

## TEKSTİL YIKAMA ATIKSULARINDAN BASINÇLI MEMBRAN PROSESLERLE SU GERİ KAZANIMI ÜZERİNE MEMBRAN TÜRÜNÜN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

*Coşkun AYDINER* \*  
*Berna KIRIL MERT* \*\*  
*Esra CAN DOĞAN* \*\*\*  
*Esin BALCI* \*  
*Yasemin Melek TILKI* \*  
*Şeyda AKSU* \*  
*Ayşegül Yağmur GÖREN* \*

Alınma: 17.04.2016; kabul: 21.11.2016

**Öz:** Dünya genelinde endüstriyel faaliyetlerdeki gelişmeler, su tüketiminin artmasına ve endüstriyel su kirlenmesi problemlerinin yaygınlaşmasına neden olmaktadır. Artan su kıtlığı problemleriyle beraber bu durum, aşırı su tüketilen endüstrilerin atıksularından yeniden kullanılabilir kalitede suyun geri kazanıldığı teknolojik uygulamaların hayata geçirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu çalışmada, ultrafiltrasyon (UF), nanofiltrasyon (NF) ve ters osmoz (TO) membran prosesleri kullanılarak;  $6,22 \pm 0,03$  pH,  $1130 \pm 321$  mg TÇK/L,  $2362 \pm 727$  mg KOİ/L ve  $744 \pm 234$  mg TOK/L giriş değerlerindeki tekstil yıkama atıksularından, proseste yeniden kullanıma uygun kalitede suyun geri kazanılması amaçlanmıştır. Bu bağlamda, membran proseslerin saha ölçek kurulumları için ana belirleyici parametre olan membran türünün, arzu edilir kalitede yıkama suyu geri kazanımı üzerine etkisi araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar, UF ve NF prosesler için 4'er, TO prosesi için ise 5 farklı membran kullanılarak; atıksuyun kendi pH'sında, 25 °C'da ve 300 rpm'lik çapraz akış hızıyla UF, NF ve TO için sırasıyla 8, 12 ve 40 bar'lık membran geçiş basıncı şartlarında yerine getirilmiştir. Deneyler neticesinde, UF, NF ve TO için sırasıyla UH050, NF270 ve LFC-3 membranlarının en iyi performans veren membranlar olduğu belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, tekstil yıkama atıksularından UF/NF/TO birleşik sistemi kullanılarak, 6,34 pH, 6 mg TÇK/L, 34 mg KOİ/L ve 14 mg TOK/L ile proseste yeniden kullanıma uygun kalitede suyun geri kazanılabileceği ortaya konmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Tekstil yıkama atıksuları, Endüstriyel su geri kazanımı, Ultrafiltrasyon, Nanofiltrasyon, Ters osmoz

### Investigation of Influence of Membrane Type on Water Recovery by Pressurized Membrane Processes from Textile Washing Wastewaters

**Abstract:** Developments in industrial activities around the world lead to increase water consumption and to become widespread industrial water pollution problems. This situation accompanied by increasing water shortage issues needs to be realized technological applications which include recovering water in reusable quality from wastewaters of excessive water-consuming industries. In this study, recovering water in reusable quality from textile washing wastewaters having  $6.22 \pm 0.03$  pH,  $1130 \pm 321$  mg TDS/L,  $2362 \pm 727$  mg COD/L and  $744 \pm 234$  mg TOC/L was aimed using ultrafiltration (UF), nanofiltration (NF)

\* Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 41400, Gebze, Kocaeli.

\*\* Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 54100, Esentepe, Sakarya.

\*\*\* Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 41380, İzmit, Kocaeli.

İletişim Yazarı: C. Aydiner (aydiner@gtu.edu.tr)

and reverse osmosis (RO) membrane processes. In this respect, effect of membrane type as the main parameter for real-scale installations on reusable water quality was examined. Experiments were performed using four membranes each for UF and NF and five for RO at the conditions of original pH, 25 °C and 300 rpm cross-flow rate in trans-membrane pressures of 8, 12 and 40 bar for UF, NF and RO, respectively. At the experiments, the best performances were obtained by UH050, NF270 and LFC-3 membranes for the aforementioned order of the processes. This study was proved that reuse water with pH 6.34, 13 mg TDS/L, 34 mg COD/L and 14 mg TOC/L could be produced from textile washing wastewaters using UF/NF/RO combined system.

**Keywords:** Textile washing wastewaters, Industrial water recovery, Ultrafiltration, Nanofiltration, Reverse osmosis

## 1. GİRİŞ

Dünya genelinde endüstriyel faaliyetlerdeki gelişmeler, su tüketiminin artmasına ve endüstriyel su kirlenmesi problemlerinin yaygınlaşmasına neden olmaktadır. Artan su kıtlığı problemleriyle beraber bu durum, özellikle aşırı su tüketilen endüstrilerde proses atıksularından yeniden kullanılabilir su geri kazanımının sağlandığı, tatlı su kaynaklarının korunduğu ve endüstriyel su girdi maliyetlerinin azaltıldığı başarılı uygulamaların hayata geçirilmesini gerekli kılmaktadır. Ülkemizde kişi başına su tüketimi 1650-1700 m<sup>3</sup>/yıl civarındadır. Bugün ki nüfus artış hızı ve kalkınma verileri ışığında 2025-2030 yılları arasında su fakiri (<1500 m<sup>3</sup>/kişi-yıl) ülke durumuna düşeceğimiz konunun uzmanları tarafından iyi bilinen ve dikkatlice takip edilen bir gerçektir. Bunun yanı sıra, Ülkemizdeki sanayi tesislerinin sayısı ve faaliyet çeşitliliklerinin zaman içerisinde artması ile endüstriyel su taleplerinin arttığı da iyi bilinmektedir. Ayrıca, sanayicimizin ulusal ve uluslararası pazarlarda yüksek rekabet gücüne sahip olabilmeleri hususu dikkate alındığında, yüksek miktarlarda su tüketen sanayi kollarında ürün maliyetleri içerisinde önemli girdiler oluşturmaya başlamış “su tarifesi” payının düşürülmesine de şiddetle ihtiyaç bulunmaktadır. Zira böyle bir ihtiyacın varlığı, söz konusu endüstrilerde su ve atıksu yönetimi uygulamalarının daha etkin yürütülmesini gerektirmekte; bu itibarla da, başarısını ispat etmiş teknolojilere dayalı yeni ve/veya pratik çözümlerin hayata geçirilmesini daha ivedi bir hale getirmektedir.

Endüstriyel atıksu arıtma uygulamalarında sahada başarısını ispatlamış teknolojilerin başında basınç sürücülü membran prosesler gelmektedir. Membran malzemelerin ayırma büyüklüklerine göre bu prosesler, mikrofiltrasyon (MF), ultrafiltrasyon (UF), nanofiltrasyon (NF) ve ters osmoz (TO) şeklinde genel olarak 4 alt kategoriye ayrılmaktadır. Su veya atıksu ortamından ayırma veya filtrasyon işlemlerinde; MF ve UF prosesleri sırasıyla katı/kolloidal parçacıklar ve büyük moleküler ağırlıklı organik maddeler için kullanılmakta iken, NF ve TO prosesleri esasen çözünmüş inorganikler için kullanılmaktadır. NF proste, çok değerlikli çözünmüş inorganiklerin tek değerli iyonlardan seçici ayrımı prosteeki esas işlevselliği oluştururken; TO prosesle, tek değerlikli çözünmüş inorganiklerin ve çok düşük moleküler ağırlıklı organik maddelerin arıtılmış su ortamından ayırımı ve giderimi sağlanmaktadır (Mulder, 1991; Aydiner, 2006). Membran proseslerin, endüstride, saflaştırılmış ve/veya geri kazanılmış su eldesinde başarıyla uygulanabildiği farklı ölçeklerdeki uygulamalardan bilinmektedir. Etkin bir ayırma işlemi vasıtasıyla bu prosesler, özellikli kirleticilerin endüstriyel çıkış sularından proste yeniden kullanım amacıyla geri kazanımına da imkân sağlayabilmektedir (Capar, 2006; Meister, 2006; Vergili ve diğ., 2012). Ancak membran proseslerle endüstriyel su geri kazanımının, gerçek proses atıksuları kullanılarak doğrudan yerine getirildiği bilimsel çalışmalara rölatif olarak literatürde daha az rastlanmaktadır. Bununla birlikte, sadece endüstriyel faaliyetin türüne göre değil aynı zamanda sektördeki üretim farklılıklarına, zamana ve diğer faktörlere göre değişen atıksu karakteristikleri sebebiyle; gerçek atıksulardan proses suyu geri kazanımının sağlandığı uygulamalar, atıksuyun bertarafı ve yeniden kullanımı çözümlerinin çeşitlendirilmesi ve ulaşılan bu çözümlerin pratikleştirme

öncesi mutlak başarılarının kanıtlanması bakımından ayrı bir öneme sahip olarak değerlendirilmektedir (Vergili ve diğ., 2012; Li ve He, 2013; Thamaraiselvan ve Noel, 2015).

Bu çalışmada, yoğun su tüketen ve yüksek miktarlarda atıksu oluşturan sektörlerin başında gelen tekstil endüstrisinde (1000–5000 m<sup>3</sup>/gün), üretilen atıksuların yüksek hacmini oluşturan tekstil yıkama atıksularından, UF, NF ve TO prosesleri kullanılarak, proseste yeniden kullanıma uygun kalitede suyun geri kazanılması amaçlanmıştır. Laboratuvar ölçek deneysel düzenekle gerçekleştirilen deneysel çalışmalarla, arzu edilir kalitede geri kazanım suyu üretmenin, membran proseslerin sahada kurulum ve işletme maliyetlerinde önemli bir parametre olan membran türünden nasıl etkilendiği, proseslerdeki süzüntü akısı ve kirletici giderme etkinlikleri üzerinden her bir proses için ayrı ayrı araştırılmıştır. Çalışma sonucunda, UF, NF ve TO prosesler için en iyi performans veren membranlar tek tek belirlenerek, bu membranların kullanıldığı birleşik membran sisteminde en iyi kalitede geri kazanım suyu eldesi sağlayan işletim altında yeniden kullanım suyu üretimi sağlanmıştır. Üretilen geri kazanım suyu kalitesi, proseste yeniden kullanımda beklenen su kalitesi değerleri üzerinden değerlendirilmiştir.

## 2. MALZEME VE YÖNTEM

### 2.1. Membranlar

Deneysel çalışmalarda, uluslararası tedarikçilerden temin edilmiş farklı malzemelerden üretilmiş farklı ayırma büyüklüklerine sahip ticari membranlar kullanılmıştır. Proses işletimleri, UF proseste 4 (UP005, UP020, UH050, UV150), NF proseste 4 (NP030, NF270, DS-5DK, ESNA-1) ve TO proseste 5 (TFC-HRRO, LFC-3, CPA-3, CPA-5 ve BW30) olmak üzere toplam 13 farklı membran kullanılarak yerine getirilmiştir. Deneylerde kullanılan membranlara ilişkin genel özellikler Tablo 1’de verilmiştir.

### 2.2. Deneysel Çalışma Düzeniği

Deneylerde kullanılan tezgah üstü çalışma düzeneği Şekil 1’de gösterilmiştir. Düzenek, bir adet Sterlitech marka 300 mL besleme kapasitesine haiz paslanmaz dikey yerleşimli çelik çapraz akış membran modül ünitesine sahiptir. Modülde istenen membran geçiş basıncı, modüle doğrudan beslenen azot gazı ile sağlanmıştır. Bu amaçla düzenek bir adet azot tüpü ile teçhiz edilerek; modüle gaz geçişini sağlayan azot gazı iletim ve tahliye hattına bağlı bir adet basınç açma ve bir adet basınç ayarlama vanası vasıtasıyla güvenli işletim yerine getirilmiştir. Membran modül içerisine beslenen atıksuda istenen sabit sıcaklık ve çapraz akış hızı değerleri, sıcaklık ve karıştırma hızı ayarlamalı manyetik karıştırıcı vasıtasıyla sağlanarak deneyler yürütülmüştür. Membran modülden çıkan filtre edilmiş süzüntü akımı cam bir behere alınarak, bir adet hassas terazi vasıtasıyla süzüntü suyunda ağırlık ölçümleri yapılmıştır. Teraziden veri bağlantısı aracılığıyla bilgisayara alınan süzüntü suyu ağırlığı verileri üzerinden (1)’de verilen su akısı hesaplama formülü kullanılarak, süzüntü suyu akısı zamana karşı elde edilmiştir.

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

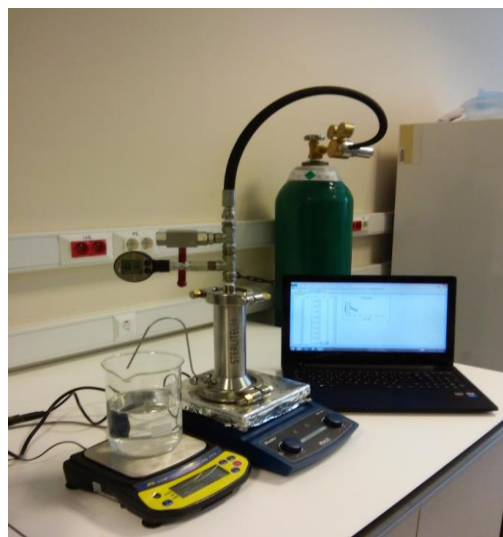
Denklemden;  $J$  (L/m<sup>2</sup>·sa), membrandan geçen süzüntü suyu akısı;  $A$  (m<sup>2</sup>), etkili membran alanı;  $V$  (dm<sup>3</sup>), membrandan geçen suyun hacmi; ve  $t$  (sa), filtrasyon süresini ifade etmektedir. Membran proses işletimlerinde kullanılan düzenekte deneysel çalışmalar, herhangi bir pH ayarlaması yapılmaksızın, 25 °C sıcaklık ve 300 rpm’lik çapraz akış hızı şartlarında; UF, NF ve TO prosesleri için sırasıyla 8, 12 ve 40 bar’lık membran geçiş basıncı şartlarında yerine getirilmiştir. NF deneylerinde UF’ten geçirilmiş, TO deneylerinde ise UF ve sonrasında NF’ten geçirilmiş arıtılmış atıksu, membran proseste besleme akımı olarak kullanılmıştır.

**Tablo 1. Deneylerde kullanılan UF, NF ve TO membranların genel özellikleri**

Proses	Membran	Üretici Firma	Malzeme <sup>a</sup>	MWCO <sup>b</sup> (kDa)	pH	T <sup>b</sup> (°C)
UF	UP005	MicrodynNadir	PES	5000	0-14	95
	UP020	MicrodynNadir	PES	20000	0-14	95
	UH050	MicrodynNadir	PES	50000	0-14	95
	UV150	MicrodynNadir	PVDF	150000	2-11	95
NF	NP030	MicrodynNadir	PES	400	0-14	95
	NF270	Filmtech DOW	A-PA TFC	300	2-11	45
	DS-5DK	GE-Osmonics	TFC	150-300	2-11	50
	ESNA-1	Hydranautics	A-PA TFC	200	2-10	45
TO	CPA-3	Hydranautics	A-PA	100-200	3-10	45
	CPA-5	Hydranautics	K-PA	100-200	2-11	45
	BW30	DOW	PA-TFC	100-200	2-11	45
	LFC-3	Hydranautics	K-PA	100-200	2-10	45
	TFC-HRRO	KOCH	PA	100	4-11	45

<sup>a</sup> PES: Polietersülfon, RC: Rejenere selüloz; PVDF: Polivinilidenflorit; TFC: İnce film kompozit; A-TFC: Aromatik ince film kompozit; A-PA: Aromatik poliamid; K-PA: Kompozit poliamid.

<sup>b</sup> Molecular weight cut-off'ın kısaltması olarak MWCO, membranın, kirletici molekül boyutu üzerinden ayırma büyüklüğünü; sıcaklığın sembolü olarak T, membranın azami işletme sıcaklığını ifade eder.



**Şekil 1:**

*Çapraz akış membran proses tezgah üstü deneysel çalışma düzeneği*

### 2.3. Tekstil Yıkama Atıksuyu

Deneylerde kullanılan tekstil yıkama atıksuları, tekstil ürünleri üretim faaliyetlerinde bulunan bir tekstil fabrikasının tekstil ürünleri yıkama ünitesinden alınmış gerçek atıksular olup, yıkama ünitesinin işletimi sırasında 6 farklı zamanda alınmış atıksu numunelerine ait su kalitesi analiz sonuçları, ortalama ve standard sapma değerleri üzerinden Tablo 2’de gösterilmiştir.

**Tablo 2. Tekstil yıkama atıksularının karakteristik özellikleri**

Parametre	Birim	Ölçüm Yöntemi	Ortalama	Std. Sapma
pH	–	Dijital multi-metre	6,22	0,03
Sıcaklık	°C	Dijital multi-metre	25,0	1,3
İletkenlik	µS/cm	Dijital multi-metre	2226	613
TÇK	mg/L	Dijital multi-metre	1130	321
ÇO <sub>2</sub>	mg/L	Dijital multi-metre	8,04	0,87
KOİ	mg/L	Kapalı reflux kalorimetrik	2362	727
TOK	mg/L	750 °C’ta sıcaklıkta yakma	744	234
AKM	mg/L	105 °C’ta gravimetrik tartım	19,0	10,3
AOX	mg/L	UV absorpsiyon	0,85	0,79
Bulanıklık	NTU	Nefelometrik	3,51	5,04
Amonyak	mg/L	Ön Destilasyon	1,77	1,57
Renk	A (436-620 nm)	UV spektrofotometrisi	0,27	0,07
Nitrat	mg/L	UV spektrofotometrisi	8,5	5,7
Sülfat	mg/L	UV spektrofotometrisi	440	453
Klorür	mg/L	UV spektrofotometrisi	35,5	14,2
Demir (II)	mg/L	UV spektrofotometrisi	7,7	12,5
Demir (III)	mg/L	UV spektrofotometrisi	4,0	3,1
Toplam Azot	mg/L	UV spektrofotometrisi	13,7	17,6
Toplam Sertlik	mg/L	UV spektrofotometrisi	101	71
Fenol	mg/L	UV spektrofotometrisi	11,5	4,7
Toksosite*	TU	Işık saçan bakteri testi	9,6	6,3

\* Toksosite parametresi, TU (toxicity unit) biriminde; 0: toksik değil, >1: az toksik, 1-10:toksik, 11-100: çok toksik, >100: aşırı toksik olarak değerlendirilmekte, analiz edilen tekstil yıkama banyosu atıksuyu ortalama değer olarak çok toksik sınırında toksik endüstriyel atıksu grubuna girmektedir.

## 2.4. Analitik Yöntemler

Ham tekstil yıkama atıksuları ve membran proses işletimleriyle arıtılmış çıkış sularındaki su kalitesi analizleri, uluslararası standard su ve atıksu analiz yöntemlerine uygun Tablo 2’de gösterilen analiz yöntemleri uyarınca yerine getirilmiştir (APHA&AWWA, 2005).

Membran proseslerin performansları, elektriksel iletkenlik ( $E_c$ ), toplam çözülmüş katılar (TÇK), toplam organik katılar (TOK), kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), renk, klorür ve sülfat parametreleri olmak üzere toplam 7 parametre üzerinden ayrı ayrı izlenmiştir. Membranların kirlenme giderme performansları, membran süzöntü akımından alınan kompozit numunelerde yapılan analizler üzerinden yerine getirilmiştir. Proseslerde membranların kirlenme ayırma veya giderme verimleri, her bir parametre için aşağıdaki denklem kullanılarak hesap edilmiştir.

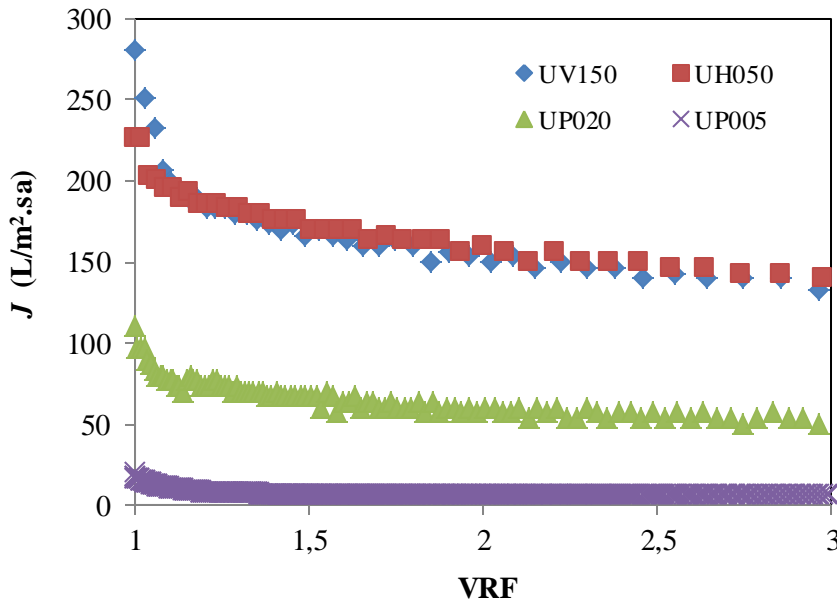
$$R (\%) = 100 * \left[ 1 - \frac{C_s}{C_k} \right] \quad (2)$$

Denklemden,  $R (\%)$  kirlenme giderme verimini ve  $C_s$  ve  $C_k$  ise sırasıyla süzöntü ve konsantre akımlarındaki kirlenme parametre ölçüm sonuçlarını ifade etmektedir.

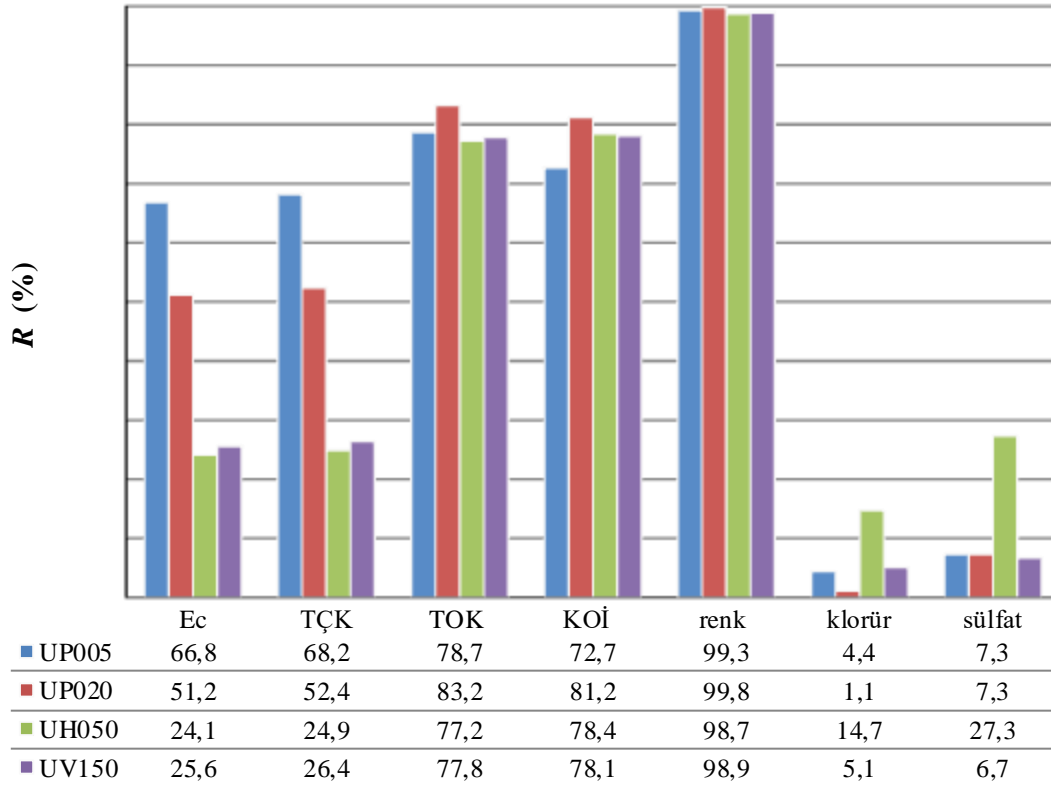
## 3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

### 3.1. UF Proses Etkinliği

UF prosesinde, 4 farklı membran için elde edilmiş süzöntü suyu akılarının besleme akımını konsantre etme oranına (*volume reduction factor*, (VRF): deney başlangıcı besleme akımı hacminin membran konsantrisine veya deney sonu besleme hacmine oranı) göre değişimleri ve deney sonu itibarıyla kirlenme giderme verimi grafikleri sırasıyla Şekil 2 ve 3’te gösterilmiştir. UF prosesin işletimi sırasında farklı membranlar için aynı VRF oranlarını sağlamak amacıyla deneysel işletim süreleri, UP005, UP020, UH050 ve UV150 membranları için sırasıyla 200, 105, 40 ve 40 dk’dır.



**Şekil 2:**  
UF membranlara ait süzöntü suyu akıları



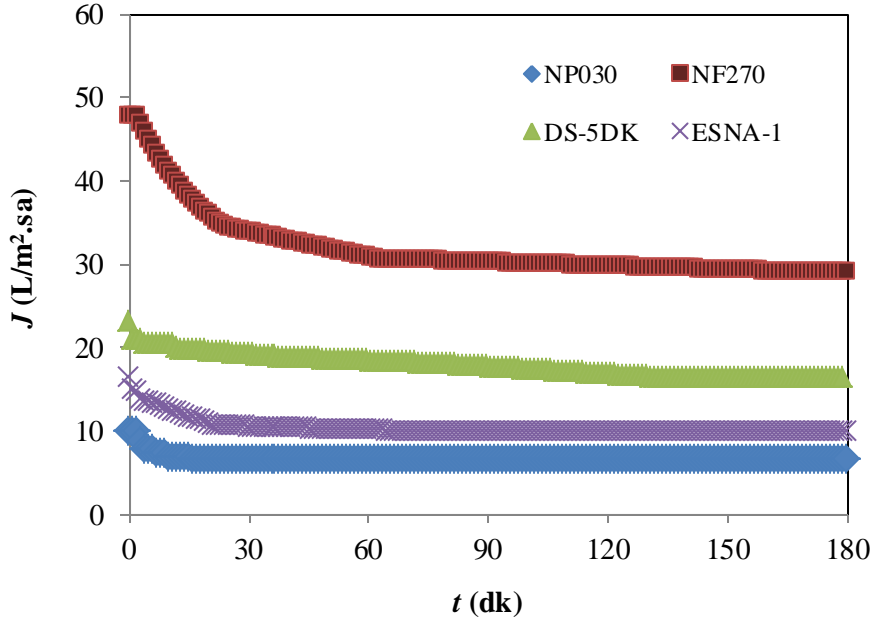
**Şekil 3:**

*UF membranlara ait kirletici filtrasyon performansları*

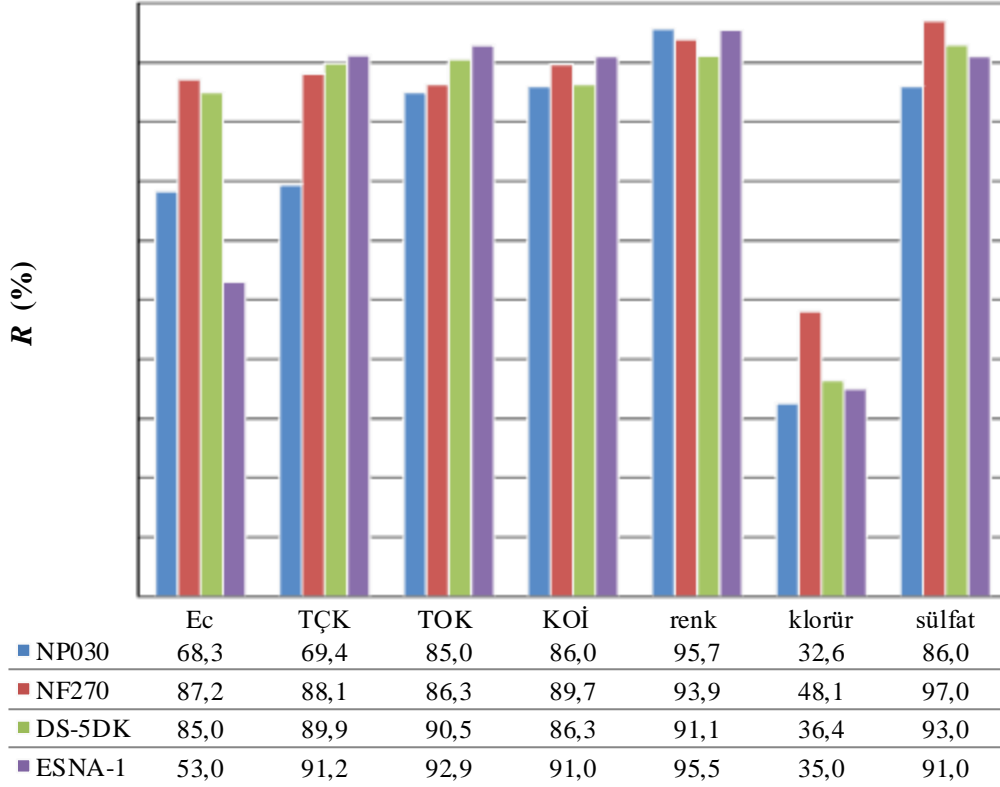
Şekil 2'ye göre, daha büyük gözenek büyüklüklerine sahip UH050 ve UV150 membranlarının sırasıyla 136 ve 132 L/m<sup>2</sup>.sa değerleri ile, diğer iki membran türüne kıyasla çok daha yüksek süzüntü suyu akışı elde etmişlerdir. Her ne kadar bu iki membran malzeme için 3'ten daha büyük VRF değerlerinde su akışındaki azalma bir miktar daha sürecek gibi görünse de, ham besleme atıksuyunun üç kat konsantre edildiği VRF 3 değeri itibarıyla, çalışılan her bir membranda kararlı su akışı işletiminin genel olarak sağlanabildiği değerlendirilebilir. Şekil 3'e göre, UH050 ve UV150 membranlarının TOK, KOİ ve renk parametreleri itibarıyla atıksudan organik madde gideriminde, diğer membranlarla yarışır düzeylerde etkin olduğu gözlenmiştir. TÇK, klorür ve sülfat parametreleri itibarıyla inorganik madde giderimi ise, diğer membranlara nazaran UH050 membranında daha iyi seviyelerde gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar göstermiştir ki, UF proste çalışılan membran türleri arasında en iyi performansa sahip olanı, aynı firmanın polietersülfon malzemeli yüksek pH ve sıcaklık aralığında işletilebilen UH050 ticari kodlu membrandır.

### 3.2. NF Proses Etkinliği

NF proste, 4 farklı membran için elde edilmiş süzüntü suyu akışının zaman göre değişimleri ve deney sonu itibarıyla kirletici giderme verimi grafikleri sırasıyla Şekil 4 ve 5'te verilmiştir. Membranlardaki rölatif düşük su akışı değerleri sebebiyle farklı membranlar için aynı VRF değerleri elde edilememiş olduğundan, süzüntü suyu akışının grafik gösterimi VRF'ye karşı değil, zamana karşıdır. Prosesin işletimi sırasında farklı membranlar için 180 dk'lık işletim süresinin sağlandığı VRF değerleri, NP030, NF270, DS-5DK ve ESNA-1 membranları için sırasıyla 1.1, 2.4, 1.5 ve 1.3'tür.



**Şekil 4:**  
NF membranlara ait süzöntü suyu akıları



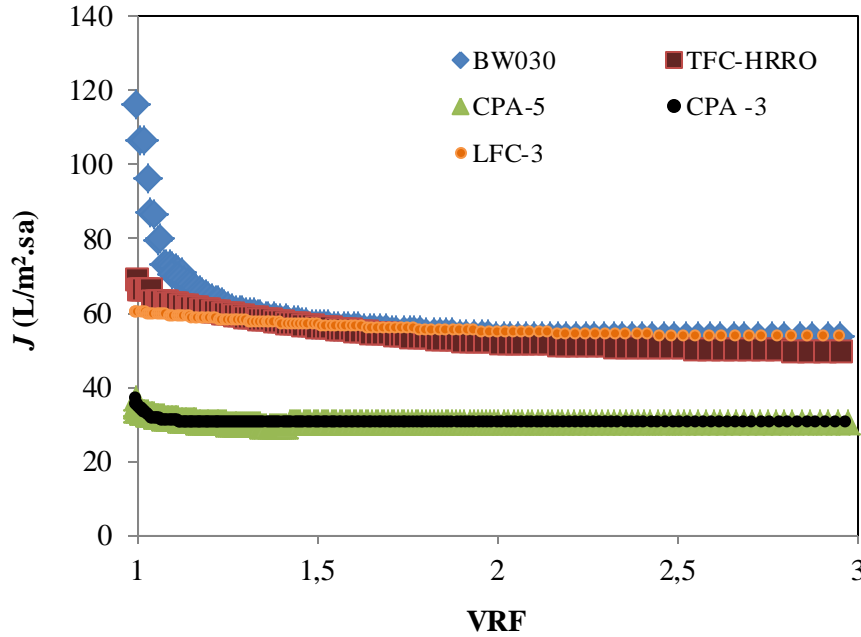
**Şekil 5:**  
NF membranlara ait kirletici filtrasyon performansları



UF proste UH050 membranından geçirilmiş ham atıksuyun NF proste NF membranlardan filtrasyonunda su akısı performansları NF270>DS-5DK>ESNA-1>NP030 sırasındadır. Kararlı hal akısı işletmelerine, NF270, DS-5DK, ESNA-1 ve NP030 için sırasıyla 150, 125, 25 ve 15 dk'lık operasyonlarda ulaşıldığı saptanmıştır. 29,2 L/m<sup>2</sup>.sa süzöntü suyu akısı ile NF270 membranı, diğer üç membrana kıyasla daha iyi bir işletim etkinliğine haizdir. Nitekim bu membranın organik kirletici madde giderimindeki etkinliği ESNA-1 ve DS-5DK membranlarına göre % 1,5-6,6 seviyelerinde daha düşük kalmış ise de, ortalama % 90'lar seviyesinde yüksek seviyede organik madde gideriminin sağlandığı görülmüştür. Buna karşın, inorganik kirletici gideriminde NF270'in, ESNA-1 ve DS-5DK membranlarından asgari % 4,0 ile % 11,7 arasında daha yüksek ayırma performansı ile işleme imkân sağladığı belirlenmiştir. NF membranlar ile yürütülen filtrasyon deneyleri göstermiştir ki, tekstil yıkama atıksuyunun UF filtrasyonu sonrasında işletilecek bir NF proste, NF270 ticari kodlu aromatik poliamid bazlı ince film kompozit membranı, çalışılan NF membranları arasında en iyi filtrasyon performansına sahip olmaktadır.

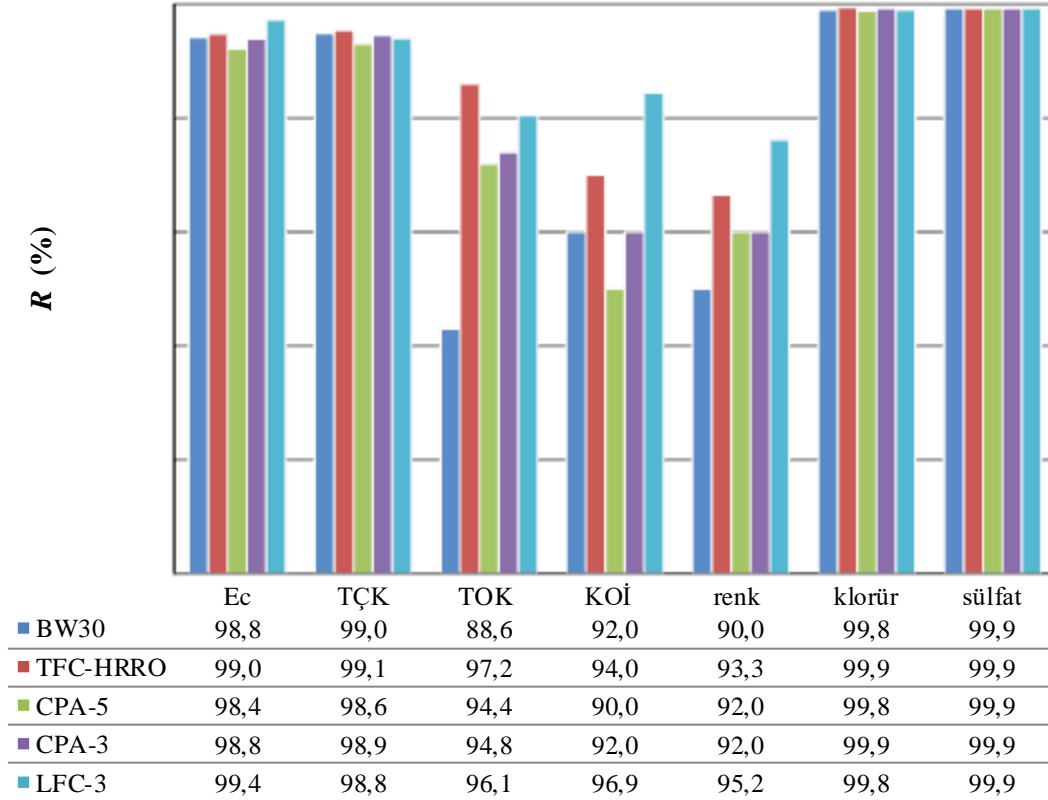
### 3.3. TO Proses Etkinliği

TO proste, 5 farklı membran için elde edilmiş süzöntü suyu akılarının besleme akımını konsantre etme oranına (VRF) göre değişimleri ve deney sonu itibariyle kirletici giderme etkinliği grafikleri sırasıyla Şekil 6 ve 7'de sunulmuştur. TO prosesin işletimi sırasında farklı membranlar için 3 VRF değerine; BW30, LFC-3 ve TFC-HRRO membranlarda yaklaşık 120 dk, CPA-3'te 206 dk ve CPA-5'te 216 dk'lık işletim süreleri sonunda ulaşılmıştır.



Şekil 6:  
TO membranlara ait süzöntü suyu akıları

UF proste UH050 membranından geçirilmiş ham atıksuyun NF270 membranından filtrasyonu sonrasında işletilen TO proste, membranların su akısı performansları, BW30≅LFC-3≅TFC-HRRO>CPA-3≅CPA-5 şeklinde gerçekleşmiştir. En yüksek süzöntü suyu akısı, 53,1 L/m<sup>2</sup>.sa değeri ile BW30 membranında gözlenmiştir. Bunun yanı sıra, TO membranlarda kararlı hal akısı işletmelerine, BW30, LFC-3 ve TFC-HRRO membranları için yaklaşık 2,7 VRF, CPA-3 ve 5 membranlarında ise yaklaşık 1,5 VRF değerinde ulaşıldığı saptanmıştır.

**Şekil 7:**

*TO membranlara ait kirletici filtrasyon performansları*

TO prosesinde kirletici giderim etkinlikleri için verilmiş Şekil 7'deki sonuçlara göre, her ne kadar tüm membranların inorganik madde giderim verimleri çok yüksek değerlerde ve %98.4 üzeri değerlerde gerçekleşmiş ise de, yüksek VRF değerinde rölatif yüksek süzüntü suyu akışı ile işletilmiş BW30 membranında ortalama % 90 organik madde giderim etkinliğiyle atıksu arıtımının yapılabildiği belirlenmiştir. BW30 membranındaki eşit VRF ve çok yakın değerlerde süzüntü suyu akışı (53,0 L/m<sup>2</sup>.sa) ile % 95,2'den büyük organik madde giderimi etkinliği altında işletilmiş kompozit poliamid esaslı LFC-3 membranının, prosesteki arıtma etkinliği açısından çalışılan TO membranları arasında en iyi performansa sahip membran olduğu tespit edilmiştir.

### 3.4. UF/NF/TO Sisteminde Endüstriyel Su Geri Kazanımı

UF, NF ve TO prosesler için belirlenmiş en iyi performanslı membranların kullanıldığı UH050/NF270/LFC-3 membranları sırasında işletilen UF/NF/TO birleşik membran sisteminde tekstil yıkama atıksuyunun filtrasyonu ile elde edilen arıtılmış çıkış suyunun kalitesi, her bir membran proses adımında elde edilen arıtma performansları ve proseste yeniden kullanım için hedeflenen çıkış suyu kalitesi değerleriyle birlikte Tablo 3'te verilmiştir. UF/NF/TO birleşik sistemi kullanılarak tekstil yıkama atıksularından, 6,34 pH'da, 13 µS/cm ve 6 mg TÇK/L ile çok düşük inorganik madde içeriğinde ve 14 mg TOK/L ve 34 mg KOİ/L ile proseste yeniden kullanım için arzu edilen kaliteye yakın ama biraz üzeri organik içerikte suyun geri kazanımı sağlanmıştır. Arıtılan nihai çıkış suyunun proseste yeniden kullanımı sırasında, birleşik membran sistemdeki membran konsantreleri hacminin toplamı kadar temiz yıkama suyu (her bir membran proseste %80,0 su geri kazanımı için nihai çıkış suyu ham giriş atıksuyunun %51,2'si (=0,80<sup>3</sup>) geri kazanım suyu olacak ve bu durumda membran konsantreleri hacmi toplamı %48,8 (=1.000-0,512)) ile giriş atıksu akımı debisinin yarısına yakın olacaktır), arıtılmış geri

kazanım suyu ile beraber, yıkama ünitesine doğrudan beslenerek ilave edileceğinden; yıkama prosesindeki temiz karışım suyunun organik kirletici seviyesi, proseste kullanılan arzu edilir yıkama suyu kalitesinde olacaktır.

**Tablo 3. UF/NF/TO birleşik membran sistemiyle tekstil yıkama atıksuyunun filtrasyonunda proses performansları ve çıkış suyu kalitesi değerleri**

Performans Parametresi	Membran Prosesler			UF/NF/TO		“Hedeflenen Yeniden Kullanım Suyu Kalitesi
	R (%)			Arıtılmış Çıkış Suyu Kalitesi	Toplam R (%)	
	UF	NF	TO			
$J^b$	135.9	29.2	53.0	–	–	–
pH <sup>b</sup>	6.34	7.03	6.34	6.34	–	6-8
$E_c$	24.1	87.2	99.4	13	99.6	<2500 $\mu$ S/cm
TÇK	24.9	88.1	98.8	6	99.7	<1250 mg/L
TOK	77.2	86.3	96.1	14	99.6	–
KOİ	78.4	89.7	96.9	34	99.6	25 mg/L
Renk	98.7	93.9	95.2	0.001	99.9	0
Klorür	51.5	48.1	99.8	0.07	99.9	–
Sülfat	27.3	97.0	99.9	0.2	100.0	–

<sup>a</sup> (Bes-Pia ve diğ., 2010).

<sup>b</sup>  $J$  ve pH için sunulan değerler, yüzde giderme verimlerini değil, sırasıyla membran süzöntü akısı ( $L/m^2 \cdot sa$ ) ve pH ölçüm değerlerini göstermektedir.

#### 4. SONUÇLAR

Tekstil yıkama atıksuyundan su geri kazanımında, UF, NF ve TO membran proseslerinin sahada teknik kurulumlarında en iyi performansla işletilebilecek membran türleri; UF ve NF proseslerde 4'er ve TO proseste 5 olmak üzere toplam 13 ticari membran için araştırılmıştır. Gerçek atıksuyla yürütülen çalışmalarda, UF, NF ve TO prosesleri için uygun membran türlerinin, sırasıyla UH050, NF270 ve LFC-3 olduğu belirlenmiştir. Bu membranlarla işletilen UF/NF/TO birleşik membran sisteminde arıtılmış tekstil yıkama atıksuyundan; proseste yeniden kullanım suyu kalitesinden çok daha iyi inorganik içerikte (13  $\mu$ S/cm elektriksel iletkenlik ve 6 mg TÇK/L) ve hedeflenenin biraz üzeri organik kalitede (14 mg TOK/L ve 34 mg KOİ/L) geri kazanım suyu üretilmiştir. Pratikte, yıkama ünitesine devrettirilecek arıtılmış geri kazanım suyuna, konsantre hacimleri toplamı kadar temiz yıkama suyu ilave edilerek; proses suyunun, başka bir işleme gerek olmaksızın hedeflenen organik kalitede olması sağlanacaktır.

#### TEŞEKKÜR

Bu çalışma, 113Y352 numaralı 1003 projesi ile TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. Yazarlar, bu desteklerinden ötürü TÜBİTAK'a teşekkürlerini sunar.

## KAYNAKLAR

1. Mulder, M. (1991) *Basic Principles of Membrane Technology*, Kluwer Academic Publishers. Netherlands.
2. Aydiner, C. (2006) *Hibrit Mikrofiltrasyon Teknolojisi ile Sulu Ortamdan Nikel Giderimi*, Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi-Mühendislik Fakültesi, İstanbul.
3. Capar, G., Yilmaz, L., Yetis, U. (2006) Reclamation of acid dye bath wastewater: Effect of pH on nanofiltration performance, *Journal of Membrane Science*, 281(2006), 560–569. doi:10.1016/j.memsci.2006.04.025
4. Meister, U. (2006) *Introducing Competition into the Piped Water Market*, Deutcher Universitäts Verlag, Wiesbaden.
5. Vergili, I., Kaya, Y., Sen, U., Gönder, Z.B., Aydiner, C. (2012) Techno-economic analysis of textile dye bath wastewater treatment by integrated membrane processes under the zero liquid discharge approach, *Resources, Conservation and Recycling*, 58(2012), 25–35. doi:10.1016/j.resconrec.2011.10.005
6. Li, C.H., He, J.X. (2013) Advanced treatment of spent acid dye bath and reuse of water, salt and surfactant therein, *Journal of Cleaner Production*, 59(2013), 86–92. doi:10.1016/j.jclepro.2013.06.049
7. Thamaraiselvan, C., Noel, M. (2015) Membrane processes for dye wastewater treatment: Recent progress in fouling control, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45(2015), 1007–1040. doi: 10.1080/10643389.2014.900242
8. APHA&AWWA (2005) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewaters*, American Public Health Association Publication, Washington.
9. Bes-Pia, A., Cuartas-Uribe, B., Mendoza-Roca, J.A., Alcaina-Miranda, M.I., (2010) Study of the behaviour of different NF membranes for the reclamation of a secondary textile effluent in rinsing processes, *Journal of Hazardous Materials*, 178(2010), 341–348. doi:10.1016/j.jhazmat.2010.01.085