


ARTAN SU İHTİYACI İÇİN DENİZ SUYU KULLANIMI VE ARITMA TEKNOLOJİLERİ

Ayben Polat Bulut

Cumhuriyet Üniversitesi, Mimarlık Güzel Sanatlar ve Tasarım Fakültesi, Şehir ve Bölge Planlama Bölümü, Sivas, Türkiye

**Corresponding Author:
Aybenpolat@cumhuriyet.edu.tr*

(Received 28th April 2021; accepted 07th September 2021)

 ORCID 0000-0003-0151-8680

ÖZET

Yeryüzünün yarıdan fazlasını suların oluşturmasına rağmen bu suların %90' ından fazlası kullanıma uygun değildir. Tüm canlılar için hayati öneme sahip olan su; hızlı nüfus artışı, hızlı kentleşme ve sanayileşme gibi sebeplerden dolayı her geçen gün daha da tükenmektedir. Kullanılabilir su kaynaklarının hızla tükenmesi alternatif su kaynaklarının arayışına yol açmıştır ve son yıllarda özellikle de su kıtlığı yaşayan ülkelerde deniz suyunun arıtılarak kullanımı gündeme gelmiştir. Ancak, deniz suyunun en temel problemi yüksek oranda tuz derişimine sahip olmasıdır. Bu nedenle deniz suyundan kullanıma eldesi için çeşitli tuz giderme (desalinasyon) teknolojileri kullanılmaktadır. Bu çalışmada termal olarak aktifleştirilmiş sistemler, basınç uygulayan sistemler ve diğer aktifleştirilmiş tuz giderme yöntemleri olarak desalinasyon teknolojileri 3 grupta toplanmış ve her bir teknoloji ayrı ayrı ele alınarak değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Arıtma, Deniz suyu, Desalinasyon, İçme suyu, Tuzluluk*

SEAWATER USAGE AND TREATMENT TECHNOLOGIES FOR INCREASING WATER NEED

ABSTRACT

Although more than half of the earth's surface is covered with water, more than 90% of this water is not suitable for daily use. The water resources, which are vital for all living things, are running out every day due to reasons such as rapid population growth, rapid urbanization, and industrialization. The rapid depletion of usable water resources has led to the search for alternative water resources; therefore, the treatment of sea water has come to the agenda, especially in countries suffering from water scarcity in recent years. However, the main problem of sea water is that it has a high salt concentration. For this reason, various desalination technologies are used to obtain usable water from sea water. In this study, desalination technologies were classified into three groups as thermally activated systems, pressure applying systems and other activated desalination methods; each technology was evaluated separately.

Keywords: *Treatment, Seawater, Desalination, Drinking water, Salinity*

GİRİŞ

Su alternatifi olmayan, yaşam için vazgeçilmez bir kaynaktır [1]; [2]. Dünyanın % 70' ini suların kaplamasına rağmen suyun % 90' ından fazlası tuzlu sudur ve içmek için uygun değildir [1]. Yeryüzündeki suların sadece % 0.5' ini tatlı sular oluştururken % 97' si deniz

suyundan oluşmaktadır [3]. Artan nüfus ve ekonomik büyüme, kentleşme, sanayileşme ve iklim değişikliği, akiferlerden yoğun su çekimi gibi faktörlerden dolayı su kıt bir kaynak haline gelmiştir [4]; [5]; [6] ve yeni temiz su kaynakları arayışı ortaya çıkmıştır [4]. İçme suyu güvenliği artan kentleşme ve endüstrileşmeyle birlikte daha da ciddi kaygılar oluşturmaktadır [7]. Küresel ekonominin büyümesiyle birlikte tatlı su krizi çok ciddi bir problem olmuştur [8] ve çok yakında dünyanın her yerinde su krizleri olacaktır [9]. Klasik su kaynaklarının noksanlığından dolayı deniz suyu ve tuzlu su kaynakları gibi alışılmışın dışındaki su kaynaklarının kullanımı günümüzde ve gelecekte hedeflenmektedir [10]. Deniz suyunun tuzdan arındırılması, özellikle kişi başına düşen su kaynakları dünyadaki ortalama miktarın çok altında olan ülkelerde durumu hafifletmek için kullanılan yöntemlerden biri gibi düşünülmektedir [8].

Dünya nüfusunun yaklaşık % 41' i kurak bölgelerde yaşamaktadır ve bu nedenle tatlı su temini dünya çapında bir problem olmuştur [3]. Tuz giderme su kıtlığı olan bir çok bölgede tatlı su kaynağı yaratmak için giderek yaygınlaşan bir çözümdür [11]. Deniz suyu desalinasyonu körfez ülkeleri, İspanya ve Çin gibi bir çok ülkede tatlı su kaynağının güvenliğini sağlamak için önemli bir yol haline gelmiştir [3]. Özellikle sahil bölgelerinde tuzdan arındırılan deniz suyu giderek önem kazanan bir içme suyu kaynağı olmaktadır [12].

Deniz suyunun tuzdan arındırmak için üç grup desalinasyon teknolojisi bulunmaktadır: i) termal olarak aktifleştirilmiş sistemler, ii) basınç uygulayan sistemler ve iii) diğer aktifleştirilmiş tuzdan arındırma yöntemleri. Termal olarak aktifleştirilmiş sistemler çok kademeli şok damıtma (multi-stage flash distillation, MSF), çok işlemlili damıtma (multiple-effect distillation, MED), buhar sıkıştırımalı damıtma (VC), solar distilasyon, nemlendirme-nem alma ve dondurma yöntemlerini içermektedir. Basınç uygulayan sistemler ters osmoz (RO), ileri osmoz (FO), elektrodializ (ED) ve nanofiltrasyonu (NF) içermektedir. Diğer aktifleştirilmiş tuzdan arındırma yöntemleri ise adsorpsiyon, iyon değişimi ve çözücü ekstraksiyonu yöntemlerini içermektedir.

Küresel ölçekte, 125' ten fazla ülkede günlük toplam 40 milyon m³ su kapasiteli yaklaşık 16000 desalinasyon tesisi işletilmektedir. Deniz suyu desalinasyon kapasitesinin % 80' i yaklaşık 100 milyon insana içme suyu sağlamak için kullanılmaktadır [14].

DENİZ SUYU ÖZELLİKLERİ VE BİLEŞİMİ

Deniz suyu, çoğunlukla iyon formunda bulunan 80' den fazla bilinen kimyasal element içeren karmaşık bileşenlere sahip bir tür sıvıdır. Deniz suyunun yoğunlaşma ve kristalleşme işlemleri sırasında Çizelge 1' de verilen 11 bileşenin içeriği 1 ppm' i aştığında iyonlar tuz olarak çöker. Bu bileşenler, toplam tuzluluğun %99.58' ini oluşturan deniz suyunun majör elementlerdir. Ayrıca, deniz suyu birçok çözünmüş gaz da bulunmaktadır ve en bol olanları CO₂, N₂ ve O₂' dir (Çizelge 2). Desalinasyonun işletimi ile doğrudan ilişkili faktörler askıda katılar, çözünmüş gazlar ve pH değeridir. Deniz suyunun fizikokimyasal özellikleri desalinasyon ünitesinin tasarımı, hesabı ve işletim süreçleri bakımından önemli parametrelerdir. Deniz suyunun kimyasal özellikler Çizelge 3' te, fiziksel özellikleri ise Çizelge 4' te görülmektedir [15].

Çizelge 1. Deniz suyunun içerdiği temel elementler [15]

Elementler	Cl	Na	Mg	S	Ca	K	Br	Sr	B	Si	F
Varolduğu Form	Cl ⁻	Na ⁺	Mg ²⁺	(SO ₄) ²⁻	Ca ²⁺	K ⁺	Br ⁻	Sr ²⁺	B(OH) ₃	Si(OH) ₄	F ⁻
Derişimi, ppm	19,000	10,500	1350	885	400	380	65	8.0	4.6	3.0	1.3

Çizelge 2. Deniz suyunun çözünmüş gaz içeriği [15]

Gazlar	CO ₂	N ₂	O ₂	Ar
Derişim (ppm)	102.5	12.82	8.05	0.479

Çizelge 3. Deniz suyunun genel kimyasal özellikleri [15]

pH	Klor oranı (‰)	Tuzluluk (‰)	Toplam tuz derişimi (‰)
7.5-8.4	~19.38	~34.85	~35.07

Çizelge 4. Deniz suyunun genel fiziksel özellikleri (25 °C sıcaklık ve 1atm basınç altında) [15]

Yoğunluk (kg/m ³)	Spesifik sıcaklık (kJ/kg °C)	Buharlaştırma ısı (kJ/kg)	Donma Noktası (°C)	Kaynama noktası (°C)	Buhar basıncı (Pa)	Osmotik basınç (Pa)	Dinamik viskozite (kg/ms)
1023.4	3.90	2436.3	-1.91	100.56	0.9812p ₀	-0.084T	0.96x10 ⁻³

Deniz suyunun tuzluluğu 33 ppt ve 38 ppt aralığındadır [16]. Deniz suyu başlıca Na⁻, Ca⁺⁺, K⁺, Mg⁺⁺, (SO₄)⁻ ve Cl⁻ içermektedir. Doğada bulunan diğer bütün iyonlarda deniz suyunda bulunmaktadır ancak çok daha düşük derişimlerde. Açık denizin kimyasal bileşimi sabittir ancak çözünmüş katıların toplam çözünmüş miktarı yerel koşullara bağlı olarak değişir. Ayrıca deniz suyunda çözünmüş iyonlarda bulunmaktadır. Deniz suyu kum, kil, mikroorganizma, virüs ve koloidal madde içeren askıda maddelerde ihtiva etmektedir. Bu bileşenlerin boyutları 5x10⁻² -0.15 µm aralığındadır [17].

DENİZ SUYUNDAN TUZ GİDERME YÖNTEMLERİ

Üç çeşit tuz giderme teknolojisi kullanılmaktadır. Bunlar; termal olarak aktifleştirilmiş sistemler, basınç uygulayan sistemler ve kimyasal olarak aktifleştirilmiş tuzdan arındırma yöntemleridir [13].

Termal Olarak Aktifleştirilmiş Sistemler

Bu sistemlerde deniz suyunu kaynatmak ya da dondurmak için ısı transferi kullanılır ya da tuzlu su buhar veya buza dönüştürülerek tuzlar sudan ayrılır [13].

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

MSF termal bir tuz giderme sürecidir [18]. 20. yüzyılın sonlarına kadar dünya üretim kapasitesinin % 60' ına yakın bir oranına sahip olan MSF tuz giderme endüstrisi için başlıca süreç olmuştur. 21. Yüzyılın ilk yarısında da dünya çapında büyük bir orana sahip olmaya devam etmiştir [19].

Çok kademeli şok damıtma (MSF) süreci şok (ani, hızlı) buharlaştırma ilkesine dayanır [20]. MSF süreci aşama adı verilen bir dizi öğeden oluşur. Her bir aşamada deniz suyunun ön ısınımlı için yoğuşma buharı kullanılır. Bu sistemin işletimi tesiste basınç gradyanları

gerektirir. Mevcut tesisler 10-30 aşamalı olarak tasarlanmıştır (her aşamada sıcaklık 2 °C düşer) [21]. Tuzlu su ısıtıcısı ve ısı geri kazanımı adı verilen iki bölümden oluşur. Tuzlu su devridaim ünitesinde “ısı çıkışı bölümü” adı verilen ekstra bir bölüm bulunur. Gerçek bir deniz suyu MSF tesisi, 19–30 ısı geri kazanım aşamalarından ve 2–3 ısı reddetme aşamalarından oluşabilir [18].

MSF sürecinde sıcaklığı artırmak yerine basınç düşürülerek deniz suyu buharlaştırılır [20]. Eğer su 100 °C ya da daha yüksek sıcaklıkta ısıtılırsa ve buhar salınana kadar basınç altında tutulursa su şoklanır. Temel prensibi düşük basınçta birden fazla kademenin ardışık olarak bağlanmasıdır. Bu süreçte bir çok aşamada buharlaşma ve yoğunlaşma yapılır, ve böylece verim artar. Sisteme gelen deniz suyu giderek artan sıcaklıklarda su buharının yoğunlaştığı dıştaki ısı eşanjörü borularından geçirilir. Son olarak, prosese enerji sağlamak için akım harici bir kaynaktan tuzlu su ısıtıcısına geçirilir ve deniz suyu maksimum proses sıcaklığına ısıtılır. Deniz suyu daha sonra basıncın azaldığı evaporatöre geçer ve kaynama gerçekleşir. Bu işlem birçok aşamada tekrarlanır, basınç kademeli olarak düşürülür, böylece şoklama daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşir. Yoğunlaşan buhar artık damıtılmış sudur [22].

Düşük sıcaklıklı ısı kaynağı kullanılabilir [19] ve MSF prosesinde ekipman yapımı basittir [19]; [15]. Bunlar MSF sürecini diğer tuz giderme süreçlerinden ayıran MSF’ ye özgü özelliklerdir. MSF’ nin kurulum aşamasında az sayıda bağlantı tüpü kullanılmaktadır. Bu durum sızıntı sorunlarını sınırlar ve bakım işlemlerini kolaylaştırır. Buharlaşma ve yoğunlaşma birçok aşamada yapılır ve böylece verimlilik artar [19]. MSF işletim kolaylığı, performans özellikleri, sistem kontrolü ve kapasite açısından en yaygın kullanılan tuz giderme sürecidir. MSF’ nin dezavantajı farklı aşamalarda hassas basınç gerektirir ve bu nedenle geçici bir süre tesisin normal işletim periyodunu kurmak gereklidir [21].

MSF’ nin temel özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir [23].

- Yüksek güvenilirlik
- Çok sınırlı ölçeklendirme nedeniyle ön arıtma ihtiyacı yok, basit filtrasyon
- Yüksek yatırım maliyeti
- Yüksek kalitede tatlı su üretimi, 50 ppm’ in altında tuz derişimi
- Düşük çalışma esnekliği
- Düşük sıcaklıkta ısı kaynağı kullanılabilir.
- Ekipman kurulumu basittir.
- İşletimde deneyim fazladır.
- Bakımı basittir.

MSF tesisleri performansının yüksek olmamasına ve toplam tuzdan arındırma kapasitesinin % 40-45 olmasına rağmen dünya çapında uygulanmaktadır [23].

MSF işlemi Orta Doğu’ da yaygın olarak kabul görmüştür [19] ve dünyada deniz suyu desalinasyonunun % 34’ ünü oluşturmaktadır [18].

Çok İşlemlerli Damıtma (Multiple Effect Distillation, MED)

Çok işlemlerli damıtma (MED) süreci en eski ve termodinamik olarak yüksek verime sahip tuz giderme yöntemlerinden biridir [20]. MED süreci ikinci işleme ısı temin etmek için ilk işlemdeki buharın yoğunlaşma ısının kullanımına dayanır. Buharlaşma denge sıcaklığının 40-68 °C arasında olduğu sıcaklıklarda gerçekleşir [23]. MED süreci işlem

adı verilen bir dizi evaporatörde gerçekleşir, ve çeşitli işlemlerde ortam basıncını düşürme ilkesine dayanır. Bu süreç ilk işlemde sonra ilave ısıya ihtiyaç duymadan deniz suyunun kaynamasına olanak tanır [20]. İlk işlemde, üretilen buhar, düşük bir sıcaklıkta buharlaşmayı ve yoğunlaşmayı sağlamak için ikinci işleme enjekte edilir. Bu durum diğer işlemlerde tekrar edilir [23].

Deniz suyu ilk işleme girer ve tüplerde ön ısıtıldıktan sonra ısı kaynama noktasına kadar yükselir. Deniz suyu, hızlı buharlaşmayı sağlamak için evaporatör tüplerinin yüzeyine püskürtülür. Borular harici dışardan bir elektrik santralinden sağlanan buharla ısıtılır. Buhar tüplerin diğer tarafında yoğunlaştırılır ve yoğunlaşan buhar besleme suyunun kaynaması için tesise geri döndürülür [20], [22]. MED tesisinin ekonomisi işlem sayısı ile orantılıdır. Toplam işlem sayısı, mevcut toplam sıcaklık aralığı ve bir işlem ile bir sonraki işlem arasındaki izin verilen minimum sıcaklık farkı ile sınırlıdır [20].

İlk işlemde tüplere uygulanan deniz suyunun bir kısmı buharlaştırılır. Geri kalan su yeni bir tüp demetine uygulanmak için ikinci işleme verilir. Bu tüpler ilk işlemde üretilen buharla ısıtılır. Bu buharın bir kısmı sıradaki işleme verilen deniz suyunun bir kısmını buharlaştırmak için kullanılırken bir kısmı da tatlı su üretmek için yoğunlaştırılır [20], [22]. Buharlaşma ve yoğunlaşma süreci daha düşük basınç ve sıcaklıkta her bir işlem için tekrarlanır [20]. Tipik bir büyük tesis 8-16 işlemlilik bir süreçten oluşur [22].

Kaynayan deniz suyu buhar olarak salınır ve yoğunlaştığında saf su üretilir. Süreci daha verimli hale getirebilmek için birçok işlem birbirine bağlanabilir. Bunun gerçekleşmesi için her işlem farklı basınçta çalışmalıdır. [22].

Bazı tesisler en yüksek tuzlu su sıcaklığında (ilk aşamada yaklaşık 70 °C) işletilmek üzere inşa edilmiştir ve bu deniz suyunun ölçeklenmesi potansiyelini azaltır, ancak tüp şeklinde ek ısı transfer alanına duyulan ihtiyacı artırır. Bir MED tesisinin güç tüketimi, bir MSF tesisininkinden önemli ölçüde daha düşüktür ve MED tesisinin performans oranı, MSF tesisininkinden daha yüksektir. Bu nedenle MED, termodinamik ve ısı transfer açısından MSF'den daha verimlidir [20].

MED sürecinin temel özellikleri aşağıdaki gibidir [23].

- Yüksek güvenilirlik, sistemin kolay başlatılması (1 saatten kısa bir süre)
- Yüksek kalitede tatlı su üretimi (işlem sayısına bağlı olarak): tuz derişimi 50 ppm' in altındadır.
- Karmaşık ön arıtma ihtiyacı yoktur.
- Endüstriyel tesislerde yan ürün olarak kolaylıkla geri kazanılabilen düşük sıcaklık (60 ° C'den) kullanılabilir.

MED sürecinin avantajları [24].

- Düşük sıcaklıklarda işletilir. Yüksek hacimsel buhar akışlarında üstün termodinamik verime ve çok düşük basınç düşüşlerine sahiptir. 70 °C' lik maksimum tuzlu su sıcaklığında prosesin optimizasyonu sağlanır.
- Düşük işletme sıcaklığı ısı transferi tüpleri için alüminyum alaşımı, plastik proses boruları ve daha iyi sonuç veren epoksi boyalı karbon çelik kabuklar gibi ekonomik ve dayanıklı inşaat malzemelerinin kullanımını mümkün kılmıştır.

- Isı transferi için kullanılan alüminyum tüplerin ekonomisi yüksek sıcaklıklar için kullanılan bakır alaşımlı tüplerle kıyaslandığında aynı yatırım maliyeti için tuz giderme tesislerinde üretilen suyun tonu başına ısı transfer alanının artmasını sağlar.
- MED' in MSF süreci üzerindeki termodinamik üstünlüğüne ilave olarak ısı transfer alanındaki önemli artış işlem başına çok düşük sıcaklık düşüşlerine (1.5-2.5 °C) sebep olur. 70 °C kadar düşük maksimum tuzlu su sıcaklığında bile çok sayıda işlemin (10-16) dahil edilmesine olanak verir, sonuç olarak çok yüksek ekonomi oranları elde edilir.
- Ön arıtma işlemlerine minimum ölçüde ihtiyaç duyar.
- Diğer süreçlerle kıyaslandığında düşük sıcaklıklı süreçlerin önemli bir stabilite, esneklik ve güvenilirliğe sahip olduğu görülmektedir.
- Düşük sıcaklıkta işletimden dolayı enerji tüketiminde ve korozyonda önemli ölçüde azalma sağlanır.
- Düşük sıcaklıkta damıtma tesislerinin düşük maliyetli, düşük dereceli ısıyı veya mümkün olduğu durumlarda sıfır maliyetli atık ısıyı etkin bir şekilde kullanabilme kabiliyeti, bu tesislerin temel enerji gereksinimini en aza indirir.

MED süreci düşük sermaye gereksinimleri, düşük işletme maliyeti, kolay işletim ve bakım, yüksek termal verim, yüksek ısı transfer kat sayısı, düşük enerji tüketimi ve diğer termal tuz giderme metotlarından daha yüksek performans gibi avantajlarından dolayı daha yaygın kullanılmıştır [25].

Buhar Sıkıştırma Damıtma (VCD)

VCD sürecinde deniz suyunu buharlaştırma ısısı, buharın sıkıştırılmasından sağlanır [26]; [20]. VCD tesisleri, basıncı düşürerek kaynama noktası sıcaklığının azaltılması ilkesinden yararlanır [20]. Ön ısıtılan deniz suyu sıcaklığın artması ile kademeli olarak buharlaştırılır ve üretilen ikinci buhar sisteme enerji sağlamak için sıkıştırma sonrası evaporatör içinde tekrar yoğunlaşır [15]. Deniz suyunu buharlaştırmak için ısı üretmek ve su buharını yoğunlaştırmak için iki yöntem kullanılır. Bunlar mekanik sıkıştırma ve termal sıkıştırma [26]; [21]; [20]. Mekanik sıkıştırma genellikle elektrik odaklıdır [20]. Mekanik buhar sıkıştırma sistemleri buharı sıkıştırmak için mekanik bir kompresör kullanırken, termal buhar sıkıştırma sistemleri bir buhar püskürtme kompresörü kullanır [21].

Kompresör, buharlaştırıcıda bir vakum yaratır ve daha sonra buharlaştırıcıdan alınan buharı sıkıştırır ve bunu bir tüp demetinin içinde yoğunlaştırır. Kaynayıp kısmen buharlaşan deniz suyu ısıtılmış tüp demetinin dışına püskürtülerek daha fazla buhar üretir [20].

Termokompresör olarak adlandırılan buhar püskürtmeli VCD' de buhar püskürtme bir venturi deliği oluşturur ve evaporatörden gelen su buharı daha düşük bir ortam basıncı yaratır. Oluşan su buharı buhar püskürtme ile sıkıştırılır. Bu karışım termal enerji ve yoğunlaşma ısısı sağlamak için tüpün duvarlarında yoğunlaştırılır [20].

Bu yöntemin özelliği ilk ısı dışında harici bir ısı kaynağının kullanılmamasıdır [15]. Düşük sıcaklıkta VCD distilasyonu, sadece güç gerektiren oldukça basit, güvenilir ve verimli bir işlemdir. Yüksek kapasiteli bir kompresöre sahip olmak, 70 ° C'nin altındaki düşük sıcaklıklarda çalışmasına izin verir, bu da korozyon potansiyelini azaltır [20]. Buhar sıkıştırılmalı damıtma işleminin avantajı, ısı kullanımının yüksek verimliliğidir. Dezavantajı ise kazandaki ciddi hasardır [15].

Solar Distilasyon (SD)

SD tesislerinde damıtılmış su elde etmek için suyun ısıtılması ve buharlaştırılmasında güneş enerjisi kullanılır [19]. SD sürecinde tuzlu su güneş enerjisi ile doğrudan buharlaştırılır ve sonra distile suya yoğunlaştırılır [27]. Bu teknolojiler güneş ışığını akışkan ısı transferini içeren emici bir boru üzerinde toplar. Su kullanıldığında, güneş ışınlarından gelen ısı, doğrudan buhar oluşumu ile suyu buhara dönüştürür. Akışkan olarak yağ ya da tuz kullanıldığında, akışkan suyu buhara dönüştüren farklı ısı eşanjörlerinden geçen bir ara termal enerji taşıyıcısı görevi görür [23]. SD sistemleri bakımları kolay ve ekonomik olmalarına rağmen düşük verim ve büyük miktarda ısı kaybından dolayı kullanımları ve üretkenlikleri sınırlıdır [27]. SD sürecinin işletme verimi iki sebepten dolayı düşüktür. İlki buharlaşma ısısının atmosfere kaçması, ikincisi ise bir reaktörde ısıtma, buharlaşma ve yoğunlaşmadan dolayı aynı anda buharlaşma sıcaklığının artması ve yoğunlaşma sıcaklığının azalması zordur. Nemlendirme-nem alma sistemli SD geliştirilerek bu sorunların üstesinden gelinebilir. Nemi artırmak için deniz suyu hava akımına eklenir. Ve sıcaklıkla havanın buhar taşıma kabiliyeti artar. SD sistemleri güneş kolektörleri, güneş havuzları ve fotovoltaikler içerir. SD sistemleri düşük işletme ve bakım maliyeti ancak geniş kurulum alanları ve yüksek ilk yatırım maliyetleri gerektirir [19].

Nemlendirme-Nem Alma (HDH)

HDH sürecinde çalışma akımı olarak hava kullanılır [28] ve süreç güneş kolektörlerinden sağlanan düşük sıcaklığı kullanır [29]. Bu süreç kütle difüzyonu prensibi ile çalışır ve tuzlu suyu buharlaştırmak için kuru hava kullanılır, böylece hava nemlendirilir. HDH süreci buharın önemli miktarı ile havanın karışabileceği gerçeğine dayanır [28]. HDH desalinasyon süreci nemlendirme ve nem alma olarak bilinen iki adet cihazdan oluşur. Nemlendiricide hava tuzlu su ile doğrudan temas halindeyken nem alma aşamasında doğrudan ya da dolaylı su ile temas halinde olabilir. Başlıca üç farklı tür HDH türü vardır. Bunlar dolaylı nem almalı HDH, direkt temaslı HDH ve kabarcık kolonu kullanan HDH' tır. Dolaylı nem almalı HDH sisteminde deniz suyunu ön ısıtmak için hava kullanılırsa daha yüksek ısı geri kazanımı sağlanabilir. Ancak doğrudan temaslı HDH sisteminde tuzlu su sadece nemlendirme ile alakalıdır. Bu nedenle nem almadaki korozyonla ilgili problemler ortadan kalkar ve bu durumda sistemin yatırım maliyeti daha düşüktür [30].

Havanın buhar taşıma kapasitesi sıcaklıkla artar, yani 1kg kuru havanın sıcaklığı 30 °C' den 80 °C' ye artırıldığında 0.5 kg buhar taşıyabilir ve bu da 670 Kcal' dir [28]. HDH süreci her 10 °C sıcaklık artışı için doyumluk neminin 2' ye katlandığı gerçeğine dayanır. Hava 90 °C' de 70 °C' dekinden beş kat daha fazla tutulur. Hava tuzlu su ile temas ettiğinde tuzlu su sıcaklığında buhar çıkar ve soğumaya neden olur. Diğer taraftan, damıtılmış su soğuyan yüzeyle temas halindeki nemli havadan geri kazanılır ve buharın yoğunlaşma ısısı salınır [29].

Kısaca su buharı yoğunlaştırılarak tatlı su üretilir ve böylelikle havanın nemini alır. Bu teknoloji önemli bir avantaja sahiptir. Atık ısıyla çalışabilen ve potansiyel olarak çok düşük maliyetli olan düşük basınç ve düşük sıcaklıkta işletim sağlar [28].

HDH teknolojisi, ucuz, güvenilir ve çevre dostu bir tuzdan arındırma sürecidir. HDH sisteminin düşük dereceli ısı kaynakları kullanan uygulamalar için ucuz ve güvenilir bir tuzdan arındırma sisteminin olduğu bilinmektedir [30].

Dondurma (FD)

Dondurma distilasyon (FD) doğrudan ve dolaylı temaslı olmak üzere iki çeşittir. İlki deniz suyunu sıvı soğutucu ile doğrudan karıştırır. Soğutucu akışkan dondurucunun üst kısmından buharlaşarak kaçar. Aynı zamanda deniz suyu soğurular ve sonra donar. Bu süreç yüksek üretim hızına sahiptir ancak soğutucunun gereksinimleri sıkıntılıdır. Soğutucu toksik olmamalıdır, kimyasal olarak aktif olmamalıdır, su ile karışmamalıdır ve hidrat oluşturmaya dirençli olmalıdır. Buna karşılık, dolaylı dondurma, soğutucuyu deniz suyundan izole etmek için bariyerler kullanır. Isı değişimi ayarlanabilir soğutma koşullarında kristalizatör duvarlarında gerçekleşir. Tuz içermeyen buz üretimini kolaylaştırmak için uygun bir sıcaklıkta sıvı doğalgazdan deniz suyuna soğuk enerji geçişi için bir ara soğutucu kullanılabilir [31].

Süreç teoride caziptir çünkü donma için gereken minimum termodinamik enerji buharlaşma için olduğundan daha azdır, çünkü suyun erime ısısı 6.01 kJ / mol iken 100 ° C'deki buharlaşma ısısı 40.66 kJ / mol'dür. Teorik olarak FD süreci bazı avantajlara sahiptir. Bu avantajlar daha düşük bir teorik enerji gereksinimi, minimum korozyon potansiyeli, küçük ölçeklendirme ve düşük çökelti içerir. Dezavantajı ise mekanik olarak karmaşık olan buz ve su karışımlarının kullanılmasını içermesidir. Avantajlarına rağmen FD sistemleri maliyeti, karmaşıklığı ve erimeden önce kristallerin yıkanması için gerekli olan tatlı su ihtiyacından dolayı ekonomik bir desalinasyon tekniği olarak görülmemektedir [28].

Basınç Uygulayan Sistemler

Ters Osmoz (RO)

Ters osmoz (RO) membran sistemine uygulanan osmotik basınç aşıldığında yarı geçirgen membranın özelliklerine bağlı olarak tuzlu çözümden su ayrılır [23]. Tuzlu çözüme bu değerin üzerinde bir basınç uygulanırsa, tuzlu sudan su bölmesine tatlı su geçecektir [21]. RO sistemleri kolay işletim, düşük enerji tüketimi [23]; [32] ve tüm çözünebilir elektrolitleri mükemmel reddetme yeteneği gibi avantajlara sahiptir [32]. RO sürecinde ısıtma ve faz ayrımı değişikliği gerekli değildir. Tuz gidermek için gerekli en büyük enerji deniz suyunun basınçlandırılmasında kullanılır [20]. Teorik olarak tek enerji gereksinimi besleme suyunu osmotik basıncın üzerinde bir basınçla pompalamak içindir. Uygulamada ise membranın birim alanından daha fazla suyun geçmesi için daha yüksek basınçlar (50-80 atm) kullanılmalıdır [21].

RO teknolojisi membran tıkanmasını önlemek için ön arıtmaya (filtrasyon ve kimyasal ihtiyacı) ihtiyaç duyar ve 500 ppm civarı çıkış suyu tuz derişimine sahiptir [23]. Ön arıtılmış suyun kalitesi RO membran süreci için besleme seviyesini karşıladığında tuz giderme süreci verimli, ekonomik ve çevre dostu bir sistem haline gelir. İyi planlanmış ve uygulanmış bir ön arıtma sistemi [33];

- RO membranlarının temizlenme sıklığını azaltır ve böylece temizleme kimyasalları ile oluşan maliyet azalır.
- Membranların tıkanmasından dolayı basınç düşmesi azalır, böylece toplam enerji maliyeti de azalır.
- Ön arıtılan suyun kalitesi iyileştiğinden dolayı membran ömrü uzar.
- Yüksek kaliteli ön arıtılmış sudan dolayı membranlarda verimlilik artar.
- Membran temizliği için gerekli kimyasal kullanımı ve atıklarının azalmasından dolayı çevresel etkileri de azalmaktadır.

Bu sular içme suyu, tarımsal kullanım ve endüstriyel uygulamalar için uygundur [22].

İleri Osmoz (FO)

FO yarı geçirgen bir membran boyunca basınç farkının seçici su taşımına yol açtığı, tuzluluğun kademeli ya da osmotik olarak giderildiği bir desalinasyon sürecidir [27]. Klasik su arıtma ve ters osmoz ve nanofiltrasyon gibi membran süreçlerine alternatif olabilecek enerji tasarrufu sağlayan yeni bir membran teknolojisidir [34]. FO süreci tuzu ayırmak için enerji azaltma potansiyeline sahiptir. FO teknolojisinde bir membranla tatlı suyu ayırabilmek için yüksek tuzluluğa sahip olan sudan daha yüksek osmotik basınca sahip olan bir çözelti (çekme çözeltisi) kullanılır [35]. Uygun bir çekme çözeltisinin seçimi verimli bir FO işlemi için oldukça önemlidir. İdeal bir çekme çözeltisi üç temel kriterlere sahip olmalıdır. 1) yüksek osmotik basınç oluşturmalıdır, 2) tekrar doldurma maliyetini azaltmak için oldukça düşük ters çözünen bir akıya sahip olmalıdır, 3) ve kolaylıkla ve verimli bir şekilde yenilenebilir enerji tüketimi olmalıdır [36]. FO teknolojileri tatlı su üretimi için gerek duyulan enerji gereksinimini % 20 – 35 oranında azaltmaktadır. Enerji ihtiyacındaki bu azalma suyun maliyetinde % 10-15' lik bir azalma sağlamaktadır [35]. Süreci işletmek için harici bir hidrolik basınç neredeyse gerekli değildir [34].

Elektrodiyaliz (ED)

Elektrodiyaliz sistemi elektriksel potansiyel farkının etkisi altında besleme suyundaki iyonları membranlardan geçirerek tuzluluğu azaltma işlemidir [21]; [37]. Bu işlem, acı su ve deniz suyundan içme suyu ve proses suyunun üretimi, endüstriyel atık suların arıtılması, atık sulardan yararlı maddelerin geri kazanımı ve tuz üretimi için yaygın olarak kullanılmaktadır [38]; [39]. Süreç, acı sudaki tuz iyonlarını gidermek için bir DC (doğru akım, direct current) elektrik alanını kullanır. Tuzlu besleme suyu, pozitif yüklü sodyum ve negatif yüklü klor iyonlarına ayrılmış çözünmüş tuzlar içerir. Bu iyonlar çözeltiye batırılan karşılıklı olarak yüklenmiş bir elektrota doğru hareket eder, yani pozitif iyonlar (katyonlar) negatif elektroda (katot) ve negatif iyonlar (anyonlar) pozitif elektroda (anot) gider [37]. Katyonlar, negatif yüklü katyon değişim membranından kolayca geçerken, pozitif yüklü anyon değişim membranları tarafından tutulular. Benzer şekilde, negatif yüklü anyonlar anyon değişim membranlarından geçer ve bunlar katyon değişim membranları tarafından tutulur. Genel sonuç, değişim tanklarındaki iyon derişiminde artış olurken diğer tanklarda eş zamanlı olarak iyon derişimi azalır [40].

Nanofiltrasyon (NF)

NF, parçacıkları boyutlarına ve aralarındaki elektrostatik etkileşimlere göre ayırabilen basınçla çalışan bir ayırma işlemidir. Yüklü olmayan molekülleri ayırmak için basınç mekanizma moleküler boyut iken benzer boyuttaki iyonların ayrılmasında elektrostatik kuvvetler daha önemli bir rol oynamaktadır [41]. Etkili bir basınçla çalışan membran işlemi olan NF, RO ve ultra filtrasyon arasında gözenek boyutuna ve kesme özelliğine sahiptir. Eşsiz ayırma kabiliyetinden dolayı, NF teknolojisi iyon ve düşük molekül ağırlıklı organiklerin ve deniz suyundan NaCl' nin bir kısmının giderimi için geliştirilmiştir [36]. Genelde nanofiltrasyon iki ve daha çok değerlikli iyonlarının giderimi için kullanılır [42]. NF membranları 1 nm civarında gözeneklere sahiptir, bu nedenle RO' ya kıyasla düşük basınçlarda daha yüksek su akışı sağlanmaktadır. NF teknolojisinin kullanılmasındaki ana problem, özellikle inorganik ayırma sırasında membran ömrünün azalmasına yol açan membran tıkanmasından kaynaklanan endüstriyel ünitelerin kapasitelerinin azalmasıdır [41].

Diğer Aktifleştirilmiş Tuz Giderme Yöntemleri

Adsorpsiyon

Klasik desalinasyon teknolojileri yüksek enerji tüketimi, kirlenici emisyonu, membranların korozyon ve tıkanması ve boru korozyonu ve ısı eşanjörünün dış yüzeyinde tuz veya kireç birikimi nedeniyle yüksek bakım maliyetleri gibi bazı sınırlamalara sahiptir. Bu sorunları çözmek için adsorpsiyon desalinasyon süreçleri geliştirilmiştir [43].

Adsorpsiyon desalinasyon sistemi genellikle buhar üretmek için tekli ya da çoklu damıtma işlemi içeren bir adsorpsiyon ısı pompasını çalıştırmak için düşük sıcaklıkta ısı kaynaklarını kullanan yeni gelişen bir tuz giderme yöntemidir [44]. Adsorpsiyon teknolojisinin, atık ısı ve güneş enerjisi gibi düşük dereceli ısı kaynakları ile çalışması ve su gibi çevre dostu soğutucuların kullanılması gibi önemli avantajlara sahip olması ile sürdürülebilir bir sistem olduğu kanıtlanmıştır [45]. Mevcut adsorpsiyon süreçlerinde adsorban olarak su buharını etkili bir şekilde emen silika jel kullanılır. Adsorban, harici bir termal kaynakla hafif ısıtılarak (50-85 °C) rejenere edilir [46].

Adsorpsiyon desalinasyon sistemi, adsorpsiyon/desorpsiyon yataklarından, bir yoğunlaştırıcıdan ve bir buharlaştırıcıdan oluşur. Her bir yatak ısı eşanjörleri ile adsorban malzemesi içerir. İki yataklı sistem için ilk yatak adsorpsiyon yatağı iken ikinci yatak desorpsiyon yatağıdır. Döngünün başlangıcında, adsorbanın afinitesinden dolayı deniz suyunun buharlaştırıldığı bir buharlaşma-adsorpsiyon işlemi gerçekleşir ve bu da buharlaştırıcıda soğutma etkisine yol açar. Adsorpsiyon ısı yayılır ve adsorpsiyon yatağındaki soğutma suyuna aktarılır. Desorpsiyon-yoğuşma işlemleri sırasında, adsorbe edilen su buharını uzaklaştırmak için desorpsiyon yatağına düşük dereceli ısı verilir. Desorpsiyon yatağı ve yoğunlaştırıcı devreye girdikçe su buharı buharın yoğunlaştırıldığı yoğunlaştırıcıya geçer ve desaline edilmiş su toplanır [45].

İyon Değişimi

İyon değişimi atıksu desalinasyonu için çok uygun bir kimyasal süreçtir. Bu kimyasal yöntem, aynı yükteki iyonların sıvı fazdan katı faza yer değiştirmesini içeren kimyasal bir işlemdir. Su saflaştırma için kullanılan iyon değişimi sudan tuzları giderir. Desalinasyonun mekanizması güçlü bir asit katyon değiştirici kullanarak tuzu aside

dönüştürür ve daha sonra zayıf bir anyon değiştirici kullanarak absorpsiyon ile zayıf asidi giderir [47].

Çözücü Ekstraksiyonu

Trietilamin gibi bazı organik çözücüler düşük sıcaklıkta suyun çözünmesini sağlayabilir ve sıcaklık artırıldığında sudaki çözünmüş maddeler sudan ayrılabilir. Tuzlu su ilk olarak ekstraksiyon ünitesinde çözücü (solvent) ile temas ettirilir. Ardından tuzlu su jeneratör ve ısı eşanjörü aracılığıyla ayırıcıya (peperatör) ulaşır ve son olarak ayırıcıdan arıtılmış su alınır. Çözücü sisteme geri döndürülür. Bu yöntemin avantajları; oda sıcaklığına yakın optimum çalışma sıcaklığı, düşük enerji tüketimi ve düşük korozyon potansiyelidir. Çözücünün sudaki çözünürlüğü tatlı su miktarını etkileyebilir. Bu durumda ideal bir ekstraksiyon çözücüsü gereklidir [15].

SONUÇ VE TARTIŞMA

Deniz suyundan tuz giderimi için 3 grup tuz giderme teknolojisi kullanılmaktadır. Bunlardan ilki MSD, MED, VCD, SD, HDH ve FD süreçlerini içeren termal olarak aktifleştirilmiş sistemlerdir. İkinci grup ise basınç uygulayan sistemlerdir ve RO, FO, ED ve NF süreçlerini içermektedir. Son olarak ise adsorpsiyon, iyon değişimi ve çözücü ekstraksiyonu süreçlerini içeren diğer aktifleştirilmiş sistemler kullanılmaktadır.

Termal olarak aktifleştirilmiş sistemler ısı transferine dayanır ve enerji kaynağı olarak ısı enerjisi ya da güneş enerjisini kullanır. Temel prensip, tuzlu sudan suyu buharlaştırmak ve sonra yoğunlaştırarak tuzdan ayırmaktır. Bunlardan en yaygın kullanılanları MSF ve MED süreçleridir. Her ikisi de ısı enerjisi kullanır, ön arıtmaya ihtiyaç duymaz ve düşük çıkış suyu tuz derişimine (50 ppm) sahiptir. Ancak MSF süreci MED sürecinden daha yüksek işletme sıcaklığında işletildiği için, MED sürecinin enerji tüketimi ve korozyon potansiyeli daha düşüktür. VCD sürecinde ise buharlaşma ısı buharın sıkıştırılmasından sağlanır ve ilk ısı dışında harici bir ısı kaynağına ihtiyaç duymaz. Düşük sıcaklıkta işletilir ve bu nedenle korozyon oranı düşüktür. SD sürecinde ise, ısı kaynağı olarak güneş enerjisi kullanılır. Süreç ekonomik olmasına rağmen ısının atmosfere kaçmasından ve ayrıca buharlaşma ve yoğunlaşmanın aynı reaktörde gerçekleşmesindeki güçlüklerden dolayı verim düşüktür. HDH süreci de SD süreci gibi güneş enerjisini kullanır ve düşük sıcaklıkta işletilir. Ekonomik bir tuz giderme teknolojisidir. Termal olarak aktifleştirilmiş süreçlerin sonuncusu olan FD sürecinde ise donma için gerekli olan termodinamik enerji buharlaşma için gerekli olan termodinamik enerjiden düşük olduğundan enerji tüketimi düşüktür. Düşük korozyon potansiyeline sahiptir. Ancak buz kristallerinin erimeden önce tatlı su ile yıkanması gereklidir, ekonomik bir süreç değildir, karmaşık bir teknolojidir.

Deniz suyundan tuz giderimi için en yaygın kullanılan basınç uygulayan sistem RO sürecidir. Sisteme dışardan basınç uygulanması sonucunda osmotik basınç aşılarak oluşan ters akımla suyun tuz ve minerallerden ayrılmasıdır. Enerji ihtiyacı düşüktür ve gerekli olan enerji osmotik basıncı aşmak için deniz suyunun basınçlandırılmasında kullanılır. Ekonomik ve işletimi kolay bir teknolojidir. Membranların tıkanmasını önlemek için gerekli olan ön arıtma ihtiyacı ise sürecin kısıtlamalarındandır. FO süreci de RO süreci gibi basınç farkına dayanır, ancak FO sürecinde harici bir basınç gerekli değildir. enerji tüketimi düşük ve ekonomik bir teknolojidir. ED sürecinde ise elektriksel potansiyel farkından yararlanarak tuz giderimi gerçekleşir. NF süreci ise RO süreci ile kıyaslandığında daha düşük basınç gerektirir. Basınç uygulayan sistemlerde karşılaşılan

en önemli sorun membranların tıkanmasıdır. Bu sorunun azaltılmasına yönelik olarak da ön arıtma ihtiyacıdır.

Bunların dışında kullanılan diğer tuz giderme yöntemleri ise adsorpsiyon, iyon değişimi ve çözücü ekstaksiyonudur. Herhangi bir yüksek ısı ve basınca gerek duymadıkları için bu süreçlerin enerji tüketimleri düşüktür. Ayrıca membran tıkanması ve korozyon gibi sorunlarla karşılaşılmaz.

KAYNAKLAR

- [1] Abujazar, M. S. S., Fatihah, S., Rakmi, A. R., Shahrom, M. Z. (2016): The effects of design parameters on productivity performance of a solar still for seawater desalination: A review, *Desalination* 385: 178-193.
- [2] Mapunda, D. W., Chen, S. S., Yu, C. (2018): The role of informal small-scale water supply system in resolving drinking water shortages in Peri-Urban Dar Es Salaam, Tanzania. *Applied Geography* 92: 112-122.
- [3] Zhao, D., Zhu, L., Fu, Y., Zhu, M., Xue, L. (2015): Development of lower cost seawater desalination process using nanofiltration technologies-A review. *Desalination* 376: 109-116.
- [4] Hezi, Z., Shpak, S., Fliesher, M., Gillerman, L., Kasher, R., Oron, G. (2018): Optimal managing the coastal aquifer for seawater desalination and meeting nitrates level of drinking water. *Desalination* 436, 63-68.
- [5] Jayarathna, L., Rajapaksa, D., Managi, S., Athukorala, W., Torgler, B., Garcia-Valiñas, M. A., Gifford, R., Wilson, C. (2017): A GIS based spatial decision support system for analysing residential water demand: A case study in Australia. *Sustainable Cities and Society* 32: 67-77.
- [6] Zhao, D., Chen, S., Guo, C., X., Zhao, Q., Lu, X. (2016): Multi-functional forward osmosis draw solutes for seawater desalination. *Chinese Journal of Chemical Engineering* 24: 23-30.
- [7] Shi, J., Wu, W., Xia, Y., Li, Z., Li, W. (2018): Confined interfacial polymerization of polyamide-graphene oxide composite membranes for water desalination. *Desalination* 441: 77-86.
- [8] Yang, H., Sun, Z., Zhan, Z., Zhang, H., Yao, Y. (2018): Effects of watering parameters in a combined seawater desalination process. *Desalination* 425: 77-85.
- [9] Khalid, S., Murtaza, B., Shaheeni, I., Ahmad, I., Ullah, M. I., Abbas, T., Rehman, F., Ashraf, M. R., Khalid, S., Abbas, S., Imran, M. (2018): Assessment and public perception of drinking water quality and safety in district Vehari, Punjab, Pakistan. *Journal of Cleaner Production* 181: 224-234.
- [10] Shahmansouri, A., Min, J., Jin, Y., Bellona, C. (2015): Feasibility of extracting valuable minerals from desalination concentrate: A comprehensive literature review. *Journal of Cleaner Production* 100: 4-16.
- [11] Peñate, B., García-Rodríguez, L. (2012): Current trends and future prospects in the design of seawater reverse osmosis desalination technology. *Desalination* 284: 1-8.
- [12] Belila, A., El-Chakhtoura, J., Otaibi, N., Muyzer, G., Gonzalez-Gil, G., Saikaly, P. E., van Loosdrecht, M. C. M., Vrouwenvelder, J. S. (2016): Bacterial community structure and variation in a full-scale seawater desalination plant for drinking water production. *Water Resource* 94: 62-72.
- [13] Youssef, P. G., AL-Dadah, R. K., Mahmoud, S., M. (2014): Comparative analysis of desalination technologies. *Energy Procedia* 61: 2604-2607.

- [14] Zheng, X., Chen, D., Wang, Q., Zhang, Z. (2014). Seawater desalination in China: retrospect and prospect. *Chemical Engineering Journal* 242: 404-413.
- [15] Zheng, X. (2017): *Solar Energy Desalination Technology*. Elsevier, pp. 784.
- [16] Pearce, M., Brennan, (2015): Novel findings in desalination. *Desalination* 360: 13-18. 20
- [17] El-Dessouky, H. T., Ettouney, H. M., Al-Roumi, Y. (1999): Multistage Flash desalination: Present and future Outlook. *Chemical Engineering Journal* 73: 173-190.
- [18] El-Ghonemy, A. M. K. (2018): Performance test of a sea water multi-stage flash distillation plant: Case study. *Alexandria Engineering Journal*: 57: 2401-2413.
- [19] He, T., Yan, L. (2009). Application of alternative energy integration technology in seawater desalination. *Desalination* 249, 104-108.
- [20] Khawaji, A. D., Kutubkhanah, I. K., Wie, J. (2008): Advances in seawater desalination technologies. *Desalination* 221: 47-69
- [21] Kalogirou, S. A. (2005): Seawater desalination using renewable energy sources. *Progress in Energy and Combustion Science* 31: 242-281.
- [22] Raluy, G., Serra, L., Uche J. (2006): Life cycle assesment of MSF, MED and RO desalination technologies. *Energy* 31: 2361-2372.
- [23] Compain, P. (2012): Solar energy for water desalination. *Procedia Engineering* 46: 220-22.
- [24] Ophir, A., Lokiec, F. (2005): Advanced MED process for most economical sea water desalination. *Desalination* 182: 187-198.
- [25] Mazini, M. T., Yazdizadeh, A., Ramezani, M. H. (2014): Dynamic modeling of multi-effect desalination with thermal vapor compressor plant. *Desalination* 353: 98-108.
- [26] Aly, N. H., El-Fiqi, A. K. (2003): Thermal performance of seawater desalination systems. *Desalination* 158: 127-142.
- [27] Ahmed, F. E., Hashaikeh, R., Hilal, N. (2019): Solar powered desalination- technology, energy and future Outlook. *Desalination* 453: 54-76.
- [28] Qiblawey, H. M., Banat, F. (2008): Solar thermal desalination Technologies. *Desalination* 220: 633-644.
- [29] Li, C., Goswami, Y., Stefanakos, E. (2013): Solar assisted sea water desalination: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 19: 136-163.
- [30] Dehghani, S., Date, A., Akbarzadeh, A. (2019): An experimental study of brine recirculation in humidification-dehumidification desalination of seawater. *Case Studies in Thermal Engineering* 14: 100463.
- [31] Chang, J., Zuo, J., Lu, K., Chung, T. (2016): Freeze desalination of seawater using LNG cold energy. *Water Resource* 102: 282-293.
- [32] Yao, Y., Li, M., Cao, X., Zhang, P., Zhang W., Zheng, J., Zhang, X., Wang, L. (2018): A novel sulfonated reverse osmosis membrane for seawater desalination: Experimental and molecular dynamics studies. *Jornal of Membrane Science* 550: 470-479.
- [33] Kavitha, J., Rajalakshmi, M., Phani, A. R., Padaki, M. (2019): Pretreatment processes for seawater reverse osmosis desalination systems-A review. *Journal of Water Process Engineering* 32: 100926.
- [34] Linares, R. V., Li, Z., Sarp, S., Bucs, S. S., Amy, G., Vrouwendelver, J. S. (2014): Forward osmosis niches in seawater desalination and wastewater reuse. *Water Resource* 66: 122-129.
- [35] Voutchkow, N. (2018): Energy use for membrane seawater desalination-currents Status and trends. *Desalination* 431: 2-14.
- [36] Zhau, D., Zhu, L., Fu, Y., Zhu, M., Xue, L. (2015): Development of lower costs seawater desalination processes using nanofiltration technologies-A review. *Desalination*, 376: 109-116.

- [37] Kalogirou, S. A. (2009): *Solar Energy Engineering: Process and Systems*, Oxford, s. 819.
- [38] Sadrzadeh, M., Mohammadi, T. (2008): Sea water desalination using electro dialysis. *Desalination* 221: 440-447.
- [39] Sadrzadeh, M., Mohammadi, T. (2009): Treatment of sea water using electro dialysis: current efficiency evaluation. *Desalination* 249: 279-285.
- [40] Gmar, S., Chagnes, A. (2019): Recent advances on electro dialysis for the recovery of lithium from primary and secondary resources. *Hydrometallurgy* 189: 105124.
- [41] Faridirad, F., Zourmand, Z., Kasiri, N., Moghaddam, M. K., Mohammadi, T. (2014): Modeling of suspension fouling in nanofiltration. *Desalination* 346: 80-90.
- [42] Roy, Y., Sharqawy, M. H., Lienhard, J. H. (2015): Modeling of flat-sheet and spiral-wound nanofiltration configurations and its application in seawater nanofiltration. *Journal of Membrane Science* 493: 360-372.
- [43] Zhang, H., Ma, H., Liu, S., Wang, H., Sun, Y., Qi, D. (2020): Investigation on the operating characteristics of a pilot-scale adsorption desalination system. *Desalination* 473:114196.
- [44] Du, B., Gao, J., Zheng, L., Su, X., Zhang, X., Yu, S., Ma, H. (2017): Area optimization of solar collectors for adsorption desalination. *Solar Energy* 157: 298-308.
- [45] Elsayed, E., AL-Dadah, R., Mahmoud, S. Anderson, P., Elsayed, A. (2020). Experimental testing of aluminium fumarate MOF for adsorption desalination. *Desalination* 475: 114170.
- [46] Li, Z., Siddiqi, A., Anadon, L. D., Narayanamurti, V. (2018). Towards sustainability in water energy nexus: Ocean energy for seawater desalination. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*: 82: 2833-2847.
- [47] Dube, N. M., Tzoneva, R. (2007). Optimal closed-loop controller design for an ion exchange process used for desalination of water," *IFAC Proceedings Volumes*, 40: 970-975.