

# Kapasitif Deiyonizasyon Prosesinin Verimliliğine Etki Eden Parametrelerin Belirlenmesi

\*<sup>1</sup>Halil İbrahim Uzun, <sup>1</sup>Fatih İlhan, <sup>1</sup>Eyüp Debik, <sup>1</sup>Yaşar Avcı  
<sup>1</sup>Yıldız Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü, Türkiye

## Özet

Temiz suya ulaşım sıkıntısı yaşam standartlarının ve nüfusun artmasıyla birlikte dünyayı ciddi bir şekilde etkilemektedir. Temiz su kaynaklarının kısıtlı olması ise çalışmalarını tuzlu ve yeraltı sularından temiz su eldesine yönlendirmektedir. Kapasitif deiyonizasyon (Capacitive deionization - CDI) tuzlu ve yeraltı sularından iyonların giderilebildiği alternatif ekonomik bir deiyonizasyon teknolojisidir. CDI prosesinde çok düşük voltajların ( $\leq 1.2V$ ) aralarında su akışı için bir kanalın bulunduğu iki paralel elektrot plakasına uygulanmasıyla suda bulunan iyonlar zıt yüklü elektrotların yüzeyinde oluşan elektrik çift tabakanın içine adsorbe olurlar ve daha sonra doyumluğa ulaşmış elektrotların yüklerinin değiştirilmesi ile ya da kısa devre oluşturulması yoluyla desorbe edilirler. İşletilmesi basit ve paket olarak kurulabilen CDI prosesi deiyonizasyonda termal prosesler ve ters ozmosdan çok daha fazla enerji verimliliği sağlaması, düşük enerji potansiyeline ihtiyaç duyması ve herhangi bir enerji kaynağından dönüşüme gerek kalmadan elektriği direkt olarak kullanabilmesi ile ön plana çıkmaktadır.

Bu çalışmada CDI verimliliğini etkileyen konsantrasyon, elektrik potansiyeli, elektrot türü ve elektrotlar arası mesafe gibi parametreler incelenerek bu işletme parametrelerinin proses performansına katkısı tespit edilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Deiyonizasyon, tuzsuzlaştırma, kapasitif deiyonizasyon

## Abstract

Problem of reach to clean water seriously affects the world with increasing living standards and population. Due to limited resources of clean water, studies are now turning towards salty and ground water for obtained clean water. Capacitive deionization (CDI) is an economic and alternative process for can be removed ions from salty and groundwater. Oppositely charged ions in the water adsorbed on the electrodes of the electrical double layer by lower voltages ( $<1.2V$ ) in CDI process. Moreover these ions are desorbed by reverse charging or short circuit. CDI process, which can be installed as a package and operated simply, can be used directly with the electricity, provide much more energy efficient from thermal processes or reverse osmosis and needing of lower energy potential come into prominence.

In this study, the parameters affecting the efficiency of CDI will be investigated. This parameters are initial concentrations, electrode type, electrical potential and electrode spacing. Also this process contribute to the performance of operating parameters has been determined.

**Key Words:** Deionization, Desalination, Capacitive Deionization

## 1. Giriş

İçme ve kullanma sularına ulaşmada yaşanan sıkıntının yanı sıra suya olan talebin de artması ülkeleri ve toplulukları olumsuz etkilemektedir. Dünya üzerinde yaklaşık 1 milyardan daha fazla insan temiz su bulmakta zorlandıkları bölgelerde yaşarken 2,3 milyar insan (dünya nüfusunun yaklaşık %41'i) su kıtlığı ile karşı karşıyadır [1]. Dünya sularının %97'den daha fazlasının tuzlu su niteliğinde olması sebebiyle deiyonizasyon / desalinasyon prosesleri su krizinin çözümüne yönelik en kullanışlı araçlar olarak öne çıkmaktadır. Bu kadar büyük orana sahip tuzlu suların kullanılabilir ve içilebilir formlara dönüştürülmesi kaliteli su üretimi ve su kaynaklarının efektif kullanımı açısından büyük bir potansiyel anlamına gelmektedir [2]. Ancak dünyanın büyük bir çoğunluğu kalan %3'lük kısmın üçte biri (Toplam su miktarının buzullar hariç %1'lik kısmı) ile yetinmektedir. Bu sular yüzeysel ve yer altı suları olarak adlandırılmakla birlikte yüzeysel tatlı su kaynaklarının yeraltı sularının katkısıyla oluştuğu bilinmektedir. Yeraltı sularının içerdiği iyonik unsurlar su temini açısından "kirletici" olarak tanımlanmaktadır. Aynı ayrı her bir iyon türünün giderimi farklı prosesler ile mümkün olsa da hemen hemen bütün iyonik kirleticilerin giderimi için en uygun işlemler deiyonizasyon prosesleridir.

Diğer taraftan su sadece yaşayan organizmalar için değil aynı zamanda endüstride çeşitli amaçlarla kullanılan; solventler, temizleyiciler, saflaştırıcılar, soğutucular ve reaktifler gibi temel kaynaklar için de gereklidir [3]. Ayrıca su içerisinde bulunan çözünmüş iyon miktarı, suyun kullanım alanını yakından ilgilendiren bir husustur. Örneğin nükleer tesislerde özellikle türbin ve boruların yüzeyinde meydana gelen iyon kalıntılarının azaltılması kararlı sistem için gereklidir. Ek olarak özellikle beklenmeyen reaksiyonların gerçekleşmesini engellemek amacı ile ilaç sanayiinde deiyonizasyon yaygın olarak kullanılmaktadır. Yarı iletken üretim süreçleri gibi çok çeşitli proseslerde ise yüksek üretim verimliliği ve operasyonda yüksek kararlılık sağlamak amacıyla ultra saflaştırılmış su kullanılmaktadır [4, 5, 6, 7].

Dolayısı ile iyonik kirletici içeriği yüksek sulardan içilebilir ve kullanılabilir kalitede su elde etmek amacı ile birçok deiyonizasyon prosesi çalıştırılmaktadır. Adsorpsiyon, iyon değişimi, ters ozmoz ve termal işlemler gibi klasik prosesler iyonların fiziko-kimyasal farklılıkları üzerine bina edilerek geliştirilmişlerdir. Bu teknolojiler deiyonizasyonda çok geniş ölçekte kullanılmalarına rağmen adsorbentlerin rejenerasyon adımları, iyon değiştirici reçine ihtiyaçları ve membran maliyetleri dolayısı ile pahalı gözükmektedir. Son yıllarda elektrodializ sistemleri yeni bir teknoloji olarak kullanılmaktadır. Ancak distilasyon, ters ozmoz gibi sistemler ile birlikte bu teknoloji de yüksek enerji sarfiyatından muzdariptir [8].

Yeni geliştirilen kapasitif deiyonizasyon (CDI) prosesi, düşük elektrik potansiyelinin ( $\leq 1,2$  V) aralarında su akışı olan iki paralel elektrot plakasına uygulanması sonucu suda bulunan iyonların zıt yüklü elektrotların yüzeyinde oluşan elektrik çift tabakanın içine adsorbe olması prensibiyle

çalışmaktadır. CDI, düşük enerji potansiyeline ihtiyaç duymakta olup herhangi bir enerji kaynağından dönüşüme gerek kalmadan elektriği direkt olarak kullanabilmektedir. Ayrıca ısıtıcı veya yüksek basınç pompalarına da ihtiyaç duymamaktadır. Bu düşük potansiyel dolayısı ile sadece adsorpsiyon prosesi yürütülmektedir ve suyun elektrolizi gibi istenmeyen durumlar engellenmiştir [9]. CDI prosesinin uzun süreli çalıştırma periyotlarında organik ve inorganik bileşenlerce tıkanma problemine karşı oldukça dirençli olduğu da belirtilmelidir [10].

Kapasitif deiyonizasyon günümüzde çok yaygın olarak kullanılan ters ozmoz ünitelerinin kurulmasının pratik olmadığı düşünülen şehirlerden uzak bölgelerde güçlü bir alternatif olarak öne çıkmaktadır [11, 12, 13].

Dünyadaki bir çok ülke gibi, Türkiye de su kaynağı olarak önemli miktarda yeraltı suyunu kullanmaktadır. Yeraltı suları ise buldukları bölgenin yeraltı yapısına göre büyük ölçekte farklılıklar göstermektedir. Bu durum yeraltı sularına çözünerek iyon karışımına sebebiyet vermekte ve her bölgede farklı karakterde yeraltı suları ile karşılaşılabilir. Diğer taraftan iyonik kirletici konsantrasyonu yüksek olan suların içerdikleri her bir parametre için günümüzde farklı arıtma teknikleri uygulanmasına rağmen, işletme şartları ve prosesin bazı aşamaları değiştirilmeden aynı suda değişik konsantrasyonlarda farklı iyonik kirleticilerin (Arsenik, Nitrat, Bor, Florür, Siyanür) tek bir yöntemle arıtılmaları mümkün olmamaktadır. Ayrıca kullanılacak bu yöntemlerin verimliliklerinin düşük olması, ekonomik olmamaları gibi dezavantajlarının da olduğu bilinmektedir.

Bu bilgiler ışığında yapılmış olan çalışmanın amacı deiyonizasyon teknikleri içerisinde önemli avantajları ile sınırlan CDI prosesinin performansı ile farklı işletme parametreleri arasındaki ilişkilerinin belirlenmesi ve optimizasyon için çalışılacak işletme şartlarının tespitidir.

## **2. Materyal ve Metot**

Bu çalışmada yapılan laboratuvar çalışması literatür taraması ile birlikte değerlendirilerek potansiyel, akım, debi, sıcaklık, konsantrasyon gibi parametrelerin CDI prosesinde etkileri incelenmiştir.

### *2.1 Reaktör*

Çevre Mühendisliği laboratuvarında elektrodializ prosesinde kullanılan PCCell marka ED64-4 model reaktör, iyon değiştirici membranların çıkartılması ve reaktörün akım kolloktörüne yüzey alanı yüksek aktif karbon elektrot yerleştirilmesi sureti ile CDI prosesine dönüştürülmüştür. Elektrotlar arası mesafe literatürde ayırıcılar (120- $\mu$ m kalınlığında) ile sağlanırken reaktör şartları dolayısı ile laboratuvarda yaklaşık 1-1,5 cm olarak çalışılmıştır. Elektrotlar arası mesafe eşdeğer elektriksel gerilime paralel olarak akım değeri ile ters orantılıdır. Buna göre, elektrotlar arası mesafenin 10 kat artırılması akımı da 10 kat düşürecektir. Bu nedenle eşdeğer akım için

elektriksel gerilimin de 10 kat artırılması gerekmektedir. Reaktörde kullanılan elektrot aktif karbon olup, kullanılan elektrot boyutları 6 cm x 6cm'dir.

### 2.2 Çözelti ve Çalışma Şartları

Deiyonizasyon proseslerinde standart bir prosedür olan sentetik tuzlu su çözeltileri ile proses performansı irdelenmiştir. Bu amaçla sentetik olarak 1 gr/L NaCl çözeltisi hazırlanarak peristaltik pompa (Watson Marlow, 323 Dz) ile reaktör beslenmiştir. Bu amaçla besleme debisi olarak 15, 25 ml/dk debiler ile çalışılmıştır. Reaktör için gerekli elektriksel gerilim güç kaynağı (GW INSTEK, GPC3030D) vasıtasıyla sağlanmış olup reaksiyon süresi boyunca akım ve voltaj değerlerinin değişimi kontrol edilmiştir.

### 2.3 Analiz Çalışmaları

Çalışma boyunca deiyonizasyon performansını izlemek için sürekli olarak elektriksel iletkenlik ölçümleri yapılmıştır. Bu amaçla Hach Lange Marka, HQ40d model multimetre ile ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca klorür bazlı giderim de Standart Metotlarda SM.4500 Cl<sup>-</sup> B kodlu Arjantometrik Yöntemle klorür analizleri yapılarak belirlenmiştir [X].

## 3. Sonuç ve Tartışmalar

Bu çalışmada kapasitif deiyonizasyon prosesi ile literatürde yapılan araştırmalar incelenerek değişkenlerin etkileri tespit edilmeye çalışılmış, laboratuvarında yapılan çalışmalarla ise konsantrasyonun sabit tutulması sureti ile debi, voltaj ve akım parametreleri değiştirilerek sistem literatür çalışmalarına nispet edilmiştir. Söz konusu literatür taraması yolu ile derlenen parameter değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

**Tablo 1.** CDI Prosesinde Çalışılan İşletme Şartları ve Giderim Verimi Üzerindeki Etkileri

Elektrot	Konsantrasyon mg/l ( $\mu\text{S/cm}$ )	Debi ml/dk	Çalışma Süresi dk	Voltaj V	Akım mA	Giderim %	Kaynak
Akıcı Elektrot (Flow Electrode)	36500	3	-	1.2	-	95	[14]
Karbon Elektrot (Aktif Karbon)	5969	40	-	1.2	-	~95	[15]
Karbon Elektrot (Aktif Karbon)	200	20	-	1.5	100	85	[16]
SWCNT**	-	50	-	1.2	-	97	[17]
Karbon Elektrot (Aktif Karbon)	10	20	-	0.8	5500	99	[18]
MnO <sub>2</sub> /PSS/CNTs Kompozit Elektrot ***	128	20	-	1.2	-	~97	[19]
Karbon Elektrot (Aktif Karbon)	200	30	-	1.2	-	~93	[20]
Karbon Elektrot (Aktif Karbon)	465	50	-	1	10	41	[21]
% 100 Karbon	1000	-	10	0,9	300	38 - 31	[22]

Aerojel - %25 Karbon Aerojel + %75 Silika jel							
Aktif nano yapılı karbon kaplama	2000 ( $\mu$ S/cm)	25	2,7	1 – 1,5	-	41 - 58	[23]
Nanoporlu silikon dioksit	-	16 - 24	3	1,5	-	80 - 90	[24]
Karbon Elektrot (Aktif Karbon)	1270 – 1454 – 1362	25		1,3	-	88,2 - 90,2 - 90,5	[25]
Karbon Elektrot (Aktif Karbon)	1000	10	0,5	1,2 - 1,4 - 1,6	-	73 – 78 - 83	[26]

### 3.1 Elektrot

Kapasitif deiyonizasyon işleminin de temelini oluşturan elektrokimyasal ayırma proseslerinde en kritik konu elektrot materyalinin seçimidir. CDI verimliliği çok güçlü bir şekilde elektrodun yüzey alanı ve yüzey özellikleri (adsorpsiyon özellikleri) ile ilgilidir [27] Uygun bir CDI elektrot materyali aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır [10].

1. Özgül yüzey alanı (birim ağırlık başına yüzey alanı) mümkün olduğunca geniş olmalı
2. Elektronik iletkenlik yüksek olmalı
3. Giriş yüzey alanı elektrosorpsiyon – elektrosorpsiyon değişimlerine hızlı cevap verebilir olmalı
4. Oksidantların varlığında (klor v.b.) ve geniş bir yelpazede pH değişimlerine karşı kimyasal – elektrokimyasal kararlılık göstermeli ve sık voltaj değişimlerine toleranslı olabilmeli
5. Dizayn ihtiyacına göre kolay şekillendirilebilmeli
6. Biyolojik ve organik tıkanmaya düşük eğilimli olmalı.

Elektrot materyalleri için verilen yukarıdaki ihtiyaçlar ışığında ve özellikle ilk maddeye bakıldığında farklı formlarda ve porozitelerde bulunabilen karbonun yüksek yüzey alanı özelliğiyle CDI ve diğer elektrosorpsiyon proseslerinde yaygın olarak kullanılması şarttır. CDI ve elektrosorpsiyon tarafından elektroaktif materyallerin ayrılması için; aktif karbon, aktif karbon kaplama, titanyum ile modifiye edilmiş aktif karbon kaplama, karbon keçe, karbon black, sinterlenmiş aktif karbon, karbon nanotüp, karbon aerojel gibi çeşitli formlarda karbonun kullanıldığı çalışmalar yapılmıştır [28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35]. Ayrıca farklı teknikler kullanılarak elektrot materyallerinin değişik ürünlerle (nanomalzeme) modifiye edilmesi üzerine çalışmalar sürmektedir.

Yapılan çalışmalarda irdelendiğinde aktif karbon ve karbon aerojelden müteşekkil elektrot malzemelerinin sağladığı yüksek yüzey alanı dolayısı ile diğer malzemelere nispetle yüksek verim sağladığı görülmektedir.

### 3.2 Başlangıç Kirlenici Konsantrasyonu

Genel itibari ile literatür çalışmalarında konsantrasyon parametresi değişken olarak kullanılmamıştır. Laboratuvarda yapılan çalışmada da 1000 mg/L NaCl çözeltisi sabit olmak üzere debi, akım ve voltaj değişkenleri irdelenmiştir. Ancak elektrotların adsorpsiyon kapasiteleri sınırlı olduğu için klasik CDI prosesi ile en yüksek 5969 mg/L konsantrasyon ile çalışılmıştır [15]. Diğer taraftan son zamanlarda geliştirilen reaktör tiplerinde aktif karbon kullanılarak (akıcı elektrot) 30000 – 35000 mg/L aralığında deniz suyu arıtımı çalışmaları başarı ile sürdürülmektedir. Akıcı bir elektrodun kullanılmasında ki handikap CDI prosesinde önemli aşamalardan biri olan desorpsiyonun uygulanamıyor oluşudur [14].

### 3.3 Debi

Debi, “suların arıtılması” başlığı altında irdelendiğinde temas süresi – bekletme süresi, reaktör hacmi gibi unsurlarla doğrudan ilişkilidir. Literatüre bakıldığında aynı şartlar altında farklı debiler ile yapılan çalışmalarda düşük debi ile daha yüksek verim elde edildiği görülmektedir [25]. Laboratuvarda 1000mg/L NaCl çözeltisi ile yapılan uygulamada da 15 ve 25 ml/dk gibi iki farklı debi ile çalışılmış; 15 ml/dk ile %75 verim elde edilirken, 25 ml/dk debi ile yapılan çalışmada verim %65’te kalmıştır.

### 3.4 Akım ve Voltaj

CDI prosesi diğer deiyonizasyon prosesleri ile karşılaştırıldığında enerji verimi ile öne çıkmaktadır. Dolayısı ile literatürde yapılan çalışmalarda akım ve voltajın değişken olarak çok fazla değerlendirilmediği görülmektedir. Genel itibari ile akım hakkında fazla bilgi verilmemekle birlikte 1 – 2 V potansiyel uygulanmaktadır. Elbette potansiyelin ve dolayısı ile akımın artırılması verimi de yükseltecektir [23, 26]. Fakat yüksek potansiyel uygulanması durumunda enerji sarfiyatının artması ve suyun elektrolize uğraması gibi olumsuzluklar vardır. Ayrıca laboratuvar çalışmalarında elektrotlar arası mesafenin artmasının giderim için en mühim unsur olan akımın teşkilini engellemektedir. Giderim için etkili bir akımın sağlanması amacıyla voltajın yükseltmesi enerji sarfiyatının artmasına neden olmaktadır.

### 3.5. Seçicilik

Özellikle yeraltı suları incelendiğinde farklı iyonik kirlenicilerin olduğu ve adsorpsiyon sürecinde iyonların rekabet halinde olduğu bilinmektedir. Karbon arojel elektrot kullanılarak yapılan bir çalışmada iyon adsorpsiyon derecesinin (mol/gr arojel) giriş konsantrasyonu ile doğrudan ilişkili olduğu görülmüştür ve iyon seçicilik sıralaması  $I > Br > Ca > alkalinite > Mg > Na > Cl$  şeklindedir. Söz konusu bu sıralamanın sudan iyon seçme imkânı sağlayabileceği söylenebilir [36].

Mossad vd. yaptıkları çalışmada Na, Ca, Mg, Fe katyon konsantrasyonları sırasıyla 240,1; 72,8; 54,3; 1,78 mg/L; Cl, Br, NO, F, SO<sub>4</sub> anyonların konsantrasyonu sırasıyla 390; 8,6; 6,9; 2,2; 186 mg/L'dir. Karbon elektrotlar ile 24 °C sıcaklıkta 2 L/dk debi ile yapılan çalışmada %87,8 giderim verimi elde edilmiştir. Aralarında küçük farklılıklar olmak ile birlikte giderim verimleri incelendiğinde kapasitif deiyonizasyon verimleri katyonlar için Fe> Ca> Mg> Na ve anyonlar için SO<sub>4</sub>>Br>C > F >NO<sub>3</sub> şeklinde bir sıralama izlemiştir [37].

## Sonuçlar

Temiz sulara ulaşmada yaşanan sıkıntılar dolayısı ise iyonik içeriği yüksek olan suların kullanılması en güçlü alternatif olarak görülmektedir. Düşük enerji maliyeti ve hacimsel olarak daha az ikincil kirlilik oluşturması ile öne çıkan CDI prosesi günümüzde kullanılan klasik deiyonizasyon prosesleri için ciddi bir rakip olarak durmaktadır. CDI prosesinin yaygın olarak kullanımının sağlanması amacıyla optimum sistem elemanlarının ve çalıştırma şartlarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu tespitin doğru yapılabilmesi için bu çalışmada literatür taraması laboratuvar çalışması ile desteklenerek proseste etkili parametrelerin etki dereceleri belirlenmeye çalışılmıştır.

Yapılan değerlendirme sonucunda değişken parametre olarak mevcut elektrot materyalleri kullanıldığında acı su sınıfına giren suların arıtılmasında CDI prosesinin oldukça başarılı olduğu görülmektedir. Deniz suyu gibi yüksek kirletici muhtevasına sahip suların etkili arıtımı için yeni sistem ve elemanlarının geliştirilmesi zaruridir. Ayrıca daha düşük debilerde farklı bir ifade ile yüksek bekletme sürelerinde ve nispeten yüksek potansiyelde daha etkili arıtma sağlandığı gözlenmiştir.

Yapılan çalışma ve literatür verileri karşılaştırıldığında CDI prosesi için en önemli işletme parametrelerinden birinin elektrotlar arası mesafe olduğu görülmektedir. Gerek enerji maliyeti ve gerekse arıtım performansı ve akım oluşumu açısından oldukça büyük öneme haizdir. Elektrotlar arası mesafenin azaltılması akım ve dolayısıyla elektrolitik reaksiyonları eşdeğer oranda arttırmaktadır.

Sonuç olarak farklı işletme parametrelerinin özellikle kendi aralarında ilişkili olduğu görülmektedir. Elektrotlararası mesafe, akım, elektriksel gerilim ve süre ile doğrudan ilişkilidir. Keza debi de süre ve akım ile doğrudan ilgili olmaktadır. Bu amaçla yapılacak CDI çalışmalarında iyi ve etkin bir planlama yapılarak optimizasyonun gerçekleştirilmesi verim maksimizasyonu ve maliyet minimizasyonu açısından büyük önem taşımaktadır.

## Kaynaklar

- [1] Service RF. Desalination freshens up. Science 2006; 313:1088–90.
- [2] Can M, Etemoğlu AB, Avcı A. Deniz suyundan tatlı su eldesinin teknik ve ekonomik analizi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi 2002; 7:1

- [3] Parsons SA. The effect of domestic ion-exchange water softeners on the microbiological quality of drinking water. *Water Res* 2000;34:2369–75.
- [4] Matsuo T, Nishi T. Activated carbon filter treatment of laundry waste water in nuclear power plants and filter recovery by heating in vacuum. *Carbon* 2000;38:709–14.
- [5] Bondoux G, Jandik P, Jones WR. New approach to the analysis of low levels of anions in water. *J Chromatogr* 1992;602:79–88.
- [6] Vanatta LE, Coleman DE, Slingsby RW. Low-level calibration study for a new ion chromatographic column to determine borate in deionized water. *J Chromatogr A* 1999;850:107–17.
- [7] Takeda K, Watanabe S, Naka H, Okuzaki J, Fujimoto T. Determination of ultra-trace impurities in semiconductorgrade water and chemicals by inductively coupled plasma mass spectrometry following a concentration step by boiling with mannitol. *Anal Chim Acta* 1998;377:47–52.
- [8] Spiegel EF, Thompson PM, Helden DJ, Doan HV, Gaspar DJ, Zanolidou H. Investigation of an electrodeionization system for the removal of low concentrations of ammonium ions. *Desalination* 1999;123:85–92.
- [9] Pekala RW, Farmer JC, Alviso CT, Tran TD, Mayer ST, Miller D. Carbon aerogels for electrochemical application. *J. Non-Cryst. Solids* 1998;225:74.
- [10] Oren Y. Capacitive Deionization (CDI) for Desalination and Water Treatment – past, present and future (a review). *Desalination* 2008;228:10-29.
- [11] Zhang W, Mossad M, Zou L. A study of the long-term operation of capacitive deionisation in inland brackish water desalination. *Desalination* 2013;320:80–85.
- [12] Nie C, Pan L, Liu Y, Li H, Chen T, Lu T, Sun T. Electrophoretic deposition of carbon nanotubes–polyacrylic acid composite film electrode for capacitive deionization. *Electrochimica Acta* 2012;66:106–109.
- [13] Welgemoed TJ, Schutte CF. Capacitive deionization technology: an alternative desalination solution. *Desalination* 2005;183:327–40.
- [14] Jeon SI, Park HR, Yeo JG, Yang S, Cho CH, Han MH, Kim DK. Desalination via a new membrane capacitive deionization process utilizing flow-electrodes, *Energy and Environmental Science*, 2013.
- [15] Lee JB, Park KK, Eum HM, Lee CW. Desalination of a thermal power plant wastewater by membrane capacitive deionization. *Desalination* 2006;196:125–34.
- [16] Kim YJ, Choi JH. Enhanced desalination efficiency in capacitive deionization with an ion-selective membrane. *Separation and Purification Technology* 2010;71:70–75.
- [17] Li H, Zou L. Ion-exchange membrane capacitive deionization: A new strategy for brackish water desalination. *Desalination* 2011;275:62–66.
- [18] Lee JH, Choi JH. The production of ultrapure water by membrane capacitive deionization (MCDI) technology. *Journal of Membrane Science* 2012;251:409–410.
- [19] Yang J, Zou L, Song H. Preparing MnO<sub>2</sub>/PSS/CNTs composite electrodes by layer-by-layer deposition of MnO<sub>2</sub> in the membrane capacitive deionization. *Desalination* 2012;286:108–114.
- [20] Kim YJ, Choi JH. Improvement of desalination efficiency in capacitive deionization using a carbon electrode coated with an ion-exchange polymer. *Water Research* 2010;44:990–96.
- [21] Kim YJ, Kim JH, Choi JH. Selective removal of nitrate ions by controlling the applied current in membrane capacitive deionization (MCDI). *Journal of Membrane Science*



2013;429:52–57.

[22] Yang CM, Choi WH, Na BK, Cho BW, Cho WI. Capacitive deionization of NaCl solution with carbon aerogel/silica gel composite electrodes. *Desalination* 2005;174:125–33.

[23] Oh HJ, Lee JH, Ahn HJ, Jeong Y, Kim YJ, Chi CS. Nanoporous activated carbon cloth for capacitive deionization of aqueous solution. *Thin Solid Films* 2006;515:220 – 225.

[24] Leonard KC, Genthe JR, Sanfilippo JL, Zeltner WA, Anderson MA. Synthesis and characterization of asymmetric electrochemical capacitive deionization materials using nanoporous silicon dioxide and magnesium doped aluminum oxide. *Electrochimica Acta* 2009;54:5286–91.

[25] Lee LY, Ng HY, Ong SL, Tao G, Kekre K, Viswanath B, Lay W, Seah H. Integrated pretreatment with capacitive deionization for reverse osmosis reject recovery from water reclamation plant. *Water Research* 2009;43:4769 – 77.

[26] Kim YJ, Hur J, Bae W, Choi JH. Desalination of brackish water containing oil compound by capacitive deionization process. *Desalination* 2010;253:119–23.

[27] Conway BE. *Electrochemical supercapacitors—scientific fundamentals and technological applications*. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers 1999;138–141.

[28] Ban A, Schafer A, Wendt H. Fundamental of electrosorption on activated carbon for wastewater treatment of industrial effluents. *J. Appl. Electrochem* 1998;28:227–236.

[29] Ayranci E, Conway BE. Adsorption and electrosorption of ethyl xanthate and thiocyanate anions at high area carbon cloth electrodes studied by in situ UV spectroscopy: Development of procedures for wastewater purification. *Anal. Chem.* 2001;73:1181–89.

[30] Ryoo MW, Seo G. Improvement in capacitive deionization function of activated cloth by titania modification. *Water Res.* 2003;37:1527–34.

[31] Ayranci E, Conway BE. Adsorption and electrosorption at high area carbon felt electrodes for wastewater purification: System evaluation with inorganic S-containing anions. *J. Appl. Electrochem.* 2001;31:257–66.

[32] Oren Y, Soffer A. Electrochemical parametric pumping, *J. Electrochem. Soc.* 1978;125:869.

[33] Andelman MD. Non-fouling flow-through capacitor system. *US Patent* 1998;5:779 – 891.

[34] Dai K, Shi L, Fang K, Zhang D, Yu B. NaCl adsorption in multi-walled carbon nanotubes. *Mat. Lett.* 2005;59:1989–92.

[35] Pekala RW, Alviso CT. Carbon aerogels and aerogels. *Proc. Materials Research Society Symp.* 1992;270:3–14.

[36] Xu P, Drewes JE, Heil D, Wang G. Treatment of brackish produced water using carbon aerogel-based capacitive deionization technology, *Water Research* 2008;42:2605 – 17.

[37] Mossad M, Zou L. A study of the capacitive deionisation performance under various operational Conditions. *Journal of Hazardous Materials* 2012;213– 214