



Review Paper / Derleme Makalesi

SEAWATER DESALINATION TECHNOLOGIES

Fulya AYDIN*, Yüksel ARDALI

Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, SAMSUN

Received/Geliş: 24.03.2011 Accepted/Kabul: 21.11.2011

ABSTRACT

A rapidly increasing population, the depletion of high quality water sources by water population and desertification, are the main causes of the increased demand. There are many solutions to the water problem, including control of water consumption, conservation, improved distribution and storage, reclamation, purification and reuse, crops that use less water, tapping of new sources. Desalination is seriously considered only when all the other possibilities have been ruled out. With this purpose, for our country, it is aimed to determine economical and applicable desalination methods and to bring up the optimal solution examining studies which was published in this topic. In this paper, it was investigated the desalination technologies which is used to obtain fresh water from seawater.

Keywords: Seawater, treatment, desalination.

DENİZ SUYU ARITIM TEKNOLOJİLERİ

ÖZET

Hızla artan nüfus, su kirliliği ve çölleşme tarafından yüksek kaliteli su kaynaklarının tüketimi artan ihtiyacı başlıca nedenleri olmaktadır. Su tüketim kontrolü, korunması, dağıtımı ve depolanmasının iyileştirilmesi, arazi iyileştirme, arıtma ve yeniden kullanma, daha az su kullanan ürün vermek, yeni kaynakları kullanmaya başlamak gibi konuları kapsayan su probleminin pek çok çözümü vardır. Bu koşullarda deniz suyunun kullanımı iyi bir alternatif yaklaşım olmaktadır. Bu amaçla ülkemiz için ekonomik ve uygulanabilir tuzsuzlaştırma yöntemlerini belirlemek ve bu konuda yapılan çalışmaları araştırarak optimum çözümleri ortaya koymak hedeflenmiştir. Bu çalışmada deniz suyundan tatlı su elde etmek için kullanılan tuzsuzlaştırma teknolojileri incelenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Deniz suyu, arıtım, tuzsuzlaştırma.

1. GİRİŞ

Su dünyada yaşamın esas maddesidir ve ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Tarım, ticari ve evsel kullanımlar için suyun eksikliğinin ciddi problemler oluşturmasının yanında iyi kaliteli içme ve kullanma suyu ihtiyacı dünya çapında hızla artmaktadır [1-2]. Dünyanın her tarafındaki yönetimler görünen krizin farkına varmaya başlamakta, gelecek barışı ve refahının, tatlı suyu temizlemenin yapılabilirliği ile yakından ilgili olduğu konusunda bir kabul ve su üzerine gelecek savaşların olabileceği konusundaki büyüyen bir fikir birliği içerisinde bulunmaktadır. Tasarruf

* Corresponding Author/Sorumlu Yazar: e-mail/e-ileti: fulyaa@omu.edu.tr, tel: (362) 312 19 19 / 1536

önlemlerine ek olarak deniz suyu artırımında yeni ve düşük maliyetli yöntemlerin araştırılması ayrıca deşarj edilen kararsız suyun alıcı ortamdaki davranışlarıyla ilgili konularda değerlendirmelerin yapılmasına gerek duyulmaktadır [3].

2. SU

Su evsel, tarımsal, endüstriyel ve içme suyu olmak üzere dört temel amaç için kullanılmaktadır. Dünya üzerindeki kullanılabilir suyun çoğu deniz suyudur. Çizelge 2.1’de dünya çapında su dağılımı verilmektedir [4].

Çizelge 2.1. Dünya Çapında Su Dağılımı [4]

Su Kaynakları	Su Dağılımı
Okyanuslar	97.23 %
Buz dağları ve buzullar	2.14 %
Yer altı suyu	0.61 %
Tatlı su gölleri	0.01 %
Diğerleri	0.01 %

Dünyanın tatlı su kaynaklarının yenilenebilir kısmı genellikle yüzey suyu şeklinde bulunmaktadır ve bu kaynaklar düzensizce dağılmış durumdadır. 1 milyon üzerinde insan temiz içme suyundan yoksun ve yaklaşık 2.3 milyon insan su kıtlığı olan bölgelerde yaşamaktadır [34]. Yapılan incelemeler Orta Doğu ve Kuzey Afrika’nın en fazla su kıtlığının yaşandığı bölgeler olduğunu ortaya çıkarmıştır. Bu alanlar dünya nüfusunun yaklaşık %6.3’ünü kendi sahası içerisine almakta, fakat dünyanın yenilenebilir tatlı suyunun sadece %1.4’ünü karşılamaktadır. Orta Doğu’nun aksine Amerika yenilenebilir tatlı su bakımından oldukça zengindir. Çizelge 2.1’den de görüldüğü gibi dünyanın büyük bir kısmı okyanuslarla çevrelenmiş olup yağışlardan sağlayabileceğimiz içme suyu kaynaklarını sadece yüzeysel ve yer altı sularına karışan yağış miktarı ile orantılı olarak elde edebiliriz ki burada yüzeyden buharlaşma yoluyla atmosfere taşınımın olması da kayıpların oluşmasına neden olmaktadır. Bu duruma ek olarak, yükselen yaşam standartları, hızlı nüfus artışı ve kentsel büyüme, tarımda ilerleme, doğal su rezervlerinin kirlenmesi, endüstrileşme ve kültürel gelişmeler su problemini meydana getiren başlıca konulardır [3].

Su eksikliğinin mevcudiyeti, ekonomik gelişime engel olmak, insan sağlığını harap etmek, çevresel bozunmaya yol açmak ve politik düzensizliği körüklemek gibi etkilere sahiptir. Su problemini ele almak için bir grup araştırma gündemi oluşturulmuştur [3]. Washington’daki çevre araştırma örgütü Worldwatch Enstitüsü’ne göre dünya nüfusunun üçde ikisinden fazlasının 2025’e kadar su kıtlığı yaşayabilecektir, bu nedenle, onlar ihtiyacı yada ek su kaynakları gelişimini azaltmadıkça dünyada her ülke pratik olarak bu durumu etkileyebilir [72]. Yavaşlayan nüfus büyümesi ve deniz suyu, bulanık su, atmosferik su buharı ve fosil enerji ya da diğer geri kazanım işlemleri ile tatlı suyun alternatif kaynaklarını ön plana çıkartmak, su kıtlığının etkilerini sınırlandırmak için bir grup paralel yaklaşım su kullanım verimliliğini arttırmayı kapsayan, gerçekleştirilmiş teknolojiler, su korunumunu ve tekrar kullanımını cesaretlendiren politikalar ortaya sürmüştür [3].

Su eksikliği problemi sadece dünya yüzeyinin %60’ından daha fazlasını kapsayan kurak alanları değil, aynı zamanda suyun bol bulunduğu ülkelerin çoğunda miktar ve kalite problemleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle, birçok ülkede su politikası ekonomik politikanın önemli bir bileşeni haline gelmiştir ve su probleminin çözümü için deniz suyunun kullanılabilirliğinin artırılması büyüyen bir fikir birliğiyle ön plana çıkmıştır [4, 46, 72, 73].

Türkiye için bu durumu değerlendirdiğimizde, Türkiye'nin kullanılabilir su potansiyeli 205.10^9 m³ ve bu suyun 110.10^9 m³'lük kısmından ekonomik olarak yararlanılabilmektedir. Mevcut durumda 65 milyon nüfusu olan Türkiye'de yılda kişi başına 3150 m³ su bulunduğu anlamına gelmektedir. Potansiyel suyun ekonomik olarak kullanılabilir bölümü düşünüldüğünde bu miktar yılda kişi başı 1735 m³ olmaktadır. Su kaynakları açısından zengin olan bir bölge yılda kişi başına 10000 m³'lük bir su potansiyeline sahip olmak zorunda olduğu varsayılmaktadır. Yılda kişi başı 1000-2000 m³'lük su potansiyeline sahip bölgeler su sıkıntısını ele almaktadırlar ve yılda kişi başı 1000 m³'ün altında su potansiyeline sahip olanlar su kıtlığı durumunu değerlendirmektedirler. Bu sınıflandırmaya göre yılda kişi başına düşen 1735 m³'lük su potansiyeli ile Türkiye su sıkıntısında olan bir bölge olarak düşünülebilir. Ayrıca, 2025 yılı için yapılan nüfus planlamasına göre nüfusun 79 milyon olması beklenmektedir. Türkiye'nin gelecek nüfusu düşünüldüğü gibi olduğunda yararlanılabilir su potansiyeli yılda kişi başı 1300 m³'ün altına düşecektir. Bu nedenle, bu durumda olan bölgeler için su temininde alternatif çözümler bulunmalıdır [79].

Sonuçta, su problemlerinin ortadan kaldırılması için tasarruf ve su tüketiminin kontrolü, korunması, dağıtımı ve depolanmasının iyileştirilmesi gibi verimlilik kriterlerinin herhangi birinin gerçekleştirilmesi gerekecektir. Küresel bakış açısından tuzsuzlaştırma temiz su sağlama üzerinde sadece küçük bir etkiye sahip olurken, bunun yanı sıra yerel kaynaklar üzerinde deniz suyu arıtımı çok önemli bir rol oynayacaktır.

2.1. Deniz Suyu

Deniz suyunun fiziksel özellikleri sıcaklık, tuzluluk ve basınç olmak üzere üç bağımsız değişkenin etkisi altındadır. Bunlardan basınç, özellikle su yüzeyi altında kalan derinliğe bağlı olup sıcaklık ısının bir ölçüsüdür [5].

Tuzluluk ise, su içerisinde çözülmüş katı maddelerin konsantrasyonunun bir değeri olarak genellikle deniz suyunun 1000 gramındaki çözülmüş tuzların gram cinsinden değerleri hesaplanmaktadır. Deniz suyunun tuzluluğu geniş kapsamda buharlaşma ve yağış arasındaki farka bağlıdır. Yüksek buharlaşmanın olduğu Kızıldeniz gibi alanlarda, tuzluluk %40 yaklaşmaktadır. Ayrıca deniz suyunun tuzluluğu derinlikle değişmektedir. Tuzlulukta en büyük değişim 100 ve 1000 m derinlik arasında meydana gelmektedir. Bu hızlı değişimin gerçekleştiği tabaka haloklin tabakası olarak adlandırılmaktadır ve sıcaklık ile çözülmüş oksijenle ilişkilidir [6,7]. Çizelge 2.2 dünya çevresindeki farklı deniz sularının başlıca kimyasal özelliklerini göstermektedir [1].

Çizelge 2.2. Farklı Deniz Suyu Kompozisyonları [1]

Yer	1	2	3	4	5	6	7
Kompozisyon, ppm							
TÇK	40679	36049	33300	35137	43700	39151	31985
pH	8.1	8.5	7.7	8.0	8.1	8.3	7.5
HCO ₃ ⁻	162	146	175	141	122	159	750
SO ₄ ²⁻	3186	2769	2280	2709	3200	3010	1620
Cl ⁻	22599	19841	26000	19370	23922	21573	17172
Na ⁺	12200	11035	10700	10779	12950	11998	9552
Ca ²⁺	481	418	432	421	440	455	1611
Mg ²⁺	1557	1330	1290	1293	1580	1446	1280
K ⁺	481	397	381	386	n/r	432	n/r

1. Eastern Mediterranean (Pankratz, 2004)

2. Caribbean Sea (Pankratz, 2004)

3. Central Pacific (Pankratz, 2004)

4. South Atlantic (Pankratz, 2004)

5. Arabian Gulf (Pankratz, 2004)

6. Indian Ocean (Pankratz, 2004)

7. Ajmām, Shallow beach intake (Turkian, 1968)

Deniz suyunda 100'den fazla elementin varlığı belirlenmişse de bunların en önemlileri Çizelge 3.1.'de verilmiştir.

3. DENİZ SUYU TUZSUZLAŞTIRMA TEKNOLOJİLERİ

Tuzsuzlaştırma, tuzların ve biyolojik materyallerin tatlı su elde etmek için deniz suyundan uzaklaştırılmasını kapsamaktadır. Dünya suyunun, arıtım olmaksızın insanlığın tüketimi için yetersiz bu geniş kaynakları yaratan yaklaşık %97'si 35000 mg/L tuz içerikleriyle okyanuslardan meydana gelmektedir. Bu yüzden, deniz suyunun ekonomik bir şekilde tuzsuzlaştırılması şimdi sadece kurak alanlarda değil aynı zamanda dünya çapında da kamu özeni ve geniş idareye dikkat çekilen uluslararası bir hedef haline gelmiştir [1].

Çizelge 3.1. Su İçinde Bulunan Anyon ve Katyonların Ortalama Değerleri [8, 9]

Katyonlar (g/kg)		Tuzluluğa Katkısı (%)
Na ⁺	10.770	30.61
Mg ²⁺	1.294	3.69
Ca ²⁺	0.413	1.16
K ⁺	0.384	1.10
Toplam	1.864	
Anyonlar (g/kg)		
Cl ⁻	19.353	55.04
SO ₄ ²⁻	2.712	7.68
HCO ₃ ⁻	0.142	0.41
Br ⁻	0.067	0.19
I ⁻	0.060	Eser
Toplam	22.334	
Genel Toplam	35.198 g/kg	99.88

Deniz suyu tuzsuzlaştırma tesisleri pek çok ülkede özellikle kurak Orta Doğu'da kurulmaktadır, çünkü yapılabilir başka bir alternatifleri yoktur. Tuzsuzlaştırmayla ilgili başlıca problemler yatırım ve işletim maliyetlerinin çok yüksek olmasıdır. Tuzlu suyu tuzsuzlaştırmak için pek çok yöntem önerilmesine rağmen sadece bir kaç tı ticari olarak yaşama geçirilmiştir ve bu proseslerin çoğunluğu son 50 yıl içinde geliştirilmiştir [4]. Tuzdan suyu ayırmak için damıtma, membran ve kimyasal prosesler olmak üzere üç temel proses bulunmaktadır [1, 13, 70]. İçilebilir su sağlamak amacıyla uygulanan tuzsuzlaştırma teknolojileri gün geçtikçe dünya çapında artmaktadır. Bu teknolojiler ile küresel olarak üretilen toplam su miktarı 1994 yılında 17.3 milyon m³/gün iken 2009 yılında 68 milyon m³/gün kapasitelerine ulaşmış, 2016 yılında ise 130 milyon m³/gün olması planlanmıştır [41].

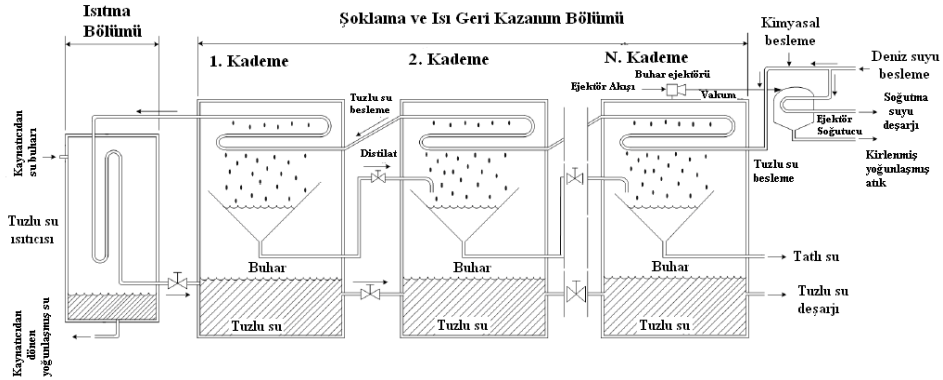
3.1. Damıtma Prosesleri

Suyun (gaz ya da katı) hal değişimi özelliğini kullanarak değişen fazını ayırmak için termal araç kullanılan proseslerdir. Amaç, fiziksel olarak tuz çözeltisinden suyu buharlaştırarak ayırmak ve daha sonra tekrar sıvı forma dönüştürerek toplamaktır. Bu sistemler için termal enerji ya da güneş enerjisi kullanılmaktadır. 80'lerden önce damıtma tuzsuzlaştırması (DT) deniz suyu arıtımı için en popüler yöntem olmuştur. Ticari olarak kullanılan ilk deniz suyu arıtma prosesleri olmasının yanında dünyada deniz suyu arıtım proseslerinin %65'lik kısmını halen bu prosesler kullanılarak yapılmaktadır. Termal kısmına ek olarak damıtma prosesleri sık sık daha düşük sıcaklıklarda da buharlaştırmayı arttırmak için vakum uygulamasıyla birleştirilmiştir. Deniz suyu arıtımında uygulanan damıtma prosesleri [9, 19, 29, 36, 70]:

- i. Çok işlemlili damıtma (*multiple-effect distillation*)
- ii. Çok kademeli şok damıtma (*multi-stage flash distillation*)
- iii. Mekanik buhar sıkıştırma (*mechanical vapour compression*)
- iv. Güneşle damıtma (*solar distillation*)

3.1.1. Çok Kademeli Şok Damıtma (Multi - Stage Flash Distillation-MSF)

MSF, ilk kez 1950'lerde geliştirilen fakat gelişimi 1980'lerin ortalarından beri önemli derecede yavaşlayan çoğunlukla büyük ölçek kapasitesinde kullanılan en basit ve en güvenilir olan tuzsuzlaştırma prosesidir [10, 11, 59]. MSF suyun buharlaştırılması ve yoğunlaştırılması esasına dayanan bir damıtma prosesidir. Buharlaştırma ve yoğunlaştırma adımları MSF'de birbirleriyle bağlantılıdır. Su geri dönüşümünü maksimize etmek için, bir MSF biriminin her bir aşaması ardışık olarak daha düşük basınçlarda işletilmektedir. Buharlaştırma boyunca uygulanan enerji yoğunlaştırımda değerlendirilir [3, 35].



Şekil 3.1. Çok Kademeli Şok Damıtma Tesisinin Diyagramı [4]

Şekil 3.1'de çok kademeli şok damıtma tesisi şematik olarak gösterilmiştir. MSF fosil yakıtların kullanan termal bir teknolojidir. Dünyanın büyük bir kısmındaki tuzsuzlaştırma tesisleri bu teknolojiye dayanmaktadır [36]. MSF'de, deniz suyu deniz ısıtıcısı olarak adlandırılan bir kanal içinde ısıtılır. Oluşan su buharı daha sonra kaynama ya da şoklama için azaltılmış basıncın uygulandığı yer olan bir kademe olarak adlandırılan diğer bir kanal içine akar ve burada yoğunlaşarak toplanır [4]. Kanal içerisinden geçen deniz suyu ısıtma bölümüne gidene kadar su buharını yoğunlaştırmak için kullanılıp soğutma sistemlerinin kurulumu için gereken maliyeti azalmakta ve aynı kanal içinde ısıtma bölümüne gelen deniz suyu birinci kademeye geçerken aldığı ısı enerjisinin de yardımıyla buhar fazına geçmektedir. Sürekli bir döngünün olduğu bu sistemde bir kanal içerisinden besleme yapılan deniz suyu aynı zamanda yükselen su buharının kanala çarpmasıyla oluşan ısı alışverişi sonunda yoğunlaşarak toplanabilmektedir ve böylece şoklanmış su buhar her bir kademe içinden geçen sıcaklık değiştirici tüpler üzerinde yoğunlaştırılmasıyla tatlı suya dönüştürülür.

Tipik olarak, bir MSF tesisi 4 ile yaklaşık 40 kademedan meydana gelmektedir. MSF tesisleri genellikle 4000 – 30000 m³/gün debi ile inşaa edilmekte ve 90-120°C besleme sıcaklıklarıyla işletilmektedirler. 120°C'den yüksek sıcaklıklarda işletilen tesislerde verimlilik artar, fakat bu durum metal yüzeylerin korozyona uğramasına neden olup sisteme zarar verebilmektedir [4].

Batı Asya’da tuzsuzlaştırma tesislerinin % 50’si hala bir günde 8.28 milyon m³ tatlı su üreten MSF yöntemini kullanmaktadır [12]. Dünyanın deniz suyu arıtımı kapasitesinin %40’dan fazlasını oluşturan Orta Doğu’da da (özellikle Suudi Arabistan, Birleşmiş Arap Emirlikleri ve Kuveyt) çok kademeli şok damıtma (MSF) birimleri geniş çaplı olarak kullanılmaktadır [3].

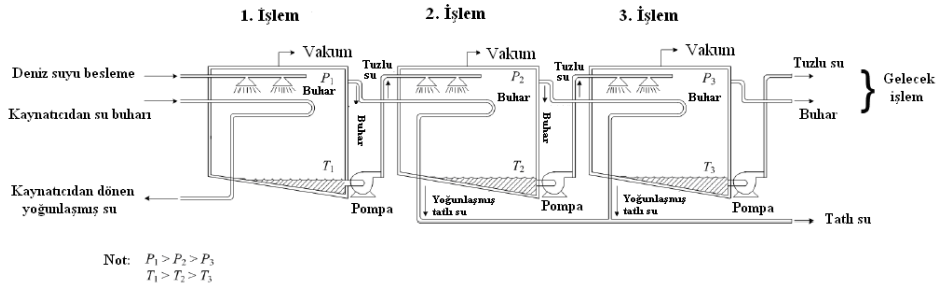
Buharlaştırma seviyesinin genişlemesi ve diğer tuzsuzlaştırma metotlarıyla birleşme gibi tasarım değişikliklerini kapsayan çeşitli tesis modifikasyonları denenmiştir. Bununla birlikte, işletim ve kontrol parametreleri üzerindeki çalışmalar sürekli olarak yürütülmektedir. Besleme sıcaklığı mevsimsel iklim koşullarıyla tuzsuzlaştırma tesisleri üzerinde etkili olan bir işletim parametresidir. Deniz suyu sıcaklıklarındaki değişimler deniz suyu ısıtıcısının tüplerinde bozulmalara neden olup MSF tuzsuzlaştırma tesislerinin verimliliğini etkilemektedir. Pratik olarak MSF tesisleri sırasıyla yaz ve kış işletim periyotları olarak bilinen yaz ve kış boyunca iki farklı besleme sıcaklıklarında işletilirler. Yaz ve kış mevsimleri için tipik işletim sıcaklıkları sırasıyla 32 ve 25°C’dir [55].

3.1.2. Çok İşlemlilik Damıtma (Multi - Effect Distillation - MED)

Çok işlemlilik damıtma uzun bir süredir endüstriyel amaçlı damıtma işlemleri için kullanılmaktadır. İlk su damıtma tesislerinin bazıları MED sistemini kullanılmıştır, fakat bu proses maliyet faktörü ve mukavemetindeki bozulma nedeniyle MSF üniteleri ile yer değiştirmiştir. Bununla birlikte, geçen 10 yılda, MED sistemlerindeki ilgi artmaktadır ve bir grup yeni tasarım inşaa edilmektedir. Çoğu yeni MED üniteleri daha düşük sıcaklıklarda işletilmektedir [4]. MSF gibi MED’de daha düşük basınçta işletilen, birbirini takip eden işlemlerle bir seri kanal içinde meydana gelmektedir.

Bir MED tesisinde, sisteme alınan deniz suyu ilk işleme girer ve önceden ısıtılmış su buharının geçtiği tüpler üzerine püskürtülür veya ani buharlaşmayı desteklemek için ince bir film içinde buharlaştırıcı tüplerin yüzeyi üzerine dağıtılır. Oluşan su buharı ikinci işleme geçer ve burada ısı transferi sonucu yoğunlaşarak toplanır [36]. Buharlaştırıcılar seri halinde yerleştirilir ve “işlem” olarak adlandırılırlar. Besleme suyu pompalanır ve ilk bölümde buharlaştırılır. Daha sonra buhar taşınır ve kalan besleme suyunun bir kısmının buharlaştırıldığı bir sonraki bölümde buharlaştırma için termal enerji olarak kullanılır. Bu olay ardışık işlem olarak devam eder [12].

İlk işlem içinde tüplere gelen deniz suyunun sadece bir kısmı buharlaştırılır ve kalan deniz suyu ikinci işleme beslenir. Sırasıyla bu tüpler ilk işlem içinde yaratılan buharlar tarafından ısıtılırlar. Bu buhar bir sonraki işlemde kalan deniz suyu beslemesinin bir kısmını buharlaştırmak için kullanılırken diğer kısmı tatlı su üretimi için yoğunlaştırılır ve bu işlem ardışık olarak devam eder. Tipik büyük bir tesiste 8-16 işlemci bulunur ve 2000-10000 m³/gün debiler için inşaa edilmektedir [4]. Şekil 3.2’de çok işlemlilik damıtma tesisi şematik olarak verilmiştir.



Şekil 3.2. Çok İşlemlilik Damıtma Tesisinin Şematik Şekli [4]

MED prosesi, MSF prosesi popüler olana kadar geniş kapsamlı olarak kullanılmaktaydı. Ancak, % 40 - 60 arasında iyi bir geri kazanım oranına sahip olmasına rağmen, işletimi ve bakımındaki güçlükler nedeniyle günümüzde kullanımı azalmıştır [12].

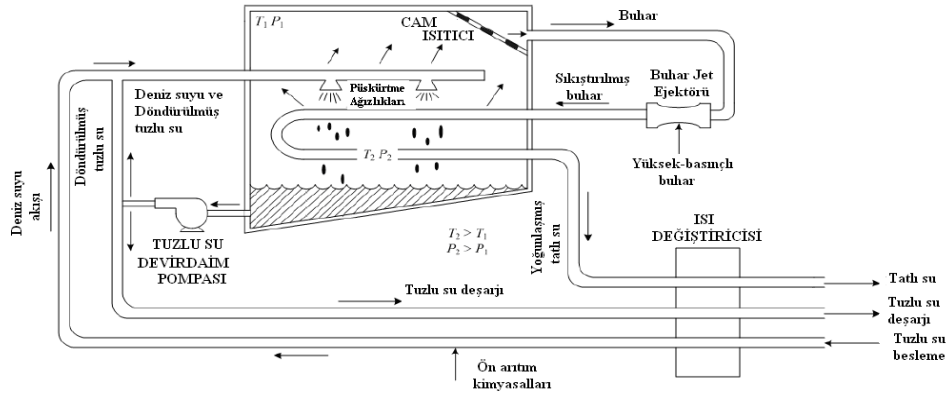
3.1.3. Buhar Sıkıştırılmalı Damıtma (Vapor - Compression Distillation - VC)

Buhar sıkıştırma prosesleri buharlaştırmayı devam ettirmek için basınç azaltılması esasına dayanmaktadır [3]. Genel olarak küçük ya da orta ölçekli tuzsuzlaştırma birimleri için kullanılmaktadır. Buhar sıkıştırma damıtma tesislerinin yoğun ve etkili sistemler oldukları bilinmektedir. VC'nin esas avantajlarından biri onun basınç ve sıcaklığını kompresörle yükselttikten sonra son işlemden üretilmiş buharın yeniden kullanılmasıdır. Buhar ya mekanik (MVC) ya da termal (TVC) enerji ile sıkıştırılır [4, 29].

3.1.3.1. Termal Buhar Sıkıştırma (Thermal Vapour Compression - TVC)

Termal Buhar Sıkıştırma (TVC) prosesleri pek çok durumda tesislerinde bir vakum oluşturarak en iyi verimi sağlarlar; bu yüzden kolay bir şekilde işletilebilirler. Termal buhar sıkıştırma proseslerinin kapasiteleri çok küçük miktarlardan çok geniş miktarlara değişebilmektedir. Şekil 3.3'de Termal Buhar Sıkıştırma Tesisi şematik olarak gösterilmektedir [4].

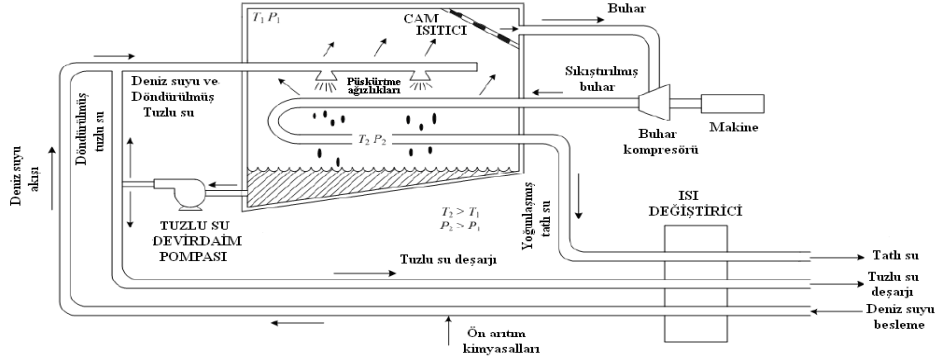
TVC sisteminde ısı değiştirici içerisinde geçen deniz suyu sisteme püskürtülmektedir (Şekil 3.3). Sistem içerisinde gerçekleşen ısı alışverişini sonrasında açığa çıkan su buharı bu sistemi oluşturan en önemli unsurlardan biri olan su buharı jet kompresörü ile sıkıştırılır ve tatlı su üretimi gerçekleşir [3].



Şekil 3.3. Termal Buhar Sıkıştırma Tesisinin Şematik Şekli [4]

Şekil 3.4, bir yüksek verimli jet püskürtücünün kullanıldığı deneysel tuzsuzlaştırma prosesini göstermektedir. Tuz içeren besleme suyu öncelikle sıcaklık değiştiriciye gaz giderici boyunca beslenir. Tuz içeren sıvı kaynar, düşük basınç buharı üretilir. Buharlar bir jet püskürtücü kullanılarak ilk ısı değiştiricisinden uzaklaştırılır. Kızgın su buharı süpersonik hızda jet püskürtüclere verilir. Jet püskürtücüden ayrılan basınçlandırılmış su buharı öncelikle bir ısı değiştirici içinde yoğunlaşır. Yoğunlaşma ısısı tuz çözeltisi için buharlaşma ısısını sağlamaktadır. Buharlarda onların yoğunlaştırıldığı ikinci ısı değiştiricisine geçer. Damıtılmış sıvı su tüm ısı değiştiricilerden geri kazanılır ve ilk ısı değiştiriciden tuz çözeltisi konsantr edilir [4].

suyunun püskürtüldüğü sistemden geçerken ısı alışverişi olur ve tekrar yoğunlaşması sağlanır ve sonuçta tatlı su oluşur. Sistem içerisinde kalan tuzlu suyun geri devri sağlanmaktadır. Sonuçta deniz suyu iki farklı kanaldan tatlı su ve tuz içeriği artmış su olarak ayrılmaktadır. Şekil 3.6'da mekanik buhar sıkıştırma tesisi şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.6. Mekanik Buhar Sıkıştırma Tesisinin Şematik Şekli [4]

MVC'de termal bir enerji kaynağı olan ısının yerine mekanik enerjiden yararlanılmaktadır. MVC ünitesi oteller ve endüstriler gibi 20-2000 m³/gün arasındaki küçük ölçekli deniz suyu arıtımı için uygundur. Dünyanın deniz suyu arıtım kapasitesinin yaklaşık % 4'ünde MVC yöntemini kullanılmaktadır [12].

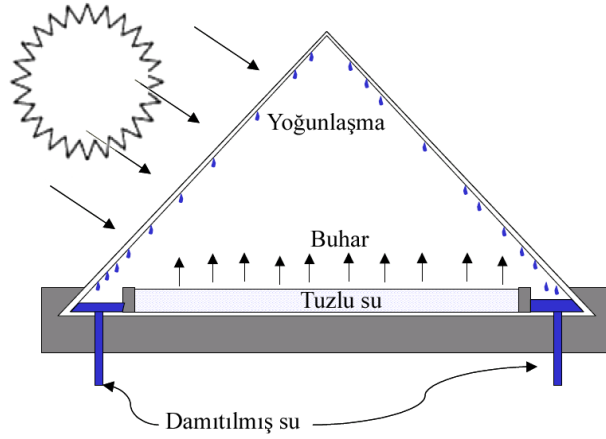
Buhar sıkıştırımlı damıtma proseslerinin mukayesesi yapılacak olunursa, TVC sistemleri 20000 m³/gün boyutunda düzenlenirken MVC üniteleri tipik olarak yaklaşık 3000 m³/gün debilerde düzenlenebilmektedir. TVC sistemleri çok aşamalı iken MVC sistemleri genel olarak sadece bir kademeye sahiptir. Bu fark TVC sistemlerinin termal verimliliği eklenen ek kademelerle artarken MVC sistemleri kademelerin gruplarına aldırılmadan aynı özel enerji tüketimine sahip olduğundan dolayı oluşmuştur. Böylece bir MVC sistemine eklenen etkilerin esas avantajı basit olarak kapasitenin artırılmasıdır [2].

3.1.4. Güneşsel Damıtma (Solar Distillation -SD)

Güneşsel damıtma daha küçük ölçekte olup hidrolojik döngüyü yeniden oluşturan sistemlerdir. Bir güneş damıtıcının basit tasarımı Şekil 3.7'de gösterildiği gibi bir seraya benzerdir [3]. Güneşsel tuzsuzlaştırma teknolojileri deniz suyundan tatlı su üretimi için temiz işletimi olduğu için düşünülmüştür. Ayrıca, SD teknolojileri tatlı su ihtiyacı boyutuna ve varolan güneş enerjisine göre çeşitlidir ve çoktur [62]. Güneşsel Damıtma sistemleri esas itibarıyla pasif güneşsel damıtıcı ve aktif güneşsel damıtıcı olarak sınıflandırılmaktadır. Alandaki su derinliği, alanın materyali, rüzgar hızı, güneşsel ışımaya, çevresel sıcaklık ve eğim açısı gibi çok sayıda parametre damıtıcının performansını etkilemektedir. Güneşsel damıtıcının herhangi bir tipinin verimliliği alandaki su ve iç cam yüzey geri dönüşümü arasındaki sıcaklık farklılığı ile belirlenmektedir. Pasif güneşsel damıtma sistemlerinde, güneşsel ışımaya direk olarak alan suyu ile alınmaktadır ve sadece su sıcaklığını yükseltmek için enerji kaynağıdır, dolayısıyla daha düşük seviyelerde buharlaşma meydana gelmektedir. Bu nedenle aktif güneşsel damıtma sistemleri geliştirilmiştir. Burada buharlaşma oranını arttırmak ve verimliliği geliştirmek için harici şekilde alan boyunca ekstra termal enerji temin edilmektedir. Şekil 3.8'de çift etkili güneşsel damıtma sistemi şematik olarak verilmiştir [43, 53, 60].

Güneş enerjisi bir eğimli ayna ya da plastik panel boyunca girer. Deniz suyu saydam materyaller tarafından çevrelenen siyah hatlı derin olmayan bir havzada tutulur. Plan, güneş ısısının absorplanması ve buharlaşma noktası için deniz suyunu ısıtmaktır. Daha sonra su buharı sirküle edilen hava ile şeffaf örtünün yüzeyine taşınır. Bu noktada yoğunlaşma meydana gelir ve sıvı kılıf üzerinde kalır.

Yoğunlaşmış damlacıklar panellere dökülür ve kullanım için toplanır. Tipik üretkenlik yaklaşık $2.5-3.0 \text{ L/m}^2 \cdot \text{gün}$ civarındadır [3, 12]. Güneşsel damıtıcılar tipik olarak % 50'den daha az verimlidir. Bu tip damıtıcılar, yaklaşık 1 m^2 'lik alan içinde her gün sadece 4 litre tatlı su üretebilirler. Bu, azaltılan yatırım maliyetinde yapının çok ucuz maddeleri kullanması için önemlidir. Buna rağmen, güneş damıtıcıların donanımı diğer yöntemlerden daha komplekstir. Diğer damıtma yöntemlerine göre diğer bir dezavantajı ise iklim koşullarına karşı hassas olmasıdır. Verimliliği arttırmak için damıtıcıların modifikasyonlarının yapılması genellikle maliyeti arttırmaktadır [3].

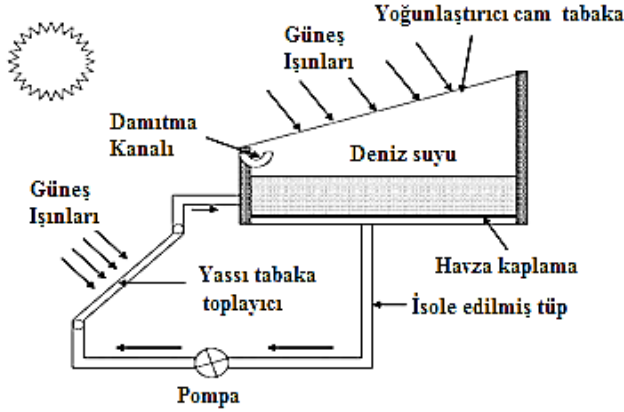


Şekil 3.7. Güneş Damıtma Ünitesinin Şematik Şekli [3]

Prosesin konumu güneşsel damıtmanın performansını önemli bir şekilde etkilemesine rağmen tipik üretkenlik günde her m^2 yaklaşık 2.5-3.0 litre civarındadır. Bu 1 litre suyu buharlaştırmak için gereken enerjinin 2.260 kJ ve yaklaşık $18.000 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{gün}$ 'lük güneşsel ışıltama düşünüldüğünde yaklaşık % 30'luk bir verim gerektirir.

Bahsedilen tüm damıtma tuzsuzlaştırma yöntemleri deniz suyu arıtma proseslerinde gereken termal enerjiyi sağlamak için yüksek maliyet gerektirirler. Buna karşın, güneşsel damıtma gerekli olan termal enerjiyi güneş ısısından toplandığı için enerji maliyeti yoktur. Bu sistemin en önemli dezavantajları ise güneşsel damıtma boyut sınırlamasına sahiptir ve diğer damıtma yöntemleri kadar etkili olmayabilir [12].

Teknik ve ekonomik olarak güneş enerjisi sistemleriyle RO, ED, MED ve MSF gibi konvansiyonel deniz suyu arıtım proseslerinin bir arada kullanılması daha faydalı olmaktadır. Bununla birlikte, konvansiyonel RO, MED ve MSF küçük yerleşim uygulamaları için uygun değildir [61].



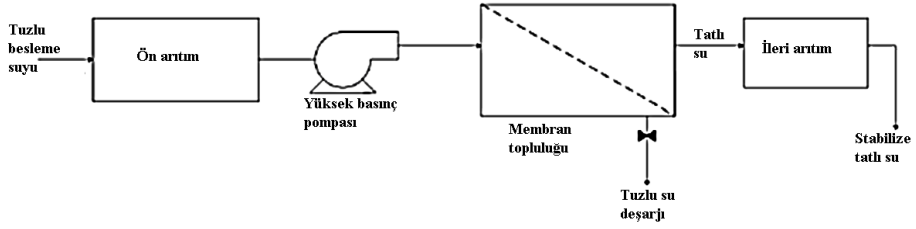
Şekil 3.8. Yassı Tabaka Toplayıcı ile Birleştirilmiş Çift Etkili Güneşsel Damıtma Sisteminin Şematik Şekli [43, 60]

3.2. Membran Prosesler

Membran prosesler, fiziksel olarak bileşenlerin ayrılmasında membran sisteminin kullanıldığı proseslerdir. Deniz suyu arıtımında en çok kullanılan iki membran prosesi ters ozmos ve elektrodializdir [2, 70]. Ayrıca membran distilasyon (MD) prosesi de kullanılmaktadır [48]. Ters ozmos yönteminde, suyun basınç altında tutulmasıyla açığa çıkan kimyasal potansiyel eğilimiyle çözünen madde membran boyunca geçer ve sudan fiziksel ayrımı gerçekleştirir. Elektrodializde, çözeltide iyonlar bir elektriksel alana karşılık anyon ve katyon seçici membranlar boyunca hareket ederler. Akış boyunca sudan çözülmüş iyonları ayırmak ve toplamak için bir elektriksel alan kullanılmaktadır. Her iki proses de büyük ölçekte ticarileştirilmiştir [19, 25].

3.2.1. Ters Ozmos (Reverse Osmosis – RO)

Ters ozmos membranları uzun zamandır acı su ve deniz suyu arıtımında geniş ölçekte kullanılan ve gelişen bir teknolojidir [32, 34, 82]. Deniz suyu RO sistemleri için işletim parametreleri esas itibarıyla sıcaklık ve besleme suyu tuzluluğunun bir fonksiyonudur [80]. RO basınçlandırılmış tuzlu çözümden suyu çözünenlerden ayıran bir membran ayırma prosesidir. Uygulamada tuzlu su membrana karşı basınçlandırılan kapalı bir kanal içine pompalanır. Suyun bir kısmı membran boyunca geçerken kalan besleme suyunun tuz içeriğinde artış gözlenir [4]. Aynı zamanda besleme suyunun bir kısmı membran boyunca geçmeksizin deşarj edilir. Bu deşarjın kontrolü olmadan aşırı doymuş tuzların çökmesi gibi problemler yaratan tuz konsantrasyonundaki artış devam eder ve membranların geçiş sırasında osmotik basınç artar. Bu tuzlu suda atık olarak deşarj edilen besleme suyunun miktarı besleme suyunun tuz konsantrasyonuna bağlı olarak besleme akışı %20-70 arasında değişir [4, 20, 25]. Şekil 3.9'da ters ozmos tesisi planının basit bileşenlerini göstermektedir.



Şekil 3.9. Ters Ozmos Tesisi Planının Basit Bileşenleri [4]

Bir ters ozmos sistemi aşağıdaki ana bileşenlere sahiptir:

- Ön arıtma
- Yüksek basınç pompası
- Membran topluluğu ve
- Son arıtmadır.

Ön arıtma ters ozmos sisteminde önemlidir çünkü besleme suyu işlem süresince çok dar kanallardan geçmektedir. Membran proseslerinde membran performansının bozulmasına, temizleme ve geri kazanma maliyetleri gibi sonraki adımları sınırlayan en büyük problem olarak kirlenme sık sık beklenen bir sorun olarak görülmektedir [49, 51, 78]. Bu nedenle askıda katı maddeleri uzaklaştırılmak ve tuz çökeli mi ya da membran üzerinde mikroorganizma büyümesinin meydana gelmesini engellemek için su ön arıtmadan geçirilmektedir. Sıcaklık, toplam çözülmüş katı maddeler ve biyolojik kalite gibi deniz suyunun su kalite parametreleri çok sayıda deniz suyu arıtma tesisinin ön arıtım sistemlerini etkilemektedir [39, 50, 58]. Genellikle ön arıtım adsorpsiyon, elektrokoagülasyon, mikrofiltrasyon ve koagülasyon/flokülasyon sistemlerinden meydana gelmektedir. Membran teknolojilerindeki ilerlemeler, deniz suyu ön arıtımı için mikrofiltrasyon ve nanofiltrasyon proseslerinin araştırılması ve uygulanması yönünde olmaktadır [4, 50, 56, 57, 58, 63, 74, 83]. Ön arıtım yöntemleri besleme suyunun koşullarına ve membran materyaline göre değişiklik göstermektedir [12].

Yüksek basınç pompaları suyun membran boyunca geçişini sağlamak için gerekli olan basıncı oluştururlar. Bu basınç tuzlu su için 250-400 psig arasında ve deniz suyu için 800-1180 psig arasında değişmektedir [4]. Ters ozmos tarafından tüketilen enerjinin çoğu tuzlu suyun basınçlandırılmasından oluşmaktadır [3, 42].

Membran topluluğu, bir basınç kanalı ve membrana karşı basınçlandırılmış besleme suyuna izin veren membranlardan meydana gelmektedir. Yarı geçirgen membranlar hassastır ve tuzların akışını engellenirken tatlı su geçirebilme özellikleri değişir. Ters ozmos ile deniz suyu arıtımında genellikle polivinil klorür (PVC), polivinilidin florür (PVDF), polieter sulfon (PES) ve diğer organik polimerlerden üretilen organik membranlar kullanılmaktadır. Ancak, alümina ve silika gibi seramik membranlar mekanik özellikleri, kimyasal ataleti, termal denge ve uzun ömürlülüğü ile polimerik membranlardan daha üstün olmaktadır [30, 37, 40, 44, 85]. Membran materyallerinin gelişimi genellikle araştırma aktivitesine göre ikiye ayrılmıştır: (i) uygun materyal (kimyasal bileşim) ve membran oluşum mekanizması için araştırma, ve (ii) fonksiyonellik ve dayanıklılığı arttırmak amacıyla membran formülasyonu için daha kontrollü koşulların gelişimi [38]. Ters ozmos membranları değişik konfigürasyonlarda üretilmiştir. Ticari olarak en çok başarılı olanlardan ikisi spiral-sarmal levha ve boşluklu ince liflerdir. İmalatçılara bağlı olarak değişmesine rağmen membranın ve basınç kanalının tasarımı besleme suyunun tuz içeriği ve bu konfigürasyonların her ikisi hem tuzlu suyu hem de deniz suyunu arıtmak için kullanılmaktadır [4]. Ters ozmos membranları pH'a, oksidantlara, organiklerin geniş aralıklarına, bakterilere, partiküllere ve diğer kirliliklere duyarlıdır [3, 42, 78].

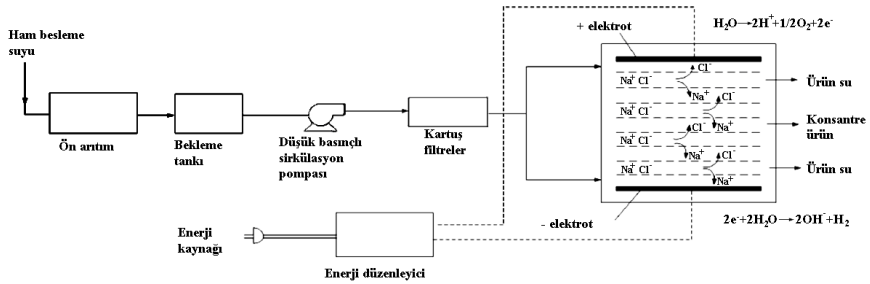
Son arıtma, suyun dengelenmesi ve dağıtılmasını içermektedir. Bu son arıtma hidrojen sülfür gibi gazları uzaklaştırma ve pH'ın ayarlanmasından oluşabilir [4, 83].

Ters ozmos ile yapılan arıtmada membran maliyeti ana maliyetinin %20-30'nu, membran yenilenmesi ise işletim maliyetinin %25-30'unu oluşturmaktadır. Bu nedenle ters ozmosun membranlarının ekonomik değeri güçlü bir şekilde membran ömrüne bağlıdır ve bu yüzden bozulma kontrol edilmelidir [1]. Ayrıca üretilen tatlı suyun her metreküpü için yaklaşık olarak 3-10 kilowatt-saat elektrik enerjisine ihtiyaç duymaktadır [26]. Deniz suyu ters ozmos tesislerinin işletme maliyetinin hemen hemen yarısını elektrik maliyeti oluşturmaktadır. Bazı araştırmacılara göre bu maliyet RO sistemleri için en önemli dezavantaj olarak ifade edilmektedir [77]. Bu nedenle enerji geri kazanımını sağlamak amacıyla bir takım çalışmalar yapılmaktadır [78].

Son zamanlarda RO'nun güvenilirliği ön arıtım adımlarında RO ile birleştirilebilen mikrofiltrasyon(MF), ultrafiltrasyon(UF) ve nanofiltrasyon(NF) gibi diğer çeşitli membran proseslerinin gelişimi ile geniş ölçüde artmıştır. Deniz suyu arıtımında çeşitli membran ünitelerinin optimizasyonu ve entegrasyonu sayesinde sıfır tuz üretimi ve artan geri kazanım oranı ile daha iyi kalitede su temini etmek mümkündür [23, 37, 38, 81].

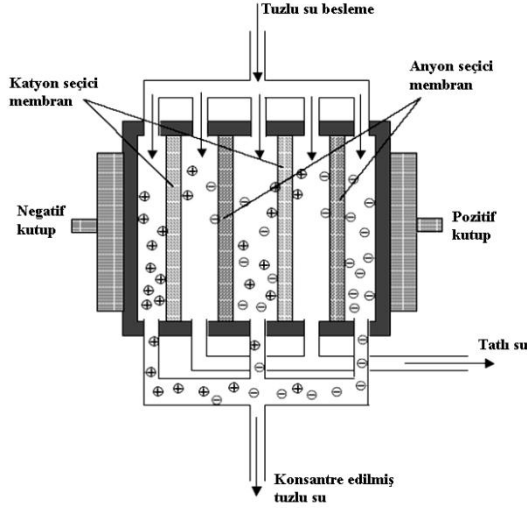
3.2.2. Elektrodializ (Electrodialysis-ED)

Elektrodializ özel inorganik kirlenmelerin giderimi ve tuzsuzlaştırma için RO ile beraber deniz suyu arıtımında uygulanan membran proseslerindedir. Bir elektriksel alan altında iyon değıştiren membranlar boyunca iyonların seçici geçirgenliğini içeren ED prosesleri deniz suyundan içilebilir su üretimi gibi konsantr edilmiş tuzlu su ve tuzu tüketmiş su üreten tuzlu çözeltilerin tuzsuzlaştırılması için kullanılmaktadır [27]. Temel elektrodializ ünitesi dış tarafı elektrotlarla birlikte sınırlanan birkaç hücre çiftinden meydana gelmektedir ve bir membran destesini içermektedir. Besleme suyu aynı zamanda tuzsuzlaştırılmış üretim suyunun akışının devamını sağlamak için hücrelerin tamamı boyunca paralel yollar içinden geçmektedir [4]. Şekil 3.10'da elektrodializ tesisinin basit bileşenleri gösterilmektedir.



Şekil 3.10. Elektrodializ Tesisinin Basit Bileşenleri [4]

Membran elektrodializ birimleri kirliliğe bağlıdır ve bu yüzden besleme suyunun bazı ön arıtmaları genellikle gereklidir. Membranlar boyunca su akışı olmadığı için elektrodializ prosesi ile ters ozmos prosesinden daha yüksek miktardaki çözünmüş katı içeren atıksular arıtılabilir. Şekil 3.11'de Elektrodializ Prosesi şematik olarak verilmiştir [3].



Şekil 3.11. Elektrodializ Prosesinin Şematik Diyagramı [2]

Şekil 3.11’de de görüldüğü gibi tipik bir ED hücresinde, bir anot ve bir katot arasında birbirini izleyecek şekilde anyon ve kation değiştirebilen membranlar serisi dizilmiştir. İki elektrot arasına elektrik potansiyeli uygulandığında pozitif yüklü iyonlar kation değiştirici membrana, negatif yüklü iyonlar ise anyon değiştirici membrana doğru hareket ederler. Sonunda iyon konsantrasyonu yüksek olan konsantre edilmiş deniz suyu ile iyonlarından ayrılmış tatlı su ayrı ayrı bölmelerden toplanır [28].

Elektrodializ 5000 mg/L üstündeki toplam çözünmüş katı düzeyleriyle tuzlu sularda özellikle ekonomik bir proses olabilir. Deniz suyu arıtımı için, elektrodializ düşük ve orta seviyelerde tuzluluğa sahip sular ile küçük ölçekli tuzsuzlaştırma amaçları ile sınırlandırılmıştır. Elektrodializ yöntemi dünyada tuzsuzlaştırma kapasitesinin %5’lik kısmını oluşturmaktadır [12, 21].

3.2.3. Membran Distilasyonu(Membran distillation- MD)

Membran distilasyon prosesi (MD) mikro-gözenekli hidrofobik membranlar boyunca buhar geçişini kapsayan termal bir prosedir ve sıvı-buhar dengesi üzerine işletilir. Prosesin yürütücü gücü sıvı-buhar ara yüzeyleri arasında maruz kalan sıcaklık derecelerinden meydana gelen farklı buhar basınçlarından karşılanmaktadır. MD çoğu bilimsel ve endüstriyel alanlarda uygulamalara sahip bir prosedir. Özellikle, MD prosesi MSF, RO ve MED gibi konvansiyonel tuzsuzlaştırma proseslerinin yerine kullanılabilir [54]. Son yıllarda, yenilikçi proses membran distilasyonu tuzsuzlaştırma işlemleriyle üretilen nanofiltrasyon tuzlarından değerli tuzların geri kazanımı için de araştırılmıştır [64].

Deniz suyu arıtımında, eğilim esas olarak yüksek nüfus yoğunluğu olan alanlar için daha ekonomik ve uygun olduğu için merkezileşmiş arıtma tesislerini inşa etmektedir. Bu amaçla, MD gerçekte yararlı bir yöntemdir [52]. Ters ozmos ve termal olarak işletilen tuzsuzlaştırma prosesleri üzerindeki araştırmalar ve gelişmeler devam etmesine rağmen uygulanabilirse düşük derecede atık sıcaklığıyla işletilen membran distilasyonu gibi alternatif tuzsuzlaştırma teknolojilerinin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır [45]. MD, termal damıtma ve membran proseslerinden oluşan hibrit sistemlerdir [52]. MD teknolojileri sıcaklık farklılıklarıyla farklı buhar basıncı yaratan direkt temaslı membran distilasyonu (DCMD), nüfuz boşluğu membran

distilasyonu (PGMD) ve hava boşluğu membran distilasyonu (AGMD) olarak adlandırılmaktadır. Gaz temizleme membran distilasyonu (SGMD ve vakum membran distilasyonunda (VMD) buhar basıncı farklılığı üretim alanında direkt olarak süzülebilen maddelerin konsantrasyonunun azalmasıyla oluşmaktadır [47, 48].

3.3. Kimyasal Prosesler

Bu kategori damıtma ve membran proseslerinden daha değişikdir ve iyon değiştirme, sıvı-sıvı ekstraksiyonu veya diğer artım tasarımlarını kapsamaktadır. Tuzsuzlaştırma için damıtmanın ve membran proseslerinin verilen süresi kimyasal prosesler veya kimyasal ve diğer proseslerle birlikte bir hibrit sistem tanımıyla hemen alışılmışın dışındadır. Genel olarak, kimyasal prosesleri tatlı suyun üretimi için uygulamak oldukça pahalı bulunmuştur. Ancak kimyasal proseslerden biri olan iyon değiştirme özel uygulamalar için yüksek saflıkta de-iyonize su üretmek için kullanan özel bir prosesdir. Bunun yanı sıra, iyon değiştirme çözünmüş katı madde miktarı yüksek olan sular için de pratik olmayan bir prosesdir [3]. Ancak deniz suyundan bor uzaklaştırmak için kullanılan en uygun teknoloji olduğu yapılan çalışmalarla desteklenmiştir. Aynı zamanda içme suyu kalitesinde deniz suyunun tuzluluğunu azaltmak için gerekli olan ters ozmos proses ile de birleştirilebilmektedir [22].

4. DENİZ SUYU TUZSUZLAŞTIRMA TESİSLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

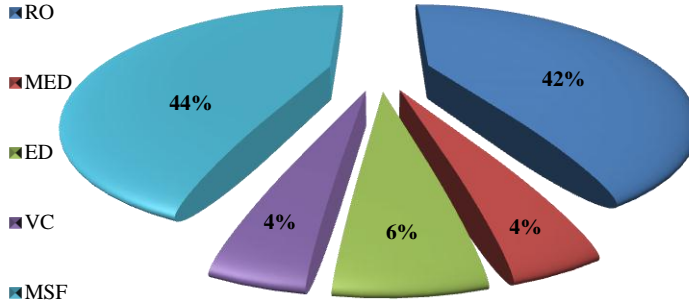
Günümüzde, tuzlu su çoğunlukla ters ozmos ve elektrodializ ile içme suyuna dönüştürülürken deniz suyu değişen termal prosesler kullanılarak veya ters ozmosla arıtılmaktadır. Çizelge 4.1'de tuzsuzlaştırma proseslerinin sınıflandırması, Çizelge 4.2'de ise farklı tuzsuzlaştırma proseslerinin verileri verilmiştir [4]. Buna göre;

MSF tesisleri diğer çeşitli tuzsuzlaştırma tesisleri ile karşılaştırıldığında dünya çapında en fazla tatlı su üreten tesisler arasındadır [59]. Ancak, RO enerjiden başka MSF gibi, termal prosesleri kapsayan diğer konvansiyonel tekniklerle karşılaştırıldığında daha az yer kaplayabilen ya da küçük ölçekli tesisleri inşa edilebilen, modülerlik, esneklik gibi bazı avantajlara sahiptir [24]. Ayrıca günümüzde RO membran prosesleri MSF ve MED gibi konvansiyonel termal proseslerden daha ekonomik olduğu kabul edilmektedir [32]. Ters ozmos (RO) tesislerinin tipik olarak enerji tüketimi Damıtma Tuzsuzlaştırma (DD)'sına bağlı tesisler için gereken enerjinin yaklaşık yarısı kadardır çünkü RO yönteminde, DD yönteminde olduğu gibi suyu ısıtmak ve buharlaştırmak için kullanılan termal enerjiye karşılık mekanik enerji kullanır [14]. RO, daha az korozyon ve daha düşük işletim sıcaklıkları sayesinde daha düşük işletim ve bakım maliyetlerinin olması avantajına sahiptir [15].

RO prosesi ile tuzsuzlaştırılmış suyun maliyetini besleme suyunun tuzluluğu, tesisin maliyeti, enerji gereksinimi, gereken kimyasal maddelerin miktarı ve membran yerleşimini kapsayan işletim ve bakım maliyeti önemli bir şekilde etkilemektedir [16, 33]. RO yöntemi tipik olarak DD yönteminden daha iyi geri kazanım oranına sahiptir. Genellikle DD yöntemleri üretim suyundan 8-10 kat daha fazla besleme suyu gerektirdiğinde RO üretim suyundan 2.5-3 kat arasında besleme suyu gerektirir [17]. Bu RO prosesi deşarj suyu tuzluluğunun DD yöntemlerinden daha yüksek olduğu anlamına gelmektedir. Bir karşılaştırma olarak, normal deniz suyunun toplam çözünmüş katı madde değeri 35000 mg/L iken üretilmiş tatlı su RO ile 500 mg/L'den az, MED, MSF, VC veya ED ile 10 mg/L'den daha az çözünmüş katı madde değerlerine ulaşabilmektedir [12].

Çizelge 4.1. Ticari Tuzsuzlaştırma Proseslerinin Tanıtımı [4]

Proses Grubu	Proses	Gereken Enerji Şekli
Damıtma Sıvı-Buhar	MSF	Isı
	MED	Isı
	VV yada MVC	Isı, mekanik enerji
Membran Prosesleri	Ters Ozmos	Mekanik Enerji
	Elektrodiyaliz	Elektrik enerjisi



Şekil 4.1. Dünyada Tuzsuzlaştırma Teknolojilerinin Dağılımı [5]

Şekil 4.1'de dünyada mevcut deniz suyu arıtma teknolojilerinin dağılımı gösterilmektedir. Şekil 4.1'de görüldüğü gibi, çok kademeli şok damıtma ve ters ozmos tesisleri toplam tesislerin %85'inden daha fazlasını oluşturmaktadır. Bu iki metod deniz suyundan büyük miktarlarla tatlı su üretebildikleri için en başarılı prosesler olarak tanımlanmaktadır [3, 42, 69]. Dünya çapındaki deniz suyu arıtma tesisleri arasında, membran prosesler ve termal prosesler yaklaşık olarak eşit bir dağılıma sahip olmasına rağmen yaygın eğilimler günümüzde membran proseslerin tercih edildiğini ve sonunda uygulamada baskın olacağını göstermektedir [3].

Çizelge 4.2. Proses Verileri [4]

	MSF	MED	TVC	MVC	RO	ED
İşletim Sıcaklığı (°C)	< 120	< 70	< 70	< 70	< 45	< 45
Enerji Şekli	Buhar	Buhar	Buhar	Mekanik (Elektrik)	Mekanik (Elektrik)	Elektrik
Elektrik enerji tüketimi (kWh/m ³)	3.5	1.5	1.5	8-14	4-7	1.0
Ham suyun tipik tuz içeriği (ppm TÇK)	30.000-100.000	30.000-100.000	30.000-100.000	30.000-50.000	1000-45.000	100-3000
Ürün suyu kalitesi (ppm TÇK)	< 10	< 10	< 10	< 10	< 500	< 500
Kapasite (m ³ /gün)	5000-60.000	500-12.000	100-20.000	10-2500	1-10.000	1-12.000

Çizelge 4.3'de ülkeler tarafından kullanılan deniz suyu arıtma kapasitesinin dağılımını verilmektedir. 1998'de 11 ülke küresel kapasitenin % 75'inden fazlasından oluşmaktaydı. Doğal olarak 11 ülkenin 6'sı Orta Doğu'da bulunmaktadır ve bu ülkelerde termal prosesler baskın olmaktadır. Bunun iki nedeni vardır: verimli enerji kaynakları ve modern RO prosesinin gelişiminden daha önce kullanılmaya başlanan termal proseslerin tuzsuzlaştırma üzerinde tarihsel güven sağlanmasıdır [3, 71]. Deniz suyu tuzsuzlaştırma tesislerinin büyük bir kısmını ki bu miktar toplamda deniz suyunun arıtımından elde edilen miktarın yaklaşık % 45'lik bölümü olan 11 milyon m³/gün'lük miktarını üreten tesisler Arap Körfezinde bulunmaktadır. Körfez bölgesindeki esas üreticiler dünya çapında tuzsuzlaştırma kapasitesinin % 26'sını oluşturan Birleşik Arap Emirlikleri, % 13'ü Kızıldeniz ve % 9'u körfez bölgesinden toplamda % 23'lük kapasiteyle Suudi Arabistan ve % 7'den daha az miktarlarda arıtım kapasitesiyle Kuveyt olmaktadır. Akdeniz'de, deniz suyundan toplam üretimi dünya çapında üretilen su miktarının % 17 lik bölümü ile yaklaşık 4.2 milyon m³/gün'dür. % 7'lik bir oranla İspanya bu bölgenin en büyük üreticisidir. Körfez bölgesinde MSF ve MED gibi termal prosesler % 90 oranında kullanılıyorken, İspanyada esas proses tüm tesislerin %95 ile ters ozmos'dur. Kızıldeniz'de 3.4 milyon m³/gün'lük kapasite ile tuzsuzlaştırma tesislerinin üçüncü en büyük konsantrasyonları bulunabilmektedir. Kaliforniya'da 2 milyon m³/gün'lük üretim kapasitesi ile oluşturulan 20 yeni projenin 2030 yılına kadar yapılması beklenmektedir [71]. Amerika, deniz suyu arıtımı kapasitesinde Suudi Arabistan'dan sonra ikinci sırada gelmektedir. Amerika'da tuzsuzlaştırmanın büyümesi geçen yıllar boyunca membran teknolojisine yakından bağlantılıdır. Membran proseslerinin kullanılmaya başlanmasıyla termal proseslerin aksine ekonomik bir şekilde artılamayan tuzlu su kaynaklarının arıtımı sağlamıştır [3, 71].

Çizelge 4.3. Ülkeler Tarafından Kurulmuş Tuzsuzlaştırma Kapasitesi [5]

Ülke	Toplam Kapasite (m ³ /gün)	Küresel üretimin %	MSF	MED	MVC	RO	ED
Suudi Arabistan	5.253.200	25.90	65.70	0.30	1.20	31.00	1.90
Amerika	3.092.500	15.20	1.70	1.80	4.50	78.00	11.40
Birleşmiş Arap Emirlikleri	2.164.500	10.70	89.80	0.40	3.00	6.50	0.20
Kuweyt	1.538.400	7.60	95.50	0.70	0.00	3.40	0.30
Japonya	745.300	3.70	4.70	2.00	0.00	86.40	6.80
Libya	683.300	3.40	67.70	0.90	1.80	19.61	9.80
Katar	566.900	2.80	94.40	0.60	3.30	0.00	0.00
İspanya	529.900	2.60	10.60	0.90	8.70	68.90	10.90
İtalya	518.700	2.60	43.20	1.90	15.10	20.41	19.20
Bahreyn	309.200	1.50	52.00	0.00	1.50	41.70	4.50
Umman	192.000	0.90	84.10	2.20	0.00	11.70	0.00
Toplam	15.594.500	76.90					

Deniz suyu arıtımı ülkelerin büyük bir bölümünde başarılı bir şekilde kullanılmıştır ve 2003'den sonra daha fazla tuzsuzlaştırma tesisi dünya civarında inşa edilmektedir [15]. Daha önceleri deniz suyu arıtımı için damıtma prosesleri önerilirken şimdi yeni tesislerin çoğu enerji verimliliği avantajı ve günde 95000 m³lük üretim kapasitesi sağlayan RO tuzsuzlaştırma yöntemini kullanmaktadır. Bununla birlikte, Suudi Arabistan gibi petrol zengini ülkeler hala konvansiyonel damıtma proseslerinden biri olan MSF yöntemini tercih etmektedir [12]. Ayrıca, farklı tuzsuzlaştırma proseslerinin örneğin damıtma ve ters ozmosun birleşimi de gelecek için kullanılabilir bir metot olabilmektedir [31].

Dolaylı güneşsel tuzsuzlaştırmadaki son gelişmeler hem membran hem de termal tuzsuzlaştırma teknolojilerinin termal enerji üzerindeki işletim, yüksek tuzluluk içeren suların

tuzsuzlaştırılabilmesi, asgari ön arıtma ve kirlenmeye dayanıklılık gibi avantajlarını birleştirdiği için membran distilasyonu prosesi üzerine odaklanmıştır.

MD prosesini MSF, RO ve MED prosesleri ile karşılaştırdığımızda, MSF ve MED proseslerinden daha düşük işletim sıcaklıkları ve buhar alanı gerektirmesi, RO'dan daha düşük işletme basıncı ile işletilmesi, teorik olarak %100 uçucu olmayan çözünmüş maddeleri geri çevirmesi ve verimliliği yüksek osmotik basınç ya da konsantrasyon polarizasyonu ile sınırlanmaması gibi bir çok avantaja sahiptir [54].

Ciddi su kıtlığıyla savaşılan Orta Doğu ülkeleri deniz suyu arıtma tesislerinin büyük bir kullanıcısı olarak dünyadaki deniz suyu arıtma kapasitesinin % 50'sinden fazlasını oluşturmaktadırlar. Orta Doğu ülkelerini Amerika % 19, Avrupa % 14, Asya % 12 ve Afrika % 6'lık paylarla takip etmektedir [5].

Tüm bu uygulamalar dışında, termal ve membran tuzsuzlaştırma proseslerini birleştiren hibrit tuzsuzlaştırma sistemlerinin iyi bir ekonomik alternatif olduğu düşünülmektedir. Hibrit konfigürasyonları işletimde kolaylık, rahatlık, esneklik, düşük enerji tüketimi, düşük inşaat maliyeti, yüksek tesis kullanılabilirliği, daha iyi güç ve uygun su ile karakterize edilmektedir [65, 66, 67, 68, 75, 76]. Son yıllarda, basit hibrit MSF/RO konfigürasyonu anlayışı var olan bir grup olarak ya da yeni konvansiyonel tuzsuzlaştırma tesislerini kapsamaktadır [76]. MSF ve RO proseslerinin bir araya getirilmesi dışında diğer proseslerinde çeşitli konfigürasyonları ile deniz suyu arıtımı yapmak mümkün olabilmektedir [84].

Al-Mutaz [18], RO ve MSF tuzsuzlaştırma proseslerinin karşılaştırmasını yapan bir çalışma yürütmüştür. Al-Mutaz düşük yakıt maliyetli bölgelerde MSF büyük ölçekli bir tesis için uygun olduğu sonucuna varmıştır. RO yönteminin ise orta büyüklükteki tesisler ya da yakıt maliyeti yüksek olan ülkelerde uygun olduğunu savunmuştur. Al-Mutaz da RO/MSF hibrit tesisleri düşük maliyetli artırılmış su üretimi potansiyeline sahip olduğunu bulmuştur [12, 75].

5. SONUÇ

Bolivya'nın girişimiyle 28 Temmuz 2010'da bir araya gelen Birleşmiş Milletler (BM) genel kurul üyeleri dünya çapında yüz milyonlarca kişinin zorlukla elde ettiği ya da hiç ulaşamadığı temiz içme suyunun “temel insan hakkı” olduğunu ilan etti. BM'nin “temiz suya ulaşımın ve sağlığın korunmasının temel insan hakkı olduğu”na ilişkin bağlayıcılığı bulunmayan kararı, 122 ülkenin desteğiyle yapılan oylamada kabul edildi. Karar metninde 884 milyon kişinin güvenli içme suyuna ulaşma, 2.6 milyarı aşkın kişinin de temel sağlık korumasından yoksun olduğu belirtildi.

“Yaşam hakkının tam olarak kullanılabilmesi için bir insan hakkı olarak güvenli ve temiz içme suyu ile sağlığın korunması hayati önemdedir” denilen kararda, uluslararası topluma hitaben şöyle denildi: “Herkes için güvenli, temiz, erişilebilir, ulaşılabilir su ve sağlık koruması için çabalar artırılmalı”. BM verilerine göre, her yıl 5 yaşın altındaki yaklaşık 1.5 milyon çocuk, su ve sağlık koşulları bağlantılı hastalıklardan ölüyor. Temel bir insan hakkı olan ve tüketicilerin en temel gereksinmesi olan suyun sağlıklı, yeterli bir şekilde sağlanması sosyal devletin en başta gelen görevidir.

“Bu bağlamda 50 yıldan daha uzun bir süredir büyük ölçekte uygulanan deniz suyu arıtma teknolojileri su temini amacıyla ön plana çıkmaktadır. Günümüze kadar gerçekleştirilmiş gelişmeler ve başlıca teknolojiler dikkat çekecek şekilde verimli, güvenilir ve ucuz bulunmuştur. Ancak içme suyu ihtiyacının son 20 yıl içinde artacağı göz önüne alındığında daha ucuz, basit, kuvvetli, güvenli ve eğer mümkünse, daha az enerji tüketen ve daha fazla çevre dostu olan arıtım tekniklerinin kullanımının artırılması düşüncesi ortaya çıkmaktadır.

REFERENCES / KAYNAKLAR

- [1] Wang Y., Composite Fouling of Calcium Sulfate and Calcium Carbonate in a Dynamic Seawater Reverse Osmosis Unit, Master of Science, The University of New South Wales, Sydney, Australia, 2005.
- [2] Lacoursière S., Water Purification by Membrane Distillation, Master of Science, Department of Chemical Engineering, McGill University, Montreal, Canada, 1994.
- [3] Miller J. E., Review of Water Resources and Desalination Technologies, Sand Report, Materials Chemistry Department, Sandia National Laboratories, 2003.
- [4] Vishwanathappa M. D., Desalination of Seawater Using a High-Efficiency Jet Ejector, Master of Science, Chemical Engineering, Texas A&M University, 2005.
- [5] Tsiourti N.X., Desalination and The Environment, *Desalination*, 2001, 141, 223-236.
- [6] Bhatt J.J., *Oceanography Exploring the Planet Ocean*, 1978.
- [7] Samsunlu A., *Deniz Kirliliği Ve Kontrolü*, İ.T.Ü., 1995.
- [8] Öztürk İ., *Atık Su Ön Arıtma Ve Deniz Deşarj Sistemleri*, İ.T.Ü., Çevre Teknolojisi Anabilim Dalı, İnşaat Fakültesi, 1996.
- [9] Ünsal İ., *Oseanografi*, İ.T.Ü., İnşaat Fakültesi, 1984.
- [10] Artüz İ., *Oseanografi Ders Notları*, İstanbul Teknik Üniversitesi Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, 1990.
- [11] El-Nashar, A.M. and Qmhiyeh, A.A., Simulation of the Steady-State Operation of a Multi-Effect Stack Seawater Distillation Plant, *Desalination*, 1995, Vol. 101, pp 231-243.
- [12] Udono K., Modelling Seawater Desalination with Waste Incineration Energy Using Dynamic Systems Approach, Degree of Doctor of Philosophy, Faculty of Engineering and Information Technology, Griffith University, Queensland, Australia, 2005.
- [13] Murakami M., *Managing Water For Peace in the Middle East: Alternative Strategies*, University Press, October, 1995.
- [14] Malek A, Hawlader M. N. A. and Ho J. C., Design and Economics of RO Seawater Desalination, *Desalination*, 1996, Vol. 105, pp 245-261.
- [15] Schiffer M., Perspectives and Challenges for Desalination in the 21 st Century, *Desalination*, 2004, Vol.165, pp 1-9.
- [16] Will M. and Klinko K., Optimization of Seawater RO Systems Design, *Desalination*, 2001, Vol.138, pp 299-306.
- [17] Morton A.J, Callister I.K. and Wade N.M., Environmental Impacts of Seawater Distillation And Reverse Osmosis Processes, *Desalination*, 1996, Vol.108, pp 1-10.
- [18] Al-Mutaz I.S., A Comparative Study of RO and MSF Desalination Plants, *Desalination*, 1996, Vol.106, pp 99-106.
- [19] Sulaiman Al-Obaidani^{a,b,*}, Efrem Curcio^{b,c}, Francesca Macedonio^b, Gianluca Di Profio^b, Hilal Al-Hinai^d and Enrico Drioli^{b,c}, Potential of Membrane Distillation in Seawater Desalination: Thermal Efficiency, Sensitivity Study and Cost Estimation, *Journal of Membran Science*, 2008, Vol.323, pp 85-98.
- [20] Asmerom M.Gilau[†], Mitchell J. Small¹, Designing Cost-Effective Seawater Reverse Osmosis System Under Optimal Energy Options, *Renewable Energy*, 2008, Vol.33, pp 617-630.
- [21] T.A. Vetter^{a,1}, E.M. Perdue^b, E. Ingall^b, J.F. Koprivnjak^b, P.H.Pfromm^{a,*}, Combining Reverse Osmosis and Electrodialysis for More Complete Recovery of Dissolved Organic Matter From Seawater, *Separation and Purification Technology*, 2007, Vol.56, pp 383-387.
- [22] Cyril Jacob, Seawater desalination: Boron removal by ion exchange technology, *Desalination*, 2007, Vol.205, pp 47-52.

- [23] Francesca Macedonio^a, Efrem Curcio^{a,b}, Enrico Drioli^{a,b,*}, Integrated Membrane Systems for Seawater Desalination: Energetic and Exergetic Analysis, Economic Evaluation, Experimental Study, Desalination, 2007, Vol.203, pp 260-276.
- [24] João Abel G.C.R. Pais, Licínio Manuel G.A.Ferreira^{*}, Performance Study of an Industrial RO Plant for Seawater Desalination, Desalination, 2007, Vol.208, pp 269-276.
- [25] Erineos Koutsakos^{*}, David Moxey, Membrane Management System, Desalination, 2007, Vol.203, pp 307-311.
- [26] S.Al-Kharabsheh, An Innovative Reverse Osmosis Desalination System Using Hydrostatic Pressure, Desalination, 2006, Vol.196, pp 210-214.
- [27] Laura J.Banasiak^a, Thomas W.Kruttchnitt^b, Andrea I.Schäfer^{c*}, Desalination using electrodialysis as a function of voltage and salt concentration, desalination, 2007, Vol.205, pp 38-46.
- [28] Mohtada Sadrzadeh, Toraj Mohammadi^{*}, Sea Water Desalination Using Electrodialysis, Desalination, 2008, Vol.221, 440-447.
- [29] Mostafa H. Sharqawy^{a,b}, John H. Lienhard V^{a,*}, Syed M. Zubair^b, On Exergy Calculations of Seawater with Applications in Desalination Systems, International Journal of Thermal Sciences, 2011, Vol.50, 187-196.
- [30] Jia Xu^{a*}, Chia-Yuan Chang^b, Congjie Gao^a, Performance of a Ceramic Ultrafiltration Membrane System in Pretreatment to Seawater Desalination, Separation and Purification Technology, 2010, Vol.75, 165-173.
- [31] Runya Deng^{a,b}, Lixin Xie^{c,*}, Hu Lin^{a,b}, Jie Liu^c, Wei Han^a, Integration of Thermal Energy and Seawater Desalination, Energy, 2010, Vol.35, 4368–4374.
- [32] Youngbeom Yu, Sangyoun Lee, Seungkwon Hong^{*}, Effect of Solution Chemistry on Organic Fouling of Reverse Osmosis Membranes in Seawater Desalination, Journal of Membrane Science, 2010, Vol.351, pp 205-213.
- [33] Baltasar Peñate^{a,*}, Fernando Castellano^a, Alejandro Bello^a, Lourdes García-Rodríguez^{b,1}, Assessment of a stand-alone gradual capacity reverse osmosis desalination plant to adapt to wind power availability: A case study, Energy, 2011, Vol.36, pp 4372-4384.
- [34] Lauren F. Greenlee^a, Desmond F. Lawler^b, Benny D. Freeman^a, Benoit Marrot^c, Philippe Moulin^{c,*}, Reverse Osmosis Desalination: Water Sources, Technology, and Today's Challenges, Water Research , 2009, Vol.43, 2317-2348.
- [35] S.A. Abdul-Wahab^{*}, J. Abdo, Optimization of Multistage Flash Desalination Process by Using a Two-Level Factorial Design, Applied Thermal Engineering, 2007, Vol. 27, pp. 413–421.
- [36] Muhammad TauhaAli^{*}, Hassan E.S.Fath,Peter R.Armstrong, A Comprehensive Techno-Economical Review of Indirect Solar Desalination, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, Vol.15, 4187-4199.
- [37] M.C. Duke^{*}, S. Mee, J.C. Diniz da Costa, Performance of porous inorganic membranes in non-osmotic desalination, Water Research, 2007, Vol.41, pp. 3998-4004.
- [38] Kah Peng Lee, Tom C. Arnot, Davide Mattia^{*},A Review of Reverse Osmosis Membrane Materials for Desalination - Development to Date and Future Potential, Journal of Membrane Science, 2011, Vol.370, pp.1-22.
- [39] Jinwook Lee^a, Byung Soo Oh^b, Sungyoun Kim^a, Sung-Jo Kim^a, Soon Kang Hong^c, In S. Kim^{a,b,*}, Fate of Bacillus sp. and Pseudomonas sp. Isolated from Seawater During Chlorination and Microfiltration as Pretreatments of a Desalination Plant, Journal of Membrane Science, 2010, Vol. 349, pp. 208-216.
- [40] Sabeur Khemakhem^{*}, Raja Ben Amar, Modification of Tunisian Clay Membrane Surface by Silane Grafting: Application for Desalination with Air Gap Membrane Distillation Process, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2011, Vol.387, pp.79-85.

- [41] Dror Drami^{a,b}, Yosef Z. Yacobi^c, Noga Stambler^d, Nurit Kress^{a,*}, Seawater Quality and Microbial Communities at a Desalination Plant Marine Outfall. A Field Study at the Israeli Mediterranean Coast, *Water Research*, 2011, Vol.45, pp.5449-5462.
- [42] Churl Hee Cho^{*}, Ka Yeon Oh, Si Kyung Kim, Jeong Gu Yeo, Pankaj Sharma, Pervaporative Seawater Desalination using NaA Zeolite Membrane: Mechanisms of High Water Flux and High Salt Rejection, *Journal of Membrane Science*, 2011, Vol.371, pp. 226-238.
- [43] K. Sampathkumar^{a,*}, T.V. Arjunan^b, P. Pitchandi^a, P. Senthilkumar^c, Active Solar Distillation - A Detailed Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, Vol.14, pp. 1503-1526.
- [44] Sanchuan Yu^{a,*}, Meihong Liu^a, Xuesong Liu^a, Congjie Gao^b, Performance Enhancement in Interfacially Synthesized Thin-Film Composite Polyamide-Urethane Reverse Osmosis Membrane for Seawater Desalination, *Journal of Membrane Science*, 2009, Vol.342, pp. 313-320.
- [45] Liming Song^{a,1}, Zidu Ma^b, Xiaohong Liao^b, Praveen B. Kosaraju^{a,2}, James R. Irish^b, Kamallesh K. Sirkar^{a,*}, Pilot Plant Studies of Novel Membranes and Devices for Direct Contact Membrane Distillation-Based Desalination, *Journal of Membrane Science*, 2008, Vol. 323, pp. 257-270.
- [46] Hyunku Joo^a, SanghyunBae^b, ChunghwanKim^c, SuhanKim^c, JaekyungYoon^a, Hydrogen Evolution in Enzymatic Photoelectrochemical Cell Using Modified Seawater Electrolytes Produced by Membrane Desalination Process, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2009, Vol.93, pp. 1555-1561.
- [47] D. Winter^{*}, J. Koschikowski, M. Wieghaus, Desalination Using Membrane Distillation: Experimental Studies on Full Scale Spiral Wound Modules, *Journal of Membrane Science*, 2011, Vol. 375, pp. 104-112.
- [48] Maryam Ahmadzadeh Tofighy, Yaser Shirazi, Toraj Mohammadi^{*}, Afshin Pak, Salty Water Desalination Using Carbon Nanotubes Membrane, *Chemical Engineering Journal*, 2011, Vol. 168, pp. 1064-1072.
- [49] Hui-Ling Yang, Justin Chun-Te Lin, Chihpin Huang^{*}, Application of Nanosilver Surface Modification to RO Membrane and Spacer for Mitigating Biofouling in Seawater Desalination, *Water Research*, 2009, Vol.43, pp. 3777-3786.
- [50] Yun Ye, Lee Nuang Sim, Bram Herulah, Vicki Chen^{*}, A.G. Fane, Effects of Operating Conditions on Submerged Hollow Fibre Membrane Systems Used as Pre-Treatment for Seawater Reverse Osmosis, *Journal of Membrane Science*, 2010, Vol.365, pp. 78-88.
- [51] Sheida Khajavi^{*}, Jacobus C. Jansen, Freek Kapteijn, Production of Ultra Pure Water by Desalination of Seawater Using a Hydroxy Sodalite Membrane, *Journal of Membrane Science*, 2010, Vol.356, pp. 52-57.
- [52] Jean-Pierre Mericq^a, Stéphanie Laborie^{b,*}, Corinne Cabassud^c, Evaluation of Systems Coupling Vacuum Membrane Distillation and Solar Energy for Seawater Desalination, *Chemical Engineering Journal*, 2011, Vol.166, pp. 596-606.
- [53] Mahmood. I.M. Shatat, K. Mahkamov^{*}, Determination of Rational Design Parameters of a Multi-Stage Solar Water Desalination Still Using Transient Mathematical Modelling, *Renewable Energy*, 2010, Vol. 35, pp. 52-61.
- [54] Sulaiman Al-Obaidani^{a,b,*}, Efrem Curcio^{b,c}, Francesca Macedonio^b, Gianluca Di Profio^b, Hilal Al-Hinai^d, Enrico Drioli^{b,c}, Potential of Membrane Distillation in Seawater Desalination: Thermal Efficiency, Sensitivity Study and Cost Estimation, *Journal of Membrane Science*, 2008, Vol. 323, pp. 85-98.
- [55] Majed M. Alhazmy^{*}, Multi Stage Flash Desalination Plant with Brinefeed Mixing and Cooling, *Energy*, 2011, Vol.36, pp. 5225-5232.

- [56] Chatkaew Tansakul^{a,b,c}, Ste'phanie Laborie^{a,b,c,*}, Corinne Cabassud^{a,b,c}, Adsorption Combined with Ultrafiltration to Remove Organic Matter from Seawater, *Water Research*, 2011, pp. 1-9.
- [57] James K. Edzwald^{a,*}, Johannes Haarhoff^b, Seawater Pretreatment for Reverse Osmosis: Chemistry, Contaminants, and Coagulation, *Water Research*, 2011, Vol.45, pp. 5428-5440.
- [58] H.K. Shon^a, S. Vigneswaran^{a,*}, J. Cho^b, Comparison of Physico-Chemical Pretreatment Methods to Seawater Reverse Osmosis: Detailed Analyses of Molecular Weight Distribution of Organic Matter in Initial Stage, *Journal of Membrane Science*, 2008, Vol.320, pp. 151-158.
- [59] E.A.M. Hawaidi, I.M. Mujtaba^{*}, Simulation and Optimization of MSF Desalination Process for Fixed Freshwater Demand: Impact Of Brine Heater Fouling, *Chemical Engineering Journal*, 2010, Vol.165, pp. 545-553.
- [60] Claudio O. Ayala^a, Lidia Roca^{b,1}, Jose Luis Guzman^{c,*}, Julio E. Normey-Rico^{d,2}, Manolo Berenguel^c, Luis Yebra^b, Local Model Predictive Controller in a Solar Desalination Plant Collector Field, *Renewable Energy*, 2011, Vol.36, pp. 3001-3012.
- [61] N. Ghaffour^{a,b,*}, V.K. Reddy^a, M. Abu-Arabi^{a,c}, Technology Development and Application of Solar Energy in Desalination: MEDRC Contribution, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011.
- [62] A. Safwat Nafey^{a,*}, M.A. Mohamad^b, S.O. El-Helaby^a, M.A. Sharaf^a, Theoretical and Experimental Study of a Small Unit for Solar Desalination Using Flashing Process, *Energy Conversion and Management*, 2007, Vol. 48, pp. 528–538.
- [63] Walter Den^{*}, Chia-Jung Wang, Removal of Silica from Brackish Water by Electrocoagulation Pretreatment to Prevent Fouling of Reverse Osmosis Membranes, *Separation and Purification Technology*, 2008, Vol. 59, pp. 318–325.
- [64] Xiaosheng Ji^a, Efrem Curcio^{a,b,*}, Sulaiman Al Obaidani^c, Gianluca Di Profio^{a,b}, Enrica Fontananova^{a,b}, Enrico Drioli^{a,b}, Membrane Distillation-Crystallization of Seawater Reverse Osmosis Brines, *Separation and Purification Technology*, 2010, Vol.71, pp. 76–82.
- [65] Sudipta Sarkar, Arup K. SenGupta^{*}, A New Hybrid Ion Exchange-Nanofiltration (HIX-NF) Separation Process for Energy-Efficient Desalination: Process Concept and Laboratory Evaluation, *Journal of Membrane Science*, 2008, Vol. 324, pp. 76-84.
- [66] Ali Al-Karaghoul^{*}, David Renne, Lawrence L. Kazmerski, Technical and Economic Assessment of Photovoltaic-Driven Desalination Systems, *Renewable Energy*, 2010, Vol. 35, pp. 323–328.
- [67] Driss Zejli^{a,*}, Ahmed Ouammi^{a,b}, Roberto Sacile^b, Hanane Dagdougui^{b,c}, Azzeddine Elmidaoui^d, An Optimization Model for a Mechanical Vapor Compression Desalination Plant Driven by a Wind/PV Hybrid System, *Applied Energy*, 2011, Vol.88, pp. 4042-4054.
- [68] Gur Mittelman, Abraham Kribus^{*,1}, Ornit Mouchtar, Abraham Dayan, Water Desalination with Concentrating Photovoltaic/Thermal (CPVT) Systems, *Solar Energy*, 2009, Vol.83, pp.1322–1334.
- [69] Akili D.Khawaji^{a,*}, Ibrahim K.Kutubkhanah^a, Jong-Mihn Wie^b, Advances in Seawater Desalination Technologies, *Desalination*, 2008, Vol.221, pp. 47-69.
- [70] Lin Zhang, Lin Xie, Huan-Lin Chen^{*}, Chong-Jie Gao, Progres and Prospects of Desalination in China, *Desalination*, 2005, Vol. 182, pp. 13-18.
- [71] Sabine Lattemann, Thomas Höpner, Enviromental Impact and Impact Assessment of Seawater Desalination, *Desalination*, 2008, Vol.220, pp.1-15.
- [72] Ioannis C.Karagiannis^{*}, Petros G. Soldatos, Water Desalination Cost Literature: Review and Assessment, *Desalination*, 2008, Vol. 223, pp. 448-456.

- [73] P. Glueckstern, M. Priel^{*}, E.Gelman, N.Perlov, Wasterwater Desaliantion in Israil, *Desalination*, 2008, Vol. 222, pp. 151-164.
- [74] Wei Ma^{a,b,*}, Yaqian Zhao^b, Lu Wang^a, The Pretreatment with Enhanced Coagulation and a UF Membrane for Seawater Desalination with Reverse Osmosis, *Desalination*, 2007, Vol. 203, pp. 256-259.
- [75] E. Cardona^{*}, A.Piacentino, F.Marchese, Performance Evaluation of CHP Hybrid Seawater Desalination Plants, *Desalination*, 2007, Vol. 205, pp. 1-14.
- [76] Osman A.Hamed, Overview of hybrid desalination systems-current status and future prospects, *Desalination*, 2005, Vol.186, pp. 207-214.
- [77] Leila Souari^{*}, Mohamed Hassairi, Sea Water Desalination by Reverse Osmosis: the True Needs for Energy, *Desalination*, 2007, Vol.206, pp. 465-473.
- [78] Véronique Bonnel^{ye*}, Miguel Angel Sanz, Jean-Pierre Durand, Ludovic Plasse, Frédéric Gueguen, Pierre Mazounie, Reverse Osmosis on Open Intake Seawater: Pre-treatment Strategy, *Desalination*, 2004, Vol.167, pp. 191-200.
- [79] Demet Akgul^a, Mehmet Çakmakç**ı^b, Necati Kayaalp^c, Ismail Koyuncu^{c,*}, Cost Analysis of Seawater Desalination with Reverse Osmosis in Turkey, *Desalination*, 2008, Vol.220, pp. 123-131.**
- [80] Mark Wilf^{*}, Kenneth Klinko, Optimization of Seawater RO Systems Design, *Desalination*, 2001, Vol. 138, pp. 299-306.
- [81] V. Bonnélye^{a,*}, L.Guey^a, J.Del Castillo^b, UF/MF as RO Pre-treatment: the Real Benefit, *Desalination*, 2008, Vol. 222, pp. 59-65.
- [82] M.Abou Rayan^{a,*}, I.Khaled^b, Seawater Desalination by Reverse Osmosis (case study), *Desalination*, 2002, Vol.153, pp. 245-251.
- [83] E.G.Darton^{a,*}, E.Buckley^b, Thirteen Years' Experiences Treating, a Seawater RO Plant, *Desalination*, 2001, Vol. 134, pp. 55-62.
- [84] Francesca Macedonio^{*}, Gianluca Di Profio, Efrem Curcio, Enrico Drioli, Integrated Membrane Systems for Seawater Desalination, 2006, Vol. 200, pp. 612-614.
- [85] A.A.Merdaw^{*}, A.O.Sharif, G.A.W. Derwish, Water Permeability in Polymeric Membranes, Part I, *Desalination*, 2010, Vol. 260, pp. 180-192.