



Membran Kapasitif Deiyonizasyon Prosesi ile Sertlik Giderimi

*¹Halil İbrahim Uzun, ²Eyüp Debik

¹Muş Alparslan Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, ha.uzun@alparslan.edu.tr 

²Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, debik@yildiz.edu.tr 

Araştırma Makalesi

Geliş Tarihi: 03.12.2018

Kabul Tarihi: 23.05.2019

Öz


Kalsiyum ve Magnezyum elementlerinin (+2) değerlikli iyon halleri sulara sertlik oluşturmaktadır. İnsan sağlığı açısından ciddi riskler oluşturmasa da sert sular sanayide üretim kalitesinin düşmesi, boruların ömrünün azalması, sıcak su üreten ya da tüketen cihazların ömrünün azalması gibi olumsuzluklara sebep olur. Sular CaCO₃ eşdeğeri olarak (0 – 75 mg/L) yumuşak, (75 – 150 mg/L) orta sert, (150 – 300 mg/L) sert, (>300 mg/L) çok sert su şeklinde sınıflandırılmaktadır. Membran Kapasitif deiyonizasyon (MCDI), sertlik türlerinin giderilmesinde etkili bir prosestir. Bu çalışmada sertlik gideriminde arıtılmış suyun kullanım alanı da göz önünde bulundurularak çok sert su sınıfına giren farklı oranlarda Ca²⁺ ve Mg²⁺ içeren sular MCDI ile arıtılarak proses suyu ve içme suyu elde edilmeye çalışılmıştır. Çalışmalar neticesinde 300 mg CaCO₃/L sertlik içeren sular proses suyu üretiminde %90 - %97 aralığında; içme suyu eldesinde ise %71 - %82 oranlarında arıtılmıştır. Enerji için Maliyet analizi yapıldığında proses suyu için maliyetler 0,01 – 0,02 \$/m³ aralığında değişirken içme suyu eldesi için bu maliyet 0,009 – 0,016 \$/m³ aralığında değişmektedir.


Anahtar kelimeler: Sertlik, Membran Kapasitif Deiyonizasyon, Tuzsuzlaştırma

Hardness Removal by Membrane Capacitive Deionization Process

*¹Halil İbrahim Uzun, ²Eyüp Debik

¹Muş Alparslan University, Faculty of Engineering and Architecture, Environmental Engineering Department,

ha.uzun@alparslan.edu.tr 

²Yıldız Technical University, Civil Engineering Faculty, Environmental Engineering Department, debik@yildiz.edu.tr 

Abstract

Calcium and Magnesium elements (+2) valued ion states form hardness in waters. Although it does not pose serious risks for human health, hard water causes negative effects such as decreasing production quality in the industry, shorten the life of the pipes and the life of the devices that produce or consume hot water. Water is classified as CaCO₃ equivalent (0 - 75 mg / L) soft, (75 - 150 mg / L) medium hard, (150 - 300 mg / L) hard, (>300 mg / L) as hard water. Membrane Capacitive deionization (MCDI) is an effective process for removing hardness types. In this study, taking the usage area of treated water in hardness removal, into account, water with different proportions of Ca²⁺ and Mg²⁺, which are classified as hard water, have been treated with MCDI to produce process water and drinking water. As a result of the studies, water containing 300 mg CaCO₃ / L hardness in the process water production in the range of 90% - 97%; in drinking water treatment, it was treated with % 71 - % 82. When cost analysis is performed, costs for process water vary between 0.01 - 0.02 \$ / m³, while this cost for drinking water varies between 0.009 - 0.016 \$ / m³.

Keywords: Hardness, Membrane Capacitive Deionization, Desalination

1. GİRİŞ

Suların sertliği, muhtevasında bulunan iki değerlikli metal katyonlarının sebep olduğu, suyun temas ettiği yüzeylerde tahribata yol açan, suyun tadını bozan ve su kalitesini

belirleyen bir parametredir [1]. Sertlik su içinde çözünen Ca²⁺, Mg²⁺, Sr²⁺, Fe²⁺, Mn²⁺ gibi iki değerlikli iyonların konsantrasyonlarına bağlıdır. Söz konusu bu iyonların HCO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻, NO₃⁻, SiO₃⁻ gibi anyonlar ile oluşturdukları tuzlar sertliği meydana getirir. Sulardaki

*¹Muş Alparslan Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, ha.uzun@alparslan.edu.tr,

Bu çalışma ISEM2018 sempozyumunda " Membran Kapasitif Deiyonizasyon Prosesi ile Sertlik Giderimi " başlıklı bildiri olarak sunulan çalışmadan geliştirilmiştir.

sertlik, suların temas halinde bulunduğu kayaç veya toprak dolayısı ile oluşur. Sular temas ettikleri sertlik kaynağı olan maddeleri çözerek bünyesine alır. Böylelikle sertlik oluşur. Özellikle yağışlar sırasında yağmur suları atmosfer gazları ile birleşerek asidik karaktere sahip olmaktadır. Bunun yanında toprakta meydana gelen biyolojik faaliyetler sonucunda açığa çıkan CO₂ suda çözünerek ona asidik bir karakter kazandırabilir [2].

Endüstriyel ve içme ihtiyacına yönelik kullanılacak olan sert suların arıtılması hem suların kullanım amaçları yönünden hem de suların nefaseti dolayısı ile önemlidir. Özellikle sertlik oluşturan kalsiyum ve magnezyum gibi +2 değerlikli iyonlar sıcak su kullanan veya üreten teknolojik ekipmanların borulama sistemlerinde ciddi tıkanmalara sebep olmaktadır [3]. Ayrıca arıtma sistemlerinde membranların kirlenerek ve tıkanarak işlevlerini kaybetmesi, kazan taşı oluşumu, temizlik verimliliğinde azalma, temizlik kimyasallarının sarfiyatında artış gibi problemlerin azaltılması ve giderilmesinde sertlik giderimi oldukça önemlidir [4]. Ancak suların arıtılmasında ve özellikle sertlik gideriminde suyun kullanım alanı oldukça önemlidir.

Endüstriyel ihtiyaca yönelik kullanılacak sulardan tüm iyonların giderilmesi istenebilir. Ancak içme sularında kalsiyumun ve magnezyumun sağlık açısından bilinen olumsuz bir etkisi bulunmamaktadır. Diğer taraftan kalsiyum insan vücudu için gerekli minerallerden biridir. Kemik yapısına katılmakla birlikte periferik sinirlerde ve kaslarda işlevin normal devamı için rol oynar. Magnezyum ise vücutta fosfat transferinde önemli rol oynayan elementlerden biridir. Ayrıca nükleik asitlerin yapısal düzenlerinin korunmasında önemli bir element olduğu kabul edilmektedir [5].

Sulardan sertlik gideriminde kimyasal çöktürme, iyon değiştirme, nanofiltrasyon ve ters ozmoz gibi membran prosesleri ile elektrodializ yaygın olarak kullanılan ve artık geleneksel arıtma sistemleri olarak ifade edilen proseslerdir [6]–[12].

Ancak kimyasal çöktürme işleminde kullanılan ilave kimyasallar içme sularında kısıtlanan maddelerdir. İyon değişimi ve membran işlemlerinin rejenerasyonunda açığa çıkan tek değerlikli iyonlar ve asitler, çevreye zararlı etkilere neden olmaktadır [4], [10], [13]. Bu arıtma yöntemleri arıtma yönteminin doğrudan kimyasal bir işleme dayanması, membranları meydana gelecek tıkanmaların azaltılmasında ve giderilmesinde kullanılan kimyasallar gibi ekstra kimyasal kullanımını gerektirmesi, enerji maliyetlerinin yüksek olması gibi dezavantajlar dolayısı ile ekonomik gözükmemektedir [12]. Bu sebeple sert suların arıtılmasında çevre dostu, esnek kullanıma sahip, düşük enerji maliyetleri olan arıtma yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Son yıllarda sert suların kontrolünde etkili bir alternatif olarak gösterilen kapasitif deiyonizasyon (CDI) elektrotlar

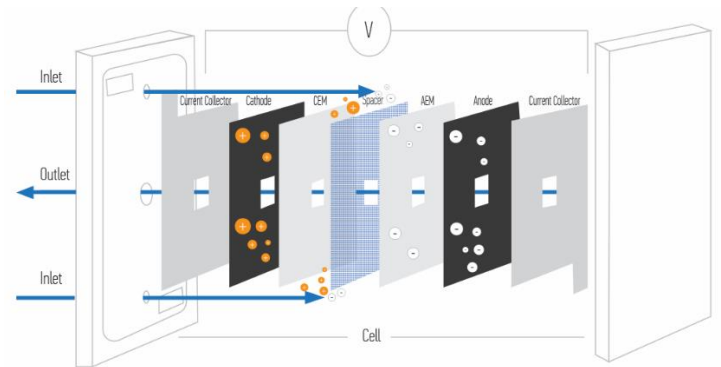
üzerinde elektrokimyasal adsorpsiyon / desorpsiyon yoluyla iyonların bertaraf edildiği bir teknolojidir [14]–[16]. CDI prosesinde uygulanan potansiyeller ile anot ve katot olarak ayrılan elektrotların yüzeyleri üzerinde zıt yüklü iyonları tutmak için elektriksel çift tabaka oluşturulur. Böylelikle zıt yüklü iyonlar karşıt elektrotlarda etkili bir biçimde tutulurlar. Kapasitif deiyonizasyon (CDI) nispeten düşük enerji tüketen, sertlik iyonlarının uzaklaştırılması için oldukça cazip, çevre dostu bir teknolojidir ve ikincil rejenerasyon atıkları oluşturmaz, pahalı membranlar ve yüksek basınç pompaları gerektirmez [17], [18].

Membran kapasitif deiyonizasyon (MCDI) ise CDI sisteminde elektrot yüzeylerine iyon seçici membran eklenmesi ile oluşturulan ve CDI teknolojisinin performansını arttırmada etkili olan bir prostestir [19]. İyon seçici membranlar karşıt elektrotlarda zıt yüklü iyonların etkili tutulmasını sağlarken aynı zamanda desorpsiyon sürecinde zıt iyonların karşı elektrotlara geçişlerini engellemektedir.

CDI prosesi ile tek değerli iyonların sudan bertarafına yönelik bir çok çalışma yapılmıştır ancak CDI kullanılarak sertliğin giderilmesi üzerine yapılan çalışmalar kısıtlıdır [14], [20], [21].

Bu çalışmada sertlik oluşturan kalsiyum ve magnezyum iyonları MCDI prosesi ile ekonomik olarak arıtılarak hem proses suyu kalitesine (%100'e yakın sertlik giderimi) hem de içme suyu kalitesine getirilmeye (%50 - %70) çalışılmıştır. MCDI prosesinde iyonların tercihli olarak giderildiği bilinmekte olduğundan kalsiyum ve magnezyum giderim verimleri ayrı ayrı tespit edilmeye çalışılmıştır. Son olarak MCDI ile sertlik gideriminde enerji sarfiyatları ve maliyetler ortaya konmuştur.

2. MALZEME VE YÖNTEM



Şekil 1. MCDI şematik gösterimi [22].

MCDI çalışmaları Şekil 1'de şematik olarak gösterilen Voltea marka MCDI sistemi ile yürütülmüştür. MCDI sistemi birbirini takip eden 24 adet hücreden oluşmakta, her bir hücre grafit akım dağıtıcı (kalınlık $\delta = 250 \mu\text{m}$), kimyasal olarak aynı katot ve anot görevi görmek üzere gözenekli karbon elektrotlar (PACMM 203, Irvine, CA,

USA, $\delta_e = 362 \mu\text{m}$), iyon geçişi kontrolünü sağlamak üzere anyon ve kation seçici membranlar (Neosepta AM-1 and Neosepta CM-1, Tokuyama Co., Japan, $\delta \approx 130 \mu\text{m}$), su akışını sağlaması ve elektrotları birbirinden ayırması için tekstil bir ayırıcı ($\delta = 115 \mu\text{m}$)'dan oluşmaktadır. Toplam elektrot alanı $1,18 \text{ m}^2$ ve karbon elektrotların direnci $1 (\pm 0,2) \Omega \cdot \text{cm}^2$ 'dir. Anyon ve kation seçici membranların dirençleri yaklaşık $2 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 'dir [23].

MCDI, arıtım (puring), ön hazırlık (prepurifying), desorpsiyon (wasting) şeklinde ifade edilebilecek üç aşamada otomatik ve manuel olarak çalıştırılmaktadır. Aşamaların tamamı aynı reaktörde gerçekleşmek olup fakat bu üç aşamada da arıtılmış su ile konsantrasyon farklı kanallardan otomatik olarak yönlendirilebilmektedir.

Ayrıca MCDI cihazında partikül maddelerin reaktör içine girmesini önlemek amacıyla 1L hacme sahip $0,1 \mu\text{m}$ por çaplı filtrenin bulunduğu bir ön arıtım hücresi bulunmaktadır. Reaktörün besleme ve arıtılmış suyun çıkış kanallarında iletkenlik propları bulunmaktadır ve iletkenlikler otomatik olarak ölçülerek yazılım aracılığı ile bilgisayara aktarılmaktadır. Elektriksel potansiyel (V), akım (A) ve basınç gibi değerler otomatik olarak ölçülebilmektedir.

MCDI sisteminde elektriksel potansiyel hidroliz şartlarının oluşmaması için maksimum $1,5 \text{ V}$ olacak şekilde sabit tutulmuştur. Cihaz reaktörü $0,3 \text{ L}$ hacminde olduğu için, tam karışım bir reaktör kabulü ile debisi ve $0,3 \text{ L/dk}$ 'da tutulmuştur. Bu değerlerin üstündeki debilerde enerji sarfiyatı artmakta, altındaki değerlerde ön hazırlık aşamasında reaktörün tam olarak boşaltılması uzun sürmektedir. Bu bağlı olarak konsantrasyon akım hacmi artmaktadır. MCDI sistemi ile yapılan optimizasyon çalışmalarında işletme sürelerinin adsorpsiyon için 1440 saniye, sistemin hazırlık aşaması (reaktörde bulunan konsantrasyonun tamamen bertarafı ve elektrotların adsorpsiyon/desorpsiyon için şarj edilmesi) için 60 saniye olarak tespit edilmiştir. Desorpsiyon süresi giriş iletkenliğine bağlı olarak değişmektedir [24].

Ca^{2+} , Mg^{2+} ölçümleri için standart metotlar kullanılmıştır [Standart Methods].

MCDI cihazının, farklı içeriklerde çok sert sınıfta kabul edilen ($300 \text{ mg CaCO}_3/\text{L}$ sertliğine sahip su numuneleri) suları arıtma performansının ortaya konması için farklı içeriğe sahip numuneler hazırlanmıştır. İçerikte bulunan Ca^{2+} ve Mg^{2+} iyonları $\text{mg CaCO}_3/\text{L}$ eşdeğeri olarak hazırlanmış ve giderim verimleri de bu eşdeğerler üzerinden hesaplanmıştır.

3. BULGULAR

3.1. Farklı Konsantrasyonlarda Ca^{2+} ve Mg^{2+} Sertliği Olan Sulardan MCDI ile Proses Suyu Üretimi

Sular sertlik derecelerine göre sınıflandırılmaktadır. Tablo

1'de bu sınıflandırma ve konsantrasyonları verilmiştir.

Tablo 1. Suların $\text{mg CaCO}_3 / \text{L}$ sertlik derecesi sınıflandırması

$\text{mg CaCO}_3 / \text{L}$	Sertlik Derecesi
0 – 75	Yumuşak
75 – 150	Orta Sert
150 – 300	Sert
300 ve üzeri	Çok Sert

Yaklaşık (1:1), (1:2) ve (2:1) ve toplam sertliği yaklaşık $300 \text{ mg CaCO}_3 / \text{L}$ toplam sertliği olan çok sert sınıfa giren MCDI ile %100'e yakın giderim verimi ile artırılarak proses suyu (ultra saf) elde edilmeye çalışılmıştır. Hazırlanan çözeltilerin Ca^{2+} ve Mg^{2+} iyonlarından kaynaklanan sertlikleri ile toplam sertlikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Hazırlanan Çözeltilerin Ca^{2+} ve Mg^{2+} ile Toplam Sertlik Dereceleri

$\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ Giriş Oranları	Ca^{2+} Sertliği mgCaCO_3/L	Mg^{2+} Sertliği mgCaCO_3/L	T.S. mgCaCO_3/L
1:1	155	152	307
2:1	195	110	305
1:2	110	190	310
Ca^{2+}	305	-	305
Mg^{2+}	-	300	300

Farklı oranlarda hazırlanan çözeltiler MCDI cihazı ile proses suyu elde etmek amacıyla ultra saf su üretilecek düzeyde artırılmıştır.

Elde edilen veriler Tablo 2'de verilmiştir. İletkenlik üzerinden giderim verimleri Ca^{2+} : Mg^{2+} için (1:1), (1:2), (2:1) için sırasıyla %97, %94 ve %92'dir. Yalnızca Ca^{2+} iyonlarından ileri gelen sertlik için iletkenlik giderim verimi %99 iken, yalnızca Mg^{2+} iyonlarından ileri gelen sertlik için iletkenlik giderim verimi %92'dir. İyonların elektrotlara göç ettirilmesinde sulu yarı çapları, elektrotların gözenek boyutları ve bu boyutların dağılımları önemlidir. Mikro ve makro gözenek boyutunun dengeli olarak dağıldığı elektrotlarda sulu yarı çapı yüksek olan iyonların daha etkili giderilebileceği söylenebilir [25].

Mg^{2+} ($4,28 \text{ \AA}$) ve Ca^{2+} ($4,12 \text{ \AA}$) sulu yarı çaplarının birbirine yakın olduğu göz önüne alındığında, Mg^{2+} ve Ca^{2+} iyonlarının dengeli olarak arıtılabilir. MCDI ile yapılan çalışmalar sonucunda standart hatalar göz önüne alındığında Ca^{2+} ve Mg^{2+} iyonlarının dengeli olarak arıtıldığı görülmektedir.

Tablo 3. MCDI ile proses suyu eldesinde performans göstergeleri

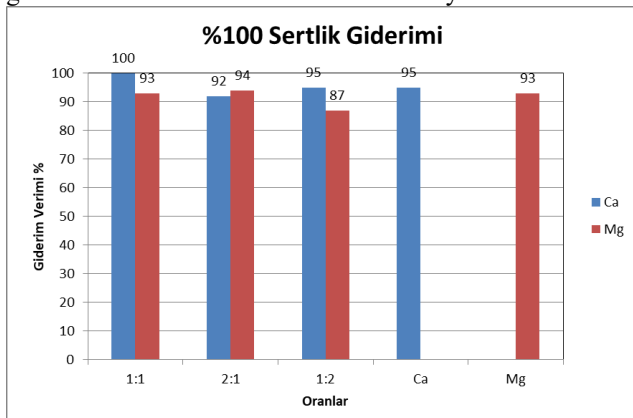
Ca ²⁺ ve Mg ²⁺ Sertliği Oranları	(1:1)	(2:1)	(1:2)	Ca ²⁺	Mg ²⁺
İletkenlik Giderimi (%)	97	94	92	99	92
Ortalama Akım (A)	2,1	1,7	1,9	1,65	3,1
Ortalama Potansiyel (V)	1,41	1,21	1,14	1,17	1,25
Su Geri Kazanımı (%)	91	91	91	91	89
Giriş İletkenliği (µS/cm)	465	367	531	351	677

MCDI ile arıtım sonrası kalan Ca²⁺ ve Mg²⁺ sertliklerinin mg CaCO₃ / L cinsinden miktarları Tablo 4’de verilmiştir.

Tablo 4. MCDI ile proses suyu eldesinde arıtım sonrası kalan Ca²⁺ ve Mg²⁺ iyonlarından kaynaklanan sertlik miktarları

Ca ²⁺ + Mg ²⁺ Sertlik Oranları	Ca ²⁺ Sertliği mgCaCO ₃ /L	Mg ²⁺ Sertliği mgCaCO ₃ /L	T.S. Giderim Verimi %
1:1	<1	10	97
2:1	15	7	93
1:2	5	25	90
Ca ²⁺	15	-	95
Mg ²⁺	-	20	93

Sonuçlara göre Şekil 2’de gösterildiği gibi yaklaşık (1:1) oranında hazırlanan çözelti için Ca²⁺ ve Mg²⁺ sertliklerinin giderim verimleri sırasıyla %100 ve %93; (1:2) oranında hazırlanan çözelti için sırasıyla %92 ve %94; (2:1) oranı için sırasıyla %95 ve %87 şeklindedir. Yalnızca Ca²⁺ veya Mg²⁺ sertliği içeren çözeltinin arıtılması ile Ca²⁺ ve Mg²⁺ sertliklerinin giderim verimleri sırasıyla %95 ve %93’tür. MCDI ile arıtımda iletkenlik ilk sürücü kuvvet olarak değerlendirilmektedir. (1:1) oranında hazırlanan çözeltide bulunan Ca²⁺ iyonlarının yalnızca Ca²⁺ iyonları ile hazırlanan çözeltide bulunan iyonlardan daha etkili giderilmesi iletkenlik farklılıklarından kaynaklanmaktadır.

**Şekil 2.** Proses suyu eldesinde Ca²⁺ ve Mg²⁺ giderim verimleri

3.2. Farklı Konsantrasyonlarda Ca²⁺ ve Mg²⁺ Sertliği Olan Sulardan MCDI ile İçme Suyu Eldesi

Sertlik giderimi daha önce ifade edildiği gibi suyun kullanım alanına uygun olarak belirlenmelidir. Bu sebeple içme suyu eldesine yönelik çalışmalarda yaklaşık olarak 300 mg CaCO₃ / L sertlik içeren suların 75 mg CaCO₃ / L düzeyine indirilerek yumuşatılması hedeflenmiştir.

(1:1), (1:2) ve (2:1) oranında Ca²⁺ ve Mg²⁺ iyonları içeren suların MCDI ile arıtılmasında kullanılan akım ve potansiyel verileri Tablo 5’de gösterilmektedir. Bu veriler ile yapılan arıtım sonrasında (1:1), (1:2) ve (2:1) oranlarında Ca²⁺ ve Mg²⁺ içeren suların arıtılmasında iletkenlik giderim verimleri sırasıyla %77, %77 ve %71’dir. Yalnızca Ca²⁺ iyonu ile hazırlanan çözeltide iletkenlik giderim verimi %78 ve yalnızca Mg²⁺ iyonu ile hazırlanan çözeltide iletkenlik giderim verimi %73’tür.

Tablo 5. MCDI ile içme suyu eldesinde performans göstergeleri

Ca ²⁺ :Mg ²⁺ Oranları	(1:1)	(2:1)	(1:2)	Ca ²⁺	Mg ²⁺
İletkenlik Giderimi (%)	77	77	71	78	73
Ortalama Akım (A)	1,7	1,50	2,1	1,29	2,7
Ortalama Potansiyel (V)	1,2	1,1	1,3	1	1,25
Su Geri Kazanımı (%)	91	91	91	91	86
Giriş İletkenliği (µS/cm)	465	367	531	351	677

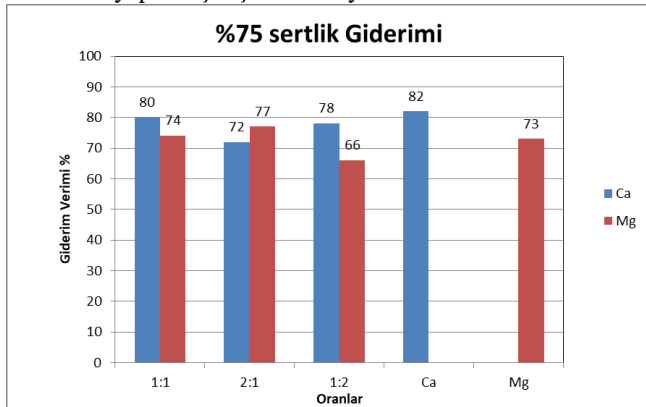
Farklı oranlarda kalsiyum ve magnezyum sertliği içeren numunelerin MCDI ile arıtım sonrası kalan Ca²⁺ ve Mg²⁺ sertliklerinin mg CaCO₃ / L cinsinden miktarları Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. MCDI ile içme suyu eldesinde arıtım sonrası kalan Ca²⁺ ve Mg²⁺ iyonlarından kaynaklanan sertlik miktarları

Ca ²⁺ + Mg ²⁺ Giriş Oranları	Ca ²⁺ Sertliği mgCaCO ₃ /L	Mg ²⁺ Sertliği mgCaCO ₃ /L	T.S. Giderim Verimi %
1:1	30	39	77
2:1	55	25	74
1:2	24	65	71
Ca ²⁺	54	-	82
Mg ²⁺	-	82	73

(1:1) oranında hazırlanan çözelti için Ca²⁺ ve Mg²⁺ sertliği içeren sudaki giderim verimleri sırasıyla %80 ve %74; (1:2) oranında hazırlanan çözelti için sırasıyla %72 ve %77; (2:1) oranı için sırasıyla %78 ve %66 elde edilmiştir. Sadece Ca²⁺ ve yalnızca Mg²⁺ ile hazırlanan numunelerin arıtılması ile Ca²⁺ ve Mg²⁺ giderim verimleri sırasıyla %82 ve

%73'tür. Şekil 3'de de gösterildiği gibi sonuçlar ultra saf su eldesinde yapılan çalışmalarla uyumludur.



Şekil 3. Proses suyu eldesinde Ca²⁺ ve Mg²⁺ sertliklerinin giderim verimleri

3.3. MCDI ile Sertlik Gideriminde Maliyet

Daha önce ifade edildiği gibi sulardan sertlik gideriminde, arıtılacak suyun kullanım alanı oldukça önemlidir. Fakat geleneksel sertlik giderim yöntemlerinde sertlik giderim verimi üzerinde esneklik bulunmamaktadır. MCDI prosesiyle yürütülen çalışmalarda da görüldüğü gibi istenen verimde arıtım yapmak mümkündür. Bu arıtım ekonomisini açısından da oldukça önemlidir. MCDI ile 300 mgCaCO₃/L sertlik içeren suyun %95 – 100 arasında arıtılarak proses suyu elde edilmesi ile yaklaşık %75 oranında arıtma veriminde içme suyu özelliğinde su elde edilmesinde toplam enerji sarfıyatı ve toplam maliyet hesaplanarak tabloda verilmiştir.

Tablo 7. MCDI ile sertlik gideriminde enerji sarfıyatları ve maliyetler

Ca ²⁺ : Mg ²⁺ Oranları	Proses Suyu Eldesi				
	(1:1)	(2:1)	(1:2)	Ca ²⁺	Mg ²⁺
Enerji Sarfıyatı kWsa/m ³	0,164	0,114	0,120	0,107	0,215
Maliyet \$/m ³	0,015	0,010	0,010	0,009	0,019
	İçme Suyu Eldesi				
	0,113	0,092	0,152	0,072	0,187
	0,01	0,008	0,014	0,007	0,016

Tablo 7'den görüleceği gibi MCDI prosesi kullanılarak aynı özellikteki suyun farklı amaçlarla arıtılması ile farklı enerji maliyetleri ortaya çıkmakta, ihtiyaca göre düşük maliyetler elde edilebilmektedir.

4. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Sert sular içeriğinde bulunan +2 değerlikli metaller dolayısıyla ile temas ettikleri yüzeylerde tahribata yol açmakla birlikte

suyun tadından ciddi bozulmalara da sebep olmaktadır. Bu olumsuzluklar sebebiyle sert suların yumuşatılması gerekmektedir. Geleneksel yöntemler ekonomik olmamaları, ilave kimyasal gerektirmeleri gibi dezavantajlara sahiptir. Kapasitif deiyonizasyon prosesinin iyon seçici membranlarla donatılmış bir modifikasyonu olan membran kapasitif deiyonizasyon prosesi (MCDI) sertlik gideriminde kullanılabilen, ekonomik, kimyasal gerektirmeyen ekonomik yeni bir teknolojidir.

Sertlik giderimi yapılırken, arıtılacak suyun ne amaçla kullanılacağı, arıtım teknolojisi ve maliyet açısından önemlidir. Bu çalışmada endüstriyel amaçla kullanılacak proses suyu üretimi için farklı Ca²⁺ ve Mg²⁺ sertliğine sahip yaklaşık 300 mg CaCO₃/L sertlik içeren numuneler MCDI ile %90 - %97 aralığında arıtılma yapılarak proses suyu elde edilmiştir. İçme suyu eldesine yönelik çalışmalarda ise aynı özellikteki numuneler %71 - %82 oranlarından arıtılarak başarı ile yumuşatılmıştır. Yapılan maliyet analizine göre proses suyu için 0,01 – 0,02 \$/m³ enerji maliyet oluşurken içme suyu eldesi için bu değer 0,009 – 0,016 \$/m³ aralığında değişmektedir.

Sonuç olarak MCDI prosenin istenen kalitede çıkış suyu elde etmek için esnek olarak kullanılabildiği ve böylece daha düşük maliyetlere sebep olduğu ortaya konmuştur.

KAYNAKÇA

- [1].J. M. Symons, L. C. Bradley, T. C. Cleveland, "The drinking water dictionary", American Water Works Association. Mc Graw Hill, 2000.
- [2].Ö. F. Tekbaş, G. Mahir, "Suların Sertlik Dereceleri ve Sağlık Etkileri," *TSK Koruyucu Hekim. Bülteni*, vol. 3.7, pp. 156–161, 2004.
- [3].C. Gabrielli, G. Maurin, H. Francy-Chausson, P. Thery, T. T. M. Tran, and M. Tlili, "Electrochemical water softening: principle and application," *Desalination*, 2006.
- [4].J. S. Park, J. H. Song, K. H. Yeon, and S. H. Moon, "Removal of hardness ions from tap water using electromembrane processes," *Desalination*, 2007.
- [5].B. Boysal, F. Şengörür, "Su Sertliğinin İnsan Sağlığı İçin Önemi," *SAÜ Fen Bilim. Derg.*, vol. 13:1, pp. 7–10, 2009.
- [6].J. G. Dean, F. L. Bosqui, and K. H. Lanouette, "Removing heavy metals from waste water," *Environ. Sci. Technol.*, 1972.
- [7]. A. R. Hauck, S. Sourirajan, "Performance of porous cellulose acetate membranes for the reverse osmosis treatment of hard and waste waters," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 3.12, pp. 1269–1275, 1969.
- [8].M. K. Nagarajan and H. L. Paine, "Water hardness control by detergent builders," *J. Am. Oil Chem. Soc.*, 1984.
- [9].B. H. Wiers, R. J. Grosse, and W. a Cilley, "Divalent and trivalent ion exchange with zeolite A.," *Environ. Sci. Technol.*, 1982.
- [10].S. Ghizellaoui, A. Chibani, and S. Ghizellaoui, "Use of nanofiltration for partial softening of very hard water," *Desalination*, 2005.

- [11].K. H. Yeon, J. H. Song, and S. H. Moon, "A study on stack configuration of continuous electrodeionization for removal of heavy metal ions from the primary coolant of a nuclear power plant," *Water Res.*, 2004.
- [12].J. H. Song, K. H. Yeon, J. Cho, and S. H. Moon, "Effects of the operating parameters on the reverse osmosis- electrodeionization performance in the production of high purity water," *Korean J. Chem. Eng.*, 2005.
- [13].P. Čuda, P. Pospíšil, and J. Tenglerová, "Reverse osmosis in water treatment for boilers," *Desalination*, 2006.
- [14].Y. Oren, "Capacitive deionization (CDI) for desalination and water treatment - past, present and future (a review)," *Desalination*, vol. 228, no. 1–3, pp. 10–29, 2008.
- [15].S. Porada, R. Zhao, A. Van Der Wal, V. Presser, and P. M. Biesheuvel, "Review on the science and technology of water desalination by capacitive deionization," *Progress in Materials Science*. 2013.
- [16].M. E. Suss, S. Porada, X. Sun, P. M. Biesheuvel, J. Yoon, and V. Presser, "Water desalination via capacitive deionization: What is it and what can we expect from it?," *Energy and Environmental Science*. 2015.
- [17].H. J. Ahn, J. H. Lee, Y. Jeong, J. H. Lee, C. S. Chi, and H. J. Oh, "Nanostructured carbon cloth electrode for desalination from aqueous solutions," *Mater. Sci. Eng. A*, 2007.
- [18].J. F. Farmer, J. C., Fix, D. V., Mack, G. V., Pekala, R. W., & Poco, "Capacitive deionization of NaCl and NaNO₃ solutions with carbon aerogel electrodes," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 143(1), p. 159–169., 1996.
- [19].P. M. Biesheuvel and A. van der Wal, "Membrane capacitive deionization," *J. Memb. Sci.*, vol. 346, no. 2, pp. 256–262, 2010.
- [20].J. B. Lee, K. K. Park, H. M. Eum, and C. W. Lee, "Desalination of a thermal power plant wastewater by membrane capacitive deionization," *Desalination*, vol. 196, no. 1–3, pp. 125–134, 2006.
- [21].T. J. Welgemoed and C. F. Schutte, "Capacitive Deionization TechnologyTM: An alternative desalination solution," *Desalination*, vol. 183, no. 1–3, pp. 327–340, 2005.
- [22].H. I. Uzun and E. Debik, "Economical approach to nitrate removal via membrane capacitive deionization," *Sep. Purif. Technol.*, vol. 209, 2019.
- [23].P. Długolecki and A. Van Der Wal, "Energy recovery in membrane capacitive deionization," *Environ. Sci. Technol.*, 2013.
- [24].E. Debik, H. İ., Uzun, F. İlhan, Y. Avşar, "Yeni Bir Deiyonizasyon Prosesi: Kapasitif Deiyonizasyon," *Uluslararası Katılımlı Çevre Sempozyumu*, vol. 1, pp. 172–177, 2014.
- [25].S. J. Seo, H. Jeon, J. K. Lee, G. Y. Kim, D. Park, H. Nojima, J. Lee, and S. H. Moon, "Investigation on removal of hardness ions by capacitive deionization (CDI) for water softening applications," *Water Res.*, vol. 44, no. 7, pp. 2267–2275, 2010.