstriyel soğutma suyu ve yeraltı suyuna deşarj gibi farklı amaçlar için de kullanılabilceği görülmektedir.

Anahtar Kelimeler – Kentsel atıksu, mikrobiyal kirlilik, nanofiltrasyon, su geri kazanım, taguchi deney tasarımı

Water Recovery From The Secondary Treatment Effluent Of Urban Wastewater Treatment Plant Using Nanofiltration Process

^{1,2,4,5,6}Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Kocaeli University, Kocaeli, Türkiye

³Kocaeli University Department of Construction and Technical Works, Kocaeli, Türkiye

Article History

Received: 03.09.2022

Accepted: 25.12.2022

Published: 30.06.2023

Research Article

Abstract – In recent years, interest in water recovery from treated wastewater and water reuse has been increasing in the regions having water shortage and hence economic value of water. The study aims to recover effluent for urban secondary treatment effluent with the laboratory scale NF (Nanofiltration) process with the removal of a high rate of organic/inorganic matter as well as microbial pollution, thus be able to introduce effective water management approach for this effluent water Taguchi Design was applied to plan experimental procedure. The transmembrane pressure (5; 7.5; 10 bar), volume reduction factor: (VRF) (2; 3; 4) and membrane type (NP030; NF270; NF90) were optimized with the “Response Surface Method” for the NF process. As a result NF90 with 5 bar and 2 VRF operating conditions were selected as the best performing membrane for water recovery. Based on the validation experiment results, the total coliform of the effluent reduced from 6.8×10^6 cfu/100 mL to below to detectable level. Further, Chemical Oxygen Demand (COD) and Total Dissolved Solids (TDS) decreased to 14 mg/L and 86 mg/L, respectively. Based on the assessment of the national and international regulations on the reusability of NF permeate water from experiment; pH, Biological Oxygen Demand (BOD₅) were 6.5, and 9.6 mg/L, as well as fecal coliform and total suspended solids (TSS) were not detected in the permeate. To come to the conclusion, the permeate water acquired from the proces is suitable for irrigation purposes and can also be used for the purposes such as industrial cooling water and discharge to groundwater.

Keywords – Urban wastewater, microbial pollution, nanofiltration, water recovery, taguchi experimental design

¹ esracan@kocaeli.edu.tr

² alioguzhannarci@kocaeli.edu.tr

³ aynurfis@kocaeli.edu.tr,

⁴ eylemtopkaya@kocaeli.edu.tr

⁵ ataberk@kocaeli.edu.tr

⁶ sevilv@kocaeli.edu.tr

*Corresponding Author

1. Giriş

Su kıtlığı sadece kurak ve yarı kurak bölgelerde bir sorun oluşturmakla kalmayıp; nüfus artışı, yaşam standartlarının yükselmesi, iklim değişikliği, endüstrileşme, tarım ve insan faaliyetlerindeki artışlar da dünya genelinde su kıtlığını giderek arttırmaktadır (Chon, Kim, Moon ve Cho, 2012; Bhattacharya, Ghosh ve Mukhopadhyay, 2013). Dünya Bankası'nın 2020 yılı raporuna göre, 2050 yılına kadar dünya nüfusunun yarısından fazlasının su kıtlığı riski altında olacağı belirtilmektedir (Kharraz vd., 2022). Artan su kıtlığı ile birlikte su ihtiyacının temiz su kaynaklarından karşılanmasındaki zorluklar da, alternatif su kaynaklarına yönelme gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Atıksu arıtma tesislerinde arıtılan atıksuların geri kazanılarak yeniden temiz su kaynağı olarak kullanılması bunun için önemli bir fırsat haline gelmiştir (Hacıfazlıoğlu vd., 2018; Hube vd., 2020).

Atıksuların yeniden kullanımı ile ilgili Avrupa ve Akdeniz Bölgeleri gibi yetersiz su dengesine sahip alanlarda artan uygulamalar mevcuttur (Bakopoulou, Emmanouil ve Kungolos, 2011; Rygaard, Binning ve Albrechtsen, 2011; Agrafioti ve Diamadopoulou, 2012). Amerika Birleşik Devletleri, Katar, Suudi Arabistan, Kuveyt ve İsrail, kişi başına atıksuyun yeniden kullanımı açısından en üst sınıf ülkeler arasındadır. Avustralya'da tahmini 2 milyar m³ atıksu her yıl 580 belediyenin arıtma tesisinde arıtılarak, sulama ve diğer amaçlar için kullanılmaktadır (Shahid, Kashif, Pathak, Choi ve Rout, 2022). Orta Doğu ve Afrika'da ise birçok kurak ve yarı kurak alan, sınırlı su kaynakları nedeniyle ciddi su stresi ile karşı karşıyadır (Chen vd., 2021). Ancak, tüm dünyada yaklaşık 14.2 milyar m³/yıl olan yeniden kullanılabilir su hacmi, toplam evsel atıksu hacminin %4'ünden daha azını temsil etmektedir (Yang vd., 2021). Su kıtlığı yaşayacak ülkeler arasında olan Türkiye'de (Aküzüm, Çakmak ve Gökcalp, 2010) ise atıksuyun yeniden kullanımı ve bununla ilgili uygulamalar büyük bir potansiyele sahiptir. Ülkemizde bu alandaki çalışmalar daha çok kentsel atıksuların geri kazanımı üzerinden ilerlemektedir. Çünkü arıtılmış kentsel atıksular yüksek hacim, uygulanabilirlik ve iyi bilinen kalite özelliklerinden dolayı sürdürülebilir su yönetimi için en iyi yeniden kullanım kaynakları arasında gösterilmektedir (Acero, Benitez, Leal, Real ve Teva, 2010; Zanetti, De Luca ve Sacchetti, 2010; Can-Doğan, Yaşar, Şen ve Aydın, 2016).

Kentsel atıksuların arıtımında genellikle konvansiyonel sistemler kullanılmaktadır. Ancak atıksu ortamında bulunan bazı kimyasal maddeler ve mikrobiyal kirleticiler, insan ve çevre sağlığı üzerinde kısa ve uzun vadede negatif etkilere yol açmaktadır (Pedrero, Kalavrouziotis, Alarcon, Koukoulakis ve Asano, 2010; Zanetti vd., 2010; Jin, Jin, Wag ve Shi, 2013; Mizyed, 2013; Can-Doğan vd., 2016). Bu nedenle insanların temas halinde olduğu alanlarda kentsel atıksuların geri kazanımı için yüksek verimlerde arıtım teknolojilerine ihtiyaç duyulmaktadır (Acero vd., 2010; Maryam ve Büyükgüngör, 2019). 25 Mayıs 2020 tarihinde yayınlanan Avrupa Parlamentosu ve Konseyi (AB) 2020/741 Yönetmeliği, suyun yeniden kullanımı için minimum gereksinimleri içermektedir. AB tarafından oluşturulan yeni Döngüsel Ekonomi Eylem Planı'na göre, atıksu arıtma sürecinin bir parçası olarak gerçekleştirilen faaliyetlerin çoğu, atıksuyu; su ve besin kaynağı olarak kullanabilen yeni teknolojilerin keşfedilmesiyle ilgili olmalıdır (Czuba vd., 2021). Bu nedenle arıtılmış kentsel atıksulardaki olumsuz etkileri ortadan kaldıracak ileri arıtma stratejilerinin geliştirilmesine ve alternatif yöntemler sunulmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Geri kazanılmış atıksuda mikrobiyal açıdan sağlık riskini kontrol altında tutmak için ileri arıtma yöntemi olarak genellikle dezenfeksiyon prosesi uygulanmakta olup, bu işlem yan ürünler oluşturması, dezenfektanların nakliyesi ve depolanması gibi problemler oluşturmaktadır. Arıtılmış atıksuların sulama amaçlı yeniden kullanımı ve geri kazanımı için, kentsel atıksulara uygulanan alternatif ileri arıtma teknikleri arasında en ön sırada membran prosesler gösterilmektedir (Wu, 2019; Rizzo vd., 2020; Suwaileh, Johnson ve Hilal, 2020; Czuba vd., 2021; Shahid vd., 2022). Teknolojinin hızlı gelişimiyle membran fiyatları, ilk yatırım ve işletme maliyetlerindeki düşüş nedeniyle de membran proseslerin bu alandaki kullanımları giderek yaygınlaşmaktadır (Guo, Ngo ve Li, 2012; Hube vd., 2020).

Membran prosesler, çeşitli monovalent ve iki değerli iyonları çözümlerden uzaklaştıran ve sudaki tuzluluğu azaltan (Hacıfazlıoğlu vd., 2018), özellikle inorganik ve organik mikrokirleticilerin giderimi için iyi performans gösteren teknolojilerdir. Ultrafiltrasyon (UF) ile içme suyu elde edilmesi için yapılan bir çalışmada kaynak olarak yüzey suyu kullanıldığında hollow fiber UF membran ile filtrasyon sonrasında süzüntü suyunda E. koliform gözlenmiş olup etkin bir mikrobiyal giderim için ilave kimyasal dezenfeksiyon gerekliliği vurgulanmıştır (Zhang ve diğ., 2019). Bununla birlikte, Wintgens vd., (2005) ve Warsinger vd., (2018), pratikteki deneyimlerde ve membran işletme şartlarında elde edilen pozitif koliform sonuçlarına göre yeniden kullanım tesislerinde kullanılan tipik UF membranlarının, her zaman bakteriyel kontaminasyona karşı tam bir engel oluşturmadığını ifade etmektedirler. Geri kazanılmış atıksular endüstriyel proseslerde soğutma, içilebilir ve/veya içilemez kentsel kullanım, yeraltısuyu ıslahı gibi amaçlarla yeniden kullanılabilir (Czuba vd., 2021). Rekreatif kullanım gibi insan vücudu ile temas edebilecek amaçlar için geri kazanılmış atıksular kullanıldığında suyun arıtımı için insan sağlığı riskini en aza indirecek nanofiltrasyon (NF) prosesi gibi gelişmiş su arıtma seçenekleri kullanılmalıdır (Ngo vd., 2021). Bu nedenle hem mikrobiyal açıdan sağlık risklerini ortadan kaldırmak hem de yüksek organik kirletici giderim verimlerini yakalamak amacıyla, son yıllarda NF membran prosesi uygulamaları artmaktadır. Literatürde atıksuların geri kazanımı için NF uygulanması konusunda çeşitli çalışmalar bulunmaktadır.

Czuba vd., (2021) yaptıkları çalışmada UF sonrası nanofiltrasyon (NF) ile elde ettikleri süzüntünün Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) bakımından soğutma suyu ve içilebilir su amaçlı, Toplam Çözünmüş Katı (TÇK) bakımından ise sadece soğutma amaçlı kullanılabilirliğini tespit etmişlerdir. NF prosesi ile maliyetteki düşüşlerle birlikte, sudaki monovalent tuzların, divalent iyonların, organik maddelerin giderimi ve bakteri eliminasyonunda etkin bir verim sağlandığı diğer çalışmalarda görülmektedir (Parlar, Hacıfazlıoğlu, Kabay, Pek ve Yüksel, 2019; Wang vd., 2020; Shahid vd., 2022). Hacıfazlıoğlu vd., (2018) yaptıkları çalışmada atıksuyun yeniden kullanımı için kullandıkları NF270 membranı ile 20 bar basınçta elde ettikleri NF süzüntüsünün orta toleranslı bitkiler için kullanılabilir olduğunu tespit etmişlerdir. Evsel atıksuların arıtımında kimyasal, mikrobiyolojik ve ekotoksikolojik olarak NF ve ters ozmos (TO) membranların değerlendirildiği çalışmada ise kimyasal parametreler için NF90 ve TO membranların etkinliğinin yüksek olduğu, membran prosesler ile süzüntü suyu eldesinde mikrobiyolojik parametrelerde bazı sınırlamaların ortaya çıktığı, ekotoksikolojik olarak değerlendirildiğinde ise uzun vadede NF90 ve SW30 gibi NF ve TO membranların daha etkili sonuçlar verdiği görülmektedir (Palma vd., 2016).

Bu çalışmada, biyolojik olarak arıtılmış kentsel atıksuların ikincil çıkış suyuna NF membran prosesi uygulanarak, organik ve inorganik madde ile mikrobiyal kirletici giderim performansları ve süzüntü suyunun çeşitli amaçlar için geri kazanılabilirliği incelenmiştir. Laboratuvar ölçekli çapraz akış membran ünitesinde gerçekleştirilen NF deneylerinde, membran tipi, işletme basıncı ve hacim azaltma faktörü (VRF) değişkenleri ve değişken seviyeleri esas alınarak Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY, response surface methodology) ile optimum işletme şartları giderim verimi, toplam koliform sayısı ve süzüntü akışı üzerinden belirlenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Kullanılan Atıksuların Karakterizasyonu ve Analitik Yöntemler

2019 yılı itibari ile yaklaşık 40.000 kişilik nüfusa sahip Kocaeli Üniversitesi Umuttepe Yerleşkesi'nde hastane, fakülteler, laboratuvarlar, kafeteryalar, yurtlar ve lojmanlar gibi kaynaklardan oluşan atıksular, yerleşke alanında bulunan kentsel atıksuların arıtma tesisine iletilmektedir. Yerleşke, 2019 yılı verilerine göre 1896,3 m³/gün su tüketimine sahiptir (bkz. Tablo 1).

Su tüketimi ve buna bağlı olarak atıksular miktarı öğrenci nüfusunun yoğun olduğu aylarda artış göstermektedir. 44.2 ha yeşil alana sahip olan üniversitede yaklaşık 700 m³/gün' lük sulama suyu ihtiyacı çoğunlukla şebeke suyundan karşılanmaktadır. Bu nedenle yaz aylarında da öğrenci olmamasına karşılık su tüketimi aynı seviyelerde gözlenmektedir.

Deneysel çalışmada kullanılan atıksu Kocaeli Üniversitesi Umuttepe Yerleşkesi Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi ikincil arıtma çıkış suyudur. Tesis 3000 m³/gün kapasite ile uzun havalandırmalı aktif çamur sistemine uygun olarak çalıştırılmaktadır. Tablo 2’de ikincil arıtma çıkış suyu ortalama karakterizasyon değerleri ile uygulanan analitik yöntemler verilmiştir. Deneysel çalışma sonuçları KOİ, TÇK, toplam koliform gibi su kalite parametreleri üzerinden değerlendirilmiştir.

Tablo 1
Kocaeli Üniversitesi Umuttepe Yerleşke’sinde su tüketimleri, 2019

Aylar	1. Öğrenci Yurdu (m ³)	Araştırma ve Uygulama Hastanesi (m ³)	2. Öğrenci Yurdu (m ³)	Diğer Birimler (m ³)
Ocak	14162	12350	776	31053
Şubat	12553	12119	666	28127
Mart	17756	11884	984	29914
Nisan	17724	11111	986	36903
Mayıs	21011	12037	1310	31078
Haziran	11166	8017	695	23162
Temmuz	8043	11613	310	34488
Ağustos	7204	8999	232	27986
Eylül	12474	10569	649	29171
Ekim	19790	11502	1156	32615
Kasım	17835	10509	1057	27925
Aralık	22070	12614	1432	34368
Günlük Ortalama (m ³ /gün)	498.1	365.3	28.1	1004.9
Yerleşkedeki Genel Su Tüketimi Ortalama (m³/gün)			1896.3	

Tablo 2
İkincil arıtma çıkış suyu karakterizasyonu ve kullanılan analitik yöntemler

Parametre	Birim	Yöntem	Konsantrasyon
pH	-	Hach HQ440d Cihazı: Multiparametre Yöntemi	6.5 – 7.8
İletkenlik	µs/cm	Hach HQ440d Cihazı: Multiparametre Yöntemi	309 – 1399
TÇK	mg/L	Hach HQ440d Cihazı: Multiparametre Yöntemi	100 – 793
AKM	mg/L	TS EN 872: Süzme Yöntemi	5 – 42
BOİ	mg/L	TS 4957-1 EN 1899-1: Aşılama Yöntemi	7-38
KOİ	mg/L	5220 D: Kapalı Reflux Kalorimetrik Yöntemi	27-88
Bakiye Klor	mg/L	TS 6229 EN 7393-2: Kalorimetrik Yöntem	0.05 – 0.534
Toplam koliform	kob/100 ml	TS EN 9308-1: Membranla Süzme Yöntemi	8x10 ¹ – 6.8x10 ⁶
Fekal koliform	kob/100 ml	TS EN 9308-1: Membranla Süzme Yöntemi	5x10 ¹ – 4x10 ⁶

2.2. Kullanılan Membranlar

Deneysel çalışmada NF270, NP030 ve NF90 membranları kullanılmıştır. Membran tipleri moleküler ağırlık kesme sınırları ve saf su akıları göz önünde bulundurularak seçilmiştir. Bu membranların genel özellikleri Tablo 3’ te verilmiştir.

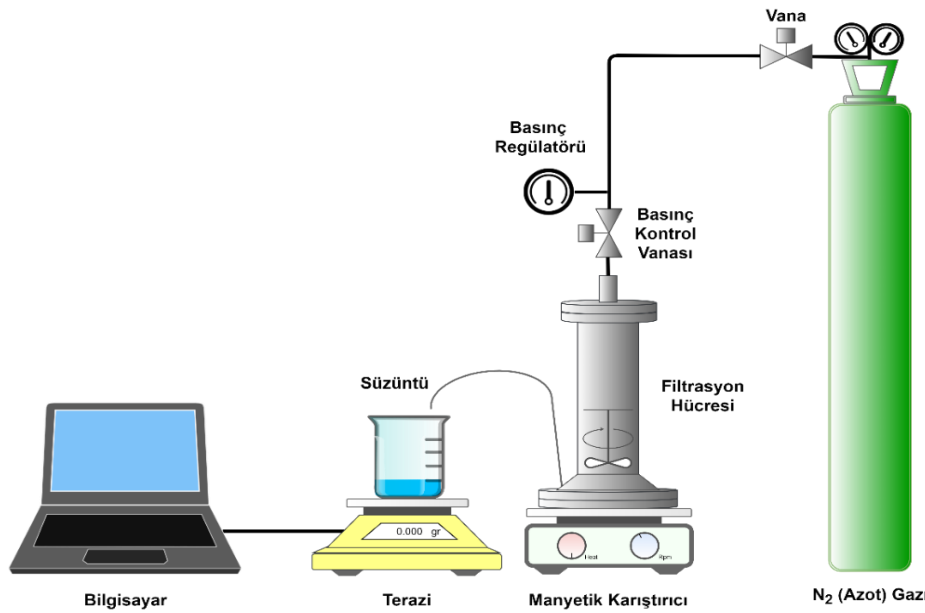
Tablo 3
Kullanılan NF membranların genel özellikleri

Membran Türü	Üretici Firma	Materyal	MWCO (Da)	pH	MgSO ₄ (%)	NaCl (%)	Geçirgenlik (L/m ² sa.bar) (20-25 °C°)	Maksimum Basınç (Bar)
NF270	Filmtech (DOW)	PAP TFC	300	2-11	<97	35	22.3 ±0.8	41
NP030	Microdyn ®Nadir	PES	400	0-14	-	30	>1	40
NF90	Filmtech (DOW)	PAP	200	4-11	-	-	2.44	41

PES: Polietersülfon; PAP: semi-aromatik piperazine-kaynaklı poliamid; TFC: İnce film kompozit

2.3. Membran Filtrasyon Sistemi ve Deneysel Prosedür

Çalışmada, kesikli deneylerde HP4750 karıştırma hücreli tezgâh üstü Sterlitech filtrasyon sistemi kullanılmıştır (bkz. Şekil 1). Sistem 14.6 cm² lik etkili bir membran alanına sahip olup, paslanmaz çelik, dikey yerleşimli ve çapraz akış membran ünitesinden oluşmaktadır. Hücre içi 300 mL' lik bir kapasiteye sahip olup, 300 rpm'lik çapraz akış hızı şartlarında deneyler yürütülmüştür. Filtrasyon prosesi konsantrasyon modunda işletilmiş ve membran geçiş basıncı, modüle doğrudan beslenen azot gazı ile sağlanmıştır.



Şekil 1. Sterlitech NF deney düzeneği

2.4. Teknik Performans

Besleme akımını konsantre etme şartlarında gerçekleştirilen kesikli deneysel çalışmalarda, NF deneyleri için “süzüntü akıları” Eşitlik (2.1)’ e göre hesaplanmıştır. Bu eşitlikte; J-süzüntü akısı (L/m² sa); A-etkili membran alanı (m²); V-toplam süzüntü hacmi (m³) ve t-filtrasyon süresini belirtmektedir.

$$J = \frac{1}{A} \frac{dV}{dt} \quad (2.1)$$

Kesikli deneylerde “kirletici madde giderme performansları”, membran süzöntü akımından alınan kompozit numunelerde yapılan analizler sonucunda belirlenmiştir. Proseslerde membranların kirletici ayırma veya giderme verimleri, her bir parametre için Eşitlik (2.2) kullanılarak hesaplanmıştır. Bu eşitlikte, R-kirletici madde giderim performansını (%); C_s -konsantr modunda deney sonunda süzöntüdeki kirletici madde konsantrasyonunu (mg/L); C_k -deney sonunda konsantradaki kirletici madde konsantrasyonunu (mg/L) vermektedir.

$$R(\%) = \left(1 - \frac{C_s}{C_k}\right) \times 100 \quad (2.2)$$

Besleme akımını konsantr etme şartlarında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda kullanılan “*hacim azaltma faktörü*” Eşitlik (2.3) e göre hesaplanmıştır. Bu eşitlikte, VRF-hacim azaltma faktörünü, V_b -başlangıçtaki besleme hacmini (L) ve V_k -filtrasyon sırasındaki konsantr hacmi (L) ni ifade etmektedir.

$$VRF = \frac{V_b}{V_k} \quad (2.3)$$

2.5. Deneysel Tasarım Yöntemi

Kentsel atıksu arıtma tesisi biyolojik çıkış suyunun NF membranlar ile arıtımına ilişkin deneysel çalışmalar, elde edilen sonuçların istatistiki yöntemlerle değerlendirilebilmesi için deneysel tasarım çerçevesinde planlanmış ve yürütülmüştür. Bu amaçla, endüstride süreç tasarım parametrelerinin optimizasyonu, çevre mühendisliği uygulamalarında ise özellikle sulardan çeşitli kirleticilerin uzaklaştırılmasını incelemek için yaygın olarak kullanılan Yanıt Yüzey Yöntemi uygulanmıştır (Bilen, Ateş ve Bayraktar, 2018; Özmetin, 2019). YYY çoklu parametrelerin sistem üzerindeki etkisini ortaya koymaya yarayan pratik bir yöntemdir. YYY’de deney tasarımı, regresyon modelleme ve optimizasyon teknikleri iç içe kullanılmaktadır. En çok kullanılan YYY tasarımları; “CCD-Merkezi bileşik tasarımı” ve “Box-Behnken tasarımı”dır (Öney ve Samanlı, 2016).

Çalışmada uygulanan NF membran prosesi için proses parametrelerinin optimizasyonuna yönelik 3 seviyeli Box-Behnken deney tasarımı uygulanmıştır. YYY, “*Design Expert 10.0*” yazılımı kullanılarak yerine getirilmiştir. NF membran prosesinin deneysel tasarımında dikkate alınmış bağımsız değişkenler ve değişken seviyelerine ilişkin bilgiler Tablo 4’te verilmiştir. Çalışmada VRF, Basınç ve NF membran türü bağımsız değişkenler; KOİ (%), TÇK (%), Akı (J) ve toplam koliform (kob/100 ml) bağımsız yanıt değişkenleri olarak belirlenmiştir. Bu 3 değişken ve 3 seviye esas alındığında elde edilen deneysel tasarım tablosu Tablo 5’teki gibidir.

Tablo 4
NF prosesi için bağımsız proses değişkenleri ve seviyeleri

Bağımsız Değişken	Seviye		
	-1	0	1
VRF	2	3	4
Basınç (bar)	5	7.5	10
Membran Türü	NP030	NF270	NF90

Sonuçlar korelasyon katsayısı (R^2), varyans analizi (ANOVA), istatistiksel ve cevap grafikleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bütün model denklemleri, istatistiksel anlam açısından uygunluklarının test

edilmesi amacıyla, varyans analizine (ANOVA) tabi tutulmuştur. ANOVA bağımsız değişkenlerin kendi aralarında nasıl etkileşime girdiklerini ve bu etkileşimlerin bağımlı değişken üzerindeki etkilerini analiz etmek için kullanılır.

ANOVA analizinde herhangi bir değişken için hesaplanan F değeri, o değişkenin yanıtlar üzerindeki etkisinin önemli ya da önemsiz olduğunun belirlenmesinde kullanılır. En büyük F değerine sahip değişkenin, yanıtlar üzerindeki etkisi de en büyüktür (Ross, 1996). Değişkenler ile bunlara karşılık yanıtlar arasında bulunan ilişki Eşitlik (2.4)'te gösterildiği gibi üç parametre için, ikinci dereceden polinomiyal bir model ile ifade edilmiştir (Sahoo ve Gupta, 2012; Yıldız ve Sağlam, 2012).

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.4)$$

Burada Y yanıt değişkenlerini, x_i ve x_j bağımsız değişkenleri, β_0 regresyon katsayısı, β_i , β_{ii} , β_{ij} sırasıyla modelin lineer, ikinci dereceden ve ikili etkileşim katsayılarını, k bağımsız değişken sayısını, ε ise hatayı ifade etmektedir (Ebrahimzadeh, Behbahani, Yamini, Adlnasab ve Asgharinezhad, 2013; Öney ve Samanlı, 2016; Demirhan, 2017).

Tablo 5

“Design Expert 10.0” ile elde edilen deneysel tasarım tablosu

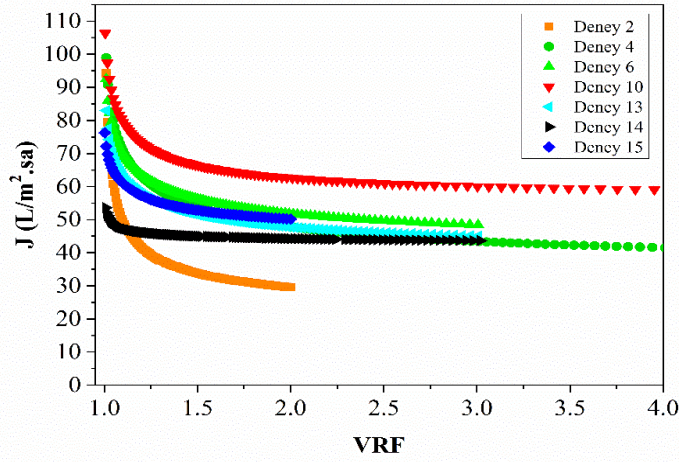
Deney No	Membran Türü	VRF	Basınç (bar)
1	NP030	4	7.5
2	NF270	2	10
3	NF90	2	7.5
4	NF270	4	5
5	NP030	3	10
6	NF270	3	7.5
7	NF90	4	7.5
8	NF90	3	10
9	NF90	3	5
10	NF270	4	10
11	NP030	2	7.5
12	NP030	3	5
13	NF270	3	7.5
14	NF270	3	7.5
15	NF270	2	5

3. Bulgular ve Tartışma

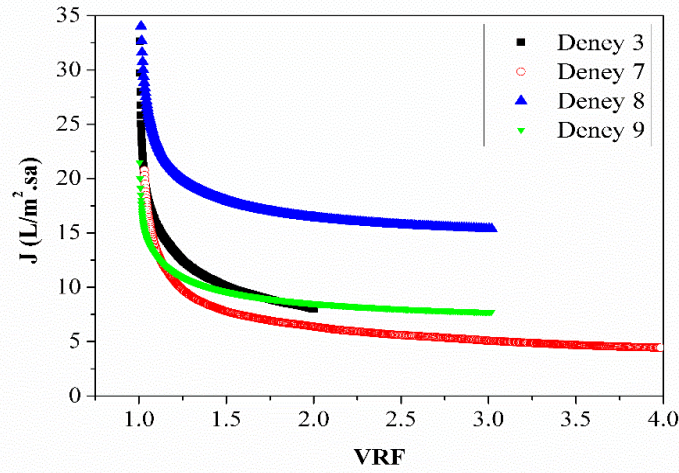
3.1. NF Deneyleri Akı Performansları

Şekil 2’de sırasıyla NP030, NF270 ve NF90 membranlar için VRF’ ye karşı elde edilen süzüntü akı değerleri verilmiştir. Yapılan bir çalışmada evsel atıksuların doğrudan bir NF membranı ile arıtılması sonucunda (15 dakikada 20.0 L/m²sa’ e kadar bir süzüntü akışında) iyi kalitede su eldesi sağlandığı görülmüştür (Sayed, Tarek, Dijkstra ve Moerman, 2007) fakat düşük basınçta ikincil atıksuların doğrudan NF ile ihmal edilebilir membran kirlenmesinde 3.0 L/m²sa’ lik çok düşük süzüntü akışı ile de arıtımının sağlandığı

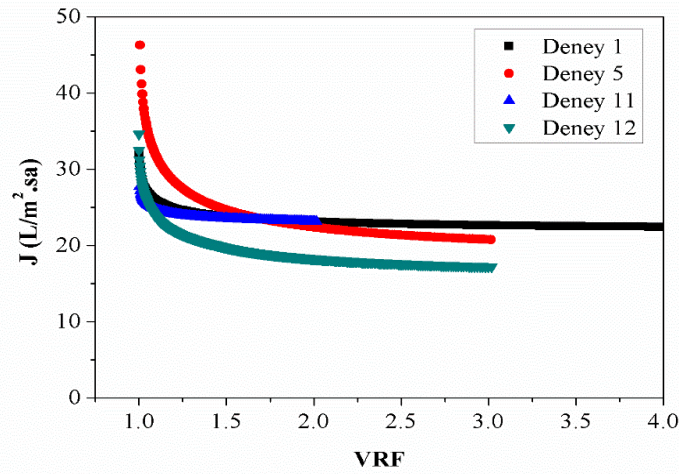
belirtilmiştir. NF membran prosesin direkt uygulandığı bu çalışmada, membran kirlenmesini minimize etmek için düşük geçirgen akı uygulaması ile de yüksek kaliteli su elde edilebileceği belirtilmektedir (Ngo vd., 2021).



(a) NF270



(b) NF90



(c) NP030

Şekil 2. Membran türlerinin VRF'ye karşı değişen akı grafikleri a) NF270 b) NF90 c) NP030

Bu çalışmada, NP030 membranlar ile yapılan deneyler arasında süzüntü akısı en yüksek olan deney seti 23.1 L/m² sa ile 11 nolu deney iken, NF270 membran ile yürütülen deneylerde en yüksek akı değeri 59.0 L/m² sa ile 10 nolu deney şartlarında elde edilmiştir. NF90 deneylerinin tamamında, beklendiği gibi, süzüntü akı değerleri çok düşük olmakla beraber 15.4 L/m² sa ile 8 nolu deney şartları ile diğerlerine göre daha yüksek akı değeri sağlanmıştır.

3.2. Yüzey Yanıt Yöntemi Çözümleri ve Doğrulama Deneyleri

Yüzey yanıt yöntemi ile belirlenen ve deney tasarım tablosunda verilen şartlarda yürütülen deneyler neticesinde, elde edilen yanıt değerleri Tablo 6' da verilmiştir. Her yanıt değeri için ANOVA analizleri gerçekleştirilmiş ve bağımsız değişkenlerin yanıtlar üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bu sonuçlar üzerinden elde edilen model ile, optimum işletme şartları ve tahmini yanıt değerleri belirlenmiş, sonrasında doğrulama deneyi gerçekleştirilerek nihai sonuçlar elde edilmiştir.

Yapılan deneylerde sınır koşulları kodlanmış değerler olarak -1, 0 ve +1 için sırasıyla başlangıç VRF değerleri 2; 3; 4, basınç 5; 7.5; 10 Bar, membran türü ise NP030; NF270; NP90 olarak seçilmiştir.

Tablo 6
Farklı değişken seviyeleri için deneysel yanıtlar

Deney No	Değişkenler			Yanıtlar			
	VRF	Basınç	Membran Türü	KOİ (%)	TÇK (%)	Akı (L/m ² .sa)	Toplam koliform (kob/100 ml)
1	4	7.5	NP030	38.0	29.8	22.4	<i>t.e.</i>
2	2	10	NF270	27.5	26.9	29.5	<i>t.e.</i>
3	2	7.5	NF90	66.3	81.3	8.0	<i>t.e.</i>
4	4	5	NF270	66.7	26.1	41.5	2
5	3	10	NP030	19.6	15.4	20.8	<i>t.e.</i>
6	3	7.5	NF270	42.0	21.7	48.4	100
7	4	7.5	NF90	63.4	86.4	4.4	1
8	3	10	NF90	49.0	86.6	15.4	8
9	3	5	NF90	85.0	90.3	7.7	4
10	4	10	NF270	64.0	35.9	59.0	<i>t.e.</i>
11	2	7.5	NP030	8.0	16.2	23.1	<i>t.e.</i>
12	3	5	NP030	11.0	18.6	17.2	3
13	3	7.5	NF270	67.2	28.3	45.1	116
14	3	7.5	NF270	59.0	24.6	43.7	84
15	2	5	NF270	40.0	19.6	50.2	<i>t.e.</i>

t.e.: Tespit edilmemiştir.

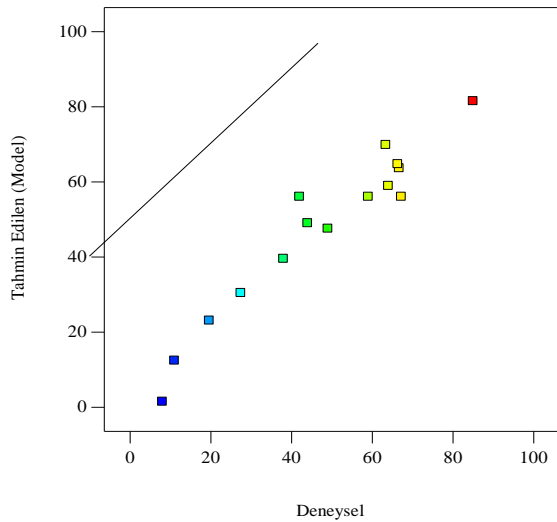
3.2.1. KOİ Giderimi

KOİ (%) parametresi için gerçekleştirilen varyans analizinin sonuçları Tablo 7' de verilmiştir. Modelin F değeri 7.38; p-değeri < 0.05 olarak bulunmuştur. p-değerinin < 0.05 olması, model terimlerinin yanıtlar üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca modelden elde edilen yüksek R² (0.93) ve ayarlanmış R² (0.80) değerleri model ve deneysel sonuçların uyumlu olduğunu göstermektedir. ANOVA tablosunda (bkz. Tablo 7) görüldüğü gibi, KOİ gideriminde VRF ve membran türü bağımsız değişkenlerinin anlamlı etkilerinin olduğu belirlenmiştir. VRF değişkenine kıyasla membran türünün KOİ giderim parametresi üzerinde daha yüksek etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.

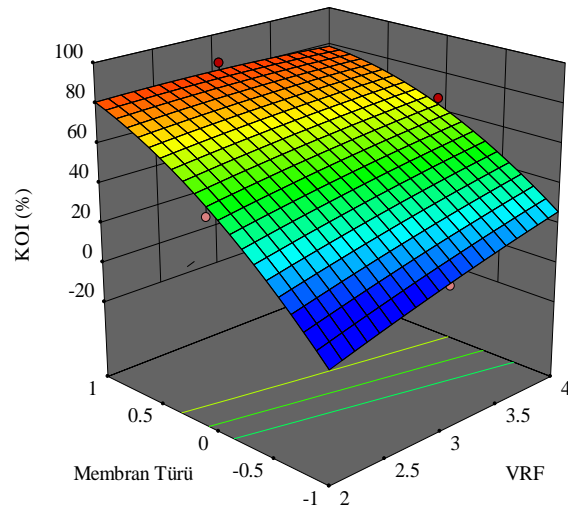
Tablo 7
KOİ (%) parametresi için varyans analizi (ANOVA)

	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kareler	F Değeri	p-değeri
Model	6862.97	9	762.55	7.38	0.0202
A-VRF	930.53	1	930.53	9.00	0.0301
B-Basınç (bar)	271.14	1	271.14	2.62	0.1662
C-Membran Türü	4375.50	1	4375.50	42.33	0.0013
AB	48.18	1	48.18	0.47	0.5251
AC	271.19	1	271.19	2.62	0.1662
BC	497.35	1	497.35	4.81	0.0797
A ²	7.15	1	7.15	0.07	0.8030
B ²	63.76	1	63.76	0.62	0.4678
C ²	427.55	1	427.55	4.14	0.0976

KOİ yanıt değişkeninin deneysel sonuçları ile model kullanılarak tahmin edilen sonuçlar arasındaki korelasyon grafiği Şekil 3(a)'da verilmiştir. Bağımsız değişkenlerin KOİ giderim parametresi üzerindeki etkilerini daha iyi anlamak için yazılımdan elde edilen 3D pilot grafiği Şekil 3(b)'deki gibidir. VRF, KOİ gideriminde etkili bir değişkendir ve VRF arttıkça KOİ giderim verimi de artış eğilimi göstermiştir fakat özellikle membran türünün KOİ giderim verimi üzerine etkisinin çok daha dikkat çekici olduğu görülmektedir. NF90 membranlarda KOİ giderimi %70' ler seviyesinde iken bu değer NF270 ve NP030 membranlar ile yapılan deneylerde çok düşük bulunmuştur.



(a)



(b)

Şekil 3. (a); Deneysel ve tahmin edilen KOİ giderim verimi grafiği, (b); Membran Türü ve VRF'ye bağlı olarak KOİ (%) değişimi

Elde edilmiş olan modelin KOİ giderimi için yapılan varyans analizi sonucu kodlanmış değerlerle ifade edilen model denklemi aşağıdaki gibidir:

$$KOİ (\%) = 22.49684 + (8.72424 \times A) + (3.47961 \times B) + (81.54019 \times C) + (1.38824 \times A \times B) - (8.23388 \times A \times C) - (4.46025 \times B \times C) - (1.39183 \times A^2) - (0.66487 \times B^2) - (10.76082 \times C^2)$$

3.2.2. TÇK Giderimi

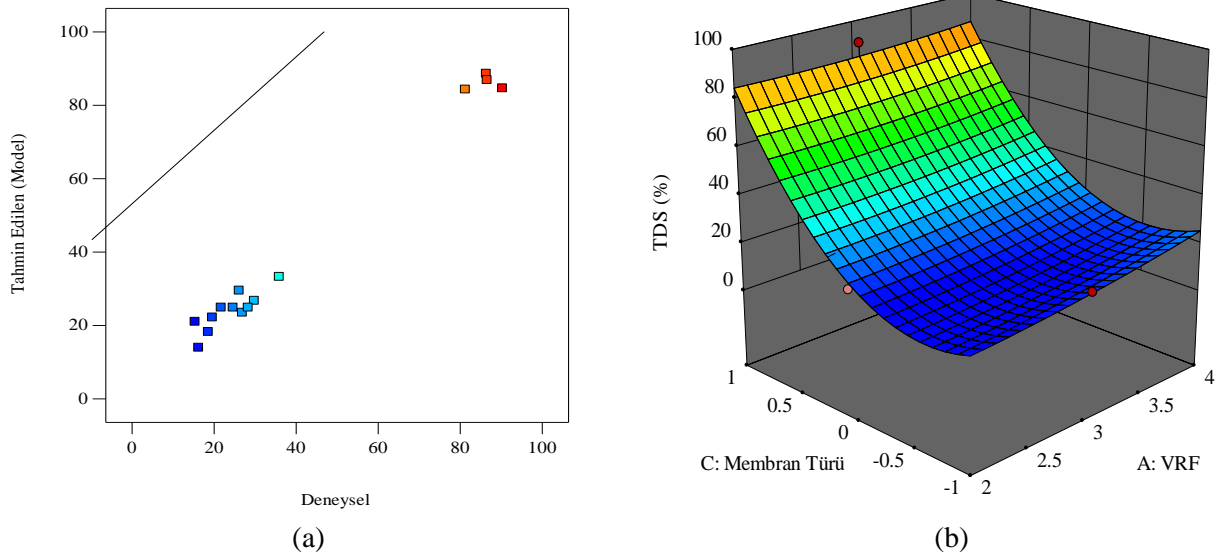
Sulama suyu kimyasal kalite kriterleri, bitkilerin tuzluluğa olan hassaslıkları ve bitkilerin yapraklarına zarar veren klorür konsantrasyonları gibi yönetmeliklerde de yer alan, TÇK ve klorür gibi önemli su kalite parametreleri de su geri kazanımı ve yeniden kullanımında oldukça önemlidir (Fesliyen 2017). Bu nedenle çalışmada diğer bir yanıt parametresi olarak, TÇK (%) parametresi seçilmiştir.

Modelin anlamlılık derecesi ve giderim verimi üzerine etki eden parametrelerin etkinlik derecesinin belirlenmesinde ANOVA tablosundan yararlanıldığı daha önce belirtilmiştir. TÇK parametresi için önerilen modelin varyans analizi (ANOVA) tablosu Tablo 8’ de gösterilmiştir. İnorganik parametre olarak değerlendirilen TÇK giderimi için 0.0003 p-değeri ile modelin önemli olduğu belirlenmiştir. Modelin verdiği yüksek R² (0.9871) ve ayarlanmış R² (0.9638) değerleri arasındaki düşük fark modelin yanıt için yeterliliğini göstermektedir. TÇK (%) parametresi için en etkili bağımsız değişkenin membran türü olduğu belirlenmiştir.

Tablo 8
TÇK (%) parametresi için varyans analizi (ANOVA)

	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kareler	F Değeri	p-değeri
Model	11634.16	9	1292.68	42.37	0.0003
A-VRF	146.46	1	146.46	4.80	0.0800
B-Basinç (bar)	12.68	1	12.68	0,42	0.5476
C-Membran Türü	8745.03	1	8745.03	286.61	<0.0001
AB	1.50	1	1.50	0.05	0.8333
AC	17.89	1	17.89	0.59	0.4784
BC	0.07	1	0.07	0.00	0.9643
A ²	7.97	1	7.97	0,26	0.6310
B ²	2.16	1	2.16	0.07	0.8009
C ²	2703.09	1	2703.09	88.59	0.0002

Deneysel ve tahmin edilen değerlerin korelasyon grafiği bkz. (Şekil 4(a)) ve Membran Türü-VRF bağımsız değişkenlerine bağlı olarak TÇK yanıt değişimi 3D yanıt yüzey grafiği Şekil 4(b)’ de verilmiştir. Şekil 4(b)’den görüldüğü üzere TÇK giderim verimi, membran türüne bağlı olarak önemli oranda değişmekte iken, VRF ile TÇK gideriminin anlamlı bir etkileşiminin olmadığı görülmektedir. KOİ gideriminde olduğu gibi TÇK gideriminde de NF90 membran ile yapılan deneyler için %80’ in üzerinde verimler elde edilmiş olup membran türünün etkisinin TÇK gideriminde çok yüksek olduğu ve NF90 hariç diğer iki membranda verimin çok düşük değerler aldığı söylenebilir.



Şekil 4. (a) Deneysel ve tahmin edilen TÇK (%) giderim verimi grafiği, (b) Membran türü ve VRF'ye bağlı olarak TÇK (%) değişimi

3.2.3. Akı

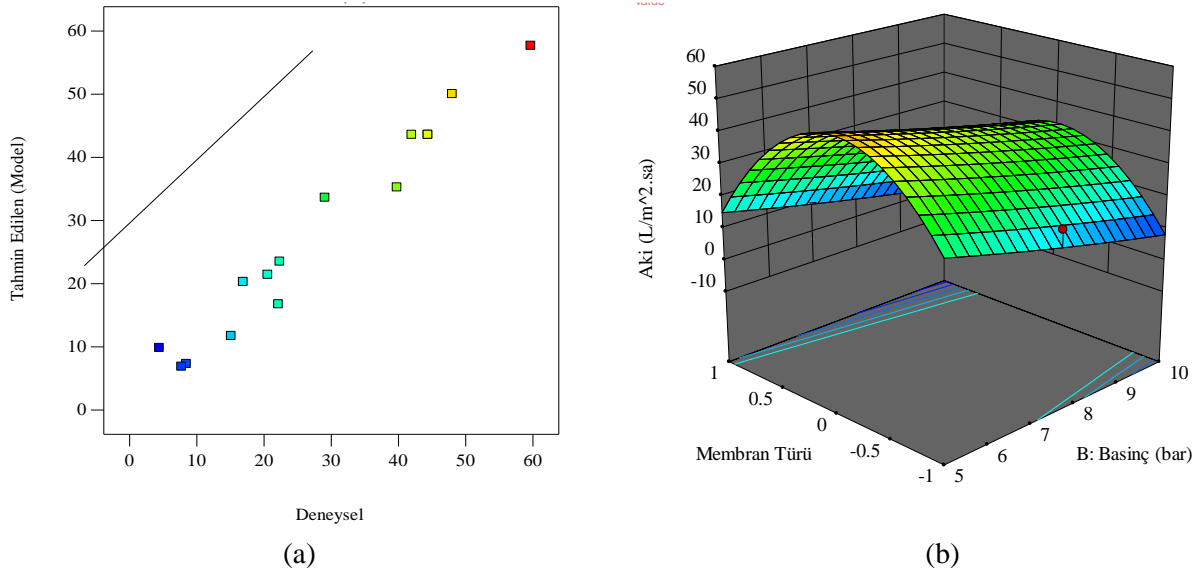
Membran maliyetlerinin değerlendirilmesinde önemli bir etkiye sahip olan membran akısı da bu çalışmada performans değerlendirilmesinde kullanılan önemli bir parametredir. Akı parametresi için ANOVA sonuçları Tablo 9'da verilmiştir. Membran proseslerde önemli bir performans göstergesi olan akı parametresi için model önemli olarak bulunmuştur. Yüksek R^2 (0.9656) değeri ve bu değerlerin ayarlanmış R^2 (0.9038) ile arasındaki düşük fark modelin akı parametresi için uyumlu ve yeterli olduğunu bir kez daha göstermektedir.

Tablo 9

Akı (J) parametresi için varyans analizi (ANOVA)

	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kareler	F Değeri	p-değeri
Model	3895.79	9	432.87	15.61	0.0037
A-VRF	43.06	1	43.06	1.55	0.2679
B-Basınç (bar)	18.03	1	18.03	0.65	0.4567
C-Membran Türü	267.02	1	267.02	9.63	0.0267
AB	376.98	1	376.98	13.60	0.0142
AC	4.45	1	4.45	0.16	0.7052
BC	3.48	1	3.48	0.13	0.7377
A ²	0.03	1	0.03	0.00	0.9761
B ²	1.55	1	1.55	0.06	0.8225
C ²	3137.56	1	3137.56	113.17	0.0001

ANOVA sonuçlarına göre akı parametresi üzerinde membran türü ve basınç parametrelerinin ikili etkileşimi ve membran türünün ikinci dereceden (kuadratik) etkisinin önemli olduğu bulunmuştur. Akı parametresi için deneysel ve tahmin edilen değerlerin karşılaştırma grafiği ile önemli etkiye sahip membran türü ve basınç parametrelerine karşı akı grafikleri sırasıyla Şekil 5(a) ve 5(b)'de verilmiştir. Süzüntü akı değerlerine baktığımızda hem NF90 hem de NP030 membranlarda akı değerleri keskin bir şekilde düşmüştür. Elde edilen parabolik eğriden de görüldüğü gibi membranın por yapısına bağlı olarak NF270 membranlarda akı değerleri 40.0 L/m² sa mertebelerinde olup yüksek değerler almıştır. Bağımsız değişkenlerden basınç arttıkça akıda çok az da olsa bir düşüş gözlenmektedir.



Şekil 5. (a) Deneysel ve tahmin edilen akı grafiği, (b) Membran türü ve basınç değişkenlerine bağlı olarak Akı değişimi

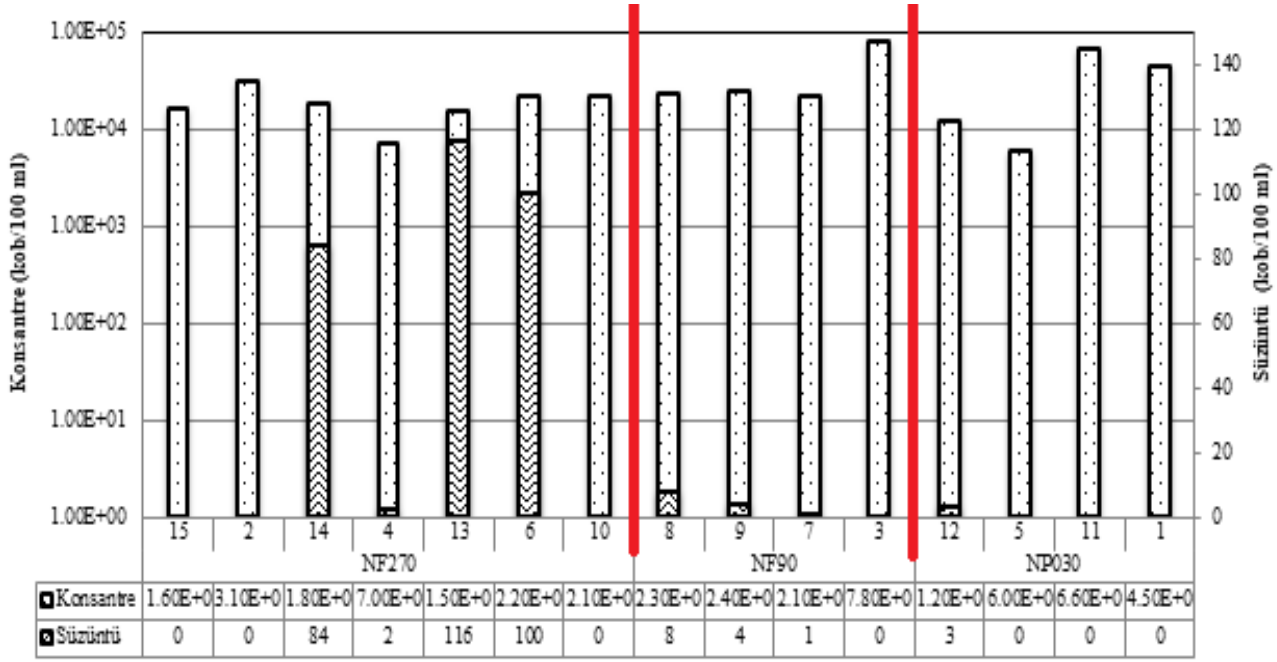
Deneysel sonuçlarının varyans analizi sonucu elde edilen model denklemini aşağıdaki gibidir:

$$AKI (J) = 124.5461 - (26.28606 \times A) - (12.60355 \times B) - (5.40923 \times C) + (3.88321 \times A \times B) - (1.05482 \times A \times C) + (0.37285 \times B \times C) - (0.086318 \times A^2) + (0.10362 \times B^2) - (29.15058 \times C^2)$$

3.2.4. Koliform Giderimi

Bir kentsel atıksuyun geri kazanımında su kalitesi açısından geri kazanılan suyun insan sağlığını tehdit etmeyecek seviyelerde olması gerekmekte olup, bu açıdan en önemli parametre olarak patojen mikroorganizmalardan indikatör koliform bakterileri gösterilebilir (Ngo vd., 2021). Deneysel çalışmalarda kullanılan kentsel ikincil arıtma çıkış suyunda yaklaşık toplam koliform değeri $8 \times 10^1 - 6.8 \times 10^6$ kob/100 mL arasında değişmektedir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda tüm şartlarda yüksek oranda toplam koliform giderimi sağlandığı görülmüştür. Farklı değişken seviyeleri için yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen yanıtlardan; NF270 süzütüsünde $1 \times 10^2 - 1.5 \times 10^2$ kob/100 mL, NP030 membran süzütüsünde $< 1 \times 10^1$ kob/100 mL toplam koliform değerleri tespit edilmiştir. NF90 membran süzütüsünde ise toplam koliform tespit edilmemiştir.

Bu çalışmada giderim performansının deney setindeki tüm deneylerde çok yüksek olması sonucu yazılım tarafından uyumlu bir model oluşturulamamıştır. Deneysel çalışmalarda NF süzütüleri ve konsantrelerinde tespit edilen toplam koliform değerleri Şekil 6'da verilmiş olup özellikle NF270 membranı ile yapılan deneysel çalışmalarda 6, 13 ve 14 numaralı deney setlerinde süzütü akımında ihmal edilemeyecek seviyelerde mikrobiyal kirliliğe rastlanmıştır. Hamoda, Al-Harbi ve Al-Ajmi, (2015) tarafından yapılan çalışmada giriş toplam koliform değerleri $0.2 \times 10^6 - 10 \times 10^6$ kob/100 mL olan atıksuların UF filtrasyonu sonucunda toplam koliform değerleri ancak $0.05 \times 10^6 - 0.47 \times 10^6$ kob/100 mL seviyelerine indirilebilmiştir. Buradan gözenekli yapıya sahip NF veya UF membranlarda mikrobiyal kirliliğin bazı işletme şartlarında istenilen seviyelere düşürülemeyeceği görülmektedir.



Şekil 6. NF süzüntüleri ve konsantrlerinde tespit edilen toplam koliform değerleri

3.3. Optimizasyon ve Doğrulama Deneysel Sonuçları

Toplam koliform'un maksimum düzeyde gideriminin amaçlandığı bu çalışmada, NF prosesinin yüksek koliform giderim performansı ile birlikte organik madde (KOİ) ve inorganik madde (TÇK) gideriminin yanı sıra süzüntü akısının maksimizasyonu için değişkenlerin optimum seviyeleri belirlenmiş ve elde edilen bu değişken verileri ile doğrulama deneyi yapılmıştır. Yazılımdan elde edilen optimum işletme seviyeleri ile model tahmin değerleri ve doğrulama deney sonuçları Tablo 10'da verilmiştir. Model tahmin sonuçları ile doğrulama deneyi sonuçları oldukça benzerlik göstermektedir. İlave olarak, doğrulama deneyi sonrasında; çıkış suyunda pH, fekal koliform, biyolojik oksijen ihtiyacı (BOİ₅) ve askıda katı madde (AKM) değerlerine de bakılarak, elde edilen süzüntü suyunun Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği (AATTUT) (2010)'ne ve U.S. Environmental Protection Agency (US-EPA) (2004) yönergesine göre yeniden kullanılabilirliği değerlendirilmiştir (Tablo 11). Doğrulama deneyi sonrasında NF90 membran ile yürütülen deneyde 12.0 L/m²sa süzüntü akısında KOİ değeri 14 mg/L, TÇK değeri 86 mg/L olup toplam koliforma süzüntü suyunda rastlanmamıştır. İkincil arıtma suyuna UF sonrası NF uygulanan benzer bir çalışmada DK membran ile 1.19±0.06 mg/L KOİ, 333.4±33.4 mg/L TÇK, >100 kob/100 mL koliform değerleri elde edilmiştir (Czuba vd., 2021).

Tablo 10

Yanıt değişkenleri optimum ve doğrulama değerleri

Optimum Seviyeler	Model Tahmin			Deneysel Doğrulama					
	KOİ (%)	TÇK (%)	Akı (L/m ² sa)	Toplam		KOİ (%)	TÇK (%)	Akı (L/m ² sa)	Toplam koliform kob/100 ml
				koliform kob/100 ml	koliform kob/100 ml				
VRF: 2 Basınç: 5 bar Membran Türü: NF90	81.0	84.6	15.2	-	-	79.2	85.7	12.0	t.e.

t.e.: Tespit edilmemiştir.

Tablo 11

Ulusal ve uluslararası mevzuata göre doğrulama deney sonuçlarının yeniden kullanım için kıyaslanması

Parametre	Doğrulama Deneyi Sonucu	AATTUT (2010)			US-EPA (2004)
		1.Sınıf	2.Sınıf	3.Sınıf	
TÇK	86	<500 mg/L ⁽¹⁾	500-2000 mg/L ⁽¹⁾	>2000 mg/L ⁽¹⁾	500-2000 mg/L ⁽⁵⁾
KOİ	14		75 mg/L ⁽²⁾		< 20-90 mg/L ⁽⁶⁾ 2.2/100 mL (7 günlük ort.) ⁽⁷⁾ 240/100 mL (Herhangi bir örnek için max.) ⁽⁷⁾
Toplam Koliform	<i>t.e.</i>		-		Tespit Edilemez Düzeyde Toplam Koliform/100 mL ⁽⁸⁾ <1-200 kob/100mL ⁽⁶⁾ ≤200 ad/100 mL ⁽³⁾
Fekal Koliform	<i>t.e.</i>		0 ad/100 mL (Sınıf A için) ⁽⁴⁾ <200 ad/100 mL (Sınıf B için) ⁽⁴⁾		<1-10 ³ kob/100mL ⁽⁶⁾
pH	6.5		5-8.3 ⁽³⁾ 6-9 (Sınıf A ve B için) ⁽⁴⁾		6 ⁽⁵⁾
BOİ₅	9.6	<20 mg/L (Sınıf A için) ⁽⁴⁾	<30 mg/L (Sınıf B için) ⁽⁴⁾		< 10-45 mg/L ⁽⁶⁾
AKM	0		<30 mg/L (Sınıf B için) ⁽⁴⁾		< 5-30 mg/L ⁽⁶⁾

(1) Tablo E7.2. Sulama suyunun kimyasal kalitesinin değerlendirilmesi için geliştirilmiş tablo (AATTUT, 2010)

(2) Tablo E7.21. Soğutma kulelerinde kullanılması tavsiye edilen su özellikleri (AATTUT, 2010)

(3) Tablo E7.22. Arıtılmış atıksuların soğutma kulelerinde yeniden kullanımında genel kalite kriterleri, izleme periyotları ve arıtma tipleri (AATTUT, 2010)

(4) Tablo E7.1. Sulamada geri kullanılacak arıtılmış atıksuların sınıflandırılması (AATTUT, 2010)

(5) Tablo 2.7. Sulama için arıtılmış sudaki bileşenler için önerilen limitler (US-EPA, 2004)

(6) Tablo 8-3. Suyun yeniden kullanımıyla ilgili su kalitesi parametreleri özeti (US-EPA, 2004)

(7) Tablo A-1. Kısıtlamasız kentsel yeniden kullanım, Tablo A-8. Endüstriyel yeniden kullanım (US-EPA, 2004)

(8) Tablo 4-13. Suyun yeniden kullanımı için önerilen yönergeler (US-EPA, 2004)

t.e.: Tespit edilmemiştir.

AATTUT (2010), Ek-7 “Arıtılmış Atıksuların Sulama Suyu Olarak Geri Kullanım Kriterleri” nde “Tablo E7.2”ye göre TÇK değeri 1. Sınıf sulama suyunda <500 mg/L olmalıdır. US-EPA (2004) yönergesi “Tablo 2.7”de ise TÇK’nın 500 mg/L’nin altında olması durumunda “hiçbir zararlı etkisi genellikle fark edilmez” olarak ifade edilmiştir. Bu doğrultuda NF90 membran süzütüsü, optimum işletme şartlarında elde edilen 86 mg/L TÇK değeri ile 1. Sınıf sulama suyu olarak nitelendirilebilir ve hiçbir zararlı etkisi fark edilemez. 25 Ekim 2022 tarihinde yapılan değişiklikle, AATTUT (2010)’ ne ilave edilen “Tablo E7.21” de sanayi tesislerinde soğutma kulelerinde kullanılan tatlı suda olması gereken TÇK miktarı tek geçişli sistem için 1000

mg/L ve resirkülasyonlu sistem için 500 mg/L'dir. Optimum işletme şartlarında NF90 süzütüsünde elde edilen 14 mg/L KOİ değeri, AATTUT (2010) "Tablo E7.21" de verilen soğutma suyu kriterlerini ve US-EPA (2004) "Tablo 8.3" e göre suyun yeniden kullanımı için verilen KOİ sınır değerlerini sağlamaktadır. Buna göre elde edilen süzütünün, TÇK ve KOİ parametreleri bakımından sulama ve endüstride soğutma amacıyla kullanıma uygun olduğu tespit edilmiştir.

Düşük konsantrasyonlarda mikroorganizma barındırdığından arıtılmış atıksuların endüstride soğutma kulelerinde kullanımı biyolojik büyümeye sebep olabilir (AATTUT, 2010). Bu tebliğde toplam koliform ile ilgili bir standart bulunmamaktadır. Bu parametre Kaliforniya eyaleti gerekliliklerine göre, US-EPA (2004)' de verilen "Tablo 8.3", "Tablo A-1", "Tablo A-8" ve "Tablo 4-13" e göre değerlendirilmiştir US-EPA (2004) "Tablo 8-3" e göre olması gereken toplam koliform miktarı <1-200 kob/100 mL olarak belirtilmiştir. "Tablo A-1" ve "Tablo A-8" e göre de herhangi bir örnek için maksimum toplam koliform miktarı 240/100 mL, 7 günlük ortalama koliform miktarı ise 2.2/100 mL olmalıdır. Aynı yönergedeki "Tablo 4.13" e göre ise direkt olmayan içilebilir yeniden kullanım amacıyla ve içilebilir akiferlere enjeksiyon yoluyla yeraltı suyu şarjı için "tespit edilemez düzeyde toplam koliform/100 mL" kriteri sağlanmalıdır. Buna göre elde edilen NF90 süzütüsünün toplam koliform parametresi bakımından; sulama amaçlı kısıtlanmasız kentsel yeniden kullanım, soğutma amaçlı endüstriyel yeniden kullanım ve yeraltı suyuna deşarj için uygun kalitede olduğu görülmektedir.

Çalışmada optimizasyon deneylerinde en iyi şartların belirlenmesi için KOİ, TÇK ve toplam koliform parametreleri esas alınırken, su geri kazanımı için NF süzütü suyunun değerlendirilmesinde ilave olarak AATTUT (2010) "Tablo E7.22" ve "Tablo E7.1" de verilen fekal koliform, pH, BOİ₅ ve AKM parametreleri de ayrıca analiz edilmiştir. NF90 ile doğrulama deney şartlarında toplam koliform gibi fekal koliform da "tespit edilemez düzeyde" belirlenmiştir. Fekal koliform esas alındığında süzütü suyu AATTUT (2010) "Tablo E.7.22" ye göre endüstride soğutma amacıyla kullanılabilir nitelikte olup ATTUT (2010) "Tablo E7.1" e göre NF90 süzütü suyu, hem A hem de B sınıfında kentsel ve tarımsal sulamaya elverişlidir. pH 6.5, BOİ₅ 9.6 mg/L değerlerinde olup süzütü suyunda AKM' ye rastlanmamıştır. Elde edilen değerler "Tablo E7.22" ve "Tablo E7.1" verilen sınır değerlerin oldukça altındadır. Ayrıca, süzütü suyundaki fekal koliform US-EPA (2004) "Tablo 8.3" e göre değerlendirildiğinde, suyun yeniden kullanım limitlerini karşılamaktadır. pH, BOİ₅ ve AKM parametreleri de suyun yeniden kullanımı için US-EPA (2004) kriterleri ile uyumludur. Tablo 11 göstermektedir ki; ikincil arıtma çıkış sularının yeniden kullanımında NF90 membran uygulaması iyi kalitede su geri kazanımı sağlayabilmektedir.

4. Sonuçlar

Geri kazanılmış atıksuların kentsel sulama, soğutma amaçlı endüstriyel kullanım ve yeraltı suyuna deşarj gibi çeşitli amaçlar için yeniden kullanımı, artan su kıtlığı nedeniyle sürdürülebilir su yönetimi çerçevesinde umut verici bir yaklaşım olarak görülmektedir. Bu çalışmada kentsel atıksu arıtma tesisi ikincil arıtma çıkış suyuna NF prosesi uygulanarak, suyun geri kazanılabilirliği değerlendirilmiştir. Taguchi deney tasarımı ve doğrulama deneyi sonrasında, transmembran basıncı, VRF ve membran türü değişkenleri arasında TÇK, KOİ ve toplam koliform gideriminde verimi etkileyen en önemli değişkenin membran türü olduğu tespit edilmiştir. VRF, KOİ gideriminde etkili bir değişkendir ve VRF arttıkça KOİ giderim verimi artış eğilimi göstermektedir fakat özellikle membran türünün KOİ giderim verimi üzerine etkisinin çok daha dikkat çekici olduğu söylenebilir. TÇK gideriminde, membran türünün önemli etkisi olduğu görülürken, VRF ile TÇK gideriminin anlamlı bir etkileşiminin olmadığı görülmektedir. Süzütü akı değerlerine bakıldığında, hem NF90 hem de NP030 membranlarda tıkanmalardan dolayı akıda hızlı düşüşler gözlenmiştir. Bağımsız değişkenlerden basınç arttıkça akıda az da olsa bir düşüş gözlenmekte olup bu çalışmada basınç etkisinin çok anlamlı olmadığı görülmüştür. Toplam koliform giderim performansının tüm deneylerde çok yüksek olması sonucu yazılım tarafından uyumlu bir model oluşturulamamışken, en iyi membran olarak belirlenen NF90 membran ile yürütülen deneyler sonucunda süzütü akımında toplam koliformun yanısıra AKM ve fekal koliforma da rastlanmamıştır. KOİ, TÇK, toplam koliform, fekal koliform, pH, BOİ₅ ve AKM parametreleri üzerinden

yapılan değerlendirmelerde, NF prosesinin artırılmış atıksuyun üçüncül arıtımı için güvenli bir şekilde kullanılabilir olduğu söylenebilir. Ayrıca NF prosesi ile farklı sınıflarda, ulusal ve uluslararası mevzuatlara uygun nitelikte kentsel ve tarımsal sulama suyu elde edilirken, artırılmış atıksulardan endüstriyel soğutma amaçlı kullanım ve yeraltı suyuna deşarj olmak üzere farklı amaçlar için su geri kazanımı da mümkündür.

Teşekkür

Bu çalışma Su ve Atıksu Laboratuvarı, 2019 AR-GE Projesi kapsamında Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Fonu tarafından desteklenmiştir.

Yazar Katkıları

Esra Can Doğan: Metodoloji, Biçimsel Analiz, Taslak Oluşturma, Yazma-İnceleme ve Düzenleme
Ali Oğuzhan Narcı: Deneyler, Veri Oluşturma, Biçimsel Analiz, İnceleme, Görselleştirme, Kaynaklar
Aynur Yaşar: Kaynaklar, İnceleme, Taslak Oluşturma, Yazma-Düzenleme
Eylem Topkaya: Deneyler, Veri Oluşturma, Kaynaklar
Ayla Arslan: Yazma-İnceleme ve Düzenleme
Sevil Veli: Yazma-İnceleme ve Düzenleme

Çıkar Çatışması

Yazarlar çıkar çatışması bildirmemişlerdir.

Kaynaklar

- Acero J. L., Benitez F. J., Leal A. I., Real F. J., Teva F., (2010). Membrane Filtration Technologies Applied to Municipal Secondary Effluents for Potential Reuse. *Journal of Hazardous Materials*, 177, 390-398. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.12.045>
- Agrafioti E. and Diamadopoulou E., (2012). A Strategic Plan for Reuse of Treated Municipal Wastewater for Crop Irrigation on the Island of Crete. *Agricultural Water Management*, 105, 57-64. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.01.002>
- Aküzüm T., Çakmak B., Gökalp Z., (2010). Evaluation of Water Resources Management in Turkey. *Journal of Agricultural Science*, 3, 1, 67-74. Doi: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20123405617>
- APHA, AWWA. *Standart Methods for the Examination of Water and Wastewaters*, 21th ed. Washington, USA, American Public Health Association Publication, 2005.
- Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği (AATTUT) (2010) Ek-7, Arıtılmış Atıksuların Sulama Suyu Olarak Geri Kullanım Kriterleri Resmi Gazete Tarih ve No: 20.03.2010-27527, Ankara, Türkiye, Doi: https://mevsu-api.csb.gov.tr/api/mevzuat/DosyaGetir?path=r_20131227190805477_99852022-df09-457a-b596-a7f5ba4f14a0.pdf
- Bakopoulou S., Emmanouil C., Kungolos A. (2011)., Assessment of Wastewater Effluent Quality in Thessaly Region, Greece, for Determining its Irrigation Reuse Potential. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 74, 188-194. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2010.06.022>
- Bhattacharya P., Ghosh S., Mukhopadhyay A., (2013). Efficiency of Combined Ceramic Microfiltration and Biosorbent Based Treatment of High Organic Composite Wastewater: An Approach for Agricultural Reuse. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1, 38-49. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.03.002>
- Bilen M., Ateş Ç., Bayraktar B., (2018). Yanıt Yüzey Yöntemi ile Bir Bor Fabrikası Atıksuyu Kimyasal Arıtma Sürecinde Optimum Koşulların Belirlenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(1), 267-278. Doi: <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.406798>
- Can Doğan E., Yaşar A., Şen Ü., Aydın C., (2016). Water Recovery from Treated Urban Wastewater by

- Ultrafiltration and Reverse Osmosis for Landscape Irrigation. *Urban Water Journal*, 13(6), 553-568. Doi: <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.992917>
- Chen C.Y., Wang S.W., Kim H., Pan S.Y., Fan C., Lin Y.J., (2021). Non-conventional Water Reuse in Agriculture: A Circular Water Economy. *Water Research*, 199, 117193. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117193>
- Chon, K., Kim, S. J., Moon, J., Cho, J., (2012). 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*, 46, 1803-1816. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.12.062>
- Czuba K., Bastrzyk A., Rogowska A., Janiak K., Pacyna K., Kosińska N., Kita M., Chrobot P., Podstawczyk D., (2021). Towards the Circular Economy-A Pilot-Scale Membrane Technology for the Recovery of Water and Nutrients from Secondary Effluent. *Science of The Total Environment*, 791, 148266. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148266>
- Demirhan E., (2017). Removal of Reactive Blue 19 From Aqueous Solution by Peanut Shell: Optimization By Response Surface Methodology. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5 (3), 312-321. Doi: <http://sujest.selcuk.edu.tr/sumbtd/article/view/427/556>
- Ebrahimzadeh H., Behbahani M., Yamini Y., Adlnasab L., Asgharinezhad A.A., (2013). Optimization Of Cu(II)-Ion Imprinted Nanoparticles For Trace Monitoring Of Copper In Water And Fish Samples Using A Box-Behnken Design. *Reactive & Functional Polymers*, 73, 23-29. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2012.10.006>
- Fesliyen K., (2017). *Evsel Atıksuların Sulama Amaçlı Yeniden Kullanılması*. (Yüksek Lisans Tezi), Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı. Doi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Guo W., Ngo H-H., Li J., (2012). A Mini Review on Membrane Fouling. *Bioresource Technology*, 122, 27-34. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.04.089>
- Hacıfazlıoğlu M.C., Tomasini H.R., Kabay, N., Bertin L., Pek, E.Ö., Kitiş, M., Yiğit, N., Yüksel M., (2018). Effect of Pressure on Desalination of MBR Effluents with High Salinity by using NF and RO Processes for Reuse in Irrigation. *Journal of Water Process Engineering*, 25, 22-27. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.06.001>
- Hamoda, M. F., Al-Harbi, M., Al-Ajmi, H., (2015). Efficiency and reliability of membrane processes in a water reclamation plant. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 5 (2), 166-176. Doi: <https://doi.org/10.2166/wrd.2015.077>
- Hube S., Eskafi M., Hrafnkelsdóttir K.F., Bjarnadóttir B., Bjarnadóttir M.A., Axelsdóttir S., Wu B., (2020). Direct Membrane Filtration for Wastewater Treatment and Resource Recovery: A Review. *Science of Total Environment*, 710, 136375. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136375>
- Jin P., Jin X., Wang X. C., Shi X., (2013). An Analysis of the Chemical Safety of Secondary Effluent for Reuse Purposes and the Requirement for Advanced Treatment. *Chemosphere*, 91, 558-562. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.004>
- Kharraz J.A., Khazada N.K., Farid M.U., Kim J., Jeong S., An A.K., (2022). Membrane Distillation Bioreactor (MDBR) for Wastewater Treatment, Water Reuse, and Resource Recovery: A Review. *Journal of Water Process Engineering*, 47, 102687. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102687>
- Maryam, B., Büyükgüngör H., (2019). Wastewater Reclamation and Reuse Trends in Turkey: Opportunities and Challenges. *Journal of Water Process Engineering*, 30, 100501. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102687>
- Mizyed N.R., (2013). Challenges to Treated Wastewater Reuse in Arid and Semi-Arid Areas. *Environmental Science Policy*, 25, 186-195. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2012.10.016>
- Ngo M.T.T., Ueyama T., Makabe R., Bui X.T., Nghiem L.D., Nga T.T.V., Fujioka T., (2021). Fouling Behavior and Performance of a Submerged Flat-Sheet Nanofiltration Membrane System for Direct

- Treatment of Secondary Wastewater Effluent. *Journal of Water Process Engineering*, 41, 101991. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.101991>
- Öney Ö., Samanlı S., (2016). Zonguldak İnce Kömürlerinin Kaba Flotasyon Parametrelerinin Cevap Yüzeyi Metodu İle Optimizasyonu. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 55 (4), 3-13. Doi: <http://www.mining.org.tr/en/download/article-file/374446>
- Özmetin E., (2019). Süt Endüstrisi Atıksularının Kimyasal Arıtımının Yanıt Yüzey Yöntemi ile Optimizasyonu. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9 (4), 1968-1976. Doi: <https://dergipark.org.tr/en/pub/jist/issue/50142/554079>
- Parlar I., Hacifazlıoğlu M., Kabay N., Pek T.Ö., Yüksel M., (2019). Performance Comparison of Reverse Osmosis (RO) with Integrated Nanofiltration (NF) and Reverse Osmosis Process for Desalination of MBR Effluent. *Journal of Water Process Engineering*, 29, 100640. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.06.002>
- Parma P., Fialho S., Alvarenga P., Santos C., Palma G., Cavaco C., Gomes R., Neves L.A. (2016). Membranes technology used in water treatment: Chemical, microbiological and ecotoxicological analysis, *Science of the Total Environment* 568 (2016) 998–1009. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.208>
- Pedrero F., Kalavrouziotis I., Alarcon J. J., Koukoulakis P., Asano T., (2010). Use of Treated Municipal Wastewater in Irrigated Agriculture-Review of Some Practices in Spain and Greece. *Agricultural Water Management*, 97, 1233-1241. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.03.003>
- Rizzo L., Gernjak W., Krezeminski P., Malato S., McArdell C., Antonio J., Perez S., Schaar H., Fatta-Kassinos D., (2020). Best Available Technologies and Treatment Trains to Address Current Challenges in Urban Wastewater Reuse for Irrigation of Crops in EU countries. *Science of the Total Environment*, 710, 136312. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136312>
- Ross P. J. (1996). *Taguchi Techniques for Quality Engineering*. Second Edition, McGraw-Hill, New York, Doi: <https://doi.org/10.1080/00224065.1996.11979713>
- Rygaard M., Binning P.J., Albrechtsen H.J., (2011). Increasing Urbanwater Self-Sufficiency: Newera, New Challenges. *Journal of Environmental Management*, 92, 185-194. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.09.009>
- Sahoo C., Gupta A.K., (2012). Optimization of Photocatalytic Degradation of Methyl Blue Using Silver Ion Doped Titanium Dioxide by Combination of Experimental Design and Response Surface Approach. *Journal of Hazardous Materials*, 215-216, 302-310. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.02.072>
- Sayed, S., Tarek, S., Dijkstra, I., Moerman, C., (2007). Optimum Operation Conditions of Direct Capillary Nanofiltration for Wastewater Treatment. *Desalination*, 214, 215-226. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.07.014>
- Shahid M.K., Kashif A., Pathak P., Choi Y., Rout P.R., (2022). Chapter 3 - Water Reclamation, Recycle, and Reuse, *Clean Energy and Resource Recovery, Wastewater Treatment Plants as Biorefineries*, 2, 39-50. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90178-9.00028-7>
- Suwaileh W., Johnson D., Hilal N., (2020). Membrane Desalination and Water Reuse for Agriculture: State of The Art and Future Outlook. *Desalination*, 491, 114559. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114559>
- TS EN 872, Su kalitesi- Askıdaki katı maddelerin tayini-Cam elyaf süzgeçler kullanılarak süzme yöntemi
- TS 4957-1 EN 1899-1, Su kalitesi-N günden sonra biyokimyasal oksijen ihtiyacının tayini (boin) -Bölüm 1: Seyreltme ve allitiyoüre ilavesi ile aşılama metodu
- TS 6229 EN ISO 7393-2, Su kalitesi-Serbest klor ve toplam klor tayini- Bölüm 2: Rutin kontroller için- N, n-Dieti- 1,4- Fenilendiamin kullanılan kolorimetrik metot
- TS EN ISO 9308-1, Su kalitesi-Escherichia coli ve koliform bakterilerin tespiti ve sayımı - Bölüm 1: Membranla süzme yöntemi
- U.S. Environmental Protection Agency (US-EPA) (2004). *Guidelines for water reuse*, EPA/625/R-04/108,

- US-EPA, Washington, DC, USA, Doi: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-08/documents/2004-guidelines-water-reuse.pdf>
- Wang J., Tang X., Xu Y., Cheng X., Li G., Liang H., (2020). Hybrid UF/NF Process Treating Secondary Effluent of Wastewater Treatment Plants for Potable Water Reuse: Adsorption vs. Coagulation for Removal Improvements and Membrane Fouling Alleviation. *Environmental Research*, 188, 109833. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109833>
- Warsinger D.M., Chakraborty S., Tow W.E., Plumlee H.M., Bellona C., Loutatidou S., Karimi K., Mikelonis, M.A., Achilli, A., Ghassemi, A., Padhye, P.L., Snyder, A.S., Curcio, C., Vecitis, D.C., Arafat, A.H., Lienhard V.H.J. (2018). A Review of Polymeric Membranes and Processes for Potable Water Reuse. *Progress in Polymer Science*, 81, 209-237. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2018.01.004>
- Wintgens, T., Melin T., Schiller A., Khan, S., Muston, M., Bixio, D., Thoeye, C., (2005). The Role of Membrane Processes in Municipal Wastewater Reclamation and Reuse. *Desalination*, 178, 1-11. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.12.014>
- Wu B., (2019). Membrane-Based Technology in Greywater Reclamation: A Review. *Science Total Environment*, 656, 184-200. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.347>
- Yang J., Monnot M., Eljaddi T., Ercolei L., Simonian L., Moulin P., (2021). Ultrafiltration as Tertiary Treatment for Municipal Wastewater Reuse. *Separation and Purification Technology*, 272, 118921. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118921>
- Zanetti F., De Luca G., Sacchetti R., (2010). Performance of a Full-Scale Membrane Bioreactor System in Treating Municipal Wastewater for Reuse Purposes. *Bioresource Technology*, 101, 3768-3771. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.091>
- Zhang X., He Y., Zhang B., Qin L., Yang Q., Huang H., (2019). Factors Affecting Microbiological Quality of Household Drinking Water Supplied by Small-scale Ultrafiltration Systems: A Field Study. *Science of The Total Environment*, 689, 725-733. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.327>