

Membran Teknolojileri ile Alternatif Su Temini: Desalinasyon ve Atıksu Geri Kazanımı

Reyhan Şengür-Taşdemir¹
reyhansengur@gmail.com

İsmail Koyuncu^{1,2*}
koyuncu@itu.edu.tr

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, Prof. Dr. Dincer Topacık Ulusal Membran Teknolojileri UYG-AR Merkezi, 34469 Maslak, İstanbul, Türkiye

² İstanbul Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 34469 Maslak, İstanbul, Türkiye

Özet

Dünyada ve ülkemizde kullanılabilir temiz su kaynaklarının artan nüfus, endüstrileşme ve küresel ısınma vb. gibi sebeplerden dolayı azalmaktadır. Nüfus artmasına bağlı olarak sanayi faaliyetlerinin artışı, tarımsal sulama, düzensiz kentleşme su kaynaklarının hızla yok olmasına ve ülkelerin su kıtlığı yaşama olasılığını artırmakta, varolan su kıtlığının artmasına sebebiyet vermektedir. Bu da su temini için insanoğlunun yeni alternatifler geliştirmesine yol açmaktadır. Bu alternatif arayışına en iyi iki çözüm atıksu geri kazanımı ve desalinasyondur. Atıksu geri kazanımı ve desalinasyon birçok farklı prosesle gerçekleştirilebilmektedir. Ancak bunlardan en verimli olan prosesler membran teknolojileridir. Bu derlemede atıksu geri kazanımı ve desalinasyonda kullanılan membran prosesler anlatılmıştır. Ülkemizde ve dünyada membran teknolojileri kullanılarak atıksu geri kazanımı ve desalinasyon gerçekleştiren tesisler hakkında bilgi verilmiştir.

Anahtar kelimeler: Desalinasyon, su geri kazanımı, membran teknolojileri, su temini

Alternative Water Supply with Membrane Technologies: Desalination and Wastewater Recover

Reyhan Şengür-Taşdemir¹
reyhansengur@gmail.com

İsmail Koyuncu^{1,2*}
koyuncu@itu.edu.tr

¹ Istanbul Technical University, Prof. Dr. Dincer Topacık National Research Center on Membrane Technologies, 34469 Maslak, Istanbul, Turkey

² İstanbul Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 34469 Maslak, İstanbul, Türkiye

Abstract

Fresh water supplies are decreasing day by day due to increased population, industrialization and global warming in the world as well as in our country. Fresh water is depleting due to increased industrial activities based on increased population, agricultural irrigation, unplanned urbanization, and this is increasing the probability of water scarcity and the amount of current water scarcity of countries in the world. Alternative solutions need to be developed in order to find new water sources. Desalination and wastewater reuse are two of the best solutions available. It is possible to use different methods for wastewater reuse and desalination, however, membrane technology offers the most efficient option. In this review, details on membrane technologies used in wastewater reuse and desalination. Also, current situation of membrane-based wastewater reclamation and desalination facilities in the world and in Turkey is presented.

Keywords: Desalination, water reuse, membrane technologies, water supply

1. Suyun Önemi

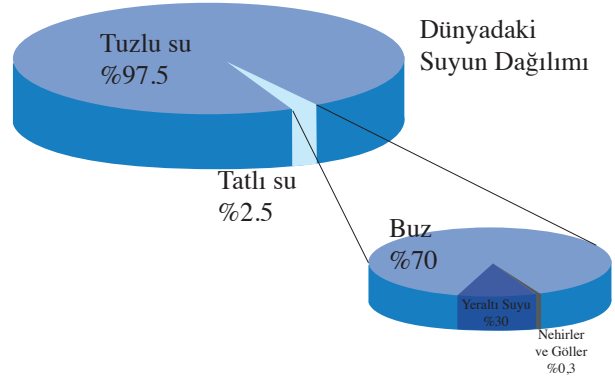
Dünya da 261 adet sınır aşan su bulunmaktadır ve nehir akımlarının %60'ı ve dünya nüfusunun % 40'ını oluşturmaktadır. 145 ülke sınır aşan su barındırmaktadır ve bu da bu ülkelerin birbiriyle ilişki içerisinde olduğunu göstermektedir. Uluslararası ilişkilerde suyun önemi büyüktür. Kalkınma, insan, çevre, enerji vb. gibi konular suyla doğrudan ilgilidir. Ülkelerin kalkınması için su gereklidir. İyileştirilmiş su temini için yeni teknolojilerin uygulanmasına ihtiyaç bulunmaktadır. Enerji üretimi için de yine su gereklidir. Çoğu su temini yönteminde enerji tüketimi oldukça yüksektir ve yaklaşık olarak dünyadaki toplam enerji tüketiminin %10'unu oluşturmaktadır (Koyuncu, 2016).

Su; ekonomik ve politik açıdan da önemlidir. Ekonomik açıdan su; enerji üretimi, sulama, içme ve kullanma suyu temini, ulaşım, taşımacılık, turizm, rekreasyonel alanlar, doğal mineralli, jeotermal ve termal su temini, endüstride önemliken; politik açıdan denizden petrol ve doğalgaz üretimi, tuz ve mineral üretimi, nehirden kum ve çakıl temini, desalinasyon ve atıksu geri kazanımıyla içme ve kullanma suyu temini için önemlidir. Ayrıca nüfus artışı da karşılıklı ilişkilerde suyun önemini arttırmaktadır (Koyuncu, 2016).

2. Su Kıtlığı

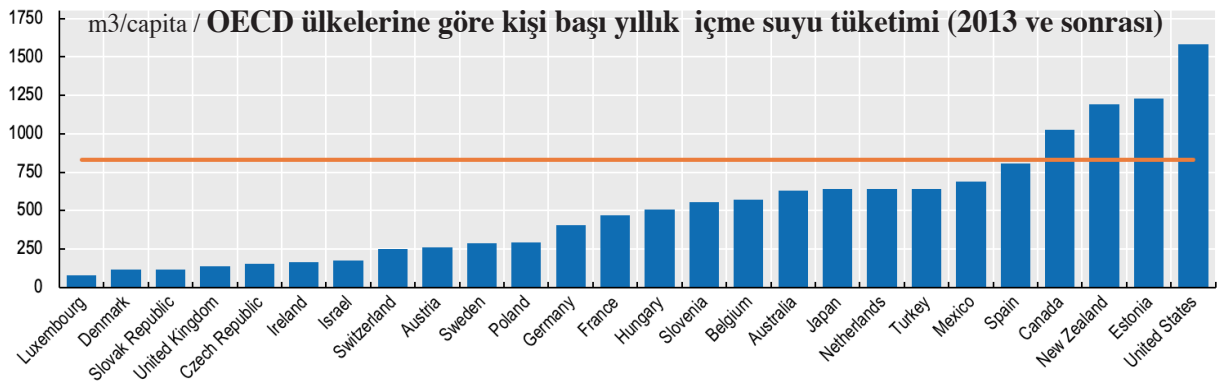
Dünya daki toplam su hacmi 1,4 milyar km³'tür. Fakat bunun sadece %0,3'lük bir kısmı içilebilir olarak nitelendirilmektedir. Geri kalan kısım buzullar, deniz suyu ve su buharı olarak yeryüzünde dağılmaktadır (Şekil). İçilebilir su kaynakları 108.000 km³ olup bu suyun sadece 47.000 km³'ü tatlı su kaynağıdır, geri kalan

kısmı göller ve nehirler oluşturmaktadır. Bu miktar herkes tarafından erişilebilir olsa, her bir kişi için yıllık 9000 m³ su tüketimi mümkün olabilecektir. İçilebilir su kaynaklarına erişim küresel bir problem olup, 2015 yılında dünya nüfusunun %91'i içilebilir su kaynaklarına erişebilmektedir. Bu da yaklaşık olarak 700 milyon kişinin bu kaynaklara erişemediği anlamına gelmektedir (OECD raporu, 2009).

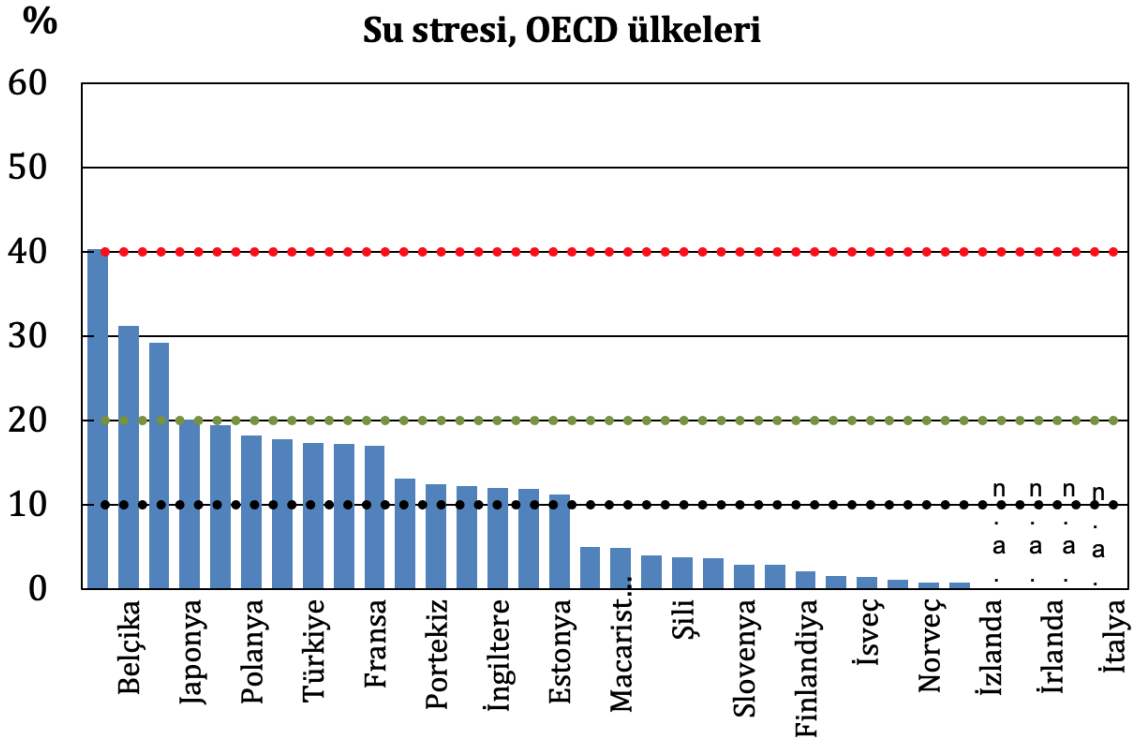


Şekil 1. Dünya daki su dağılımı (Muluk vd., 2013)

Su kaynaklarını, toplam su tüketiminin % 70 ile en çok tarımsal sulama kullanmaktadır. Bunu elektrik üretimi, buhar bazlı elektrik üretimi soğutma suları izlemektedir. Şekil 2 ve Şekil 3'te Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü (OECD)'nin ülkeler bazında yıllık içme suyu tüketimleri ve su stresi yaşayan ülkeler belirtilmiştir. Şekiller incelendiğinde ülkemizin içme suyu tüketimi OECD ortalamasının altında kalmasına rağmen, ülkemiz orta seviyede su stresi yaşayan ülkeler arasındadır ve bu stresin 2050 yılına gelindiğinde yüksek su stresine evrileceği öngörülmektedir (Koyuncu ve Şengür-Taşdemir, 2018).



Şekil 2: OECD ülkelerine göre kişi başı yıllık içme suyu tüketimi (2013 ve sonrası) (OECD raporu, 2009; OECD istatistikleri, 2017).



Şekil 3. OECD ülkelerinde su stresi. <10=su stresi yok; 10-20=düşük su stresi; 20-40=orta su stresi; >40=yüksek su stresi (OECD raporu, 2009; OECD istatistikleri, 2017)

Su kıtlığı problemini çözümlmek için hem arz hem de talep bazlı önlemler alınabilir. Talep yönlü önlemlerden en önemlisi su tasarrufu ve su talebini azaltmaya yönelik topluma bilinç kazandırılmasıdır. Bunun yanı sıra, teknolojik açıdan su tasarrufu yapabilecek ekipmanların üretilmesi ve suyun rasyonel fiyatlandırılması gösterilebilir. Arz bazlı önlemlerde ise biriktirme yapıları, barajların ve iletim hatlarının inşası, atıksuların yeniden kullanımı ve desalinasyon ile deniz suyu arıtımı gösterilebilir (Koyuncu, 2016). Su geri kazanımı yapılabilmesi için kullanılan birçok alternatif bulunmaktadır. Tablo 1’de su geri kazanımının önemi ve yararları üzerine bilgiler verilmiştir.

3. Alternatif Su Temininde Membran Teknolojiler

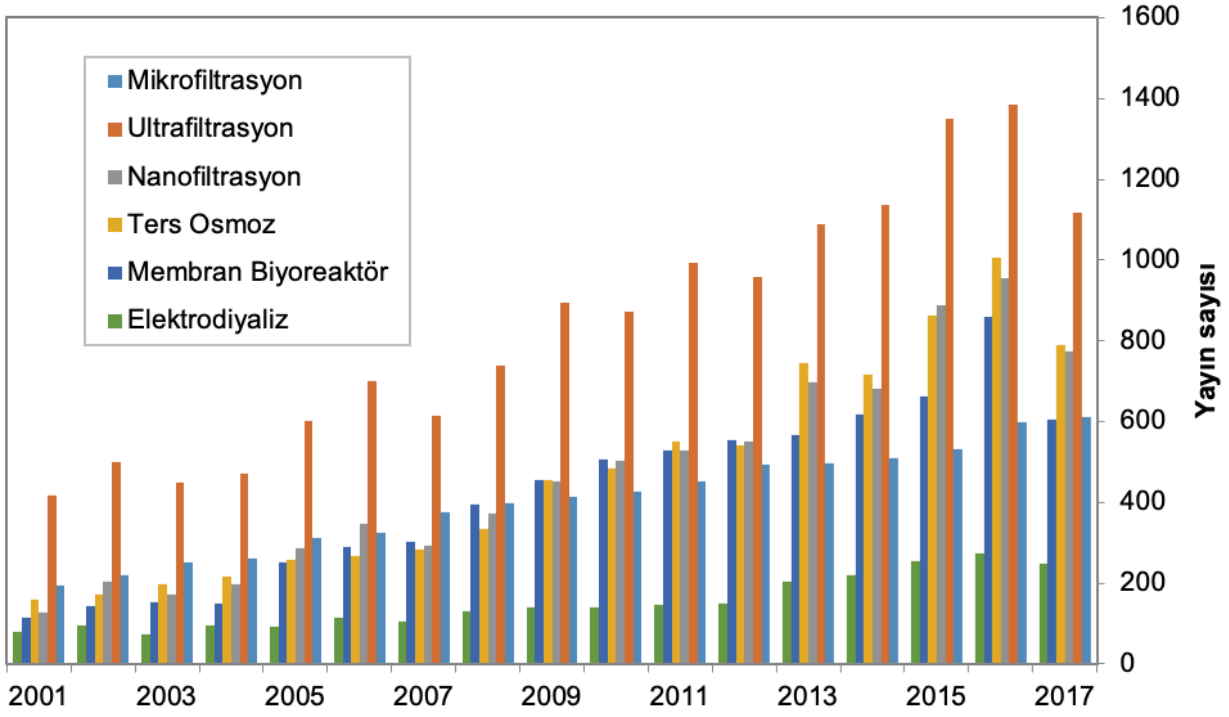
Dünyamızda su kaynaklarının korunmasının gerekliliği her geçen gün artış göstermektedir. Bu da yeni alternatiflerin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Atıksu geri kazanımı ve desalinasyon bu sebeple her geçen gün önem kazanmaktadır.

Membran; seçici geçirgen bariyerler olup farklı sürücü kuvvetler uygulandığında ayırma işlemi gerçekleştiren yapılardır. Basınç, sıcaklık, konsantrasyon, buhar basıncı, elektriksel potansiyel farkı gibi sürücü kuvvetler bulunmaktadır. Atıksu geri kazanımı ve desalinasyon uygulamalarında kullanılan membran teknolojileri mikrofiltrasyon (MF), ultrafiltrasyon (UF), nanofiltrasyon (NF), ters osmoz (TO), membran biyoreaktör (MBR), elektrodiyaliz (ED) vb. olarak söylenebilir. Şekil 4’te MF, UF, NF, TO, MBR ve ED membran proseslerinin, Şekil 5’te de membran prosesler ile su geri kazanımı hakkında “Web of Science”dan 2000 yılından itibaren oluşturulmuş yıllara göre yayın bilgileri verilmiştir. Şekil 4 ve Şekil 5’ten de görüleceği üzere yıllara göre yayın sayıları büyük artış göstermektedir.

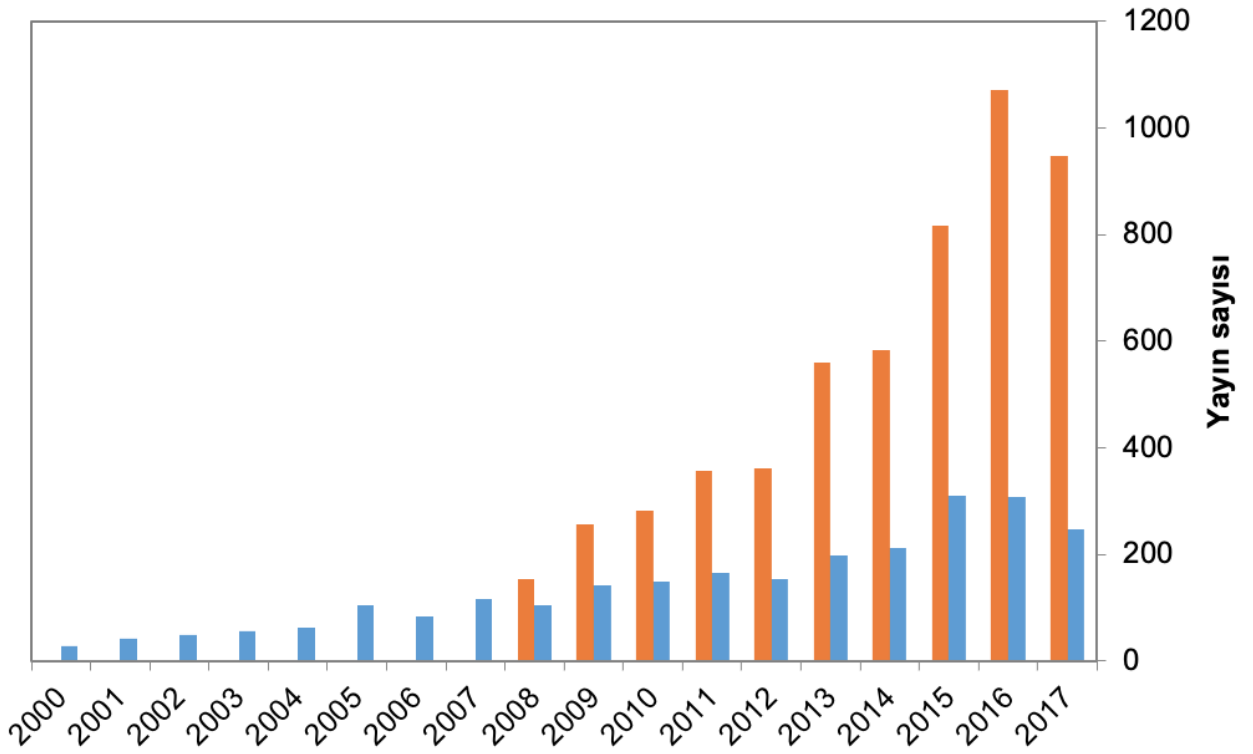
Atıksu arıtımı ve geri kazanımı için çeşitli yöntemler kullanılabilir. Bu yöntemler ve giderdiği kirleticiler hakkında Tablo 2’de bilgi verilirken, Şekil 6’da geri kazanım uygulamaları hakkında bilgi verilmektedir. Şekil 7’de ise geri kazanım akım şemaları gösterilmektedir.

Tablo 1. Su geri kazanımının önemi, olası yararları ve kullanımının artmasına destek olabilecek sebepler (Asano vd., 2007; Koyuncu ve Şengür-Taşdemir, 2018).

| Su geri kazanımının önemi | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Su sınırlı bir kaynak (İnsanların suyu bir kez kullanma lüksü her geçen gün azalmaktadır.) • Suyun döngüsünün farkında olmak ve bunun daha iyi ve fazla şekilde gerçekleştirilmesini sağlamak • Geri kazanımı yapılan suyun içme suyu gerektirmeyen uygulamalarda (sulama ve soğutma vb. gibi) kullanılmaya uygun oluşu ve su kaynaklarını destekleyerek suyun etkin ve verimli kullanılmasını sağlamak | <ul style="list-style-type: none"> • Suyun etkin bir biçimde kullanılmasını sağlayarak su kaynaklarının sürdürülebilir olmasına katkıda bulunmak • Su geri kazanımından elde edilen su ile enerjinin ve kaynakların daha etkin kullanımını sağlamak • Su geri kazanımı sayesinde alıcı ortama deşarj edilen suyun hacmi düşürülerek çevrenin korunmasına katkıda bulunmak |
| Su geri kazanımının olası yararları | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Temiz su kaynaklarının korunumu • Kirlenmeye sebep olabilecek nütrientlerin kontrolünün sağlanması • Deşarj edilen miktarın azaltılması sonucu sulak ortamlardaki hassas canlıların korunması • Ekonomik avantaj sağlanması | <ul style="list-style-type: none"> • Geri kazanımı yapılmış su içerisinde bulunan nütrientler sayesinde gübre kullanımının azalması ve buna bağlı olarak kaynakların korunumu (Geri kazanılmış su içerisinde nütrientler bulunursa ve bu sulama amaçlı kullanılırsa ürün eldesi için daha az gübre kullanımı gerekmektedir.) |
| Su geri kazanımının uygulanmasını arttıracak diğer faktörler | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Erişilebilirlik: Geri kazanılan su, olduğu yerde yeniden kullanılacağı için suyun pahalı olduğu bölgelerde kolay erişilebilir olması • Güvenilirlik: Geri kazanılan suyun miktarının tahmin edilebilir bir su kaynağı olması (Su kıtlığı bile yaşansa kentlerden çıkacak atıksu miktarı muhtemelen aynı kalacaktır ve buna bağlı olarak geri kazanılacak su miktarı da tahmin edilebilir olacaktır.) | <ul style="list-style-type: none"> • Çok yönlülük: Su geri kazanımı ile mevcut su temini kaynaklarına göre alternatif su temininin yapılabilir olması • Güvenlik: Kullanım suyu amaçlı su geri kazanımı sistemlerinin yaklaşık olarak 40 yıldır kullanılması ve sağlık riski oluşturabilecek herhangi bir durumun dünya çapında rapor edilmemiş olması |
| Su geri kazanımının uygulanmasını arttıracak diğer faktörler | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Su kaynaklarına olan rekabet: Artan nüfusla birlikte var olan su kaynakları üzerindeki baskının artması ve alternatif kaynaklara olan ihtiyacın artması | <ul style="list-style-type: none"> • Suyun maliyeti: Suyun maliyetinin daha doğru rakamlara ulaşmasının sağlanması |
| Su geri kazanımının önemi, olası yararları ve kullanımının artmasına destek olabilecek sebepler | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Deşarj standartları: Daha sıkı hale gelen deşarj standartlarına bağlı olarak atıksu arıtma tesislerindeki proseslerin iyileştirilmesi gerekliliğinin maliyeti arttırması ve bu durumda geri kazanım önemi | <ul style="list-style-type: none"> • Gereklilik ve Oportünizm: Su kıtlığı, kuraklık, atıksu deşarj standartlarının artırılması, ekonomik, politik ve teknik sebeplere bağlı olarak su geri kazanımı projelerine olan gereksinimlerin artması |



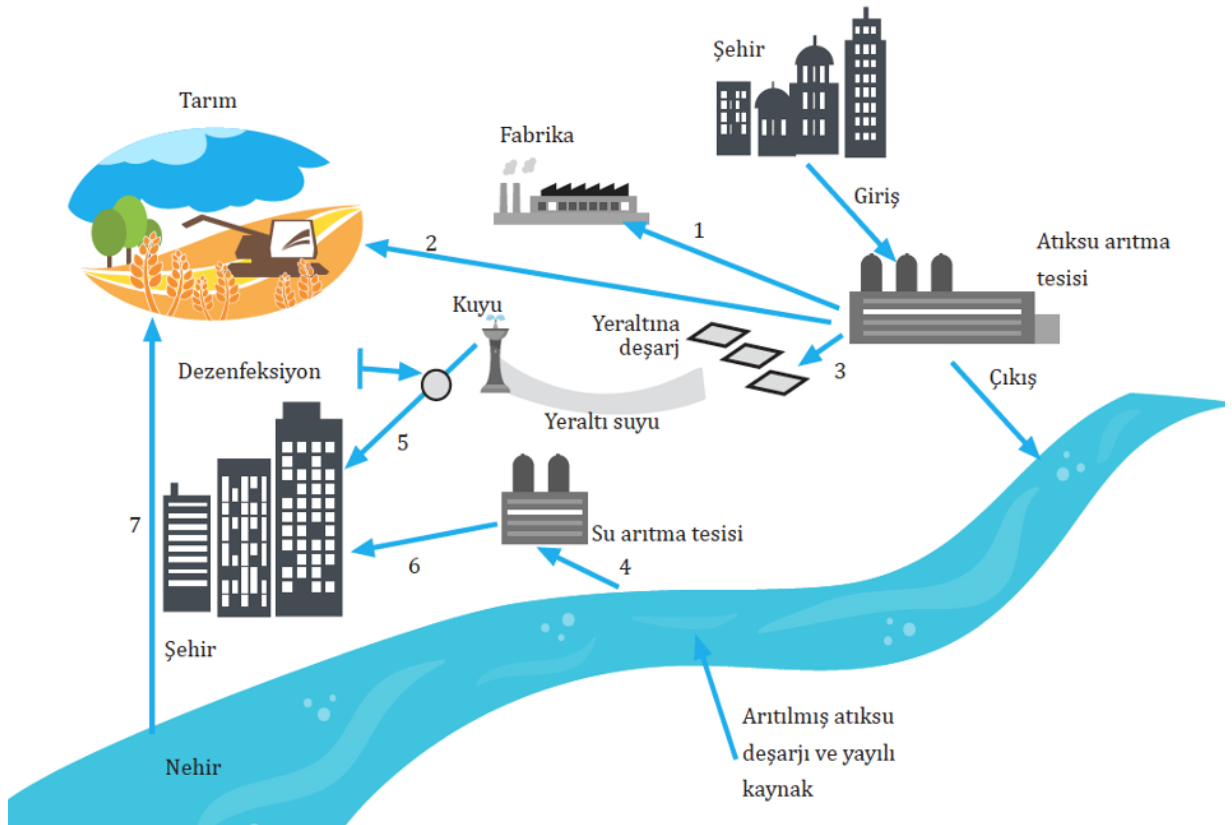
Şekil 4. Çeşitli membran proseslere ait “Web of Science” veri tabanına göre elde edilen yayın sayılarındaki değişim (Web of Science, Ekim 2017).



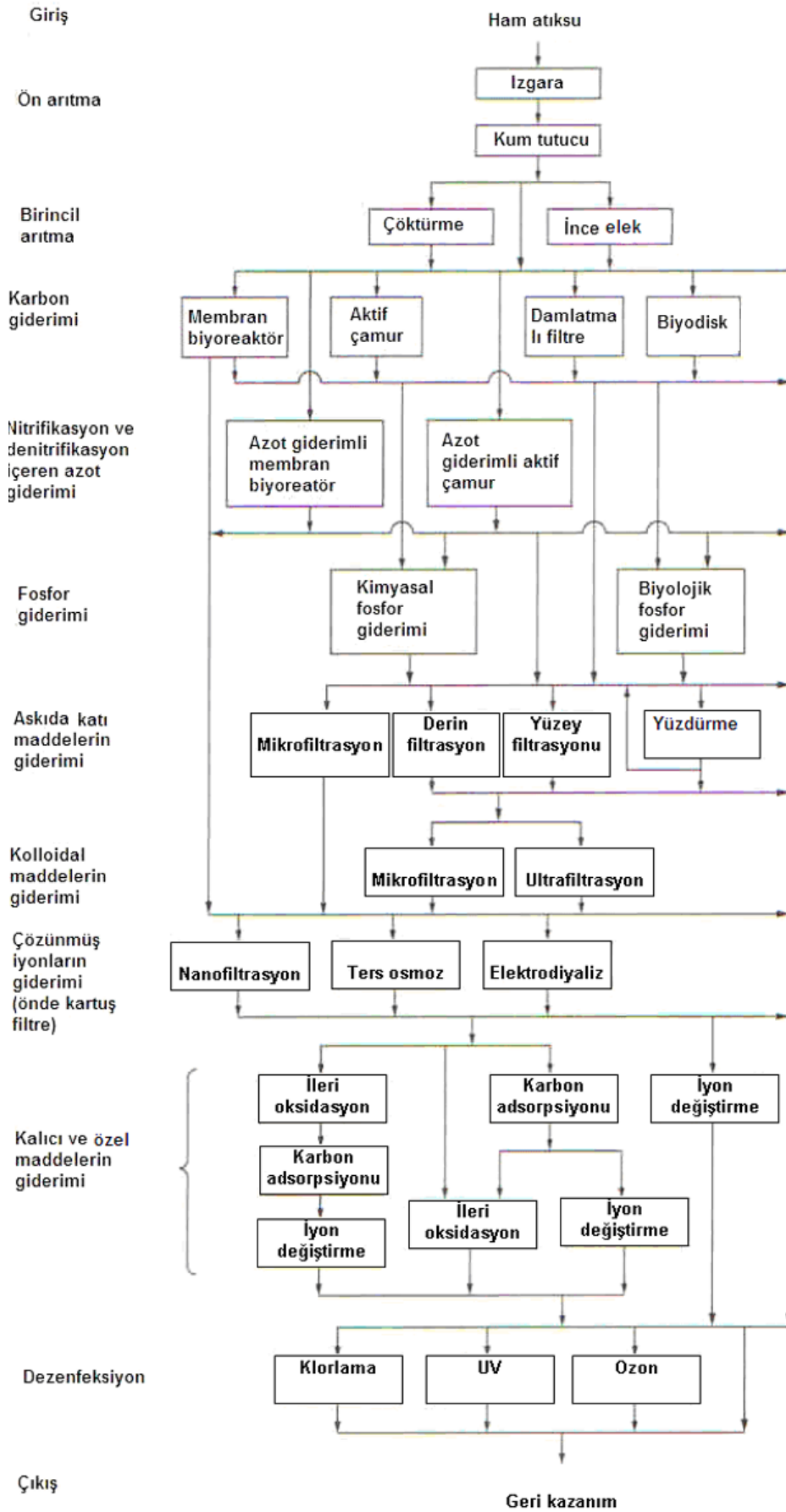
Şekil 5. Membran teknolojiler ile su geri kazanımı ve desalinasyon ile alakalı “Web of Science” veri tabanına göre elde edilen yayın sayılarındaki değişim (Web of Science, Ekim 2017).

Tablo 2. Atıksu geri kazanımı için uygulanan arıtma teknolojileri ve giderdikleri kirleticiler (Metcalf ve Eddy, 2006)

| Arıtma birimleri | Askıda katı madde | Kolloidal maddeler | Partiküler organik | Çözülmüş organik madde | Azot | Fosfor | Eser maddeler | Toplam çözülmüş madde | Bakteri | Protozoa | Virüs |
|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|------------------------|------|--------|---------------|-----------------------|---------|----------|-------|
| İkincil arıtma | X | | | X | | | | | | | |
| Nütrient giderimi | | | | X | X | X | | | | | |
| Filtrasyon | X | | | | | | | | X | X | |
| Yüzey filtrasyonu | X | | X | | | | | | X | X | |
| Mikrofiltrasyon | X | X | X | | | | | | X | X | |
| Ultrafiltrasyon | X | X | X | | | | | | X | X | X |
| Flotasyon | X | X | X | | | | | | | X | X |
| Nanofiltrasyon | | | X | X | | | X | X | X | X | X |
| Ters osmoz | | | | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Elektrodiyaliz | | X | | | | | | X | | | |
| Karb. adsorpsiyonu | | | | X | | | X | | | | |
| İyon değiştirme | | | | | X | | X | X | | | |
| İleri oksidasyon | | | X | X | | | X | | X | X | X |
| Dezenfeksiyon | | | | X | | | | | X | X | X |



Şekil 6. Atıksu geri kazanım uygulamaları (1: Doğrudan endüstriyel geri kullanım, 2: Doğrudan tarımsal geri kullanım, 3: Yeryüzüne deşarj, 4: Nehirden dolayı kullanım, 5: Kuyulardan dolayı kullanım, 6: İçme suyu şebekesine, 7: Dolaylı tarımsal kullanım) (Köseoğlu-İmer vd. 2018)



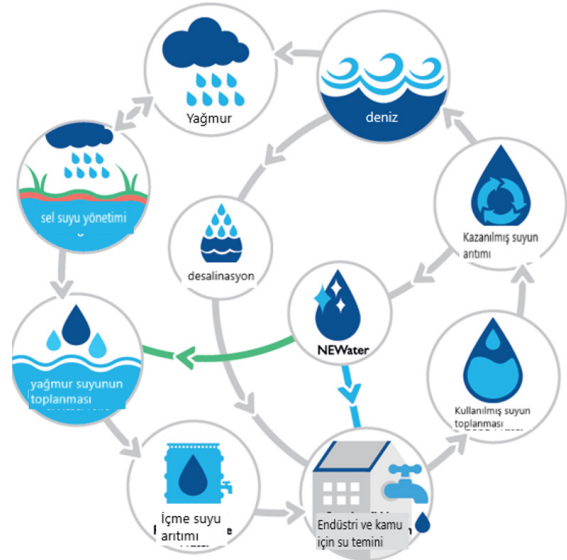
Şekil 7. Atıksu geri kazanımı akım şemaları (Metcalf ve Eddy, 2006)

3.1. Membran teknolojileriyle atıksu geri kazanımında dünyadan örnekler

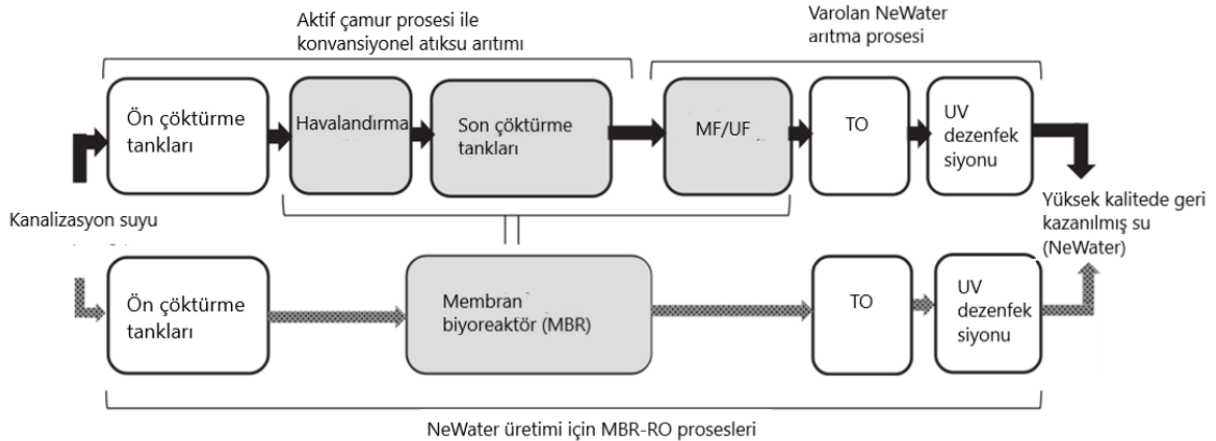
Singapur, Kuveyt, Amerika Birleşik Devletleri, Avustralya, Belçika, Çin, Japonya vb. gibi ülkelerde membran teknolojileri kullanılarak atıksu geri kazanımı uygulamaları bulunmaktadır.

Singapur, 718 km²'lik bir alana kurulmuş ada ülkesidir ve 5.5 milyon insana ev sahipliği yaparak km² başına düşen insan sayısı da oldukça yoğundur. Su kaynaklarının sınırlı olması sebebiyle suyunun bir kısmını Malezya'dan (1,82 milyon m³/gün) ithal etmektedir. Singapur'da su döngüsü Şekil 8'de verilmiştir. Singapur'da suyun yeniden kullanımı iki farklı şekilde gerçekleştirilmektedir. Bunlardan geri kazanılmış atıksuyun endüstriyel proseslerde tekrardan kullanımı ve NeWater prosesinde ileri arıtma yöntemleri kullanılarak içme suyu olarak kullanımıdır. 72.000 m³/gün'lük kapasitesiyle NeWater projesi 2003 yılında devreye alınmış olup, hem indirekt hem de direkt kullanımda kullanılabilir seviyede EPA ve WHO standartlarına uygun çıkış suyu kalitesinde atıksu arıtımı gerçekleştirilebilmektedir. İndirekt kullanımda geri kazanılan su silikon plaka üretiminde, enerji üretiminde, petrokimya sanayinde ve soğutma kulelerinde proses suyu olarak kullanılabilirken, direkt kullanım uygulamalarında arıtılan su rezervuar ve yağmur suyu kanallarına deşarj edilip içme suyu arıtma tesislerine ulaşmaktadır. Proseste kullanılan arıtma sisteminin genel hatları iki ayrı akım olarak Şekil 9'da verilmiştir. İlk akımda 1. Aşamada atıksular konvansiyonel yöntemlerle arıtılmakta olup, askıda katı mad-

deler, koloidal partiküller ve hastalık yapıcı bakterilerin giderilmesi için MF/UF sisteminden geçirilmekte, sonrasında sudaki tüm bakteri-virüs-protozoalar, ağır metaller, nitrat, sülfat, organik bileşikler uzaklaştırılması için TO membranları kullanılmaktadır ve TO çıkış suyunun tekrardan içme suyu olarak kullanılabilmesi için UV dezenfeksiyonu yapılmaktadır. İkinci akımda ise konvansiyonel arıtma ve MF/UF filtrasyonu aşaması yerine aynı görevi yerine getiren MBR teknolojisi kullanılmıştır ve arıtılan su ilk akımdaki gibi TO ve UV dezenfeksiyona iletilmiştir. 2016 yılı itibariyle, NeWater ülkenin su ihtiyacının %40'ını karşılamaktadır. 2030 yılına geldiğinde bu kapasitenin %50'ye ulaşması beklenmektedir (PUB, 2017; İmer vd., 2018).



Şekil 8. Singapur su çevrimi (PUB 2, 2017).

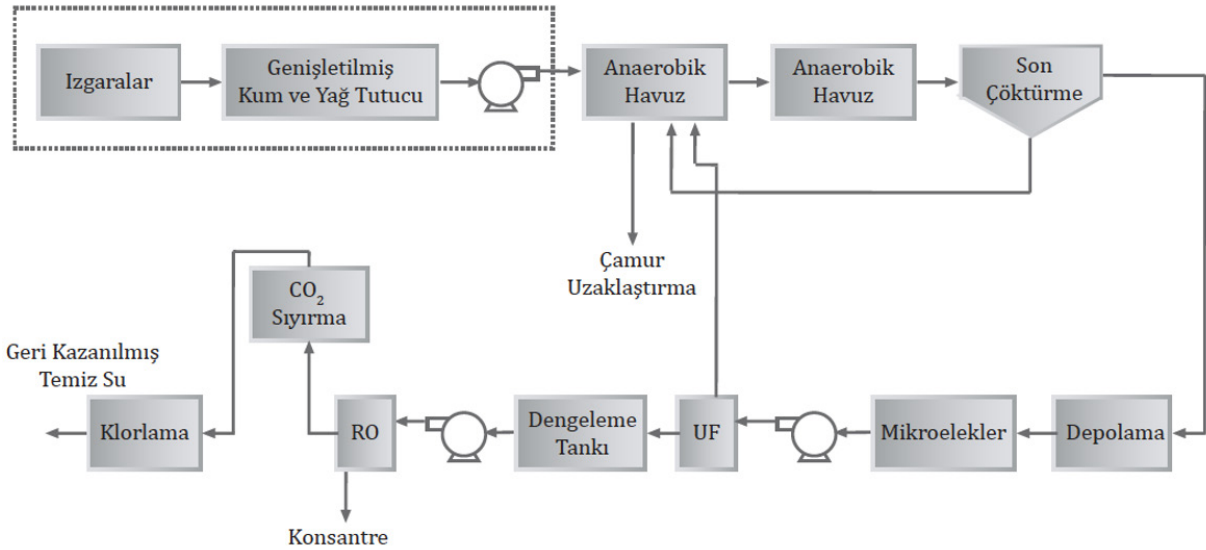


Şekil 9. NeWater treatment technologies (Lee and Tan, 2016).

Sulaibiya, Kuveyt örneği

Sulaibiya dünyanın en büyük membran teknolojileri kullanılarak atıksu geri kazanımı tesisi ve kapasitesi 375.000 m³/gün'dür. Sulaibiya'dan deşarj edilen su, acı su ile karıştırılıp varolan acı su dağıtım tesislerini iyileştirmede kullanılmaktadır. Tesise ait akım şeması Şekil 10'da verilmiştir. Tesiste konvansiyonel biyolojik atıksu arıtma tesisinin ardından, atıksu ikincil derecede arıtılmakta ve çıkış suyu, UF ve TO proseslerini içeren geri kazanım tesisinde işlenmektedir. UF'nin TO öncesi kullanılması sayesinde TO membranlarının ömrü artmakta, işletme basınçları düşmekte ve kimyasal yıkama döngüsü süresi artmaktadır. UF ve TO'nun be-

haber uygulanması içme ve kullanma suyu seviyesinde kaliteli bir su temini ile birlikte, suyun tarım ve yeraltı suyu deşarjında kullanım imkanı da ortaya çıkarmaktadır. TO süzütüsü karbondioksit sıyrıcıdan geçirilerek pH'ı yükseltilmekte ve kostik kullanımı minimumda tutulmaktadır. Tesis çıkışında su klorlanmaktadır. TO konsantrasyonu de Basra körfezine deşarj edilmektedir. Tesisinden elde edilen çıkış suyu kalitesi WHO'nun belirlediği içme suyu standartlarına göre daha iyidir ve alternatif bir kaynak olarak tarımsal sulamada da kullanılmaktadır (Suez, 2017).



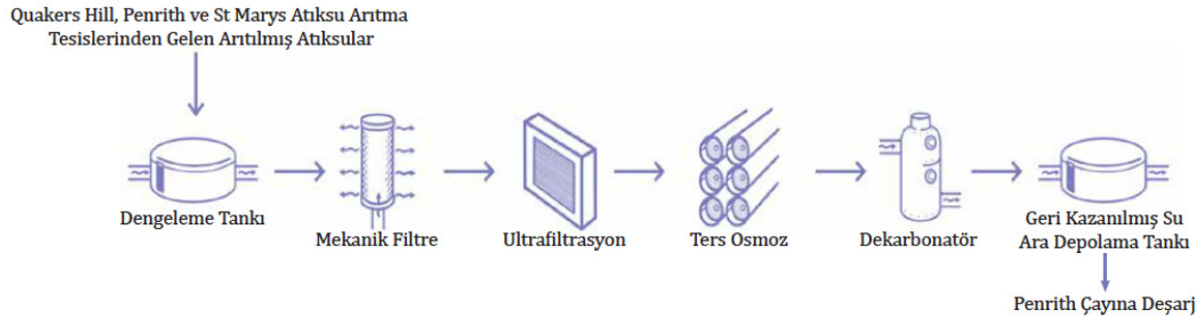
Şekil 10. Sulaibiya atıksu geri kazanım tesisi akım şeması (SUEZ, 2017; Köseoğlu-İmer vd., 2018)

Kaliforniya, ABD atıksu geri kazanım örneği

Kaliforniya su zengini olan bir bölge olmadığı için çok uzun zamandır atıksu geri kazanımı uygulamaları revaçtadır. Orange County için ise Kuzey Kaliforniya'dan su temininin maliyetli olması sebebiyle bu bölgeye atıksu geri kazanım tesisi kurulmuştur. Kurulu olan geri kazanım tesisi MF, TO ve ileri oksidasyon olarak hidrojen peroksit ve UV arıtma basamaklarını içermektedir. Tesis kapasitesi 270.000 m³/gün'dür ve kullanılan membran prosesleri sayesinde farmasötikler, pestisitler ve diğer zararlı maddeler alıcı ortama verilmeden giderilmektedir (EPA, 2012).

Avustralya su geri kazanım örneği

Yıllık 18 milyon m³ atıksu geri kazanma kapasitesi olan tesiste, üç farklı atıksu arıtma tesisinden gelen üçüncül derecede arıtılmış atıksular işlenerek geri kazanılmaktadır. Tesise ait akım şeması Şekil 11'de verilmiştir. Buna göre gelen arıtılmış atıksular önce bir dengeleme tankına gelip, mekanik filtreden geçmektedir. Ardından UF membrandan geçirilip askıda katı maddeler, bakteriler, virüsler ve organik maddelerin bir kısmı giderilmektedir. Sonraki aşamada TO membranlar kullanılıp ileri seviyede ayırım gerçekleştirilmektedir ve arıtılan su dekarbonatörden geçip ardından pH ayarı yapılarak Penrith çayına verilmektedir (EPA, 2012).



Şekil 11. Avustralya St. Mary's su geri kazanım tesisi akım şeması (Thesportsdb, 2017)

3.1.1. Membran teknolojileriyle atıksu geri kazanımında ülkemizdeki uygulamalar

Ülkemizde de atıksuların geri kazanımı ve yeniden kullanılması üzerine yapılan çalışmalar gün geçtikçe artış göstermektedir ve bu uygulamalarda membranların kullanılması da artmaktadır. İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi (İSKİ) atıksuyun geri kazanılıp yeniden kullanılması üzerine birden çok çalışma gerçekleştirmiştir. Mevcut uygulamalar içerisinde dezenfeksiyon

ve filtrasyon kullanılarak yapılan uygulama çalışmaları bulunmaktadır. Ambarlı AAT'de tesis çıkış suyuna kapasitesi 5000 m³/gün olan UF uygulaması yapılmıştır. İSKİ Ambarlı AAT'de çalıştırılan geri kazanım pilot tesise ait su kalitesi Tablo 3'de verilmiştir. Ataköy AAT'de yine tesis çıkış suyuna kapasitesi 5000 m³/gün olan kum filtrasyonu ve UF uygulaması yapılmıştır. Ağva AAT tesisi ise revize edilerek 4000 m³/gün kapasitede MBR tesisi kurulmuştur. İSKİ'ye

Tablo 3. İSKİ Ambarlı AAT atıksu geri kazanım pilot sistemi su kalitesi (Köseoğlu-İmer vd., 2018)

| Parametre | Ham Su | UF Çıkış | TO Çıkış |
|------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| KOI (mg/lt) | 34 ± 12 | 17 ± 6 | 5 ± 3 |
| AKM (mg/lt) | 26 ± 12 | 2 ± 1.3 | 0 ± 0 |
| TOK (mg/lt) | 28 ± 19 | 25 ± 13 | 0.4 ± 0.3 |
| Florür (ppm) | 0.3 ± 0.1 | 0.28 ± 0.04 | 0.07 ± 0.06 |
| Klorür (ppm) | 329 ± 103 | 277 ± 68 | 37 ± 48 |
| Nitrit (ppm) | 0.3 ± 0.2 | 0.3 ± 0.1 | 0.2 ± 0.2 |
| Nitrat (ppm) | 16 ± 8 | 11 ± 4 | 4.8 ± 4 |
| Sülfat (ppm) | 156 ± 44 | 130 ± 26 | 1.4 ± 1.6 |
| Fosfat (ppm) | 6.48 ± 2 | 5.8 ± 1 | 1.6 ± 1.8 |
| Bromür (ppm) | 1.9 ± 0.6 | 2 ± 0.04 | 0.6 ± 0.8 |
| Sodyum (ppm) | 268 ± 84 | 224 ± 56 | 25 ± 33 |
| Amonyum (ppm) | 3.85 ± 2 | 3.52 ± 3 | 0.96 ± 1 |
| Magnezyum (ppm) | 14 ± 3 | 13 ± 4 | 0.45 ± 0.2 |
| Kalsiyum (ppm) | 93 ± 25 | 76 ± 15 | 2.4 ± 2 |
| Potasyum (ppm) | 26 ± 6 | 22 ± 5 | 3 ± 3 |
| Nikel (ppm) | 0.1 ± 0.05 | 0.11 ± 0.05 | 0.04 ± 0.02 |
| Bakır (ppm) | 0.06 ± 0.02 | 0.04 ± 0.01 | 0.04 ± 0.01 |
| Alüminyum (ppm) | 0.2 ± 0.07 | 0.16 ± 0.06 | 0.16 ± 0.2 |
| Bor (ppm) | 0.26 ± 0.02 | 0.28 ± 0.02 | 0.22 ± 0.03 |
| Si (ppm) | 6.95 ± 0.25 | 7.15 ± 0.84 | 0.26 ± 0.5 |
| Kurşun (ppm) | 0.01 ± 0.01 | 0.03 ± 0.01 | 0.03 ± 0.01 |
| Demir (ppm) | 0.07 ± 0.02 | 0.09 ± 0.04 | 0.01 ± 0.01 |
| Mangan (ppm) | 0.12 ± 0.08 | 0.02 ± 0.01 | 0.02 ± 0.01 |
| Fekal Koliform (kob/100 ml) | >241960 | 11 | 0 |
| Toplam Koliform (kob/100 ml) | >241960 | 13 | 0 |

ait AAT'lerde yeniden kullanım suyu amaçlı üretilen su miktarları (dezenfeksiyon ile yapılanlar dahil) Tablo 4'de verilmiştir. İSKİ geri kazanılmış suyun kullanımını teşvik amaçlı fiyatta indirim yapmıştır ve 2015 yılında 91 kuruştan fiyatlandırılan geri dönüşüm suyunu şu anda 34 kuruştan fiyatlandırmaktadır. Atıksu arıtma tesislerinden elde edilen geri dönüşüm suları; Avrupa ve Anadolu Yakası'nda yer alan belediyeler, temizlik araçları, sanayi siteleri, yeşil alanlar, park ve bahçeler ile tesis ve havalimanlarında kullanılabilir. Geri dönüşüm sularının tekrar kullanılması sayesinde, baraj rezervlerinin yükü kısmen de olsa azalmakta, böylelikle İstanbul'un su rezervlerinin içme ve kullanma suyu amacıyla daha verimli kullanılabilmesi sağlanmaktadır. İstanbul'da İSKİ tarafından geri

kazanım sularının kullanıldığı yerleri gösteren harita Şekil 12'de verilmiştir.

İSKİ dışında Kocaeli Su ve Kanalizasyon Dairesi de (İSU) atıksuyun geri kazanılması üzerine ilk çalışmasını 2011 yılında Gebze AAT'de gerçekleştirmiştir ve elde edilen su TSE Gebze kampüsünde park ve bahçe sulama suyu olarak kullanılmıştır. 2013 yılında ise İSU Kandıra AAT'lerinde endüstride proses suyu olarak kullanmak üzere atıksuyun geri kazanılmasına yönelik çalışmalar gerçekleştirmiştir. Körfez AAT'de ise geri kazanılmış su temin eden TÜPRAŞ kendi tesislerinde TO membran sistemi kurarak aldıkları suyu TO prosesinden geçirip proses suyu olarak kullanmaktadır (İSTKA raporu, 2018; İmer vd, 2018).

Tablo 4: İSKİ'ye ait Geri Kazanım Tesislerinde Üretilen Arıtılmış Su Miktarları (İSTKA raporu, 2018).

| | | Geri Kazanım Tesislerinde Üretilen Arıtılmış Su Miktarı (m ³ /YIL) | | | | |
|---|-------|---|---------|---------|---------------------|---------------------|
| Atıksu Arıtma Tesisi Arıtılmış Atıksu Geri Kazanım Tesisi Mevcut Kapasitesi (m ³ /gün) | | 2014 | 2015 | 2016 | 2017- 6 AYLIK DÖNEM | 2018- 9 AYLIK DÖNEM |
| Ataköy İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi | 5.000 | 963.235 | 473.880 | 308.541 | 169.520 | 276.748 |
| Ambarlı İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi | 5.000 | 3.327.236 | 690.549 | 686.945 | 347.296 | 524.133 |



Şekil 12. İSKİ'ye ait AAT'lerde kazanılmış atıksuyun yeniden kullanıldığı yerler

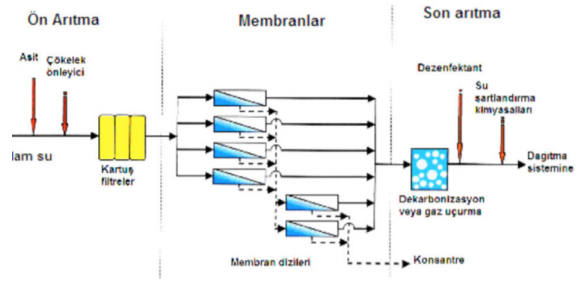
3.2. Desalinasyon

Mevcut su kaynaklarındaki azalma sonucu deniz suyunun arıtılarak içme suyu eldesi desalinasyon konusunun önemini arttırmıştır. Deniz suyu arıtımı için termal ve membran prosesler kullanılmaktadır. Termal proseslerde suyun temiz suyu buharlaştırılarak tekrar kondense edilmesini içermektedir. Öte yandan membran proseslerde basınç sürücü TO ve elektrik potansiyel farkı sürücülü ED membranları kullanılmaktadır. 2005 yılında varolan dünyadaki desalinasyon tesislerinin neredeyse % 60'ı termal prosesleri içermektedirken, günümüzde bu rakam tam tersine dönmüştür ve varolan tesislerin %63'ünde ters osmoz. %3'ünde de ED membranları kullanılmaktadır (Gude, 2016). Ters osmoz ile desalinasyon üç aşamadan oluşmakta olup bunlar; ön arıtma, membran sistemi ve son arıtmadır. Ön arıtım aşaması ters osmoz membranlarının yüksek basınçta işletilmeleri ve maliyetlerinin yüksek oluşları sebebiyle TO membranlarının ömürlerinin uzatılması ve yaşanabilecek işletme problemlerinin önüne geçmek amacıyla kullanılmaktadır. Şekil 13'de tipik bir desalinasyon tesisine ait şematik verilmiştir. Ön arıtmada ham suyun beslenmesi kararlı debide ve biyolojik büyümeyi önleyici özellikte olmalıdır. Ön arıtmada koloidal ve partiküler kirleticiler çökelek oluşturucu inorganik ve organik kirleticiler ve mikroorganizmalar uzaklaştırılmaktadır. Bu sebeple ön arıtmada kimyasal ilavesi yapılabilen, granüler ya da membran filtrasyonu uygulanabilmektedir. TO membranları poliamid veya türevleri, selüloz asetat, selüloz triasetat veya diğer organik polimerlerde yapılabilir. TO membranları sonrası elde edilen süzüntü ve konsantr akımları son arıtma basamağında ilave arıtmadan geçer. Son arıtmada gaz uçurucular, kimyasal madde ilavesi ve stabilizasyon üniteleri bulunmaktadır. Arıtılan su hiç iyon içermediği için korozif etki gösterebilir. Bu sebeple pH ayarının yapılması gerekmektedir. Bunun dışında desalinasyon için maliyet de önemlidir ve maliyetin çok büyük bir kısmını enerji gereksinimleri (yaklaşık %65) oluşturmaktadır (Gude, 2016; Akgül, 2016; MEMTEK bülteni, 2017).

3.2.1. Desalinasyon tesislerinin dünyadaki durumu

Dünyada yaklaşık olarak 20.000'den faz-

la desalinasyon tesisi bulunmaktadır ve tesisler en yoğun olarak Orta Doğu ve Amerika Birleşik Devletlerin de kurulmuştur. 1945'ler de desalinasyon kapasitesi 326 m³/gün iken bu rakam Haziran 2015 tarihi itibarıyla günlük 86,8 milyon m³/gün olmuştur. 2030 yılına gelindiğinde tesis kapasitelerinin 110 milyon m³/güne ulaşacağı düşünülmektedir. TO membranları kullanılarak kurulan desalinasyon tesisleri son 30 yılda artış göstermiştir ve dünya çapında membran prosesler kullanılan desalinasyon tesisi kapasitesi 13 milyon m³/gün'dür (MEMTEK bülteni, 2017). Dünyadaki en büyük membran teknolojileri kullanılan desalinasyon tesisleri Tablo 5'de verilmiştir.



Şekil 14. Ters osmoz sistemine ait akım şeması AWWA, 2007; MEMTEK bülteni, 2017)

Tablo 5. Dünyadaki en büyük membran teknolojisinin kullanıldığı desalinasyon tesislerinden örnekler (MEMTEK bülteni 2017)

| Tesis | Kapasite (m ³ /gün) | Yeri | Teknoloji | Devreye alınma tarihi |
|--------------------|--------------------------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Ras al-Khair | 1.036.000 | Suudi Arabistan | Ters Osmoz + Distilasyon | 2015 |
| Jebel Ali | 637.000 | Birleşik Arap Emirlikleri | Ters Osmoz | 2018 (beklenen) |
| Sorek | 624.000 | İsrail | Ters Osmoz | 2013 |
| Fujairah 2 | 591.000 | BAE | Ters Osmoz + Distilasyon | 2010 |
| Hadera | 525.000 | İsrail | Ters Osmoz | 2009 |
| Victoria | 450.000 | Avustralya | Ters Osmoz | 2012 |
| Desalination | | | | |
| Ashkelon | 396.000 | İsrail | Ters Osmoz | 2005 |
| TuaSpring | 318.500 | Singapur | Ters Osmoz | 2013 |
| Adelaide | 300.000 | Avustralya | Ters Osmoz | 2012 |
| Torre Vieja | 240.000 | İspanya | Ters Osmoz | 2011 |
| Claude "Bud" Lewis | 190.000 | ABD | Ters Osmoz | 2015 |
| Ras Abu Fontas | 164.000 | Katar | Ters Osmoz | 2018 (beklenen) |
| Beckton | 150.000 | İngiltere | Ters Osmoz | 2010 |
| Az Zour | 136.000 | Kuveyt | Ters Osmoz | 2014 |
| Tampa Bay | 114.000 | ABD | Ters Osmoz | 2008 |
| Point Lisas | 110.000 | Trinidad | Ters Osmoz | 2013 |

3.2.2. Desalinasyon tesislerinin ülkemizdeki durumu

Türkiye’de desalinasyon uygulamaları sınırlı sayıdadır. Bunlardan Ayşa Adasında ve Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti’nde Mağusa şehrinde 4000 m³/gün’lük iki adet desalinasyon tesisi denizden içme suyu arıtımı amaçlı kurulmuştur. Ülkemizdeki diğer desalinasyon uygulamaları genellikle endüstridedir. Zonguldak’da Eren Enerji termik santralinde 37.920 m³/gün’lük, İzmir ENKA Aliağa doğalgaz enerji çevrim santralinde 1.800 m³/gün’lük, Bandırma EnerjiSA Enerji santralinde ise 1.440 m³/gün’lük, TÜPRAŞ İzmit rafinerisinde 3.600 m³/gün’lük, İÇDAŞ Demir çelik tesisinde 12.000 m³/gün’lük, Gebze’de Diler Demir çelik tesisinde 3.600 m³/gün’lük ve Gebze Çolakoğlu Metalurjide 1440 m³/gün’lük kapasiteye sahip desalinasyon tesis-

leri bulunmaktadır. Diğer uygulamalar turistik bölgelerde oteller tarafından tercih edilen küçük çaplı desalinasyon sistemleridir (MEMTEK bülteni, 2017).

4. Genel Değerlendirme

İçilebilir su kaynaklarının gün geçtikçe azaldığı dünyamızda varolan su kaynaklarının korunması, yeni alternatif su kaynaklarının oluşturulabilmesi için membran teknolojilerin önemi gün geçtikçe artmaktadır. Bu derlemede de alternatif su temini için atıksu geri kazanımı ve desalinasyon amacıyla kullanılan membran teknolojiler açıklanmıştır. Membran teknolojiler kullanılarak gerçekleştirilen atıksu geri kazanım uygulamalarının ve desalinasyon tesislerinin dünyadaki ve ülkemizdeki güncel durumu ir- delenmiştir.

Kaynaklar

- Akgül D., (2006). Türkiye’de Ters Osmoz ve Nanofiltrasyon Sistemleri ile İçme ve Kullanma Suyu Üretiminin Maliyet Analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Asano T., Burton FL., Leverenz HL., Tsuchihashi R, Tchobanoglous G., (2007). Water Reuse: Issues Technologies and Applications, *McGraw-Hill Education*, 1st Edition.
- AWWA Manuel (2007). Reverse Osmosis and Nanofiltration, *AWWA*.
- EPA, (2012). Guidelines for Water Reuse, *EPA/600/R-12/618*.
- Gude VG., (2016). Desalination and Sustainability – An Appraisal and Current Perspective, *Water Research*, 89, 87-106.
- İSTKA Raporu, (2018). Artırılmış Evsel Atıksuların Tarımsal ve İnsani Kullanım Amaçlı Geri Kazanımının Pilot Ölçekli Olarak Araştırılması, *İSTKA/2016/YYN-224*, proje sonuç raporu.
- Koyuncu İ., Öztürk İ., (2008). Artırılmış Kentsel Atıksuların Sulama ve Kullanım Suyu Olarak Geri Kazanımı, *Kent Yönetimi, İnsan ve Çevre Sorunları’08 Sempozyumu*, 02-06 Kasım, İstanbul.
- Koyuncu İ., (2016). Su ve Güç: Türkiye’nin Su Potansiyeli, *Sultangazi Belediyesi*.
- Koyuncu İ., Şengür-Taşdemir R., (2018). Bölüm 1. Giriş. Su Atıksu Arıtılması ve Geri Kazanımında Membran Teknolojileri ve Uygulamaları, *Çevre ve Şehircilik Bakanlığı*, Cilt 1.
- Köseoğlu-İmer D., Güçlü S., Koyuncu İ., (2018). Bölüm 14. Evsel Atıksuların Membran Teknolojileri ile Geri Kazanımı. Su Atıksu Arıtılması ve Geri Kazanımında Membran Teknolojileri ve Uygulamaları, *Çevre ve Şehircilik Bakanlığı*, Cilt 2.
- Lee H., Tan. TP., (2016). Singapore’s experience with reclaimed water: NEWater, *International Journal of Water Resources Development*, 32 (4), 611-621, DOI: 10.1080/07900627.2015.1120188.
- MEMTEK Bülteni, (2017). Desalinasyon, 2 (3), ISSN: 2564-6176.
- Metcalf & Eddy, (2006). Water Reuse: Issues, Technologies and Applications, *McGraw Hill*, New York.
- Muluk ÇB., Kurt B., Turak A., Türker A., Çalışkan MA., Balkız Ö., Gümürtükcü S., Sarıgül G., Zeydanlı U., (2013). Türkiye’de Suyun Durumu ve Su Yönetiminde Yeni Yaklaşımlar: Çevresel Perspektif, *İş Dünyası ve Sürdürülebilir Kalkınma Derneği - Doğa Koruma Merkezi*.
- OECD report, (2009). http://www.keepeek.com/Digital-Asset-Management/oecd/environment/oecd-environmental-outlook-to-2050_978926412246-en#page231, (Erişim tarihi: 11.10.2017).
- OECD statistics, (2017). http://www.oecd-ilibrary.org/environment/oecd-environmental-outlook-to-2050_978926412246-en, (Erişim tarihi: 11.10.2018).
- PUB (2017). <https://www.pub.gov.sg/watersupply/singaporewaterstory>, (Erişim tarihi: 3.4.2019).
- PUB 2 (2017). https://www.pub.gov.sg/PublishingImages/PUB_Waterloop.png, (Erişim tarihi: 3.4.2019).
- Suez, (2017). Water tech and solutions technical paper Sulaibiya – world’s largest membrane water reuse project, https://www.gewater.com/kpcguest/documents/Technical%20Papers_Cust/ Americas/English/TP1030EN.pdf, (Erişim tarihi: 3.4.2019).
- TheSportsdb, (2017). <http://www.thesportsdb.com/team/134920>, (Erişim tarihi: Ekim 2018).