



T.C.
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TUZLU SULARIN ARITILMASINDA YENİ BİR SİSTEM TASARIMI VE
DENEYSEL UYGULAMASI

BURHAN HIRLAKOĞLU

Temmuz 2011

T.C.
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TUZLU SULARIN ARITILMASINDA YENİ BİR SİSTEM TASARIMI VE
DENEYSEL UYGULAMASI

BURHAN HIRLAKOĞLU

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Yrd. Doç. Dr. Ahmet BİLGİL

Temmuz 2011

Burhan HIRLAKOĞLU tarafından **Yrd. Doç. Dr. Ahmet BİLGİL** danışmanlığında hazırlanan “**Tuzlu Suların Arıtılmasında Yeni Bir Sistem Tasarımı Ve Deneysel Uygulaması**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği** Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.


Başkan : Yrd. Doç. Dr. Hamdi TAPLAK (Erciyes Üniversitesi)


Üye : Yrd. Doç. Dr. Ahmet BİLGİL (Niğde Üniversitesi)


Üye : Yrd. Doç. Dr. Niğmet UZAL (Niğde Üniversitesi)

ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/...../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu'nun/...../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../2011

Doç. Dr. Nurettin ACIR

MÜDÜR

ÖZET

TUZLU SULARIN ARITILMASINDA YENİ BİR SİSTEM TASARIMI VE DENEYSSEL UYGULAMASI

HIRLAKOĞLU, Burhan
Niğde Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Ahmet BİLGİL
Temmuz 2011, 66 sayfa

Yeryüzündeki mevcut suların yaklaşık %97,3'ü denizlerde tuzlu su şeklinde bulunmaktadır. Bu tuzlu suyun içme ve kullanma suyu olarak kullanımı için günümüzde pek çok arıtım teknolojisi uygulanmaktadır. Ancak bu teknolojilerin işletme ve yatırım girdilerinin fazlalığı kullanım alanlarını sınırlamaktadır.

Bu çalışmada, tuzlu suların arıtılması amacıyla uygulanabilirliği yüksek, yatırım ve işletme maliyeti daha düşük yeni bir arıtma sistemi tasarımı yapılarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Deney öncesi tuzlu suyun ve deney sonrası arıtılmış suyun elektriksel iletkenlikleri ölçülerek tuzun giderim miktarı belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan yeni sistemle elektriksel iletkenliğe göre elde edilen veriler doğrultusunda ortalama %99,7 oranında tuz giderimi sağlanabilmiştir. Ayrıca yeni sistemin işletme ve yatırım maliyetleri hesaplanarak uygulamada olan diğer sistemlerle karşılaştırılması yapılmış ve yeni sistemin ekonomik açıdan daha uygun olduğu belirlenmiştir.

Anahtar sözcükler: Desalinasyon, Tuzlu suların arıtılması, Elektriksel iletkenlik, İyon değişimi

SUMMARY

DESIGN AND EXPERIMENTAL APPLICATION OF A NEW SYSTEM IN SALINE WATER TREATMENT

HIRLAKOĞLU, Burhan

Nigde University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor : Assist. Prof. Dr. Ahmet BİLGİL

July 2011, 66 sayfa

Approximately, 97,3% of the waters existing on earth is saline water. Various treatment technologies are currently applied to for the treatment of saline waters to be used as drinking and utility waters. But excessive operating and investment inputs of these technologies limit their ranges of use.

In this study aiming at treatment of saline waters, a new treatment system that had higher applicability but lower investment and operational costs was designed and related experimental researches were carried on.

Concentration in the samples were determined by measuring electrical conductivities before and after experiments. As per the data that were obtained according to the electrical conductivity, 99,7% removal of salt was achieved by the new system used in the study. Furthermore, it was determined that this new system was more appropriate from economical point of view after the investment and operational costs of it were calculated and compared with the other systems that were currently in use.

Keywords: Desalination, Treatment of saline waters, Electrical conductivity, İon exchange

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim süresince, benden ilgi ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocalarım Doç. Dr. Kutsi Savaş ERDURAN'a, Yrd. Doç. Dr. Ahmet BİLGİL'e, Yrd. Doç. Dr. Niğmet UZAL'a, Yrd. Doç. Dr. Hamdi TAPLAK'a ve Öğr. Gör. Ergün YEŞİLYURT'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Beni sabırla dinleyip, sorunlarıma ve sorularıma yardımcı oldukları için Burak İŐKUR, Kerem BALCI, İsmail BULDUK, Muhammet ÇAKMAK, Serkan HORZUM, Yasin ATUÇURAN, Caner YILDIZ, Güray TAŐER, Niğde Üniversitesi İnşaat Mühendisliğı, Çevre Mühendisliğı ve Makine Mühendisliğı Bölümü'nün çok değerli hocalarına minnettarlığıımı belirtmek istiyorum.

Eğitimim boyunca maddi manevi yardımlarını esirgemeyen ve her daim yanımda olan ailem Zeliha HIRLAKOĞLU, Mustafa HIRLAKOĞLU ve son zamanlarımda ilgisini eksik etmeyen Aylin EKİZCE'ye ayrıca teşekkürlerimi bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iii
SUMMARY	iv
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
FOTOĞRAF DİZİNİ	x
KISALTMA VE SİMGELER	xi
BÖLÜM I. GİRİŞ	1
BÖLÜM II. GENEL BİLGİLER	3
2.1 Atıksu Arıtma Yöntemleri	6
2.1.1 Fiziksel arıtma yöntemleri	6
2.1.1.1 Izgaralar	6
2.1.1.2 Elekler	6
2.1.1.3 Yağ tutucular	7
2.1.1.4 Kum tutucular	7
2.1.1.5 Ön çökeltme havuzları	7
2.1.2 Kimyasal arıtma yöntemleri	8
2.1.2.1 Nötralizasyon	8
2.1.2.2 Pıhtılaştırma ve yumaklaştırma	8
2.1.2.3 Yüzdürme	9
2.1.2.4 Kimyasal oksidasyon	9
2.1.2.5 Kimyasal indirgeme	9
2.1.2.6 İyon değiştirme	10
2.1.2.7 Dezenfeksiyon	10
2.1.3 Biyolojik arıtma yöntemleri	10
2.1.3.1 Havalı arıtma yöntemleri	11
2.1.3.2 Havasız arıtma yöntemleri	11
2.1.4 İleri arıtma yöntemleri	12
2.1.4.1 Azot giderimi	12
2.1.4.2 Fosfor giderimi	13

2.1.4.3 Filtrasyon	13
2.1.5 Doğal arıtma yöntemleri	14
2.2 Literatür Taraması	14
2.2.1 İyon değiştirme yöntemi	15
2.2.2 Ters ozmos yöntemi	17
2.2.3 Elektrodializ yöntemi	18
2.2.4 Çok aşamalı distilasyon yöntemi	20
BÖLÜM III. MATERYAL VE METOT	23
3.1 Materyal	23
3.1.1 Atıksu	23
3.1.2 pH metre	24
3.1.3 Elektriksel iletkenlik	25
3.1.4 Deney düzeneği	26
3.2 Metot	28
3.2.1 Isı transferi	29
3.2.1.1 Termodinamiğin birinci yasası	29
3.2.1.2 Kaynama ve yoğuşma	32
3.2.2 Deneyin yapılışı	34
3.2.3 Deney sonuçları	35
3.2.3.1 İletkenlik ve pH deney sonuçları	47
BÖLÜM IV. BULGULAR VE TARTIŞMA	50
4.1 Maliyet Analizleri	54
4.2.1 Yatırım maliyeti	54
4.2.2 İşletme maliyeti	56
4.2.3 Maliyet analizlerinin karşılaştırılması	59
BÖLÜM V. SONUÇLAR	60
KAYNAKLAR	62
EKLER	65

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1	Atıksuyun fiziksel, kimyasal ve biyolojik yapısı ve kirlilik kaynakları	4
Çizelge 2.2	Atıksu arıtımında kirletici maddeler ve önemi	5
Çizelge 2.3	İyon değiştirmede reaksiyon gelişimleri	16
Çizelge 3.1	Deney öncesi numune ölçümleri	24
Çizelge 3.2	pH metre teknik özellikleri	25
Çizelge 3.3	İletkenlik ölçer teknik özellikleri	25
Çizelge 3.4	Saf suyun çeşitli sıcaklıklarda buharlaşma basıncı (Pd)	29
Çizelge 3.5	Deney parametreleri	36
Çizelge 3.6	45 °C için enerji-verim değerleri	44
Çizelge 3.7	50 °C için enerji-verim değerleri	45
Çizelge 3.8	55 °C için enerji-verim değerleri	46
Çizelge 3.9	60 °C için enerji-verim değerleri	47
Çizelge 3.10	İletkenlik ve pH sonuçları	48
Çizelge 4.1	Deney düzeneği yatırım maliyeti	55
Çizelge 4.2	Bir saatlik deneysel çalışmanın enerji giderleri	56
Çizelge 4.3	Çalışma prensiplerine karşılık bir saatlik deney için işletme maliyeti	57
Çizelge 4.4	Çeşitli yüzey alanına göre arıtılmış su üretimi ve enerji girdileri	58
Çizelge 4.5	Desalinasyon proseslerinin maliyetleri	59

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1	Deney aleti taslak planı	27
Şekil 3.2	45A. _{T2} ortamında yoğunlaşan su miktarı	37
Şekil 3.3	45A. _{T1} ortamında yoğunlaşan su miktarı	38
Şekil 3.4	50B. _{T2} ortamında yoğunlaşan su miktarı	39
Şekil 3.5	55C. _{T2} ortamında yoğunlaşan su miktarı	39
Şekil 3.6	60D. _{T2} ortamında yoğunlaşan su miktarı	39
Şekil 3.7	50B. _{T1} ortamında yoğunlaşan su miktarı	40
Şekil 3.8	55C. _{T1} ortamında yoğunlaşan su miktarı	40
Şekil 3.9	60D. _{T1} ortamında yoğunlaşan su miktarı	41
Şekil 4.1	B tankı -15 °C için yoğunlaşan su miktarları	50
Şekil 4.2	B tankı -25 °C için yoğunlaşan su miktarları	51
Şekil 4.3	Yoğunlaşma tankının ısısına göre arıtma miktarlarının değişimi	51
Şekil 4.4	B tankının -15°C karşılık yüzde enerji kullanım verimi	52
Şekil 4.5	B tankının -25°C karşılık yüzde enerji kullanım verimi	53
Şekil 4.6	1 m ³ /h üretimi için buharlaşma yüzey alanları ile çalışma süreleri ..	58

FOTOĞRAF DİZİNİ

Fotoğraf 3.1	pH metre	25
Fotoğraf 3.2	İletkenlik ölçer	26
Fotoğraf 3.3	Kullanılan dijital ve standart vakummetre	28
Fotoğraf 3.4	Sistemin genel görünüşü	28

KISALTMA VE SİMGELER

AKM	Askıda katı madde
BOİ	Biyokimyasal oksijen ihtiyacı
BOİ ₅	5 günlük biyokimyasal oksijen ihtiyacı
DC	Doğru akım
ED	Elektrodiyaliz
KOİ	Kimyasal oksijen ihtiyacı
MBR	Membran bio reaktör
MED	Çok etkili distilasyon
MF	Mikrofiltrasyon
MGD	Mekanik buhar sıkıştırma
MSF	Çok aşamalı distilasyon
MVC	En yüksek geçerli konstraasyon
NF	Nanofiltrasyon
RO	Ters ozmos
TVC	Termodinamik kompresör buharı
UF	Ultrafiltrasyon
UOK	Uçucu organik karbon
VC	Buhar sıkıştırmalı

BÖLÜM I

GİRİŞ

Doğal hayatının devamını sağlayan ana unsurlardan biri olan su, güneşin sağladığı enerji ile yeryüzünde sürekli bir döngü içinde bulunmaktadır. İnsanlar yaşamlarını sürdürebilmek ve ekonomik ihtiyaçlarını karşılamak için suyu bu dolaşımdan alır, kullandıktan sonra yine aynı dolaşıma iade ederler. Bu olaylar sırasında suya karışan maddeler, özelliklerinin değişmesine neden olur. Dünya nüfusunun hızla artışı ve endüstrideki gelişmelerden oluşan atıklar, doğadaki tüm suların sahip oldukları kendi kendilerini temizleme kapasitesinin azalmasına veya yok olmasına neden olmaktadır. Su kirliliği olarak adlandırılan bu özellik değişimleri, aynı zamanda sularda yaşayan çeşitli canlı varlıklarını da etkilemektedir. Böylece su kirlenmesi suya bağlı ekosistemlerin etkilenmesine, dengelerin bozulmasına ve giderek doğadaki tüm kullanılabilir temiz suların azalmasına veya yok olmasına neden olmaktadır.

Temizsuyun evsel, endüstriyel, tarımsal ve diğer kullanımlar sonunda, fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri kısmen veya tamamen değişmiş, kaplamalı ve kaplamasız şehir bölgelerinden cadde, otopark ve benzeri alanlardan yağışların yüzey veya yüzeyaltı akışa dönüşmesi sonucunda kirlenmekte ve atıksu olarak tarif edilmektedir. Suların çeşitli kullanımlar sonucunda atıksu haline dönüşerek yitirdikleri fiziksel, kimyasal ve bakteriyolojik özelliklerinin bir kısmını veya tamamını tekrar kazandırabilmek, boşaltıldıkları alıcı ortamın doğal fiziksel, kimyasal, bakteriyolojik ve ekolojik özelliklerini değiştirmeyecek hale getirebilmek için uygulanan fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtma işlemlerinin birini veya birkaçına da atıksuların arıtılması denilmektedir. Günümüzde atıksuyun niteliğine göre biyolojik, kimyasal, fiziksel, ileri arıtma ve doğal arıtma teknikleri kullanılmakta ve birbirlerine göre önemli farklılıklar göstermektedirler.

Mevcut arıtma sistemlerinin yatırım ve işletme maliyetlerinin yüksek olması, atıksu menşinin çok farklı özellikler içermesi ve her özelliklerin ayıklanmasında karmaşık proseslerin olması fayda/masraf fonksiyonunu olumsuz yönde etkileyerek yaygın kullanım alanlarını sınırlamaktadır. Son zamanlarda ise fayda/masraf fonksiyonu yüksek olan alternatif arıtma sistemlerinin arayışı teknolojik gelişmelerle hızlanmıştır.

Bu çalışmada mevcut arıtma sistemlerine göre yatırım ve işletme maliyeti daha düşük, endüstriyel ve evsel atıksuların arıtılmasında kullanılabilir yeni bir arıtma sistemi dizaynı tasarlanmış ve deneysel çalışmalar iki kısımda yapılmıştır. Birinci kısımda buharlaştırma ve yoğunlaştırma yapılarak sistemin çalışabilirliği test edilmiştir. İkinci kısımda; suni olarak kirlilik oluşturulmuş iyon değişimi takip edilerek arıtma sisteminin verimliliği belirlenmiştir.

Çalışma dört ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde mevcut arıtma sistemleri tanıtarak literatür çalışması yapılmıştır. İkinci bölümde; yeni tasarlanan arıtma sisteminin çalışma prensiplerine yer verilmiştir. Üçüncü bölümde; deney düzeneği üzerinde deneysel çalışmalar yapılarak elde edilen sonuçlar verilmiştir. Dördüncü bölümde; bulgular, bulguların irdelenmesi ve elde edilen sonuçlar yer almaktadır.

BÖLÜM II

GENEL BİLGİLER

Temiz su; Dünya Su Teşkilatı ve Türk Standartları Enstitüsü 266 nolu “Sular–İnsani Tüketim Amaçlı Sular” standardında belirtilen özellikleri sağlayan, insanların yaşamsal aktivitelerini yerine getirebilmesi için içtikleri, diğer gereksinimlerini karşıladıkları su olarak tarif edilmekte olup, yeryüzünde yetmeyecek kadar az miktarda bulunmaktadır. Bu standartlara uygun su birçok dünya ülkesinde olduğu gibi kendi ülkemizde de oldukça sınırlıdır ve kullanılabilir su yönünden fakir ülkeler sınıfında yer almaktadır.

Ülkemizde ortalama yıllık yağış miktarı 501 milyar m³ suya karşılık gelmektedir. Yağışın 274 milyar m³'ü çay, nehir, göl ve denizler ile bitkilerden buharlaşma yoluyla atmosfere geri dönmekte ve yağışla toprağa düşen suyun 158 milyar m³'ü akarsuyla deniz ile göllere taşınmaktadır. Yağışla oluşan yüzey suları 158 milyar m³, yer altı sularından yüzeye ulaşan 28 milyar m³ ve komşu ülkelerden akarsularla gelen 7 milyar m³'lük sular ülkemizin brüt su potansiyelini oluşturur. Yeraltına inerek yeraltı suyuna katılan 41 milyar m³'lük su da ilave edildiğinde, ülkemizin yenilenebilir brüt su potansiyeli 234 milyar m³'e ulaşır. Ancak ülkemizde çeşitli amaçlara yönelik tüketilebilecek 98 milyar m³ yüzey suyu potansiyeli bulmakta ve yerüstüne çıkarılabilen su miktarı 14 milyar m³ civarındadır. Çalışmalar, yurdumuzun tüketilebilir yüzey ve yeraltı suyu potansiyelinin yılda ortalama 112 milyar m³ olduğunu göstermektedir [1].

Kullanılabilir yetersiz su kaynaklarımız da bölgeler arasında heterojen dağılım göstermektedir. Özellikle İç Anadolu bölgesindeki yetersiz su kaynakları bilinçsizce doğrudan veya dolaylı şekilde kirletilerek önlem alınmadığı takdirde tamamen atıksu sınıflamasına gelmek üzere olduğu bilinmektedir. İçme ve kullanma, endüstri ve tarımsal sulama gibi ihtiyaçları karşılandıktan sonra çeşitli nitelik değişimlerine uğrayarak kullanılmaz duruma gelen su “Atıksu” olarak tarif edilmekte olup genellikle evsel ve sanayi menşeli olmaktadır. Su kullanımından oluşan atıksu kirlilik deşarjlarının kaynaklara göre dağılımı da sanayi %33, tarım %22, evsel %20, maden %8, ulaştırma %8 ve diğerleri %9 civarındadır [2].

Belirli standartlara sahip olan ve çeşitli şekilde kullanıldıktan sonra atıksu olarak nitelendirilen suyun içindeki zararlı maddeler kısmen organik, kısmen de inorganik şekilde bulunmaktadır. Özellikle organik maddelerin kontrol edilmeyen şartlar altında biyolojik ve kimyasal olarak ayrışması deşarj edildiği yüzeysel suların kullanılmasını tehlikeye sokmaktadır. Atıksuyun fiziksel, kimyasal ve biyolojik yapısı ve bu yapıyı oluşturan kirlilik kaynakları Çizelge 2.1’de, atıksudaki çeşitli parametreler ve bunların önemi ve doğal sulara etkisi Çizelge 2.2’de özetlenmiştir [2].

Çizelge 2.1 Atıksuyun fiziksel, kimyasal ve biyolojik yapısı ve kirlilik kaynakları

Atıksu Karakteristiği		Kaynak
Fiziksel Özellikler	Renk	Evsel ve endüstriyel atıklar, organik maddelerin doğal bozulması
	Koku	Ayrışan/bozunan atıksu ve endüstriyel atıklar
	Katı Madde	Evsel su temini, evsel ve endüstriyel atıklar, sızma
	Sıcaklık	Evsel ve endüstriyel atıklar
Kimyasal Bileşenler	Organik	
	Karbonhidrat, yağ-gres	Evsel, ticari ve endüstriyel atıklar
	Pestisitler	Tarımsal atıklar
	Fenol	Endüstriyel atıklar
	Proteinler, mikrokirleticiler	Evsel, ticari ve endüstriyel atıklar
	Yüzey dezenfektanlar	Evsel, ticari ve endüstriyel atıklar
	Uçucu organik bileşikler	Evsel, ticari ve endüstriyel atıklar
	Diğerleri	Organik maddelerin doğal bozulması
	İnorganik	
	Alkalinite ve klorür	Evsel atıklar, evsel su temini, yeraltısuyundan sızma
	Ağır metal	Endüstriyel atıklar
	Azot	Evsel ve tarımsal atıklar
	pH ve mikrokirleticiler	Evsel, ticari ve endüstriyel atıklar
	Fosfor	Evsel, ticari ve endüstriyel atıklar; doğal yüzeysel akış
Sülfür	Evsel, ticari ve endüstriyel atıklar	
Biyolojik Bileşenler	Gazlar	
	Hidrojen sülfür ve metan	Evsel atıkların ayrışması
	Oksijen	Evsel su temini, yüzeysel suyun sızması
Biyolojik Bileşenler	Hayvanlar ve bitkiler	Açık kanallar/dereler ve arıtma birimleri
	Eubakteri	Evsel atıklar, yüzeysel sudan sızma, arıtma birimleri
	Archaeobakteri	Evsel atıklar, yüzeysel sudan sızma, arıtma birimleri
	Virüsler	Evsel atıklar

Çizelge 2.2 Atıksu arıtımında kirletici maddeler ve önemi

Kirleticiler	Önemi
Askıda katı madde	Aritmasız deşarjlarda alıcı ortamda dipte sediment birikimine ve anaerobik koşulların oluşmasına neden olur.
Biyolojik ayrışabilir organikler	BOİ ve KOİ olarak ölçülen bu maddeler arıtmasız deşarjlarında oksijeni tüketerek septik ortamın oluşmasına neden olur.
Patojenler (hastalık yapıcı mikroorganizmalar)	Hastalıklara sebep olur.
Besi maddeleri (nütrient)	Azot ve fosfor, karbonla birlikte, çoğalma için gerekli besi maddeleridir. Suda yaşayan bazı canlıların aşırı çoğalmasına neden olur.
Mikrokirleticiler	Kanserojen, mutajen, teratojen ve yüksek zehirlilikte maddelerdir.
Kalıcı organikler	Konvansiyonel arıtma metotlarına direnç gösteren ve bu yöntemle arıtılmayan organiklerdir. Fenol, pestisitler, dezenfektanlar.
Ağır metaller	Ticari ve endüstriyel faaliyetlerden atıksuya giren maddelerdir.
Çözülmüş inorganikler	Ca, Na, SO ₄ gibi evsel su temininde eklenen maddelerdir. Atıksu tekrar kullanılacaksa giderilmeleri gerekir.

Genellikle yağış suları dışında atıksular, kaynağına göre evsel ve endüstriyel olarak iki grup altında incelenmektedir.

Evsel atıksular; İçmesuyu sistemiyle evlere verilen sular çeşitli şekillerde kullanıldıktan sonra değişime uğrayarak atıksu durumuna gelir ve ortamdaki kanalizasyon sistemi ile uzaklaştırılır. Atıksuyun miktarı kanalizasyon sistemi bağlanan alanın nüfusuna, atıksu özellikleri ise bu alandaki nüfusun yaşam standartlarına bağlıdır [3]. Evsel atıksular %95-99'u su olup %1-5'lik kısmı organik ve inorganik maddeleri ihtiva eder. Kanalizasyonda kalma süresinin artması ve anaerobik şartların gelişmesiyle atıksuyun rengi koyu griye ve daha sonra siyaha doğru değişebilir. Bu renk anaerobik şartlarda oluşan sülfür formlarının atıksudaki metallerle reaksiyona girmesi ile oluşan metalik sülfürlerden kaynaklanır [4].

Endüstriyel atıksular; Endüstride tekdüze bir sanayi atık suyundan söz etmek mümkün olamaz ve her bir sanayi türüne göre atık suyun kirlilik durumu ve içeri çok değişiklik gösterir. Bir demir çelik işletmesiyle, tekstil, mobilya, kağıt bakır sanayilerinin atık suları farklı olur [5]. Genellikle endüstriyel sıvı atıklarda kirlilik parametreleri: organik madde miktarı, çözülmüş tuzlar, zehirli maddeler, renk, bulanıklık, askıda kalan katı maddeler, sıcaklık, pH, besin maddeleri, yağ ve gres, radyoaktif maddeler,

bakteriyolojik kirleticiler, fenol ve fenol türevleri, tat ve koku yaratan bileşikler, tarım ilaçları, asit ve bazlar, petrol ve petrol türevleri, kalıcı atıklardır [6].

2.1 Atıksu Arıtma Yöntemleri

Atıksuların arıtılmasında atıksuyun kaynağı, karakterizasyon yapısı, içeriği, istenen arıtma verimi gibi özelliklere göre mekanik, kimyasal, biyolojik, ileri arıtma ve doğal arıtma işlemlerinden biri veya bunların tümü kullanılabilir [4].

2.1.1 Fiziksel arıtma yöntemleri

Fiziksel arıtma, atıksu içerisindeki gözle görünür atıkların uygulanan çeşitli işlemlerle ayrılmasıdır. Fiziksel arıtmada kaba maddeler ızgaralarda, kanala gelen kum kum tutucuda, çökebilir maddeler de çökeltim havuzlarında atıksudan ayırt edilir. Endüstriyel atıksuların arıtılmasında yüzdürme (flotasyon) bu kademedeki yapıdır. Debi ölçümleri de fiziksel arıtma kademesinde yapılır [2].

2.1.1.1 Izgaralar

Izgaralar, kaba ızgara ve ince ızgara olmak üzere iki çeşittir. Kaba ızgaralar, arıtma tesisinin en başında ve iri maddelerin mevcut mekanik ekipmanlara zarar vermemesi ve boru hatlarında tıkanıklık oluşturmaması için kullanılırlar [7]. Kaba ızgaralar, koruyucu ekipman olduklarından ilk ünite olarak kullanılırlar. İnce ızgaraları amacı ise ön arıtmadır. Böylece pompaların tahrip olması, tıkanmaları ve bu tür katı maddelerin arıtma tesisine zarar vermesi önlenir [8].

2.1.1.2 Elekler

Elekler, bakır veya bronzdan imal edilmiş meyilli ve üzerinde 0,02–3 mm çapında delikler bulunan süzme aletleridir. Kentsel arıtma tesisi girişinde fazla kullanılmamasına rağmen, genelde biyolojik ve ileri arıtmadan çıkan suların askıda katı maddeleri ve bir miktar organik bileşikleri tutmak için de kullanılırlar. Bu aletlerde ızgaralarda tutulamayan daha ince katı maddeler tutulur. Evsel atıksu arıtma tesislerinde mikroelekler kullanılmaktadır. Mikroelekler, arıtma tesisin girişinde kullanıldığı gibi,

ön çökeltim havuzu ve arıtma tesisi çıkışında ve daha çok ileri arıtma kademesinde kullanılmaktadır [2].

2.1.1.3 Yağ tutucular

Yağ tutucular, atıksu içindeki Askıda Katı Madde (AKM), yüzmeye yatkın yağ ve gres, elyaf, reçineli vb. maddelerin ayrılması için kullanılır. Basit bekletme yapılıdır. Suda çözünmemiş ve ayrı bir faz halinde bulunan yağ ve benzeri hafif maddeleri ayrıştırılır. Ancak yağların esas kaynağı endüstri tesisleridir ve kentsel arıtma sistemlerinde yağ tutucu yapısının inşa edilmesi zorunlu değildir. Bunun yerine yağların ön çökeltme havuzu yüzeyine monte edilen yüzey sıyrıcılar kullanılabilir. Yağın tutulabilmesi için basit bir havuz yeterlidir. Genel prensibi suyun hızını azaltmak ve suyun yüzeyini sakin tutmaktır [2].

2.1.1.4 Kum tutucular

Kum olarak tanımlanan maddeler; kum, taş, çürük gibi yoğunluğu veya çökeltme hızı, biyolojik arıtmada parçalanabilen organik maddelere kıyasla daha yüksek olan maddelerdir. Yumurta kabukları, kemik parçacıkları, tohumlar, kahve parçacıkları ve yemek artıkları gibi organik parçacıklar da bu kapsama girmektedir. Yatay akışlı, havalandırılmalı ve vorteks akımlı olmak üzere üç tip kum tutucu vardır. Tutulan kum miktarı kanalizasyon sistemine, yerine, durumuna, yolların buzlanmaya karşı ne sıklıkta kumlandığına, endüstriyel atıksu türüne, lavabo öğütücüsü kullanım oranına, yöredeki kumlu toprak miktarı gibi faktörlere bağlı olarak değişir [9].

2.1.1.5 Ön çökeltme havuzları

Çökeltme havuzları, ızgara ve kum tutuculardan geçmiş olan atıksuların partikül halindeki askıdaki organik maddelerin özgül kütlelerinin sudan farklı olma prensibiyle yerçekimi etkisi altında çökeltilecek atıksudan uzaklaştırılmasında kullanılır. Çöktürme tankları ya dairesel veya dikdörtgen şeklindedirler. Seçim, tesisin büyüklüğü, yerel arazi şartları, mevcut birincil arıtma ekipmanı, ilgili mühendisin kararı, mal sahibinin tercihi, yatırım ve işletme maliyeti gibi faktörlere bağlıdır. Hidrolik kısa devre, atıksu debisindeki aşırı değişiklikler, çok yüksek ya da düşük atıksu sıcaklıkları, yüksek geri

devir oranları Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı (BOİ) ve AKM giderimlerinin tipik değerlerin altına düşmesine neden olur [9].

2.1.2 Kimyasal arıtma yöntemleri

Kimyasal arıtmanın amacı fiziksel arıtma ile giderilmesi mümkün olmayan kirliliklerin çeşitli kimyasal maddelerle giderimini sağlamaktır. Diğer bir tanımlamayla atıksuyun rengini, nötralizasyon, kimyasal oksidasyon, dezenfeksiyonla suda bulunan mikroorganizmaları gidermek gibi işlemler kimyasal arıtma yöntemleridir. Kimyasal arıtma uygulamada tercih edilen bir yöntemdir. Çünkü hava emisyonu minimum, işçi gereksinimi az, işletmede çok fazla teknik bilgiye ihtiyaç duyulmaz ve endüstrilerde tesis içi uygulamaları kolaydır [2]. Genellikle nötralizasyon, pıhtılaştırma ve yumaklaştırma, yüzdürme, kimyasal oksidasyon, kimyasal indirgeme, iyon değiştirme ve dezenfeksiyon kısımlarından oluşur.

2.1.2.1 Nötralizasyon

Nötralizasyon, atıksudaki asidik ve bazik karakterlerinin yani pH değerinin ayarlanması işlemidir. Atık suyun pH değerinin ayarlanması; atık suyun alıcı ortama deşarj standartının sağlanması, biyolojik arıtma öncesinde uygun pH değerinin sağlanması bakımından gereklidir [2]. Nötralizasyon öncesinde debi pH'ın dengelenmesi ile kimyasal madde kullanımındaki salınımlar önlenmiş olur. Böylece işletme daha ekonomik ve işletmesi daha kolay hale gelmektedir. Sistem, kimyasal madde harcamalarına bağlı olmamakla beraber oluşan çamurun toplanması, uzaklaştırılması, nötralizasyon derecesi, kimyasal madde temini ve gerekli donanım giderleri hesap edilmeli ve optimum seçim yapılmalıdır [10].

2.1.2.2 Pıhtılaştırma ve yumaklaştırma

Pıhtılaştırma ve yumaklaştırma (koagülasyon ve flokülasyon), kimyasal çöktürme ve çamur kalınlaştırmasında yaygın olarak kullanılır, Bu işlem, esas itibari ile, atıksuya kimyasal ilavesi ile bünyesinde bulunan askıda ve çözünmüş maddelerin yapısını değiştirmek ve ilave edilen maddelerin fiziksel etkileriyle bunların sudan uzaklaştırılmasını temin etmektir [11].

Pıhtılaştırma ve yumaklaştırma işlemi üç adımdan oluşur. İlk başta hızlı karıştırma, yumaklaştırma ve çöktürme işlemleridir. Arıtılacak suya kimyasal madde ilave edilerek hızlı karıştırma ile suya karıştırılır. Karıştırılan kimyasal maddenin etkisiyle sudaki kirleticiler pıhtılaştırılır. Daha sonra yavaş karıştırma ile yumaklaşma sağlanır. Karıştırma hızı uygun ayarlanarak yumak partikülleri uygun büyüklüğe ulaşması sağlanarak çöktürülebilir. Bekletme süresine, yüzeysel yükleme, savak yükleme ve katı madde yükleme hızlarına bağlı olarak çökelme prosesindeki verim belirlenir [2].

2.1.2.3 Yüzdürme

Çöktürme işleminin tam tersi olan yüzdürme (flotasyon), katı veya sıvı partikülleri ve bilhassa yağ ve gresi sıvı yüzeyinde toplayarak sıvı fazdan ayırmak için kullanılan yoğunluk farkına dayanılarak ayrılma işlemidir. Flotasyonla uzaklaştırılan maddeler çok hafif olduğundan yerçekimi etkisiyle çökmesi hem tam olmaz hem de çok uzun süre alır. Bundan dolayı hafif maddelerin atıksudan ayrılması için flotasyon işlemi, çöktürme işleminden daha verimlidir. Flotasyon sistemleri hava flotasyonu, çözülmüş hava flotasyonu ve vakum flotasyonu olmak üzere üç tiptir [2].

2.1.2.4 Kimyasal oksidasyon

Kimyasal oksidasyon, istenmeyen zararlı bileşiklerin zararsız bileşiklere dönüştürülmesi veya daha sonraki arıtma işlemleri için uygun yapıya getirilmesidir. Çeşitli nedenlerle yapılan oksidasyon işlemi değişik oksitleyici reaktiflerle yapılır. Bu nedenler, atıksuda bulunan bazı maddelerin oksitlenip çöktürülerek, atıksudaki mikroorganizmaları ve bazı organik maddeleri çeşitli bakterilerin yardımıyla oksitleyerek yok etmektir. Aynı zamanda kimyasal oksidasyon işlemiyle atıksuda renk ve koku giderimi de sağlanabilir [2].

2.1.2.5 Kimyasal indirgeme

Kimyasal çöktürme işlemi; atıksu içindeki biyolojik olarak parçalanma özelliği az veya hiç olmayan kirletici parametrelerin sudan ayrılması, arıtma tesisi girişinde ön çöktürme ünitesinin veriminin artırılması amacıyla kullanılan bir arıtma prosesidir. İndirgeme

işlemi oksidasyonun tersine çeşitli indirgen maddelerle atıksu içinde bulunan metalik iyonları uygun bileşik durumuna getirip çökeltmede kullanılır.

2.1.2.6 İyon değiştirme

İyon değiştirme işlemi, atıksuda istenmeyen anyon ve katyonların giderilmesi için kullanılır. Genellikle katyonlar Ca^{++} ve Mg^{++} ile anyonlar ise OH^{-} ile değiştirilir. İyon değiştirme işleminde sentetik reçineler kullanılır. Katyon değişiminde HSO^{-3} aktif grubunu oluşturan reçineler, anyon değişiminde ise amin gruplarını oluşturan reçineler kullanılır [2]. Genellikle suyun geri kazanılması istenen proseslerde son üniteler olarak yer alırlar [11].

2.1.2.7 Dezenfeksiyon

Dezenfeksiyon, patojen organizmaların yok edilmesi veya etkisiz hâle getirilmesidir. İşlem esnasında tüm mikroorganizmalar yok edilemezler. Bu durum sterilizasyon işleminden en büyük farkıdır. Pıhtılaşma, yumaklaştırma, çökeltme ve filtrasyon ile mikroorganizma giderimi gerçekleşse de asıl mikroorganizma giderimi dezenfeksiyon ile gerçekleşir. Suyun kaynatılması, ultraviyole ışınları, bakır ve gümüş gibi metal iyonlar, ozon, klor, brom, sodyum hipoklorit, kalsiyum hipoklorit, klor dioksit gibi oksidanlar ile dezenfeksiyon yapılır [2].

2.1.3 Biyolojik arıtma yöntemleri

Atıksu bünyesinde bulunan organik ve kısmen de anorganik kirletici maddelerin, mikroorganizmalar tarafından besin ve enerji kaynağı olarak kullanılmak suretiyle atıksudan uzaklaştırılmaları esasına dayanan metotlardır [12]. Çökelemeyen veya çözülmüş organik maddeler biyolojik arıtma ünitelerinde kısmen okside olurken kısmen de yeni bakteri kütlesi haline dönüştürülürler [13].

Kullanılmış suda gelişen ve arıtmada önemli olan başlıca organizmalar: bakteriler, mantarlar, algler, protozoalar, rotiferler, kabuklular ve virüslerdir. Organizmalar, oksijenin kullanımına göre iki ana gruba ayrılır. Birinci grup moleküler oksijenden yararlanan ve oksijen bulunan yerlerde yaşayabilen aerobik (havali) organizmalar,

diğeri oksijenin bulunmadığı yerlerde yaşayan anaerobik (havasız) organizmalardır. Buna bağlı olarak arıtma da aerobik ve anaerobik sistemlerde yapılır [6].

2.1.3.1 Havalı arıtma yöntemleri

Bütün havalı (aerobik) arıtma sistemlerinde organik atıklar, sentez ve oksidasyon yolu ile yok olurlar. Diğer bir deyimle organik maddelerin bir kısmı yeni hücrelere dönüşürken (sentez) geri kalan kısmı gerekli enerjiyi üretmek amacıyla oksidasyona tabi tutulurlar. Organik maddeler yok olmaya başlayınca biyolojik hücrelerin bir kısmı gerekli enerjiyi sağlamak amacıyla kendi kendini oksitler, buna içsel solunum denir [4].

Aerobik sistemlerde son ürünler hemen hemen tamamen oksitlenmiş olurlar ve enerji seviyeleri düşüktür. Biyolojik indirgenmeyi karbon esaslı organik maddelerin oksitlendiği oksidasyon ve amonyağın oksitlendiği nitrifikasyon olayları meydana getirir. Aerobik biyolojik arıtma yöntemlerinden günümüzde en yaygın kullanılanlar aktif çamur sistemi, havalandırılmalı havuzlar, stabilizasyon havuzları, damlatmalı filtreler ve biyodisklerdir.

2.1.3.2 Havasız arıtma yöntemleri

Havasız arıtma yöntemleri, havasız (anaerobik) yani oksijensiz ortamda gerçekleştirilen atık su arıtma sistemidir. Anaerobik arıtma sistemlerinde organik maddeler, oksijensiz ortamda metan, karbondioksit ve amonyak gibi inorganik maddelere dönüştürülür. Biyolojik olarak ayrışabilen organik maddelerin anaerobik olarak parçalanması farklı bakteri grupları tarafından gerçekleştirilir. Bu arıtma, diğer sistemlere göre maliyeti daha ucuz olan, daha az yer kaplayan bir sistemdir. Büyük ve küçük boyutlarda da inşa edilebilir. Daha az çamur oluşumu meydana gelir. Bu sistem endüstrinin birçok kolunda kullanılır.

Organik yükün hacimsel olarak olabildiğince artırılıp reaktör hacminin küçültülmesi ve karşılaşılan arıtma problemlerinin giderilmesi maksadıyla çeşitli anaerobik arıtma sistemleri geliştirilmiştir. Anaerobik arıtma da uygulanmakta olan reaktörler; temas, filtre, akışkan yataklı, çamur yatağı ve membran havasız reaktör tipleridir [15,16].

Günümüz teknolojisinde ise yaygın olarak Fakültatif arıtma yöntemleri kullanılmaktadır. Fakültatif havalandırılmalı yöntemde birim hacme düşen enerji yoğunluğu, gerekli oksijen miktarının sıvıya verilmesi için yeterlidir. Fakat bu enerji girdisi, bütün katıları askıda tutmak için yeterli değildir. Bunun sonucunda, lagüne giren AKM'lerin bir kısmı ve substrat giderimi sonucunda oluşan katı maddeler, tabana çökmeye çalışırlar ve tabanda havasız bozunma meydana getirirler. Lagündeki aktivite kısmen havalı, kısmen de havasız olduğundan bu tip lagünlere fakültatif denmektedir. Fakültatif biyolojik arıtma yönteminde stabilizasyon havuzları kullanılmaktadır. Gündüz güneş ışığında havuz ağırlıklı olarak havalı karakterde iken, gece havuz tabanındaki su havasız karakterli olur. Tabanda biriken çamurun, çamur-su arakesit yüzeyinden itibaren birkaç mm'lik kısmı hariç, geri kalan tümü ise havasızdır. Bu havuzlardaki havalı ve havasızlık dereceleri değişkendir [15].

2.1.4 İleri arıtma yöntemleri

İleri arıtma yöntemleri, klasik ikincil kademe arıtmadan sonra kalan askıda ve çözünmüş maddelerin giderilmesi için gereken ilave arıtma işlemleri olarak tanımlanabilir. Bu maddeler organik madde, askıda katı madde ve kalsiyum, potasyum, sülfat, nitrat, fosfat gibi nispeten basit inorganik iyonların yanı sıra oldukça kompleks yapıları sentetik organik maddelerdir. Evsel atıksulara deterjanlar ve çeşitli temizlik maddelerinden biyolojik olarak indirgemesi zor organik maddeler ve önemli miktarda fosfat karışmaktadır. Artan endüstriyel atıksu miktarı ile birlikte atıksu içerisinde bulunan ağır metaller, siyanür ve zehirli organik maddelerin miktarı da artmaktadır [2].

İleri ve son arıtma genelde, klasik biyolojik arıtmadan çıkan atıksuyun kalitesini daha fazla iyileştirmek için uygulanan azot, fosfor ve filtrasyon metotlarıdır.

2.1.4.1 Azot giderimi

Ham atıksuda azot, amonyak veya organik formda olup, her ikisi de çözünmüş ve katı halde olabilirler. Azotun nitrit ve nitrat formları ise bazı endüstriyel atıksular haricinde atıksularda yok sayılabilecek kadar az bulunurlar. Azot formlarından çözünmüş organik azot atıksuda daha çok üre ve aminoasit halinde bulunur. Katı halindeki organik maddeler ise ön çöktürme ile giderilir. Biyolojik arıtma sırasında organik azotun

birçoğu amonyum ve diğer inorganik formlara dönüşürken, amonyumun bir kısmı da mikroorganizmalar tarafından hücre sentezinde kullanılır. Bu nedenle biyolojik arıtma ile toplam azotun en fazla %30'unun giderildiği söylenebilir [15].

Atıksuyun içerdiği amonyum iyonları azot bakterileri yardımıyla nitrifikasyon kademesinde önce nitrite ve sonra nitrate dönüştürülür, daha sonra denitrifikasyon kademesinde anoksit şartlar altında azot gazı halinde (N₂) sudan uzaklaştırılır. Nitrifikasyon için yüksek çamur yaşları ve düşük çamur yaşları gereklidir [12].

2.1.4.2 Fosfor giderimi

Birçok atıksuda, çözünmemiş halde olan ve sudaki fosforun yaklaşık %10'una karşılık gelen katı formdaki fosfor, ön çöktürme ile giderilir. Mikroorganizma tarafından hücre sentezinde kullanılan miktar hariç, kalan çözünmüş fosforun konvansiyonel biyolojik arıtma ile giderimi oldukça zordur [15]. Atıksularda bulunan fosfor bileşiklerini arttırmak için kimyasal ve biyolojik metotlar ayrı ayrı veya birlikte kullanılır. Fosfor bileşiklerinin kimyasal olarak arıtılmasında alüminyum tuzları, demir tuzları ya da kireç kullanılabilir. Bu işlemlerde fosfor, yüksek pH değerlerinde fosfat tuzları halinde çöktürülür. Biyolojik metotlarla fosfor arıtımı, biyolojik arıtma sırasında fosfatın mikroorganizmalarca alınması ile olur. Diğer bir metot da kimyasal arıtmanın biyolojik arıtma ile birlikte kullanılmasıdır. İleri fosfor arıtımı için alglerin yoğun olarak üretilerek hasat edildiği sığ alg lagünleri de kullanılabilir [13].

2.1.4.3 Filtrasyon

Filtrasyon, kimyasal ve biyolojik arıtma işlemlerini takip eden çökeltim havuzlarında yeterince giderilemeyen askıda katı madde ve kolloidlerin tutulması için uygulanan bir işlemdir. Filtrelerde kum, çakıl, granit, antrasit ve benzeri türden dolgu malzemeleri kullanılır. Diğer bir filtrasyon metodu ise günümüzde hızla gelişmekte olan membran prosesleridir.

Membran, iki farklı fazı veya ortamı birbirinden ayıran ve bir tarafından diğer tarafa maddelerin seçici bir şekilde taşınmasını sağlayan geçirgen bir tabakadır. Tüm

membran ayırma teknolojilerinde membrandan geçme yönünde akış sağlamak üzere itici bir kuvvet ve bazı maddelerin geçişini engelleyen ayırma faktörü, temel iki prensiptir. Kütle transferi, konsantrasyon farkı, basınç farkı ve elektriksel potansiyel farkı gibi itici güçler yardımıyla gerçekleşmektedir. Membran proseslerinde en yaygın itici kuvvet basınçtır. Membran ayırma proseslerinde mikrofiltrasyon (MF), ultrafiltrasyon (UF), nanofiltrasyon (NF) ve ters ozmos (RO) prosesleri mevcut olup günümüzde de en çok kullanılan proseslerdir [15].

2.1.5 Doğal arıtma yöntemi

Doğal arıtma yöntemi, yapay sulak alanlarda bitkiler ile atık suların arıtımı olarak tanımlanabilir. Doğayı taklit ederek geliştirilmiş basit sistemlerdir. Bu sistemler, bitkisel arıtma sistemi ya da ekili sulak alanlar olarak da tanımlanmaktadır. Karmaşık görünen yapılarına ve birçok mekanik ekipmana rağmen arıtma tesisleri ile yapılmaya çalışılan, bir nevi doğanın yaptığı işi taklit etmek veya hızlandırmaktan ibarettir. Bu tip sistemler tasarlanırken doğayı esas almakta veya biyolojik arıtma sistemlerinde olduğu gibi atık su içindeki organik maddeleri parçalamak için doğadaki mikroorganizmaların yoğun bir kültürünü kullanmaktadır. Bu sistemin avantajları; inşası basit ve ucuz, enerji ihtiyacı ve işletme giderleri oldukça düşük, çevre ile uyumlu ve işletmesinde nitelikli işgücüne gereksinim duyulmaması olarak özetlenebilir. Projelendirmenin bölgesel koşullara uygun olması ve aşırı su yüklenmemesi koşuluyla suda bulunan patojenleri elimine etmede etkili olduğu kabul edilmektedir. Tek dezavantajı ise tesisin geniş alanları işgal etmesidir [16].

2.2 Literatür Taraması

Yeryüzündeki mevcut suların yaklaşık %97,3'ü denizlerde tuzlu su halinde bulunmakta ve (kullanılmayan) atıksu olarak nitelendirilmektedir. Bu miktardaki suyu tuzdan arındırarak (desalinasyon) kullanılabilir su haline dönüştürebilmek için hala önemli çalışmalar yapılmaktadır. Desalinasyon; tuz giderimi anlamında veya mevcut tuzu, mineralleri ve diğer safsızlıkları gidererek içme, sulama, kullanma amaçlı su elde edilmesini hedefleyen genel yöntemdir. Yüksek maliyet içermesine rağmen, alternatif kaynak olmaması ve enerjinin ucuz olması gibi durumlarda genellikle tercih edilen bir

proses olmuştur. Genel olarak desalinasyonda; iyon değiştirme, ters ozmos, elektrodializ ve çok aşamalı distilasyon yöntemleri kullanılmaktadır.

2.2.1 İyon değiştirme yöntemi

İyon değiştirme kapasitesi birçok malzemede bulunmakla beraber 1910'lardan beri önce doğal ardından da sentetik zeolitin su arıtmada kullanılması ile endüstriyel bazda yaygın olarak kullanılmasını sağlamıştır. Düşük pH seviyelerinde stabil kalan ilk iyon değiştirici malzeme endüstriyel uygulamalar için geliştirilmiş olan, sulfone edilmiş kömürdür. Sentetik organik iyon değiştirici reçine ise ilk olarak 1935 de iki yönlü katyon ve anyon değişiminde kullanılabilen, sülfonik veya amin grubu içeren, fenolik kondensat ürünlerinin sentezinden elde edilmiştir [17].

İyon değiştirici, katının yapısında kalıcı değişikliğe sebep olmadan, katı (iyon değiştirici malzeme) ile sıvı arasında çift yönlü bir iyon alışverişidir. İyon değiştirme teknolojisi temelde su arıtma uygulamalarında kullanılmak ile beraber, başka sıvıları da kapsayan ayrıştırma proseslerinde veya kimyasal sentez, medikal, gıda, madencilik ve tarım gibi birçok farklı amaçla da kullanılabilir. Su yumuşatılmasında kullanılan iyon değiştiriciler, iyon değiştirme özellikleri bakımından katyon ve anyon değiştiriciler olarak ikiye ayrılır. Katyon değiştirme; yaygın olarak su yumuşatma amaçlı kullanılır. Bu uygulamada sudaki kalsiyum ve magnezyum iyonları sodyum iyonları ile yer değiştirir. Sertliğin veya kireçlenmeye sebep olan kalsiyum ve magnezyum iyonlarının alınması ile, "yumuşak su" elde edilir. İyon değiştirme yönteminde çoğunlukla uygulamalar kuvvetli asidik katyon değiştiricilerin yenilenmesinde tuz (NaCl) kullanılır. Deniz suyu ve diğer sodyum tuzları da aslen kullanılabilir. Genelde Çizelge 2.3 da özetlenen iki tip çevrim ve anyon değiştirme gelişir [17].

Çizelge 2.3 İyon değiştirmede reaksiyon gelişimleri

Sodyum çevrimi	$2\text{Na}^+\text{R}^- + \text{Ca}^{2+} \leftrightarrow \text{Ca}^{2+}\text{R}_2^- + 2\text{Na}^+$
	$2\text{Na}^+\text{R}^- + \text{Mg}^{2+} \leftrightarrow \text{Mg}^{2+}\text{R}_2^- + 2\text{Na}^+$
	$2\text{NaCl} + \text{Ca}^{2+}\text{R}_2^- \leftrightarrow 2\text{Na}^+\text{R}^- + \text{CaCl}_2$
	$2\text{NaCl} + \text{Mg}^{2+}\text{R}_2^- \leftrightarrow 2\text{Na}^+\text{R}^- + \text{MgCl}_2$
Hidrojen çevrimi	$\text{CaSO}_4 + 2\text{H}^+\text{R}^- \leftrightarrow \text{Ca}^{2+}\text{R}_2^- + \text{H}_2\text{SO}_4$
	$\text{MgSO}_4 + 2\text{H}^+\text{R}^- \leftrightarrow \text{Mg}^{2+}\text{R}_2^- + \text{H}_2\text{SO}_4$
	$2\text{HCl} + \text{Ca}^{2+}\text{R}_2^- \leftrightarrow 2\text{H}^+\text{R}^- + \text{CaCl}_2$
	$\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{Ca}^{2+}\text{R}_2^- \leftrightarrow 2\text{H}^+\text{R}^- + \text{CaSO}_4$
R = Kuvvetli asidik kation değiştirici reçinedir.	
Anyon değiştirme	$2\text{R}_{(1)}^+\text{OH}^- + \text{H}_2\text{SO}_4 \leftrightarrow \text{R}_{(1)2}^+\text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O}$
	$\text{R}_{(1)}^+\text{OH}^- + \text{HCl} \leftrightarrow \text{R}_{(1)}^+\text{Cl}^- + \text{H}_2\text{O}$
	$\text{R}_{(1)}^+\text{Cl}^- + \text{NaOH} \leftrightarrow \text{R}_{(1)}^+\text{CH}^- + \text{NaCl}$
R ₍₁₎ = Kuvvetli bazik anyon değiştirici reçine	

Kühne [18], iyon değiştiricilerin, değişim süresince çözeltilerden iyonları alıp aynı miktarda başka iyonları çözeltiye veren sistem parçaları olduğunu ve sadece aynı yüklü iyonlar arasında gerçektelebildiğini belirtmiş, bitkilerin özümleme yapma özellikleri ile topraktaki tuzun oluşumunu iyon değişimi olayına örnek olarak vermiştir.

Deda [19], iyon değişimi, arıtılması istenen işlenecek suyun içi reçine dolu bir sütundan geçirilmesi ile gerçektelediğini, iyon değiştiricileri sayesinde, sertlik, tuz miktarı, nitrat, sülfat, organik madde, ağır metal oranları büyük kolaylıkla ayarlanabildiğini belirtmiştir.

Can ve ark. [20], bu yöntemin uygulamaya geçtiği ilk zamanlarda iyon değiştiricisi olarak silikat doğal ürünlerinin kullanıldığını, günümüzde kullanılan iyon değiştiricilerin ana maddesinin ise polistirool ve poliakrilit yani polimerizasyon maddelerinin olduğunu, bu maddelerin kompakt ve yüksek sıcaklıklarda Şekil bozulmasına karşı dayanıklı bir yapıya sahip ve yüksek verimli olduğunu ifade etmişlerdir.

Miyoshi ve ark. [21], atıksuların arıtılmasında gibi birçok araştırmacı iyon değiştirici membran teknolojisini kullanmışlar, İyonların taşınma işleminde, potansiyel etkisinden başka konsantrasyon, pH, çözelti yapısı, iyon difüzyonu, membran yapısı gibi etkenlerin sözkonusu olduğunu, membran yükü, taşıma işlemlerinde önemli bir rol oynamakta ve yüklü moleküller için membranların karakterizasyonunun etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Çengelolu vd. [22], donnan dializ yöntemi ile farklı anyon değiştirici membran kullanarak ortamda bulunan nitrat, klor, flor gibi ko-iyonların Cr(VI) taşınması üzerine olan etkilerini incelemişler, üç farklı membranlar kullanılarak yapılan deneylerde Cr(VI) taşınmasının ortamda ko-iyon bulunmayan şartlarda başarıya ulaşıldığını gözlemlemişlerdir.

Son zamanlarda İyon değiştirici reçinelerin kullanıldığı suların arıtılmasında “BAYER AG” akışkan yatak, asansör yatak, rinsebed ve multistep gibi modern ters akım teknolojileri geliştirerek kullanıma sunmuştur [23].

2.2.2 Ters ozmos yöntemi

Ters ozmos (RO), deniz suyu arıtma çalışmalarında daha yeni yöntemdir. Yöntem hücre duvarlarından su ve minerallerin geçişini ifade eden çok önemli doğal ozmos işlemini esas alır. Hücre duvarları suyu geçirirler ancak mineral maddeleri geçirmezler. Bu yüzden, hücre duvarları "yarı geçirgen" olarak da adlandırılırlar. Ters ozmos da farklı tuz içeriğine (konsantrasyonuna) sahip iki farklı su kütlesi (çözeltisi) yarı geçirgen bir membran ile ayrıldıklarında, iki çözelti farklı tuz konsantrasyon seviyelerini dengelemeye çalışırlar. Daha düşük konsantrasyona sahip olan çözeltideki su, yüksek konsantrasyona sahip çözeltiye doğru membran difüzyon ile geçer. Ancak yüksek konsantrasyona sahip bölgeye bir basınç uygulandığında, su molekülleri yüksek konsantrasyonlu bölgeden düşük konsantrasyonlu bölgeye membran aracılığıyla difüzyona başlar. Ters ozmos olarak adlandırılan bu etki ile deniz suyunu, tuzundan ayırmak mümkündür [24].

Arı ve ark. [25], membran sistemleri ile ilgili yapmış olduğu çalışmada, özellikle deniz suyunun arıtılmasında deniz suyu arıtımının maliyeti, RO sistemiyle en yüksek

tuzluluğa sahip olan Akdeniz'in işletme maliyeti, Karadeniz'e göre %56 daha pahalı olduğunu belirlemişlerdir.

Güler ve ark. [26], deniz suyundan kullanılabilir su eldesi için RO membranı ile yüksek giderim membranı karşılaştıran çalışmalarında yüksek giderim membranının tuz giderim performansının, klasik membranına göre daha yüksek olduğunu, yüksek membran ile üretilen suyun içme ve kullanma suyunda uygunluk gösterdiğini belirlemişlerdir. Bununla birlikte her iki membranda da bor'un giderilmesine yönelik yeni yöntemler denenmesini ve bu amaçla iyon değiştirme yönteminin kullanılması tavsiye edilmektedir.

Babuçcu ve ark. [27], yaptıkları çalışmada Avşa Belediyesinin içmesuyu ihtiyaç açığının deniz suyundan RO arıtma sistemi ile karşılanmasına yönelik bir çalışmada bulunmuşlardır. İlk olarak gerekli pik debiler, deniz içi hamsu iletim hattı güzergahı ve konsantre su deşarj hattı güzergahları, arıtma tesisi üniteleri belirlenmiştir. Belirlenen proseslere göre yapılan değerlendirmelerde tesisten üretilen 1 m³ su için gerekli elektrik tüketimi 3,1 kWh/m³, işletme maliyeti ise 0,40 \$/m³ olarak belirlemişlerdir.

2.2.3 Elektrodializ yöntemi

Elektrodializin (ED) prensibi iki sıvı arasındaki kimyasal potansiyel vasıtasıyla yüklü moleküllerin verilen bir ortamda ulaşabileceğinden çok daha büyük oranda difüzyonunu gerçekleştiren elektriksel potansiyel değişim ölçüsüne dayanır. Bir tuzlu çözeltiden doğru elektrik (DC) akımı geçirildiğinde katyonlar negatif kutup olan katoda, anyonlar pozitif kutup olan anoda doğru göç ederler. Bu yüzden kutuplar ya da tabakalar arasındaki potansiyelin yada elektrik akımının ayarlanmasıyla tabakalar arasında taşınan iyonların hızı değiştirilebilmektedir [28].

Elektrodializin prensip olarak uygulama alanları; bir karışımdaki istediğimiz maddelerin korunması, konsantre edilmesi, temizlenmesi, ayrılması ile ilgili proseslerde ve sıvı atıklarda materyallerin geri kazanılmasında, su kaynaklarının saflaştırılmasında, uygun su kalitesinin sağlanması için gerekli standartların karşılanması ve atık suların yeniden kullanılabilmesi için onarımıdır [28].

Turek ve ark. [29] deniz suyu arıtılmasında alternatif yöntemlerden biri olan elektrodializ yöntemi üzerine yapmış oldukları çalışmada, deniz suyunun arıtılmasında ED kullanımını diğer metotlara göre kıyaslandığında, ED genellikle düşük besleme tuzluluk koşullarında (TDS 10 g/L altında) ekonomik olarak geçerli marjinal bir metot olduğu, ED için çeşitli modifikasyonlar laboratuvar da uygulanmış ve bulunan göreceli düşük enerji gereksinimi (6,6 kWh/m³) ve arındırılmış su maliyeti (1,05 \$/m³) olarak ED desalinasyonunun teknik, ekonomik fizibilitesini ispatlamışlardır ve ED'in diğer proseslerle başarılı bir şekilde yarışabileceğini kararına varmışlardır. Ayrıca ED ile tuzdan arındırma işleminin ileri optimizasyonunda (5 kWh/m³) düşük enerji tüketimine doğru gidilecek çalışmaların olacağını ileri sürmüşler, laboratuvarlarında entegre sistemleri ele alarak RO veya termal yöntemler ile elde edilen içilebilir su ile karşılaştırıldığında üretim maliyeti (0,44 \$/m³) olarak tahmin etmişlerdir.

Turek [30], elektrodializ deniz suyunun tuzdan arındırmasında maliyet etkilerini incelemiş, deniz suyunun tuzdan arıtılmasında elektrodializin payı ters ozmosa göre küçük olduğu, ED 8 -10 g/L kadar tuzluluk besleme suyu olarak RO ile rekabet edebilir düzeyde olabileceğini ve ED tuzdan arındırma maliyeti tuz miktarı ile doğru orantılı olduğu kanısına varmıştır. Deniz suyunun tuzdan arındırma sürecinde tuzu alınmış su (TDS 0,45 g/L) ilk aşamada mevcut yoğunluğuna bağlı olarak ve sanayi tesisi için tahmini toplam enerji tüketimi 6,6-8,7 kWh/m³ eşit olduğu, tuzu giderilmiş su maliyeti 0,06 \$/kWh varsayılarak 1,05 \$/m³ düzeyde olduğu tespitinde bulunmuştur.

Torunoğlu ve Orhon [31], Türkiye'de kurulabilecek tuz gideren membran teknolojisi sistemleri için bilimsel esaslı tasarıma dayalı maliyet analizlerinin inceleyerek, çeşitli nüfus ve farklı büyüklükte yerleşim bölgesinin içme ve kullanma suyu ihtiyacını karşılayacak sistemlerin tasarım esasları belirlenerek deniz ve nehir sularının kullanılması durumuna göre yatırım ve işletme maliyetleri hesaplamışlardır. Nüfusu 500 olan bir yerleşim bölgesi için kurulacak deniz suyu membran teknolojisi sisteminin toplam yatırım maliyeti 2,24 €/m³ iken, nüfusu 15000 olan için 0,60 €/m³ değerine, diğer yönden nüfusu 500 olan bir yerleşim bölgesi için kurulacak nehir suyu membran teknolojisi sisteminin toplam yatırım maliyeti 1,26 €/m³ iken, nüfusu 15000 olan için 0,26 €/m³ değerine düşmekte olduğunu belirlemişlerdir.

2.2.4 Çok aşamalı distilasyon yöntemi

Bu proses 30 yıldan daha fazla bir süre büyük ölçekli ticari kullanıma sahiptir. Çalışma prensibi ise basittir. Girişteki deniz suyu basınçlandırılarak maksimum sıcaklığa kadar ısıtılır. Isıtılan akışkan suyun doygun buhar basıncından bir miktar daha düşük basınçlı bir hazneye verilir ve suyun bir kısmı buhar fazına geçer. Bu buhar bir damlacık ayırıcıdan geçirilerek askıdaki tuzlu su damlacıklarından sıyrılır ve ısı transfer borularının dış yüzeyinde yoğuşturulur. Yoğuşan akışkan tavalara üzerine damlayarak birikir ve sıcak ürün suyunu oluşturur [32].

Awerbuch [32], çalışmasında günümüzdeki desalinasyon uygulamalarına genel olarak inceleyerek, çok aşamalı distilasyon (MSF) prosesinin en önemli avantajı çok büyük ölçekli uygulamaların başarıyla gerçekleştirilebildiğini, günümüzde MSF tesislerinin birim yatırım maliyeti 1 galon/gün kurulu kapasite başına 5-7 \$ arasında değişmekte olduğunu ayrıca gelecekte MSF uygulamalarında hem verimliliğin artması hem de çok etkili distilasyon (MED) ve membran prosesleri ile entegrasyonun sağlanması beklenmekte olduğunu vurgulamışlardır.

Wade [33], damıtma tesislerinin geliştirilmesi ve maliyetlerini incelenmesi üzerine yapmış olduğu çalışmada deniz suyunu arıtmada RO ile su üretim maliyetlerini inceleyerek, birkaç yıl öncesine kadar maliyetlerini kıyasladığında %50 ye kadar tasarruf sağladığı ortaya koymuş, RO veya büyük distilasyon tesisleri ile su maliyetleri, enerji maliyetlerine bağlı olarak 0,7-0,9 \$/m³ arasında olduğunu sonuçlarına varmış olup gelecekteki gelişmeler maliyetleri daha da düşüreceğini ortaya koymuştur.

Blanco ve ark. [34], gelişmiş çok etkili güneş arıtma teknoloji (PSA) deneyimini inceleyen çalışmasında, MSF, termal buhar sıkıştırma – çok etkili distilasyon (TVC-MED), mekanik buhar sıkıştırma (MGD) ve RO teknolojileri kullanılan deniz suyu arıtılmasında farklı işletme maliyetlerini araştırmıştır.

Turek [35], deniz suyu tuzdan arındırma ve tuz üretimi için hibrid membran - ısı işlem üzerine çalışmalarında bulunmuş, birkaç hibrit sistem geliştirmiş, NF-MSF, NF-RO-MSF, NF-RO-MD geliştirilen sistemlerin umut verici performans sunduğunu ve önerilen sistemde deniz suyu arıtılmasında sadece arıtılmış su değil bunun yanında tuz

elde edilmesi değerli bir ürün olarak görmektedir. Elde edilen bir ton tuz için 30 \$ satış varsayılırsa; UF-NF-MSF kristalizasyon sisteminde 0,71 \$/m³, UF-NF-RO-MSF kristalleşme sisteminde 0,43 \$/m³ olarak suyun maliyetini bulmuştur. Bu sistemler termik veya RO deniz suyu arıtım tesislerinde üretilen içme suyu kıyasla rekabet edeceğini kanısına varmıştır.

Helal ve ark. [36], RO ve MSF süreçlerin fizibilite çalışmaları keşfetmek için minimum su maliyetine dayalı optimizasyon çalışmasının sonuçları üzerinde yaptıkları çalışmada, tuz giderimi için aynı kapasitede dokuz farklı senaryo oluşturulmuş ve minimum su maliyeti, sermaye maliyeti ve suyu iyileşme açısından karşılaştırmışlardır. Hesaplamaların ilk aşamasında RO süreci için 0,75 \$/m³'e karşı MSF sürecini geri salamura için 1,1 \$/m³ su maliyetlerini bulmuşlardır. MSF süresince su maliyeti RO teknoloji ile hibridizasyon yoluyla %17-24 azaltılma sağlana bileceğini ortaya koymuşlardır.

Borsani ve Rebagliati [37], MSF ile tuzdan arındırma tesisleri esasları ve maliyetleri ve diğer teknolojilerle karşılaştırılmasını inceleyerek, kademeli flash arıtma dünya çapında tuzdan arındırma pazarının %60'ın üzerinde bir pazar payına sahip olup orta doğu bölgesinde %80'e kadar bir artış gösterdiğini vurgulamışlardır. Teknik gereksinimler ve kurul masrafları açısından değerlendirmeye alınmış olup her işlem için suyun maliyeti belirlemişlerdir.

Wittholz ve ark. [38], düşük maliyetli bir veritabanı kullanarak tuzdan arındırma tesisleri maliyetini tahmin etme için yapmış oldukları çalışmada, dünyanın en kurak devletlerinden biri olan Güney Avustralya'nın başkenti Adeliade için çeşitli alternatif su kaynakları araştırılmış ve uygun arıtma seçimi için maliyet çalışmaları düzenlenmişlerdir. Büyük ölçekli deniz suyu arıtma tesisleri için su tesisi büyüklüğüne bağlı 0,50–2,00 \$/m³ aralığında maliyetler MSF, MED ve RO prosesleri için bulunmuş, Adelaide için RO deniz suyundan arıtım için en ucuz teknoloji olarak belirlemişlerdir.

Eren ve Batur [39], tuzdan arındırma sistemleri ve bir güç santralinin tuzdan arındırma tesisini inceleyerek, tesise giren deniz suyu miktarı belirlenip ve buna göre 198428 kg/h giren deniz suyunun enerji denklemlerini çıkartıp maliyet analizinde bulunmuşlardır.

Çıkartılan enerji denklemleri sonunda 24031 kg/h saf su üretilmekte, üretilen suya göre harcanan enerji 6615405 kJ/h olarak belirlenmiştir. Bu harcanan enerjini 213,2 m³/h bir doğalgaz tüketimine veya 1837,6 kW/h bir elektrik enerjisi giderimine karşılık geldiğini tespit etmişlerdir.

Nusret ve Gönenç [40], alternatif su kaynaklarını çeşitli yönleri ile inceleyerek, bu irdelemede yüksek maliyet nedeniyle desalinizasyon teknolojisinin kullanımı yaygın olmamasına rağmen, meydana gelen gelişmeler birim maliyetin hızla düşmesine neden olmuştur. 1988 yılında 1 m³ suyun toplam maliyeti 1,7 \$ iken 2000 yılında toplam maliyet 0,7 \$'a kadar gerilemiş, desalinizasyon teknolojilerinin maliyet açısından karşılaştırmalarda bulunarak MSF 1,1-1,25 \$/m³, MED 0,75-0,85 \$/m³, VC 0,87-0,95 \$/m³, RO 0,68-0,92 \$/m³ bir değerlendirmede bulunmuşlardır.

BÖLÜM III

MATERYAL VE METOT

Dünyada, özellikle ülkemizde kullanılabilir su kaynaklarının sınırlı oluşu deniz suyunun arıtılmasının önemi artmaktadır. Günümüzde gerek akademisyen çevre gerekse özel sektör, deniz suyundan içme ve kullanma suyu elde etmek amaçlı çeşitli çalışmalar yapmaktadır. Bunun en önemli nedeni üretilen suyun ekonomiklik sağlamamasından kaynaklanmaktadır. Yapılan çalışmalarda; maliyetlerin minimuma indirgenmesi araştırmacılar için her daim öncelikli konu olmaktadır. Ancak bütün teknolojik ilerlemelere rağmen, desalinasyon sistemlerinin maliyetinin istenen düzeylerde olmaması önemli bir problem olarak durmaktadır. Böylece tüm ülkelerdeki akademik çalışmaların yanısıra özel sektör içinde bu konuda araştırma-geliştirme laboratuvarları kurulmasına sebep olmaktadır

Bu çalışmada yatırım ile işletme maliyetlerini minimumda tutabilecek, kullanım alanına kolayca taşınabilen, tuzluluğun giderilmesi sağlamak amacıyla bir atıksu arıtma sisteminin dizaynı yapılarak üzerinde deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmalar iki aşamada yapılmış olup, birinci aşama arıtılacak suyun miktarı, ikinci aşama sentetik olarak oluşturulan tuzlusudan tuzluluğun giderilmesi araştırılmıştır.

3.1 Materyal

Çalışma konusunun materyalini sentetik olarak Erciyes Üniversitesi Kayseri Meslek Yüksekokulu İnşaat Programı laboratuvarında hazırlanan tuzlusu örnekleri ve tasarımı yapılan atıksu arıtma sistemi oluşturmaktadır.

3.1.1 Atıksu

Bilindiği üzere, dünyadaki bütün okyanuslarda ortalama tuzluluk oranı, her bir kilogram (ya da litre) deniz suyunda yaklaşık 35 gram çözünmüş tuz (çoğunluğu sodyum klorür iyonları olan Na^+ ve Cl^-) içeriğini belirtir. Dünya üzerindeki denizlerin tuzluluk oranları %0,7-%4,3 arasında değiştiği bilinmekte olup denizden denize tuz içeriği büyük ölçüde

farklılıklar göstermektedir. Ayrıca denizlere olan tatlı su akışına bağlı olarak tuz içeriği yüksek ya da az olabilmektedir [20].

Deneyisel çalışmada, Erciyes Üniversitesinde içme suyu olarak kullanılan ve musluktan alınan şebeke suyu ve aynı şebeke suyuna Cihan-Kur A.Ş. tarafından üretilen ve satışa sunulan iri salamura tuzu (NaCl) ile sentetik olarak hazırlanan tuzlusu örnekleri konunun materyalini oluşturmaktadır. Musluktan alınan şebeke suyuna ağırlık esasına göre %1-7 oranında tuz katılarak 10 dakika süre ile karıştırılıp bir saat bekletildikten sonra yeniden 10 dakika karıştırılarak tuzun tamamen eridiğine karar verilmiş ve deneylerde kullanılmak üzere su örnekleri hazırlanmıştır. Deneyisel çalışmalara başlamadan önce her bir atıksuyun pH değerleri (asidik ve bazik durumu) ile elektriksel iletkenlikleri ölçülmüş ve Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Deney öncesi numune ölçümleri

Numuneler	Karışım Oranları			pH	°C	İletkenlik	
	Su Miktarı (L)	Tuz Miktarı (kg)	Kullanılan Miktar (L)			µS/cm	mS/cm
Çeşme suyu	100	-	42,6	8,23	16,7	309	-
Tuzlu su %7	100	7	42,6	7,71	16,8	-	80,5
Tuzlu su %6	100	6	42,6	7,70	18,3	-	68,3
Tuzlu su %5	100	5	42,6	7,68	17,2	-	56,0
Tuzlu su %4	100	4	42,6	7,65	17,6	-	43,9
Tuzlu su %3	100	3	42,6	7,63	19,9	-	31,6
Tuzlu su %2	100	2	42,6	7,67	19,1	-	19,9
Tuzlu su %1	100	1	42,6	7,73	17,5	-	11,4

3.1.2 pH metre

Deneylerde kullanılan numunelerin pH değerlerinin ölçülmesinde, Erciyes Üniversitesi Kayseri Meslek Yüksekokulu İnşaat Programı laboratuvarında bulunan “CP-411e Handheld Waterproof pH” markalı pH metre cihazı kullanılmış, bu cihazla ilgili teknik özellikler Çizelge 3.2’de, görsel ise Fotoğraf 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.2 pH metre teknik özellikleri

Fonksiyon	pH	mV	Sıcaklık °C
Ölçüm Aralığı	0.00 ~ 14.00	±1999	-50 ~ +199,9
Çözünürlük	0.01	1	0.1
Doğruluk (±1 hane)	±0.01	± 1	±0.1



Fotoğraf 3.1 pH metre

3.1.3 Elektriksel iletkenlik

Sentetik olarak hazırlanan tuzlusu örneklerinin elektriksel iletkenlik değerlerinin ölçülmesinde Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümünden temin edilen “HACH, sensION156 Portable pH/ Dissolved Oxygen Meter, with Platinum pH Electrode&DO Probe” markalı elektriksel iletkenlik ölçer cihazı kullanılmıştır. Cihazın teknik özellikler Çizelge 3.3’de, görseli Fotoğraf 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.3 İletkenlik ölçer teknik özellikleri

Fonksiyon	pH	mV	Sıcaklık °C	İletkenlik $\mu\text{S/cm}$
Ölçüm Aralığı	-2.00 ~ 19.99	±2000	-10 ~ +110	0 ~ 199.9
Çözünürlük	0.1/0.01/0.001	0.1	0.1	0.1 / 1
Doğruluk	±0.002	± 0.2/±0.1	±0.3	%±0.5



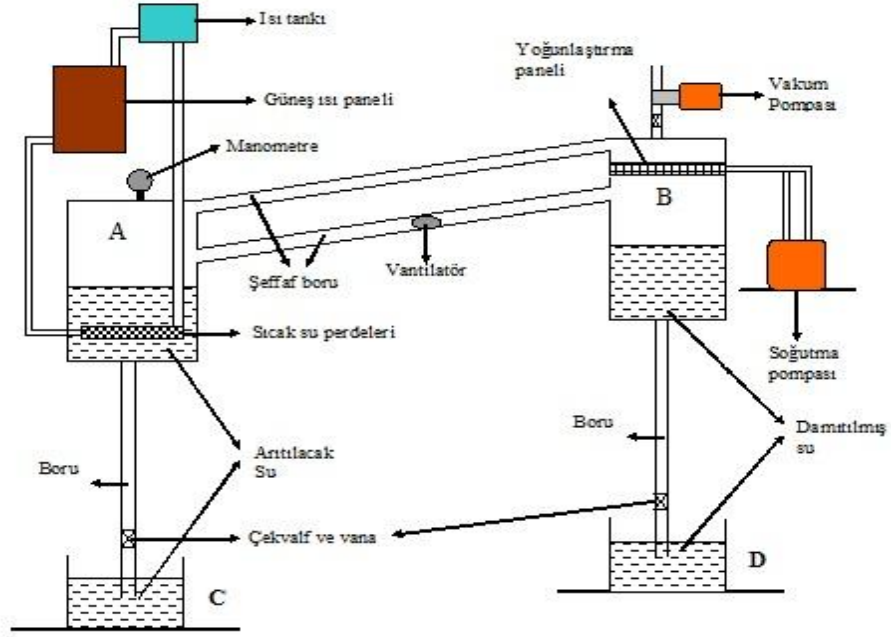
Fotoğraf 3.2 İletkenlik ölçer

3.1.4 Deney düzeneği

Literatürde, yeryüzündeki hidrolojik çevrime göre şekillendirilmiş birçok deney düzeneği tasarlanmış ve tuzlu suların arıtılması planlanmıştır. Ancak sistemden elde edilen arıtılmış su miktarının yetersizliği ve yatırım ve işletme maliyetlerinin yüksek olması dolayısıyla, bu sistemler yaygın kullanım alanı bulamamıştır. Son dönemlerde teknolojik gelişmeler yardımıyla, alternatif arıtma sistemleri tasarlanmış ve geleneksel yöntemin yerine daha ekonomik arıtma sistemlerinin kullanılması tercih edilmeye başlanmıştır.

Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Kayseri Meslek Yüksekokulu İnşaat Programı laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği, daha önce Erciyes Üniversitesi'nde Yrd. Doç. Dr. Hamdi TAPLAK, Yrd. Doç. Dr. Ahmet BİLGİL ve Öğr. Gör. Ergün YEŞİLYURT tarafından yürütülen FBA-07-22 nolu araştırma projesinde kullanılmıştır. Bu çalışmada da gerekli yazışmalar yapılarak izin alındıktan sonra mevcut projenin deney düzeneği, çalışmanın materyalini oluşturmuştur. Ancak çalışmanın yürütülebilmesi için deney düzeneği üzerinde gerekli revizeler yapılmıştır.

Deney düzeneği yeryüzündeki mevcut suların doğal döngü prensibine (buharlaştırma-yoğunlaşma-yağış) göre çalışmaktadır. Sistemin doğal hidrolojik çevrimden farkı ise kapalı ortamda atmosfer basıncını düşürerek, daha düşük ısılarda (ortalama 45 °C) buharlaşmanın gerçekleştirilmesidir. Bu yaklaşıma göre yeniden dizayn edilen arıtma sisteminin şematik görünüşü Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1 Deney aleti taslak planı

Deney düzeneği negatif mutlak basınca dayanabilecek şekilde tasarlanmış olup A haznesi buharlaşma tankı, B haznesi yoğunlaşma tankı olmak üzere iki adet tank mevcuttur. Bu tanklarda kaynama, buharlaşma ve yoğunlaşmanın gözlenmesine olanak sağlayan gözlem penceresi ve tankların üzerinde mevcut sıcaklığı gösteren standart ısı ölçerler mevcuttur. Sistem içinde buharın döngüsünü sağlamak amacıyla tanklar birbirine iki adet şeffaf boru ile bağlanmıştır. Buharlaşma tankında biriken buharı ortamdan yoğunlaştırma tankına taşımak için alt bağlantı borusuna buhar sirkülasyon pompası (vantilatör) yerleştirilmiştir. Sistemin iç basıncını düşürmek için vakum pompası kullanılmıştır. Buharlaşma tankına atık su C tankından alınmaktadır. C tankına alınan arıtılacak suyun, sistemin iç basıncı düşürüldükten sonra kontrollü şekilde A ile C tankı arasındaki vana açılarak, basınç farkı ile A tankına dolması sağlanmaktadır. Arıtılan su ise sistemin iç basıncı giderildikten sonra D tankına alınmaktadır. Ayrıca, buharlaşma haznesindeki suyu belirli ısılarda kaynatabilmek için güneş ısısından faydalanmak amacıyla gerekli düzenek yapılmıştır. Ancak güneşsiz ortamlarda da sistemi çalıştırabilmek için otomatik elektrikli ısıtıcı düzenek mevcuttur. Deney esnasında gözlem penceresinden suyun kaynamaya başladığı an tespit edildikten sonra sistemin buharlaşma basıncını belirlemek amacıyla Fotoğraf 3.3’de görülen basınç ölçer manometreler (vakummetre) bulunmaktadır.



Fotoğraf 3.3 Kullanılan dijital ve standart vakummetre

Sistemde buhar haline geçen suyu tekrar yoğunlaştırarak su haline getirmek için B tankı içinde soğutucu paneller ve bunları soğutmak için soğutma kompresörü kullanılmıştır. Sistemin genel bir görünüşü ise Fotoğraf 3.4’da verilmiştir.



Fotoğraf 3.4 Sistemin genel görünüşü

3.2 Metot

Hidrolojik çevrim sistemi olarak tasarımı yapılan çalışmanın teorik irdelenmesinde, ısı transferi olarak bilinen enerjinin korunumu prensibi, yöntem olarak seçilmiştir. Buna göre sistemde atıksuyun arıtılma miktarı ile sentetik olarak oluşturulan tuzlusu numunesinin elektriksel iletkenliğinin giderilip giderilemeyeceğinin tespiti deneysel olarak araştırılmıştır.

Çalışmada; sistemin A haznesinde bulunan gözlem penceresinin orta kısmına kadar atıksu alındıktan sonra bütün vanalar kapatılır ve vakum pompası çalıştırılarak sistem içi basıncının atmosfer basıncından daha düşük basınca inmesi sağlanır. Oluşacak iç basınç deney yapılacak kaynama (buharlaşma başlangıcı) derecesidir. Daha önce ısı ölçerden kontrol ederek deney ısısında tutulan su, gözlem penceresinden takip edilerek kaynamaya başladığı an, buharlaşma basıncı olarak kaydedilmekte ve vakum pompası durdurulmaktadır. Ölçülen bu an, deney başlangıç anı olarak kabul edilmektedir ve 30, 60, 90 dakika sürelerde yoğunlaşma miktarı ölçülmektedir.

Buhar basıncı, suyun yükselen t sıcaklığı ile logaritmik bir eğri boyunca artar. Buna göre saf suyun çeşitli sıcaklıklarda P_d mutlak buharlaşma basıncı Çizelge 3.4'de verilmiştir.

Çizelge 3.4 Saf suyun çeşitli sıcaklıklarda buharlaşma basıncı (P_d)

t (°C)	Pd		t (°C)	Pd		t (°C)	Pd	
	Kg/cm ²	+4 °C su kolonu (m)		Kg/cm ²	+4 °C su kolonu (m)		Kg/cm ²	+4 °C su kolonu (m)
0	0,006228	0,06228	13	0,01526	0,1526	32	0,04847	0,4847
1	0,006694	0,06694	14	0,01628	0,1628	34	0,05428	0,5428
2	0,007193	0,07193	15	0,01737	0,1737	40	0,072	0,720
3	0,007723	0,07723	16	0,01852	0,1852	50	0,121	1,210
4	0,008289	0,08289	17	0,01974	0,1974	60	0,196	1,960
5	0,008890	0,08890	18	0,02103	0,2103	70	0,307	3,070
6	0,009530	0,09530	19	0,02239	0,2239	80	0,467	4,670
7	0,010210	0,10210	20	0,02383	0,2383	90	0,692	6,920
8	0,010930	0,10930	22	0,02694	0,2694	100	1,000	10,000
9	0,011690	0,11690	24	0,03041	0,3041	121	2,000	20,000
10	0,012510	0,12510	25	0,03429	0,3429	134	3,000	30,000
11	0,013370	0,13370	28	0,03853	0,3853	144	4,000	40,000
12	0,014290	0,14290	30	0,04325	0,4325	152	5,000	50,000

3.2.1 Isı transferi

3.2.1.1 Termodinamiğin birinci yasası

Çalışmanın bu aşamasında, ısı transferinin temelleri tanıtılmış ve irdelenmiştir. Termodinamik, bir sistemin bir işlem sırasında, bir denge konumundan diğerine

geçerken meydana gelen toplam ısı transferi miktarıyla ilgilenir. Isı transferi bilimi ise ısı transferi hızıyla ilgilenir. Isı transferi hızı, ısı transferi donanımlarının tasarımı ve değerlendirilmesindeki en temel niceliktir. Bir sistemdeki bütün enerji biçimlerinin toplamı, sistemdeki toplam enerjiyi verir ve iç, kinetik ve potansiyel enerjileri içerir. İç enerji bir sistemdeki moleküler enerjiyi temsil eder ve duyulur, gizli, kimyasal ve nükleer enerji biçimlerinden oluşur. İç enerjinin duyulur ve gizli enerji biçimleri, sıcaklık farkı sonucunda bir ortamdan diğerine aktarılabilir. Bu enerji biçimleri ısı veya ısısal enerji olarak bilinir. Yani, ısı transferi iki ortam arasındaki sıcaklık farkından dolayı transferi gerçekleşen duyulur ve gizli enerji biçimleridir. Birim zamanda gerçekleşen ısı transferi miktarı, ısı transfer hızı olarak adlandırılır ve "Q(W)" ile gösterilir. Birim alandan olan ısı transferi hızı ise, ısı akısı "q (W/m²)" olarak adlandırılır. Sabit bir kütleden oluşan bir sistem kapalı sistem olarak adlandırılır. Sınırlarından kütle geçişi olan bir sistem ise açık sistem veya kontrol hacmi olarak adlandırılır. Bir işleme tabi olan herhangi bir sistem için "Termodinamiğin Birinci Yasası" veya enerji dengesi Denklem 3.1'de verildiği gibi ifade edilebilir [41]:

$$E_{giren} - E_{çıkan} = \Delta E_{sistem} (J) \quad (3.1)$$

Eğer hareketsiz, kapalı bir sistem yalnızca ısı transferi içeriyorsa ve sınırlarından bir iş transferi yoksa enerji dengesi sadeleşerek aşağıdaki duruma gelir [41]:

$$Q = m C_v \Delta T \quad (J = \text{kg} \cdot \text{J} / (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}) \cdot ^\circ\text{C}) \quad (3.2)$$

Burada; Q sisteme doğru gerçekleşen veya sistemden gelen toplam (net) ısı transferi, ΔT ısı transferi sabit bir hızıyla gerçekleşiyorsa gerçekleştiği zaman aralığı, C_v sabit basınçta sıvının özgül ısısı, m sıvının kütlesidir [41].

Bir giriş ve çıkışa sahip ve bu giriş ve çıkışı arasında ihmal edilebilir kinetik ve potansiyel enerji değişimi olan bir kontrol hacmi için sürekli rejimde ve iş etkileşiminin olmadığı koşullarda enerjinin korunumu bağıntısı Denklem 3.3'de verildiği gibi ifade edilebilir [46]:

$$Q = m C_p \Delta T \quad [W = (\text{kg/s}) \cdot \text{J} / (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}) \cdot ^\circ\text{C}] \quad (3.3)$$

Burada $m=\rho VA_c$ [$\text{kg/s}=(\text{kg/m}^3).(\text{m/s}).\text{m}^2$], kütleli debidir.

Isı; iletim, taşınım ve ışıyım olarak üç farklı şekilde transfer edilebilir. İletim birbirine komşu olan parçacıklar arasındaki etkileşim sonucunda, daha enerjetik olanlardan az olanlara doğru ısının transferidir. Bu transfer şekli "Fourier Isı İletim Yasası" ile Denklem 3.4'de verildiği gibi ifade edilir [41]:

$$Q_{\text{iletim}} = -kA \frac{dT}{dx} (W) \quad (3.4)$$

Burada k , malzemenin ısı iletkenliği [$\text{W}/(\text{mK})=\text{W}/(\text{m}^\circ\text{C})$], A , ısı transfer yönüne dik olan alan (m^2), $\frac{dT}{dx}$ ise, sıcaklık değişimidir ($\text{K}/\text{m}=\text{C}/\text{m}$). L kalınlığına sahip düzlemsel bir dx tabakadan gerçekleşen iletim (hızı) Denklem 3.5'de verildiği gibidir [41]:

$$Q_{\text{iletim}} = -kA \frac{\Delta T}{L} \quad (3.5)$$

Taşınım, katı bir yüzey ve ona komşu olan hareket halindeki sıvı veya gaz (akışkan) arasında gerçekleşen ısı transferi şeklidir. Taşınım, içinde hem iletimden hem de akışkan hareketinden gelen bileşik etkileri içerir. Taşınımla ısı transferi hızı "Newton Soğuma Yasası" ile Denklem 3.6'da verildiği gibi ifade edilir [41]:

$$Q_{\text{taşınım}} = h A_s (T_s - T_\infty) \quad (3.6)$$

Burada h , ısı taşınım katsayısıdır ve birimi [$\text{W}/(\text{m}^2\text{C})=\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$] ile verilir. A_s ise, taşınımın gerçekleştiği yüzeyin alanıdır (m^2). T_s yüzey sıcaklığı ($^\circ\text{C}$), T_∞ ise yüzeyden yeteri kadar uzakta akışkanın sıcaklığıdır ($^\circ\text{C}$).

ışıyım bir maddeden, yapısındaki atomların veya moleküllerinin elektronik şekillerinde meydana gelen değişimler sonucunda, enerjinin elektromanyetik dalgalar (veya fotonlar) halinde yayılmasıdır. T_s mutlak sıcaklığına (Kelvin= K) sahip bir yüzeyin yayabileceği maksimum ışıyım miktarı "Stefan-Boltzmann Yasası" ile verilir. Stefan-Boltzmann yasasına göre $Q_{\text{yayılan,max}}=\sigma A_s T_s^4 (W)$ yazılabilir. Burada; σ Stefan-Boltzmann sabitidir, $\sigma=5.67 \times 10^{-8}$ [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$] olarak kullanılmaktadır [41].

Eğer ϵ yayma katsayısına (-) ve A_s alanına (m^2) sahip T_s sıcaklığında (K) bir yüzey çok daha büyük (veya siyah) T_{surr} sıcaklığına (K) sahip bir yüzey tarafından tamamıyla sarılmışsa ve aralarında ışınımı engellemeyen bir gaz (hava gibi) varsa bu iki yüzey arasındaki net ışınım transferi Denklem 3.7’de verildiği gibidir [41]:

$$Q_{ışınım} = \epsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{surr}^4) \quad (3.7)$$

Bu durumda küçük yüzeyi saran yüzeyin yayma katsayısının ve alanının net ısı transferine etkisi yoktur. Bir yüzeyin ne kadar ışınım yuttuğunu $Q_{yutulana} = a Q_{gelen}$ denklemi belirler. Burada; Q_{gelen} yüzeye gelen ışınım miktarı ve a yüzeyin yutma katsayısıdır [41].

3.2.1.2 Kaynama ve yoğuşma

Bu bölümde kaynama ve yoğuşma konusu ele alınmıştır. Kaynama T_s ile gösterilen yüzey sıcaklığı, T_{sat} ile gösterilen doyma sıcaklığının üzerinde bulunan bir yüzeyle temas halinde olan sıvıda gerçekleşir. Kaynama, akışkanın hareketine bağlı olarak havuz kaynaması ve akış kaynaması olarak sınıflandırılır. Sıvı akışının gerçekleşmediği durumda havuz kaynaması, gerçekleştiği durumda ise akış kaynaması (zorlanmış taşınım ile kaynama) adını alır. Ayrıca sıvı sıcaklığına bağlı olarak, havuz kaynaması ve akış kaynaması aşırı soğutulmuş ve doymuş kaynama olarak sınıflandırılır. Aşırı soğutulmuş kaynamada akışkan sıcaklığı doyma sıcaklığının altındadır, doymuş kaynamada ise akışkan sıcaklığı doyma sıcaklığına eşittir. Sıcaklık fazlalığı ($\Delta T_{kızma}$) değerine göre kaynama çeşitli şekillerde gerçekleşir. Doğal taşınımlı kaynama, habbecikli kaynama, kısmi film kaynaması (geçiş bölgesi) ve film kaynaması olarak dört farklı kaynama şekli gözlemlenmiştir [42].

Kaynama şekilleri, kaynama eğrisinde gösterilir. Habbecikli kaynamada, buharlaşma hızı ve ısı transferi akımı, $\Delta T_{kızma}$ arttıkça artar ve bir noktada en büyük değere ulaşır. Bu nokta en fazla (kritik) ısı akısı olarak adlandırılır ve q_{max} olarak gösterilir. Habbecikli havuz kaynamasında ısı transferi akımı (W/m^2) Denklem 3.8 ile hesaplanabilir [42].

$$Q_{\text{habbecikli}} = \mu_1 h_{fg} \left[\frac{g(\rho_1 - \rho_v)}{\sigma} \right]^{-\frac{1}{2}} \left[\frac{c_{p1}(T_s - T_{\text{sat}})}{C_{sf} h_{fg} Pr_1^n} \right]^{-3} \quad (3.8)$$

Habbecikli havuz kaynamasında en fazla (kritik) ısı akısı ise, Denklem 3.9 ile bulunabilir [42].

$$Q_{\text{enfazla}} = C_{cr} h_{fg} \left[\sigma g \rho_v^2 (\rho_1 - \rho_v) \right]^{-\frac{1}{4}} \quad (3.9)$$

Denklemdede; h_{fg} doymuş sıvı entalpisidir. C_{cr} sabit bir sayıdır ve değeri yaklaşık olarak 0.15 alınabilir. En az ısı akısını veren eşitlik Denklem 3.10 ile verilmiştir [42].

$$Q_{\text{enaz}} = 0,09 \rho_v h_{fg} \left[\frac{\sigma g (\rho_1 - \rho_v)}{(\rho_1 + \rho_v)^2} \right]^{-\frac{1}{4}} \quad (3.10)$$

Yoğuşma olarak ise doğada iki farklı yoğuşma şekli gözlemlenmiştir. Bunlar, film yoğuşması ve damlacıklı yoğuşmadır. Film yoğuşmasında, yoğuşma yüzeyde bir sıvı filmi şeklinde gerçekleşir ve yer çekimi etkisi ile hareket eder. Damlacıklı yoğuşmada ise yüzeyde yoğuşan buhar sürekli bir film yerine çeşitli çaplarda sayısız damlacıklar şeklinde gerçekleşir [42].

Yoğuşan akışa ait Reynolds sayısı Denklem [(3.11), (3.12)] ile verilmiştir [42].

$$Re = \frac{D_h \rho_1 V_1}{\mu_1} = \frac{4 A_c \rho_1 V}{p \mu_1} = \frac{4 m}{p \mu_1} \quad (3.11)$$

$$Re = \frac{4 Q_{\text{yoğuşma}}}{p \mu_1 h_{fg}^*} = \frac{4 A_s h (T_{\text{sat}} - T_s)}{p \mu_1 h_{fg}^*} \quad (3.12)$$

Denklem 3.12 ile verilen h_{fg}^* (J/kg) değeri düzeltilmiş buharlaşma gizli ısıdır ve Denklem 3.13 yardımıyla hesaplanır [42].

$$h_{fg}^* = h_{fg} + 0,68 c_{p1} (T_{\text{sat}} - T_s) \quad (3.13)$$

3.2.2 Deneyin yapılışı

Hidrolojik çevrime göre tekrarlanan sistem de deneyler iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada; deney materyali olarak musluk suyu seçilmiştir. Çalışmanın bu aşamasındaki amacı; değişik kütlelerdeki suyun buharlaştıktan sonraki yoğunlaşma miktarının gözlenmesi ile atıksu kütlesinin ve yüzey alanının yoğunlaşma üzerine etkisi araştırılarak sistemin verimi belirlenmesidir. İkinci aşamada; sentetik olarak oluşturulan tuz kirliliğinin arıtılması gözlenmiştir. Deney öncesi ve deney sonrası numunelerin elektriksel iletkenlikleri ölçülmek suretiyle, suyun tuzdan arıtılıp arıtılmadığına karar vermek için deneyler yapılmıştır. Her bir deney aynı şartlarda iki kez tekrarlanmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar arasında %15 den fazla fark çıktığında üçüncü deney yapılarak aykırı olan sonuç atılmak suretiyle, iki deney sonucunun aritmetik ortalaması, deney sonucu olarak kabul edilmiştir.

Deney numuneleri Şekil 3.1’de gösterilen C haznesine yeter miktarda konduktan sonra A haznesi (buharlaştırma tankı) ve B haznesi (yoğunlaştırma tankı) giriş çıkış vanaları kapatılmıştır. Vakum pompası çalıştırılarak sistemin içindeki normal atmosfer basıncı daha önceden belirlenen buharlaştırma basıncına kadar düşürülmüştür. Daha sonra vakum pompası durdurularak, C haznesindeki deney numunesinin, A haznesinin giriş vanası açılarak istenen miktarda A haznesine dolması sağlanmıştır.

Numune A haznesine doldurulduktan sonra güneş ısıtıcılı sıcak su sistemi yardımı ile (sıcak su ile sıcak su üretimi sistemi) istenen sıcaklığa getirilmesi sağlanmıştır. Ancak havanın kapalı olduğu zamanlarda, sistemde mevcut olan ve elektrikle çalışan otomatik ısıtıcı rezistans yardımıyla istenilen ısılara getirilmiştir. Aynı zamanda B haznesinde bulunan panellerle yoğunlaştırma yapabilmek için soğutucu kompresör çalıştırılarak, B haznesinin ısısının -15 ve -25 °C’de deney ısısına düşmesi sağlanmıştır. Daha sonra A haznesindeki su sıcaklığı, istenilen buharlaştırma basıncına ulaştığında suyun kaynamasını sağlamak için vakum pompası çalıştırılmak suretiyle gerekli buharlaşma basıncı düşürülmekte ve su kaynatılmaktadır. Ancak sistemin kapalı devre oluşu nedeniyle buharlaşma ile basınç kısmen yükselmeye başlamaktadır. Buharlaşma basıncında atıksu kaynamaya başladığında vakum pompası devreden çıkarılmakta, iç basınç yükselmeye başladığı zaman tekrar çalıştırılmaktadır.

A haznesinde suyun kaynaması ile oluşan su buharı difüzyon yolu ile B haznesine geçmekte ve su mevcut olan soğutucu paneller yardımı ile yoğunlaştırılmaktadır. Ayrıca A ve B haznelerindeki mevcut ısı farklılıklarında buhar transferinin B haznesine difüzyon yolu ile taşınımı yetersiz kaldığında veya gerek duyulduğu zaman, sistemde mevcut olan buhar transfer pompası yardımı ile A haznesindeki buharın B haznesine geçmesi hızlandırılmakta ve buharın yoğunlaşma haznesine taşınımı pompa ile desteklendiği zaman yoğunlaşma miktarının değişimi de gözlenebilmiştir.

3.2.3 Deney sonuçları

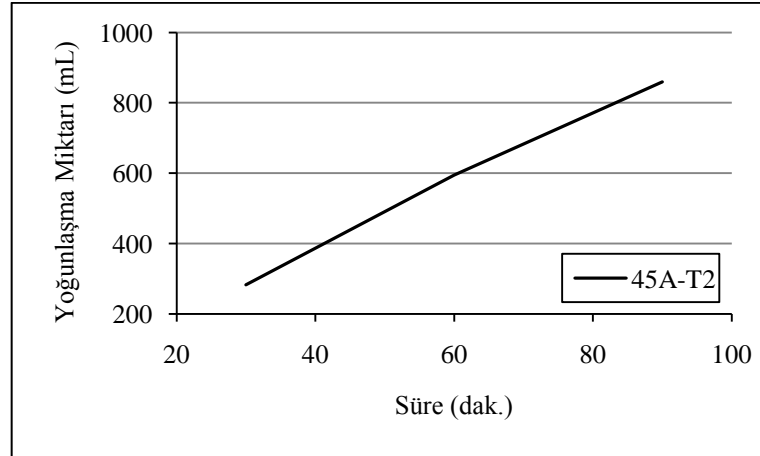
Deneylerin birinci aşamasında, sistemin artırılmış su verimi belirlenmiştir. Atıksu numuneleri 45A, 50B, 55C ve 60D olmak üzere dört gruba ayrılmış ve her bir numune üzerinde tekrarlama deneyleri yapılmıştır. Tekrarlanan deneyler, yoğunlaştırma tankı -15 ve -25 °C’de olmak üzere 30, 60 ve 90 dakikalık sürelerde yapılmıştır. Her bir deney materyali $45A_{30-T1}$ şeklinde alt indislenmiş olup grupta, 45 numunenin kaynama derecesini, A deney numunesi, 30 alt indis numunenin deneye tabi tutulduğu süreyi ve T1 alt indis sistemin yoğunlaştırma tankının ısısını (T1: -15°C, T2: -25°C) ifade etmektedir. Sisteme atıksu alındıktan sonra vakum pompası yardımı ile buharlaşma basıncı sırasıyla yaklaşık olarak -0,80, -0,75, -0,73 ve -0,66 bar’a sistem iç basıncına düşürülerek 45, 50, 55, 60 °C’de A tankındaki atıksuyun kaynaması sağlanmış ve buharlaşmanın oluşması ile deneye başlanmıştır. Ancak ölçülen buharlaşma basıncı değerleri ile Çizelge 3.4’te belirtilen saf suyun buharlaşma basınçları arasında yaklaşık %12’lik bir basın farkı ortaya çıkmaktadır. Bunun nedeni saf su ile deney numunesinin özgül ağırlıklarının farklı olmasıdır. Deneyler 30, 60, 90 dakika sürede ve yoğunlaşma tankındaki sıcaklıklar -25, -15 °C, difüzyon yoluyla ve buhar devir daim pompası çalıştırmak suretiyle elde edilen parametreler Çizelge 3.5’de gösterilmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında ise salamura tuzu ile oluşturulan atıksuların (tuzlu su) deney öncesi ve sonrası elektrik iletkenlikleri ölçülerek iyon değişimleri belirlenmiş olup yeni bir tasarım olan deney sisteminin tuzlu suların arıtılmasında kullanılıp kullanılmayacağı belirlenmiştir.

Çizelge 3.5 Deney parametreleri

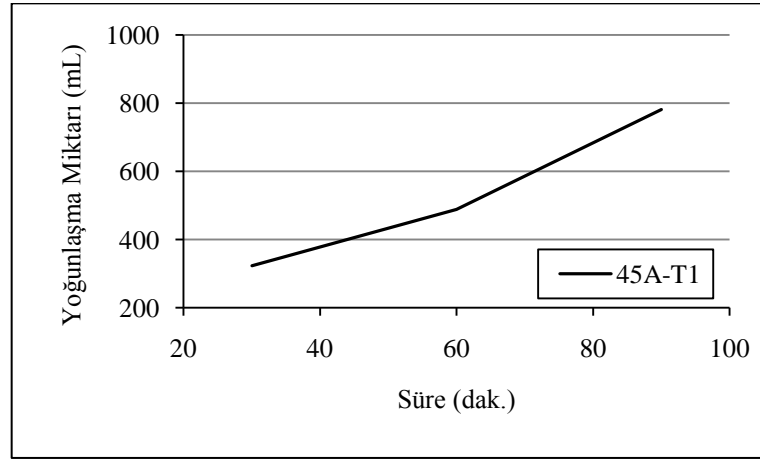
Deney No	Deney Süresi (dak.)	İlk Su Yüksekliği (cm)	Son Su Yüksekliği (cm)	A Tankı Sıcaklığı		Ti - To Geçen Süre (dak.)	B Tankı Sıcaklığı (°C)	Vakummetre		Elde Edilen Su	
				Ti (°C)	To (°C)			bar	mmHg	Buhar Döngüsü (mL)	Buhar Döngüsü (mL)
45A _{30-T2}	30	38.75	38.45	42	45	5	-25	-0,79	-610	283	252
45A _{30-T1}	30	38.45	38.20	39	45	10	-15	-0,79	-610	323	301
45A _{60-T2}	60	39.50	39.05	22	45	40	-25	-0,80	-610	595	576
45A _{60-T1}	60	37.90	37.50	41	45	7	-15	-0,80	-605	489	435
45A _{90-T2}	90	39.10	38.40	23	45	39	-25	-0,80	-610	859	792
45A _{90-T1}	90	38,40	37,75	41	45	7	-15	-0,80	-605	781	716
50B _{30-T1}	30	39.25	39.00	46	50	7	-15	-0,72	-575	385	391
50B _{30-T2}	30	38.50	38.30	45	50	10	-25	-0,77	-585	390	354
50B _{60-T1}	60	38.90	38.50	48	50	5	-15	-0,76	-580	444	469
50B _{60-T2}	60	38.20	37.80	22	50	43	-25	-0,74	-585	446	510
50B _{90-T1}	90	39,40	38,75	22	50	46	-15	-0,74	-580	623	595
50B _{90-T2}	90	38,75	38,20	46	50	7	-25	-0,76	-585	679	603
55C _{30-T1}	30	39.90	39.55	48	55	15	-15	-0,75	-575	447	465
55C _{30-T2}	30	39.50	39.10	21	55	54	-25	-0,73	-580	491	478
55C _{60-T2}	60	37.80	37.20	48	55	12	-25	-0,75	-570	583	633
55C _{60-T1}	60	37.80	37.40	21	55	55	-15	-0,75	-570	606	615
55C _{90-T2}	90	39.40	38.60	22	55	54	-25	-0,73	-570	951	823
55C _{90-T1}	90	38.60	38.05	47	55	16	-15	-0,73	-570	725	736
60D _{30-T1}	30	37.90	37.60	46	60	25	-15	-0,67	-520	361	358
60D _{30-T2}	30	39.00	38.60	53	60	12	-25	-0,66	-520	371	342
60D _{60-T2}	60	37.80	37.30	39	60	36	-25	-0,66	-520	735	682
60D _{60-T1}	60	39.70	39.05	22	60	66	-15	-0,67	-520	815	743
60D _{90-T2}	90	39.05	38.10	52	60	14	-25	-0,66	-525	1187	1096
60D _{90-T1}	90	38.10	37.20	55	60	10	-15	-0,66	-525	1204	1147

Sistemin iç basıncı -0,80 bar'a düşürüldükten sonra 45 °C de atıksuyun kaynadığı gözlenmiştir. Daha sonra buhar B haznesine difüzyon ile yani A haznesinde yüksek ısıya sahip olan buhar, B haznesinde ortamın -25 °C olması sebebiyle doğrudan B haznesine akarak ve difüzyonu hızlandırmak için ilave buhar devir daim pompası ile transfer edilerek her iki durumda da 30, 60 ve 90 dakika sürelerde sistemin B haznesinde yoğunlaşmak sureti ile arıtılan su miktarı ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda sistemin A haznesindeki buharı B haznesine daha hızlı taşımak için kullanılan buhar devir daim pompası, buharın taşınmasında ve yoğunlaştırılmasında çok etkili olmadığı görülmüştür. Deneyler de elde edilen sonuçlar neticesinde; buhar dögümlü ve buhar dögüsüz elde edilen miktarlar arasında en fazla $\pm\%10$ 'luk bir fark oluşmuştur. Bu nedenle çalışmada, buhar dögümlü olarak elde edilen miktarlar değerlendirmeye alınmamıştır. 45 °C iç buharlaşma ısısında, B tankının -25 °C'de yoğunlaşma ısısında ve basıncında ölçülen arıtılmış su verilerinin zamana göre değişimi Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Grafikselle ifade edildiği gibi sistemin A tankının buharlaşma yüzeyi sabit kalmak suretiyle arıtılan su miktarı, zamana bağlı lineer olarak artış göstermektedir.



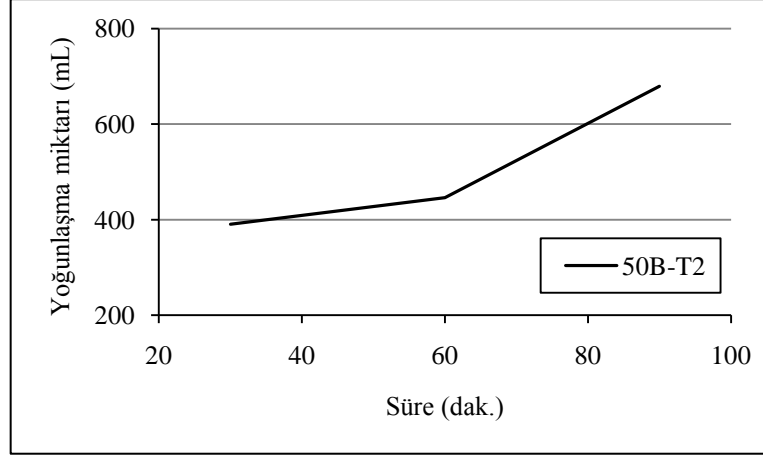
Şekil 3.2 45A-T2 ortamında yoğunlaşan su miktarı

45 °C iç buharlaşma ısısında, B tankının -15 °C yoğunlaşma ısısında ve basıncında ölçülen arıtılmış su verileri ise Şekil 3.3'de gösterilmiştir. Grafikselle ifade edildiği gibi sistemin A tankının buharlaşma yüzeyi sabit kalmak suretiyle B tankında arıtılan su miktarı, 45A-T2 numunesinin deneyinde olduğu gibi belirgin şekilde zamana göre lineer artış göstermese de, lineere yakın şekilde artış göstermektedir.

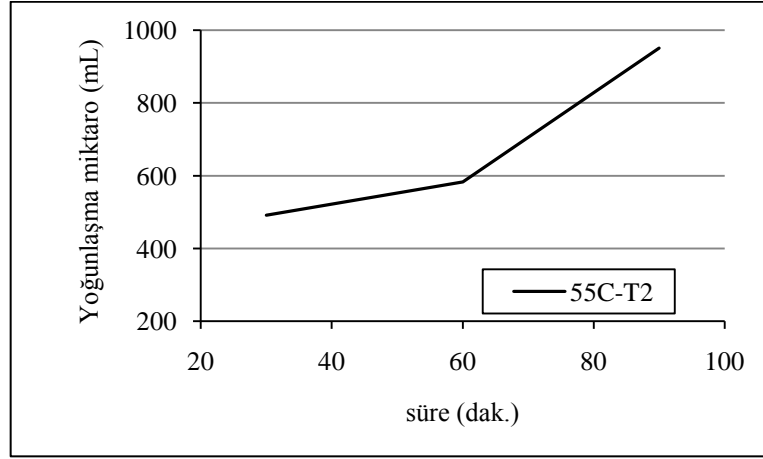


Şekil 3.3 45A-T₁ ortamında yoğunlaşan su miktarı

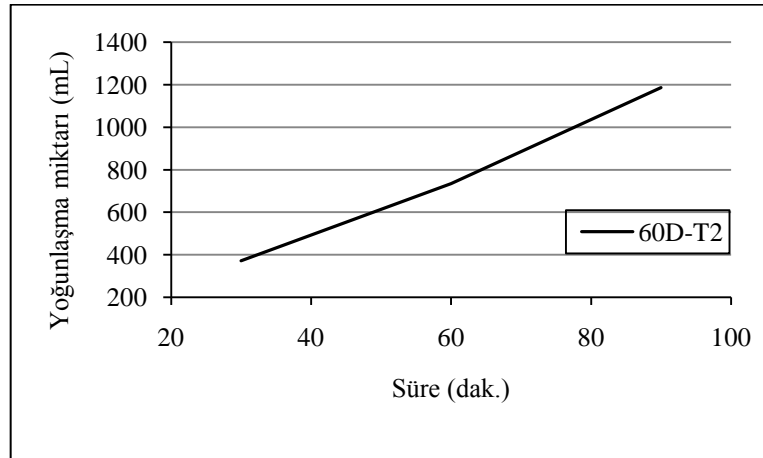
Daha sonra sistemin iç basıncı vakum pompası yardımı ile -0,76 bar'a düşürülmek suretiyle 50 °C'de, -0,73 bar'a düşürülmek suretiyle 55 °C'de ve -0,66 bar'a düşürülmek suretiyle 60 °C'de atıksular kaynatarak buharlaşmaya başlamışlardır. Buharlaşma başlangıcı, sistemin gözlem penceresinden gözlenerek kaynamaya başladığı an olarak karar verilmiştir. A haznesinde oluşan buhar B haznesine difüzyon yolu ve ilave buhar devir daim pompa gücü ile ayrı ayrı transfer edilmiş, her iki durumda bütün numuneler 30, 60 ve 90 dakika sürelerde deneye tabi tutulmuş ve B haznesinde artılan su miktarları ölçülerek Çizelge 3.5'de özetlenmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda deney yapılan bütün buharlaşma basıncı altında sistemin A haznesindeki buhar B haznesine daha hızlı taşımak için kullanılan buhar devir daim pompasının, buharın taşınmasında ve yoğunlaştırılmasında çok etkili olmadığı görülmüştür. Deneysel veriler 50 °C, 55 °C ve 60 °C iç buharlaşma basıncı ve B tankının -25 °C iç yoğunlaşma ısısında, B tankında ölçülen artılmış su verilerinin zamana göre değişimi sırasıyla Şekil 3.4, 3.5 ve 3.6'da gösterilmiştir. Grafikselleştirildiği gibi 50B-T₂, 55C-T₂ ve 60D-T₂ numunelerinde artılan su miktarı zamana bağlı lineer olarak artış göstermektedir. Bunun nedeni sistemin A tankının buharlaşma yüzeyinin zaman içinde sabit kalmasıdır. Buharlaşma verimi su külesinden bağımsız, buharlaşma yüzey alanının fonksiyonu olduğunun göstergesidir.



Şekil 3.4 50B-T₂ ortamında yoğunlaşan su miktarı

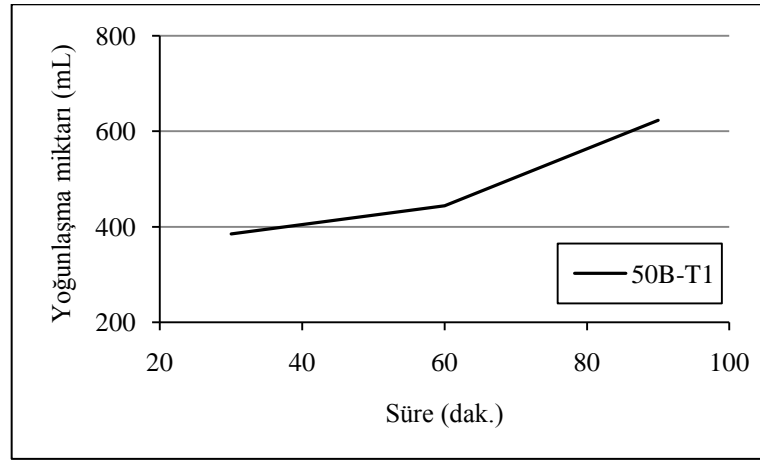


Şekil 3.5 55C-T₂ ortamında yoğunlaşan su miktarı

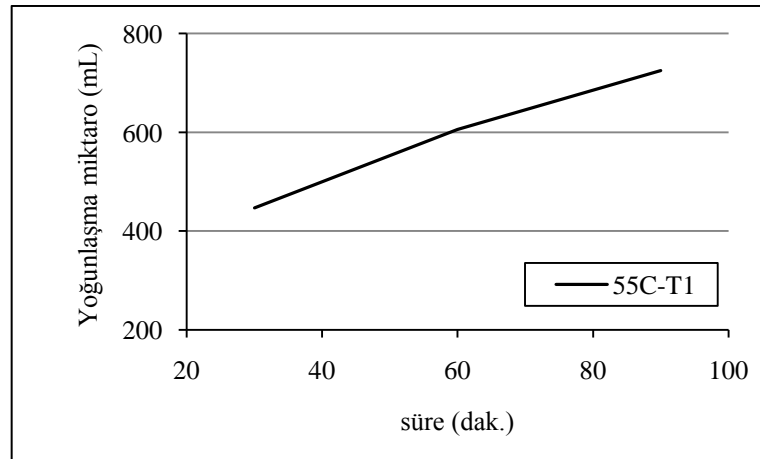


Şekil 3.6 60D-T₂ ortamında yoğunlaşan su miktarı

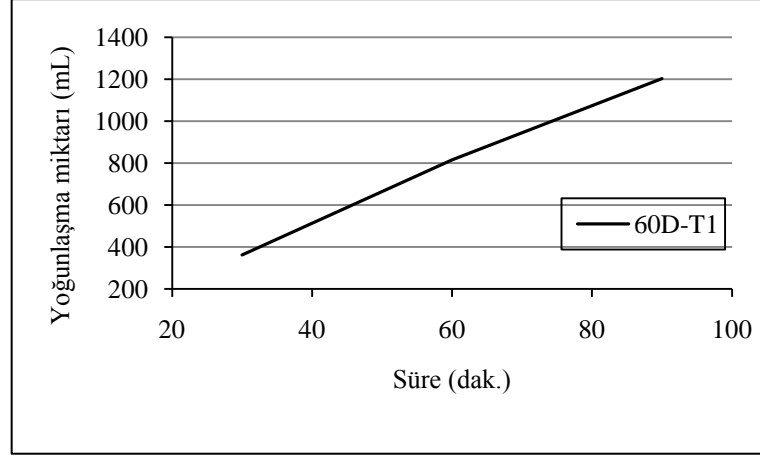
İç basıncı vakum pompası yardımı ile -0,76, -0,73 ve -0,66 bar'a düşürülmek suretiyle sırayla 50, 55 ve 60 °C'de B tankının -15 °C yoğunlaşma ısısında numuneler 30, 60 ve 90 dakika suretiyle deneye tabi tutulmuş ve B tankında ölçülen arıtılmış su verileri ise Şekil 3.7, 3.8 ve 3.9'da görselleştirilmiştir. Grafikselleştirildiği gibi 50B-T2, 55C-T2 ve 60D-T2 numunelerinde olduğu gibi, 50B-T1, 55C-T1 ve 60D-T1 numunelerinde arıtılan su miktarı zamana bağlı lineer olarak artış göstermektedir. B tankının -15 °C iç yoğunlaşma ısısında da buharlaşma veriminin su kütlesinden bağımsız, buharlaşma yüzey alanına bağlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.7 50B-T1 ortamında yoğunlaşan su miktarı



Şekil 3.8 55C-T1 ortamında yoğunlaşan su miktarı



Şekil 3.9 60D-T₁ ortamında yoğunlaşan su miktarı

Hidrolojik çevrim olayı teknikte genel olarak “Kütlenin Korunumu ve Enerjinin Korunumu” prensibine göre analiz edilmektedir. Arıtma sistemi olarak tasarımı yapılan bu sistemin çalışma prensibi de Hidrolojik Döngüdür. Bu nedenle arıtma sistemi deneysel çalışmalarından elde edilen veriler Enerjinin Korunumu prensibine göre değerlendirilerek sistemin Termodinamik Analizi yapılmıştır. Hesap yöntemi sadece bir deney setinde ayrıntılı olarak açıklanmış ve bütün deney setlerine uygulanmıştır. 45A, 50B, 55C ve 60D numuneleri için elde edilen sonuçlar sırasıyla Çizelge 3.6, 3.7, 3.8 ve 3.9 de özetlenmiştir.

Teorik yaklaşım elektrik ısıtıcı sisteme göre çözülmüştür. Elektrikli ısıtıcı rezistans A haznesindeki suyu 45 °C’ye ısıtacak, B haznesi -25 °C olacak şekilde sistem ayarlanmış ve çalıştırılmıştır. Deneye başlanmadan önce A tankına alınan numunenin ölçülen sıcaklığı 42 °C (numune sıcaklığı sisteme bağlı olan gün ısısı ile 42 °C’ye getirilmiştir), su yüksekliği 38,75 cm ve çapı 38 cm’dir. 2000 W gücündeki elektrikli ısıtıcı çalıştırılarak numune ısısı 5 dakikada 45 °C’e çıkartılmış ve enerji otomatik kesilmiştir. Daha sonra sistemin vakum pompası çalıştırılarak (610 mmHg) -0,79 bar basınca indirilmiştir ve A haznesindeki su numunesinin kaynamaya başladığı an gözlem penceresinden izlenmiştir. Deney sonunda mevcut su yüksekliği 38,45 cm, damıtılan su miktarı 283 g elde edilmiştir. Ölçülen bu parametreler ile termodinamik analizleri aşağıdaki gibi incelenmiştir.

$$T_i = 42 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_o = 45 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t = T_o - T_i = 45 - 42 = 3 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_1 = 38,75 \text{ cm}$$

$$h_2 = 38,45 \text{ cm}$$

$$P_{\text{ısıtıcı}} = 2000 \text{ W}$$

$$P_{\text{soğutucu}} = 900 \text{ W}$$

Toplam numune kütlesi;

$$m_1 = h * \pi * r^2 = 38,75 * \pi * 19^2 = 43946,954 \text{ cm}^3 = 43,947 \text{ kg}$$

Buharlaşan numune kütlesi;

$$m_b = (h_1 - h_2) * \pi * r^2 = (38,75 - 38,45) * \pi * 19^2 = 340,234 \text{ g}$$

Teorik olarak toplam kütlenin kaynama süresi; numunenin $273 \text{ }^\circ\text{C} + 44 \text{ }^\circ\text{C} = 317 \text{ K}$ 'de $C_p = 4179,850 \text{ (J/kgK)}$ bulunur.

$$m_1 * C_p * \Delta t = P_{\text{ısıtıcı}} * \Delta T$$

$$43.946 * 4179.85 * 3 = 2000 * \Delta T$$

$\Delta T = 275,53 \text{ s} = 4,59 \text{ dakikada}$ teorik olarak kaynaması gerekmektedir. Deneysel çalışmada ise kaynama derecesine 5 dakikada ulaştığı gözlenmiştir. Sonuçta; $(4,59/5) * 100 = \%91,84$ elde edilmektedir. Yaklaşık $\%10$ 'luk kısmı kayıpları oluşturmaktadır.

$45 \text{ }^\circ\text{C}$ için buharlaşan su kütlesine; $45 \text{ }^\circ\text{C}$ için $h_{fg} = 2394,8 * 10^3 \text{ J/kg}$ olarak belirlenir.

$$h_{fg} * \dot{m} = P_{\text{ısıtıcı}} \quad 2394,8 * 10^3 * \dot{m} = 2000 * 10^3 \quad \dot{m} = 0,835 \text{ g/s}$$

Bu veriler doğrultusunda 30 dak. sürede teorik buharlaşma miktarı $0,835*60*30=1503,26$ g olarak belirlenir, bu deney süresince deneysel buharlaşan ve ölçülen numune kütlesi 340,234 g'dır. Teorik ve deneysel buharlaşan numunenin miktarı orantılanırsa; $(340,234/1503)*100=\%22,63$ olarak hesaplanır.

Aynı şekilde teorik yoğunlaşma miktarıda hesaplanabilir ve yoğunlaşan numunenin su kütlesi;

$$h_{fg} * \dot{m} = P_{soğutucu} \quad 2394,8*10^3 * \dot{m} = 900*10^3 \quad \dot{m} = 0,376 \text{ g/s}$$

Bu veriler doğrultusunda 30 dak. sürede teorik yoğunlaşma miktarı $0.376*60*30=676,47$ g olarak belirlenir, bu deney süresince deneysel yoğunlaşan ve ölçülen numune kütlesi 283 g'dır. Teorik ve deneysel yoğunlaşan numunenin miktarı orantılanırsa; $(283/676,46)*100=\%41,8$ olarak hesaplanır.

Çalışmada deneysel ölçümlerle elde edilen 340,234 g buharlaşan su kütlesinin, $\dot{m}=0,835$ g/s miktarının bilinmesiyle $340,234/0,835=407,40$ s'de teorik olarak buharlaşması gerekmektedir. Ancak bu miktar 1800 s'de deneysel olarak buharlaşmıştır. Bu çalışmada, toplam deney süresinin $(407,46/1800)*100=\%22,63$ bir kısmı verimli kullanıldığı ortaya çıkmıştır.

Aynı şekilde deneysel olarak bulunan 283 g yoğunlaşan su kütlesinin, $\dot{m}=0,376$ g/s miktarının bilinmesiyle $283/0,376=752,66$ s'de teorik olarak yoğunlaşması gerekmektedir. Ancak bu miktarın 1800 s'de deneysel olarak yoğunlaşmıştır. Çalışmada, toplam deney süresinin $(752,66/1800)*100=\%41,81$ bir kısmı verimli kullanıldığı ortaya çıkmıştır.

Çizelge 3.6 45 °C için enerji-verim değerleri

Deney No	45A _{90-T1}	45A _{90-T2}	45A _{60-T1}	45A _{60-T2}	45A _{30-T1}	45A _{30-T2}	
Deney Süresi (dak.)	90	90	60	60	30	30	
Ti (°C)	41	23	41	22	42	39	
To (°C)	45	45	45	45	45	45	
Δt (°C)	4	22	4	23	3	6	
h1 (cm)	38,40	39,10	37,90	39,50	38,75	38,45	
h2 (cm)	37,75	38,40	37,50	39,05	38,45	38,20	
m1 (kg)	43,550	44,344	42,983	44,798	43,947	43,607	
Pısıtıcı (W)	2000	2000	2000	2000	2000	2000	
Psoğutucu (W)	900	900	900	900	900	900	
Cp (J/kgK)	4179,800	4179,350	4179,800	4179,325	4179,850	4178,750	
ΔT (dak.)	6,07	33,98	5,99	35,88	4,59	9,11	
Ti-To Geçen Süre (dak.)	7	39	7	40	5	10	
Ti-To Verim (%)	86,68	87,12	85,55	89,71	91,85	91,11	
hfg (10 ³ J/kg)	2394,800	2394,800	2394,800	2394,800	2394,800	2394,800	
Buharlaşma ṁ (g/s)	0,835	0,835	0,835	0,835	0,835	0,835	
Yoğunlaşma ṁ (g/s)	0,376	0,376	0,376	0,376	0,376	0,376	
Buharlaşma	Teorik Miktar (g)	4509,77	4509,77	3006,51	3006,51	1503,26	1503,26
	Deneysel Miktar (g)	737,17	793,88	453,65	510,35	340,23	283,53
	Buharlaşma Verimi (%)	16,35	17,60	15,09	16,97	22,63	18,86
	Teorik Süresi (dak.)	14,71	15,84	9,05	10,18	6,79	5,66
	Süre Verimi (%)	16,35	17,60	15,09	16,97	22,63	18,86
Yoğunlaşma	Teorik Miktar (g)	2029,40	2029,40	1352,93	1352,93	676,47	676,47
	Deneysel Miktar (g)	781,0	859,0	489,0	595,0	283,0	323,0
	Yoğunlaşma Verimi (%)	38,48	42,33	36,14	43,98	41,84	47,75
	Teorik Süresi (dak.)	34,64	38,10	21,69	26,39	12,55	14,32
	Süre Verimi (%)	38,48	42,33	36,14	43,98	41,84	47,75

Çizelge 3.7 50 °C için enerji-verim değerleri

Deney No	50B _{90-T2}	50B _{90-T1}	50B _{60-T2}	50B _{60-T1}	50B _{30-T2}	50B _{30-T1}	
Deney Süresi (dak.)	90	90	60	60	30	30	
Ti (°C)	46	22	22	48	45	46	
To (°C)	50	50	50	50	50	50	
Δt (°C)	4	28	28	2	5	4	
h1 (cm)	38,75	39,40	38,20	38,90	38,50	39,25	
h2 (cm)	38,20	38,75	37,80	38,50	38,30	39,00	
m1 (kg)	43,947	44,684	43,323	44,117	43,663	44,514	
Pısıtıcı (W)	2000	2000	2000	2000	2000	2000	
Psoğutucu (W)	900	900	900	900	900	900	
Cp (J/kgK)	4180,400	4179,450	4179,450	4180,800	4180,200	4180,400	
ΔT (dak.)	6,12	43,58	42,25	3,07	7,61	6,20	
Ti-To Geçen Süre (dak.)	7	46	43	5	10	7	
Ti-To Verim (%)	87,48	94,73	98,25	61,48	76,05	88,61	
hfg (10 ³ J/kg)	2382,700	2382,700	2382,700	2382,700	2382,700	2382,700	
Buharlaşma ṁ (g/s)	0,839	0,839	0,839	0,839	0,839	0,839	
Yoğunlaşma ṁ (g/s)	0,378	0,378	0,378	0,378	0,378	0,378	
Buharlaşma	Teorik Miktar (g)	4532,67	4532,67	3021,78	3021,78	1510,89	1510,89
	DeneySEL Miktar (g)	623,76	737,17	453,65	453,65	226,82	283,53
	Buharlaşma Verimi (%)	13,76	16,26	15,01	15,01	15,01	18,77
	Teorik Süresi (dak.)	12,39	14,64	9,01	9,01	4,50	5,63
	Süre Verimi (%)	13,76	16,26	15,01	15,01	15,01	18,77
Yoğunlaşma	Teorik Miktar (g)	2039,70	2039,70	1359,80	1359,80	679,90	679,90
	DeneySEL Miktar (g)	679,0	623,0	446,0	444,0	390,0	385,0
	Yoğunlaşma Verimi (%)	33,29	30,54	32,80	32,65	57,36	56,63
	Teorik Süresi (dak.)	29,96	27,49	19,68	19,59	17,21	16,99
	Süre Verimi (%)	33,29	30,54	32,80	32,65	57,36	56,63

Çizelge 3.8 55 °C için enerji-verim değerleri

Deney No	55C _{90-T1}	55C _{90-T2}	55C _{60-T1}	55C _{60-T2}	55C _{30-T2}	55C _{30-T1}	
Deney Süresi (dak.)	90	90	60	60	30	30	
Ti (°C)	47	22	21	48	21	48	
To (°C)	55	55	55	55	55	55	
Δt (°C)	8	33	34	7	34	7	
h1 (cm)	38,60	39,40	37,80	37,80	39,50	39,90	
h2 (cm)	38,05	38,60	37,40	37,20	39,10	39,55	
m1 (kg)	43,777	44,684	42,870	42,870	44,798	45,251	
Pısıtıcı (W)	2000	2000	2000	2000	2000	2000	
Psoğutucu (W)	900	900	900	900	900	900	
Cp (J/kgK)	4181,600	4179,575	4179,550	4180,800	4179,550	4181,800	
ΔT (dak.)	12,20	51,36	50,77	10,46	53,05	11,04	
Ti-To Geçen Süre (dak.)	16	54	55	12	54	15	
Ti-To Verim (%)	76,27	95,11	92,30	87,13	98,24	73,59	
hfg (10 ³ J/kg)	2370,700	2370,700	2370,700	2370,700	2370,700	2370,700	
Buharlaşma ṁ (g/s)	0,844	0,844	0,844	0,844	0,844	0,844	
Yoğunlaşma ṁ (g/s)	0,380	0,380	0,380	0,380	0,380	0,380	
Buharlaşma	Teorik Miktar (g)	4555,62	4555,62	3037,08	3037,08	1518,54	1518,54
	Deneysel Miktar (g)	623,76	907,29	453,65	680,47	453,65	396,94
	Buharlaşma Verimi (%)	13,69	19,92	14,94	22,41	29,87	26,14
	Teorik Süresi (dak.)	12,32	17,92	8,96	13,44	8,96	7,84
	Süre Verimi (%)	13,69	19,92	14,94	22,41	29,87	26,14
Yoğunlaşma	Teorik Miktar (g)	2050,03	2050,03	1366,68	1366,68	683,34	683,34
	Deneysel Miktar (g)	725,0	951,0	606,0	583,0	491,0	447,0
	Yoğunlaşma Verimi (%)	35,37	46,39	44,34	42,66	71,85	65,41
	Teorik Süresi (dak.)	31,83	41,75	26,60	25,66	21,56	19,62
	Süre Verimi (%)	35,37	46,39	44,34	42,66	71,85	65,41

Çizelge 3.9 60 °C için enerji-verim değerleri

Deney No	60D _{90-T1}	60D _{90-T2}	60D _{60-T1}	60D _{60-T2}	60D _{30-T2}	60D _{30-T1}	
Deney Süresi (dak.)	90	90	60	60	30	30	
Ti (°C)	54	52	22	39	53	46	
To (°C)	60	60	60	60	60	60	
Δt (°C)	6	8	38	21	7	14	
h1 (cm)	38,10	39,05	39,70	37,80	39,00	37,90	
h2 (cm)	37,20	38,10	39,05	37,30	38,60	37,60	
m1 (kg)	43,210	44,287	45,024	42,870	44,230	42,983	
Pısıtıcı (W)	2000	2000	2000	2000	2000	2000	
Psoğutucu (W)	900	900	900	900	900	900	
Cp (J/kgK)	4184,000	4183,600	4180,800	4181,000	4183,800	4182,400	
ΔT (dak.)	9,04	12,35	59,61	31,37	10,79	20,97	
Ti-To Geçen Süre (dak.)	10	14	66	36	12	25	
Ti-To Verim (%)	90,39	88,23	90,32	87,13	89,96	83,89	
hfg (10 ³ J/kg)	2358,500	2358,500	2358,500	2358,500	2358,500	2358,500	
Buharlaşma ṁ (g/s)	0,848	0,848	0,848	0,848	0,848	0,848	
Yoğunlaşma ṁ (g/s)	0,382	0,382	0,382	0,382	0,382	0,382	
Buharlaşma	Teorik Miktar (g)	4579,18	4579,18	3052,79	3052,79	1526,39	1526,39
	DeneySEL Miktar (g)	1020,70	1077,41	737,17	567,06	453,65	340,23
	Buharlaşma Verimi (%)	22,29	23,53	24,15	18,58	29,72	22,29
	Teorik Süresi (dak.)	20,06	21,18	14,49	11,15	8,92	6,69
	Süre Verimi (%)	22,29	23,53	24,15	18,58	29,72	22,29
Yoğunlaşma	Teorik Miktar (g)	2060,63	2060,63	1373,75	1373,75	686,88	686,88
	DeneySEL Miktar (g)	1204,0	1187,0	815,0	735,0	371,0	361,0
	Yoğunlaşma Verimi (%)	58,43	57,60	59,33	53,50	54,01	52,56
	Teorik Süresi (dak.)	52,59	51,84	35,60	32,10	16,20	15,77
	Süre Verimi (%)	58,43	57,60	59,33	53,50	54,01	52,56

3.2.3.1 İletkenlik ve pH deney sonuçları

Çalışmanın ikinci aşamasında tuzlu sularda kirlilik parametresinin bir göstergesi olan elektrik iletkenliği değerlerine bakılmıştır. Elektrik iletkenlik değerleri deney öncesi ve deney sonrası olmak üzere şebeke musluk suyu “S_M” ve deney için musluk suyundan sofralık tuz ile ağırlık esasına göre % 1, 2, 3, 4, 5, 6 ve 7 oranlarında oluşturulan atık tuzlu su “S_T” üzerinde ölçülmüştür. Deneyler şebeke musluk suyu ve tuzlu suyun her bir yüzdelik oranlarında 30 ve 60 dakikalık sürelerde yapılmıştır. Bu deneyde de sistemin verimini ölçmek için birinci aşamada uygulanan deney parametrelerine eşdeğer parametreler kullanılmıştır.

Deney düzeneğinin yine buharlaşma veriminin ölçümünde olduğu gibi şebeke musluk suyu “S_M” ve deney için musluk suyundan % 1, 2, 3, 4, 5, 6 ve 7 oranlarında oluşturulan atık tuzlu su “S_T” C tankında iken elektrik iletkenlikleri ve diğer parametreler ölçüldükten sonra A haznesine alınmıştır. Vakum pompası çalıştırılarak sistemin iç basıncı -0.76 bar’a düşürülerek 50 °C’de A tankına alınan her bir atık su olarak isimlendirilen numunelerin kaynaması sağlanmış ve vakum pompası kapatılmıştır. Deneyler sırasında hava kapalı olduğu için güneş enerjisi kullanılamamış ve A tankında bulunan atık suyun 50 °C’ye getirilmesinde elektrikli ısıtıcı kullanılmıştır. Aynı anda B tankının ısı da soğutma panelleri yardımı ile -15 °C’ye düşürülmüş ve deney ortamı hazırlanmıştır. Daha sonra her bir numune 30 ve 60 dakikalık sürelerde deneye tabi tutularak buharlaştırılan ve sistemin B haznesinde yoğunlaştırılan suyun elektrik iletkenlikleri ile diğer parametreler ölçülmüştür. Elde edilen veriler Çizelge 3.10’da özetlenmiştir.

Çizelge 3.10 İletkenlik ve pH sonuçları

Numuneler	30 Dakikalık Deney				60 Dakikalık Deney				
	°C	pH	İletkenlik		°C	pH	İletkenlik		
			µS/cm	mS/cm			µS/cm	mS/cm	
Çeşme Suyu S _M	Deney Öncesi	16,7	8,23	309	--	16,7	8,23	309	--
	Deney Sonrası	16,7	8,12	325	--	17	8,17	311	--
	Aritılmış	16,7	8,08	122	--	17	8,42	79,3	--
	Motordan Aritılmış	--	--	--	--	17	7,93	33,8	--
Tuzlu Su % 7 S _T	Deney Öncesi	16,8	7,71	--	80,5	16,8	7,71	--	80,5
	Deney Sonrası	17,2	7,73	--	83,7	16,9	8	--	84
	Aritılmış	17,2	8,16	309	--	17	7,92	291	--
	Motordan Aritılmış	--	--	--	--	17,5	8,14	64,9	--

Çizelge 3.10 de görüldüğü gibi musluk suyu “S_M” ve tuzlu su “S_T” olmak üzere farklı özelliklere sahip iki numune üzerinde deneyler yapılmıştır. Birinci aşamada musluk suyu ile numuneler oluşturulmuş ve deney öncesi elektrik iletkenliği ölçülmüştür. Daha sonra 30 ve 60 dakika süre ile deneye tabi tutulmuş ve deney sonunda arıtılan suların elektrik iletkenlikleri ölçülerek çok fazla bir değişimin olmadığı gözlenmiştir. 30 ve 60 dakika sürelerde elde edilen verilere göre deney süresinin elektrik iletkenliğinin giderilmesinde hiçbir etkisinin olmadığı gözlenmiştir. Ayrıca deney verileri doğrultusunda, deney öncesi duruma nazaran deney sonrası elektrik iletkenliği % 4

civarında artış göstermiştir. Ancak sistemin dizayn aşamasında her ne kadar paslanmaz malzeme kullanılmasına özen gösterilse de, kaynak ve ekleme parçaları olarak kullanılan malzemelerin bir kısmında sudan dolayı pas oluşmaktadır. Bu nedenle sistemde oluşan pasın bir kısmının arıtılmış suya karışmasının, elektrik iletkenliğinin artmasına sebep olduğu kanaati oluşmaktadır.

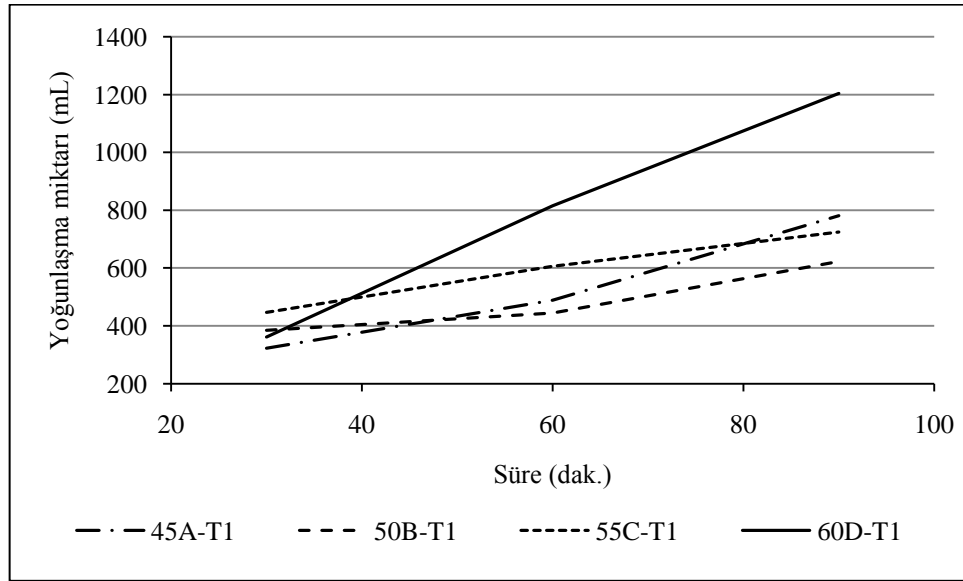
İkinci aşamada yapılan ve musluk suyu üzerine %7 oranına kadar salamura tuzu ilave edilerek numunelerde elektrik iletkenliğinin ölçülmesindeki amaç; sistemin sudaki tuzluluk oranını azaltıp azaltmadığının gözlenmesidir. Çünkü elektrik iletkenliği değerleri tuzluluk miktarının bir ifadesidir. Çalışmada deney öncesi oluşturulan tuzlu su numunelerinin elektrik iletkenliği %7 tuzluluk oranında en yüksek değer 80,5 mS/cm ölçülmüştür. Yine numune takımı üzerinde 30 ve 60 dakika süre ile deneyler yapılarak elde edilen yoğunlaştırılmış (arıtılmış) su numunelerinin elektrik iletkenlikleri ölçülmüş ve numunelerin deney öncesi, arıtılmış numune iletkenlik değerine oranlanarak elde edilen 30 dakikalık deneyde %99,61, 60 dakikalık deneyde %99,63 ve yine 60 dakikalık deney süresinde vakum motorunun bağlı bulunduğu borudan alınan numunede ise %99,92 oranında elektrik iletkenliklerinin giderildiği görülmüştür.

BÖLÜM IV

BULGULAR VE TARTIŞMA

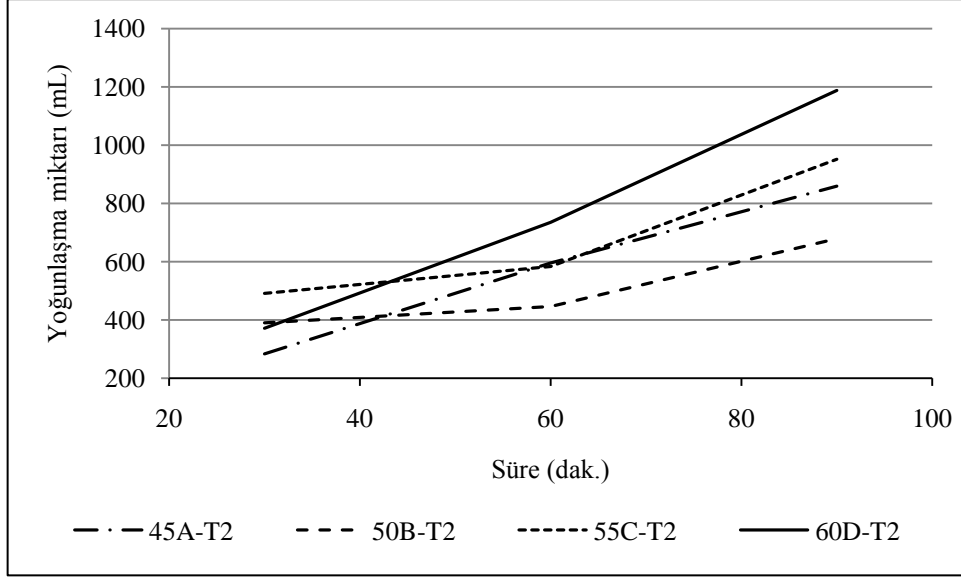
Bu bölümde, deneysel çalışmalardan elde edilen verilerin irdelenmesi, yatırım ve işletme maliyet analizleri ve uygulamadaki diğer yöntemlerle karşılaştırılması yapılmıştır.

Deneysel çalışma iki aşamada yapılmıştır. Birinci aşamada sistemin atıksuyu arıtma verimi ve tuzlu suyun arıtılabilirliği belirlenmiştir. Deneysel çalışmada gerçekleştirildiği B tankının farklı ısılarına (-15 ve -25 °C'lerde) göre arıtma miktarındaki değişimi gözlenmiştir. Yoğunlaştırma tankı ortam ısısının -15 °C'de sabit kaldığında, A, B, C ve D her bir deney setinde ve eşit şartlarda elde edilen veriler Şekil 4.1'de özetlenmiş ve her bir deney setinin deney süresince arıtım miktarı yaklaşık lineer olarak arttığı gözlenmiştir.



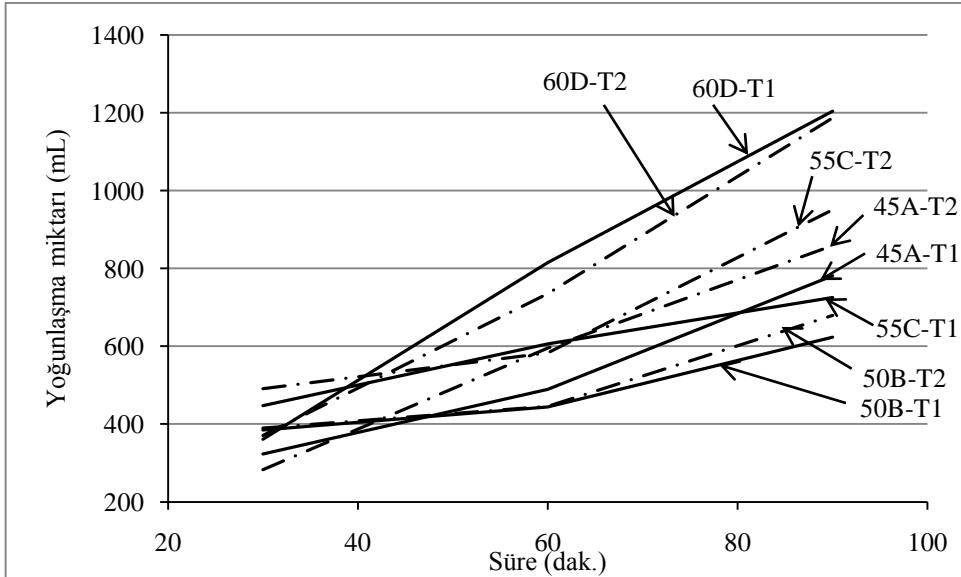
Şekil 4.1 B tankı -15 °C için yoğunlaşan su miktarları

Yoğunlaştırma tankı ortam ısısının -25 °C'de ve ortam şartlarının sabit kaldığı durumda da her bir set için deneyler tekrarlanmış ve elde edilen veriler zamana bağlı lineer artış göstererek, -15 °C'de elde edilen deney sonuçlarına benzer sonuçlar elde edilmiş ve Şekil 4.2'de özetlenmiştir.



Şekil 4.2 B tankı -25 °C için yoğunlaşan su miktarları

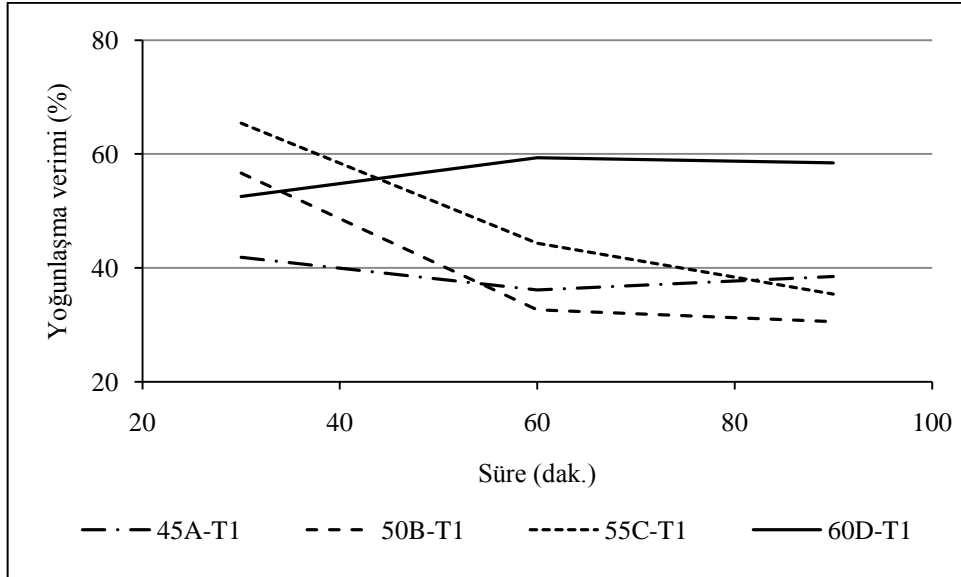
Arıtılmış su miktarının lineer olarak artış göstermesi, her bir deneyin aynı ortam şartlarında yapılması, buharlaştırma yüzey alanının sabit kalması, her zaman diliminde buharlaşmanın eşit miktarda olmasına neden olmuştur. Yoğunlaşma tankının ısısına göre arıtma miktarlarının değişimi Şekil 4.3'te verilmiştir.



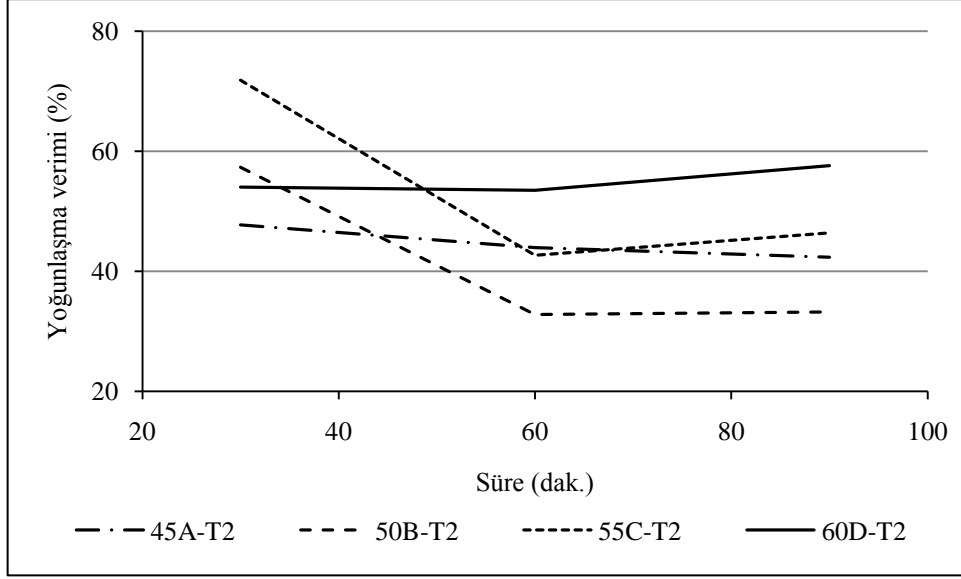
Şekil 4.3 Yoğunlaşma tankının ısısına göre arıtma miktarlarının değişimi

Şekil 4.3'te görüldüğü gibi yoğunlaştırma tankı ortam ısısının -15 veya -25 °C olması, aynı buharlaşma ısısında yapılan deneylerin yoğunlaşma miktarı üzerine belirgin bir etki göstermemiştir. Çalışmada dış deney ortamının ısısı (oda sıcaklığı) her deney seti için (ortalama 25 °C) sabit tutulmuştur. Deney sistemi üzerinde ise ısı izolasyonu yapılmamıştır. Bu şartlarda farklı iç ortam sıcaklığında yapılan deneylerde yoğunlaşma miktarı her bir deney seti için farklılaşmıştır. Özellikle 60 °C'de yapılan çalışmadan elde edilen sonuçların maksimum değerde çıkması fiziksel olarak sistemde beklenen olaydır. Çünkü, iç ortam ısısının fazla olması ve dış ortam ısısının düşük olması nedeniyle cidarlarda da yoğunlaşmanın başlaması, yoğunlaşma miktarının artmasına neden olmuştur.

Çalışmada teorik olarak elde edilen veri ile deneysel veriler karşılaştırılarak sistemin verimliliği belirlenmiştir. Verimliliğin belirlenmesinde deneysel elde edilen yoğunlaşma miktar ile teorik olarak elde edilen yoğunlaşma miktarlarının % verimleri oranlanarak elde edilen verimlilik değerleri -15 ve -25 °C ayrı hesaplanarak Şekil 4.4 ve 4.5'de verilmiştir.



Şekil 4.4 B tankının -15°C karşılık yüzde enerji kullanım verimi



Şekil 4.5 B tankının -25°C karşılık yüzde enerji kullanım verimi

Çalışmada yapılan deneylerde yoğunlaşma verimleri Şekil 4.4 ve 4.5’de de görüldüğü gibi birbirine benzer sonuçlar elde edilmiştir. Deney ortamı aynı olmasına rağmen 60 °C ki çalışmalarda verimliliğinin maksimum ve 45 °C deki çalışmalarda ise minimum olmasının nedeni; yüksek iç ısılarında sistemin tamamında yoğunlaşma gerçekleştiği için verimliliğin artmasına neden olmaktadır.

Yoğunlaşma verimleri, B tankının -15 °C de yapılan deneylerin toplam ortalaması %45.9 iken, -25 °C için yapılan deneylerin toplam ortalaması %48.6’lık bir değerde olması, soğutucu tank sıcaklığının verimlilik üzerinde önemli bir etki yapmadığının göstergesidir.

Çalışmanın ikinci aşamasında ise sentetik olarak oluşturulan tuzlu suyun sistem tarafından arıtılıp arıtılmayacağı belirlenmiştir. Tuzlu sularda kirliliğin ölçüm değeri olarak kullanılan elektriksel iletkenlik ölçüm parametresi kullanılmıştır. Ağırlıkça %0-7 oranında çeşme suyuna tuz katılmak suretiyle oluşturulan numuneler üzerinde deney öncesi ve deney sonrası yapılan elektrik iletkenliklerinin ölçüm değerlerine göre Çizelge 3,8’de de görüldüğü gibi sistemin tuzlu suları ortalama %99.72 oranında tuzdan arındırdığı bulunmuştur.

İletkenlik gideriminin ölçümünde Türk Standartları Enstitüsü 266 sayılı “Sular–İnsani Tüketim Amaçlı Sular” şartnamesi temel alınmıştır. Bu standartlara göre 20 °C’de iletkenlik için, işlem görmüş kaynak suları ve kaynak suları dışındaki insani tüketim amaçlı oluşuna göre en çok 650 $\mu\text{S}/\text{cm}$, kaynak suları dışındaki insani tüketim amaçlı içme ve kullanma suları için de en çok 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ geçmemesi şartı aranmaktadır [43].

Yapılan çalışmada, en yüksek %7 tuzluluk oranına sahip olan sentetik tuzlu suda deney sonrası %99.9 iletkenlik giderimi sağlanmıştır. Bu deneyde, deney öncesi 80.5 mS/cm olan numunenin iletkenliği, arıtım sonrası 64.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ’e düşmekte ve ilgili yönetmelik şartlarını sağladığı görülmektedir.

4.1 Maliyet Analizleri

Günümüzde atık sulardan içme ve kullanma suyu üretiminde kullanılan sistemler, yatırım ve işletme maliyetlerinin yüksek oluşu nedeniyle, yeterli uygulama alanı bulamamıştır. Ancak içme ve kullanma suyu çok az olan ülke ve bölgelerde kısmen kullanılmaktadır. Temiz su bilançosunda görülen büyük açıklara rağmen arıtılmış birim su maliyetinin yüksek oluşu, su tüketicisini farklı arayışlara itmektedir. Teknolojideki hızlı gelişmelerin, elde edilen birim su maliyetini düşürmesi ve verimin artmasını sağlamasına rağmen, hala kabul edilebilir değerlere erişilemediği için endüstride çözülmesi gereken önemli bir sorun olarak görülmektedir. Bu amaçla atık suları daha düşük birim maliyette arıtabilecek yatırım, işletme ve bakım maliyetleri mevcutlarına göre daha ekonomik, ihtiyaç duyduğu enerjiyi güneş enerjisinden sağlayan, yeni bir arıtma sistemi dizaynı yapılmış ve çalışma parametreleri deneysel olarak ölçülmüştür. Deneysel ölçümlerle sektörde kullanılabileceği desteklenen yeni sistemin yatırım ve işletme maliyetleri ayrı değerlendirilerek girdiler belirlenmiştir. Daha sonra sistemin fayda/masraf fonksiyonu, mevcut ürünlerin fayda/masraf fonksiyonları ile karşılaştırılmıştır.

4.2.1 Yatırım maliyeti

İlk yatırım maliyeti, tesis çalışmaya başlayana kadar yapılan bütün yatırım harcamalarını içerir. Yasal ödemeler (vergiler) dahil arazi bedeli, mühendislik, projelendirme ve müşavirlik hizmetleri, inşaat, ekipman ve montaj maliyetleri, inşaat

esnasında temin edilen paraya (kredi) ödenen faizler olarak ortaya konur. Yatırım maliyeti tahminlerini yaparken, değerlendirmede göz önünde bulundurulması gerekli asıl husus tüm alternatifleri gözden geçirmek ve gelecekteki maliyet projeksiyonunu iyi bir şekilde yapmaktır [3].

Çalışmalarda yatırım maliyetlerinin belirlenmesinde birçok değişken parametrenin, özellikle hacimsel büyüklüğün değişken oluşu, arıtılan su debisinin yatırım maliyetini doğrudan etkilemektedir. Bu çalışma için laboratuvar ortamına göre hazırlanan deney sisteminin dizaynında kullanılan birçok elemanlar, arıtma debisi daha büyük olan sistem içinde kullanılması zorunludur. Bu sebeple deneylerde kullanılan çalışma sisteminin yatırım maliyeti hesaplandıktan sonra enterpolasyonla arıtma debisi daha büyük olabilecek sistemin yatırım maliyeti hesaplanabilir. Bu değişim arıtılan suyun birim maliyeti de doğrudan etkileneceği için sistemin yatırım maliyeti ile ilişkilendirilerek büyük ölçekli bir sistem tasarımında gerekli tüm yatırım girdileri ayrı ayrı incelenmeli ve düşük maliyetli üretim için optimum dizayn aranmalıdır. Bu çalışmada kullanılan deney düzeneğinin yatırım maliyeti Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 Deney düzeneği yatırım maliyeti

Sistemde Kullanılacak Alet ve Cihazlar	Adet	Birim Maliyet (TL)	Toplam Maliyet (TL)
1. Vakum pompası	1	750	750
2. Aspiratör (Ø 5 cm)	1	50	50
3. Dijital Termometre	2	100	200
4. Güneş Enerjisi Panelleri (özel imalat)	1	2500	2500
5. Soğutucu panel pompası (1 fazlı devirdaim motoru)	1	500	500
6. Soğutucu paneli (özel imalat)	1	1500	1500
7. Su Tankı (0,3 m ³ lük özel imalat)	2	250	500
8. Manometre (± 3 atü kapasiteli 1 mm bar duyarlılıkta)	1	500	500
9. Şeffaf Fiber glas levha (2 cm kalınlıkta 10 m ²)	1	1000	1000
10. Şeffaf Fiber glas boru (Ø 5 cm 3 atü basınca dayanıklı 30 m)	1	1000	1000
11. Küresel vana	2	125	250
12. Çek valf li vana	2	125	250
13. Çelik profil taşıyıcı sistem	1	1000	1000
14. Deney düzeneğinin hazırlanması işçiliği	1	3500	3500
		KDV %18	Dahil
		TOPLAM	13500

Çizelge 4.1 de de görüldüğü gibi laboratuvar ölçeğinde yaklaşık 8.77 TL olarak elde edilen birim artırılmış su maliyetine düşen yatırım girdileri, sistem büyük ölçeğe taşındığı takdirde gerekli tüm girdiler ayrı incelenmeli ve düşük maliyetli üretim için optimum dizayn aranmalıdır.

4.2.2 İşletme maliyeti

İşletme maliyeti, tesis çalışmaya başladıktan sonra gerekli olan işletme ve amortisman giderlerini içermektedir. İşletme gideri olarak personel, kimyasal maddeler, yakıt, elektrik, nakliye masrafları, sigorta ve diğer masraflar gibi girdiler işletme maliyetini oluşturmaktadır. Sistemin amortisman gideri ise yedek parça, bakım ve tamir giderleridir.

Çalışma sisteminin işletme maliyeti iki aşamada değerlendirilmiştir. Birinci aşamada laboratuvar ölçeğinde oluşan maliyet girdileri hesaplanmıştır. İkinci aşamada bu girdiler lineer enterpolasyonla büyütülerek zahiri ölçeğe taşınmıştır.

Birinci aşamada; laboratuvarda yapılan deneyler sonucu elde edilen numune miktarlarının aritmetik ortalaması alınarak, bir saatlik deneysel çalışma sonunda, sistemin A haznesinin 0.113 m² buharlaştırma yüzey alanına karşılık 590 g artırılmış su üretimi yapıldığı hesaplanmıştır. Deneysel çalışmaların yürütülmesinde hava kapalı olduğu zamanlarda sistemin A tankındaki atıksuyun ısıtılmasında güneş enerjisinden faydalanılamamıştır. Böyle zamanlarda elektrik enerjisi kullanılarak su kütlesi kaynama derecesine getirilmiştir. Sistemin işletme maliyetlerinin hesaplanmasında amortisman gideri gibi girdiler ihmal edilerek, sadece elektrik enerjisi girdileri dikkate alınmış olup toplam enerji giderleri Çizelge 4.2’de özetlenmiştir.

Çizelge 4.2 Bir saatlik deneysel çalışmanın enerji giderleri

Enerji Girdileri	Motor Gücü (W)	Deney Süresi (dak.)	Çalışma Süresi (dak.)	Enerji Gideri (W)
Elektrikli Rezistans	2000	60	60	2000
Vakum Pompası (1 Hp)	736	60	10	123
Soğutucu Pompa	900	60	60	900
			Toplam =	3023

Çizelge 4.2'ye göre maksimum düzeyde elde edilen bir saatlik deneylerde 3023 Watt'lık elektrik enerjisi kullanılmaktadır. Güneş enerjisinin kullanılması durumunda ise toplam 1023 Watt elektrik enerjisi kullanılmaktadır. Kaynama ısısı sabit kaldığı durumda sistem iç basıncını düşürmek için vakum pompası çalıştırılması sonunda da 123 Watt'lık bir enerji giderinin olduğu belirlenmiştir.

Deneysel çalışmada yapılan gözlemler doğrultusunda B tankındaki soğutucu panelleri çalıştırılmadan da yoğunlaşmanın devam ettiği belirlenmiştir. Ancak bu durumda sistemin içinde buhar yığılmasının oluşmasından dolayı, yaklaşık 30 dakika sonra sistemin iç basıncı yükselerek kaynamanın durduğu gözlenmiştir. Bu durumda sistem içi basıncı, tekrar deneysel buharlaşma basıncına getirmek için vakum pompasının çalıştırılması gerekmektedir. sonuçta, elde edilen veriler doğrultusunda, sanayide kullanılan elektrik birim fiyatı dikkate alınarak, oluşturulan işletme maliyet analizleri Çizelge 4.3'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.3 Çalışma prensiplerine karşılık bir saatlik deney için işletme maliyeti

Çalışma Prensipleri	Enerji Gideri (kW)	Birim Fiyat (TL)	Toplam Maliyet (TL)
Elektrikli rezistans + Vakum pompası + Soğutucu pompa	3,023	0,165	0,499
Vakum pompası + Soğutucu pompa	1,023	0,165	0,169
Vakum pompası	0,123	0,165	0,020

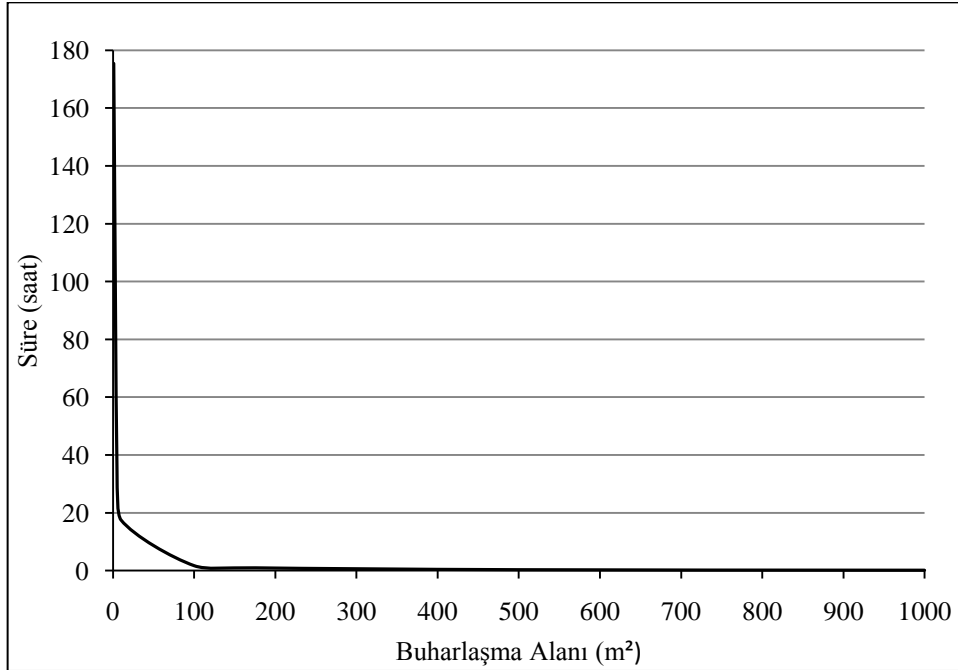
Çalışmanın ikinci kısmında; diğer çalışmaların işletme maliyetleri ile karşılaştırma yapılmıştır. Sistemin buharlaştırma yüzey alanına karşılık gelen, arıtılan su miktarı orantılanarak 1 m³/h üretimi ve enerji girdileri hesaplanmıştır. Hesaplar, atıksuyun ısıtılmasında güneş panelleri kullanılması ve soğutucu pompanın kullanılmaması durumuna göre değerlendirilmiştir. Enerji giderleri olarak sadece vakum pompasının harcadığı enerji dikkate alınmıştır. Hesaplar sırasında teorik olarak büyütülen ve deneysel çalışmaya karşılık gelen tek kademeli 15 kW'lık enerji, 580 m³/h hava boşaltım kapasiteli -700 mmHg indiren vakum pompası kullanılmıştır.

Hesapların tamamı, sistemin büyütülen yüzey alanından 1 m³/h arıtılmış su üretimi ve buna karşılık gelen enerji giderleri olarak yüzey alanının üstündeki hava boşluğundan

çekilen hava için gerekli enerji hesaplanarak işletme maliyetleri çıkartılmıştır. Sistem lineer enterpolasyonla büyütülerek, her örnek tasarım için hava boşluğu yüksekliği sabit alınmıştır. Büyütülen tesis için farklı yüzey alanlarına göre elde edilebilecek su üretim miktarları ve sistemlerde kullanılan enerji giderleri hesaplanarak Çizelge 4.4'de özetlenmiştir. Çizelge 4.4'e göre büyütülen sistemin buharlaşma yüzey alanları ile çalışma süreleri ilişkilendirilerek Şekil 4.5'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.4 Çeşitli yüzey alanlarına göre artırılmış su üretimi ve enerji girdileri

Buharlaşma Yüzey Alanı (m ²)	Hava Boşluğu (m)	Hava Boşluğu Hacmi (m ³)	1 Saatte Elde Edilen Su Miktarı (L)	Vakum Motoru				1 m ³ Su Üretimi İçin Çalışma Süresi (h)
				Boşaltım Kapasitesi (m ³ /h)	Motor Gücü (kW)	Çalışma Süresi (h)	Enerji Gideri (kW)	
1	0,5	0,5	5,22	580	15	0,001	0,01	191,57
5	0,5	2,5	26,1	580	15	0,004	0,06	38,31
10	0,5	5	52,2	580	15	0,009	0,13	19,16
100	0,5	50	522	580	15	0,086	1,29	1,92
191,6	0,5	95,8	1000	580	15	0,151	2,48	1,00
500	0,5	250	2610	580	15	0,431	6,47	0,38
1000	0,5	500	5220	580	15	0,862	12,93	0,19



Şekil 4.5 1 m³/h üretimi için buharlaşma yüzey alanları ile çalışma süreleri

Çizelge 4.4'den 1 saatlik çalışma süresi ile 1 m³ arıtılmış su eldesi optimum dizayn kabul edilmek suretiyle 191,6 m² lik buharlaştırma yüzey alanına ihtiyaç duyulduğu görülmektedir. Optimum dizayn olarak kabul edilen sistem için ise gerekli enerji 2.48 kW olarak hesaplanmıştır. Bu tesis için arıtılan su, sanayide kullanılan 0,1651 TL/kW'lik elektrik birim fiyatı ile dönüşüm yapıldığında 1m³ arıtılmış suyun işletme maliyetinin 0.409 TL'ye karşılık geldiği hesaplanmıştır.

4.2.3 Maliyet analizlerinin karşılaştırılması

Maliyetlerin karşılaştırılmasında desalinasyon sistemlerinin 1 m³/h arıtılmış su üretimi için hesaplanan değerleri Çizelge 4.5'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.5 Desalinasyon proseslerinin maliyetleri

Desalinizasyon Prosesleri	Ürün Maliyeti 1m ³ /h	Karşılaştırma Farkı (%)
Ters Ozmos (RO)	0.40 ≈ 0.92 \$/m ³	+ % 35,25
Membran bio reaktör (MBR)	0.60 ≈ 2.24 €/m ³	+ % 69,52
Elektrodiyaliz (ED)	1.05 \$/m ³	+ % 75,33
Çok Aşamalı Distilasyon (MSF)	0.52 ≈ 1.25 \$/m ³	+ % 50,19
Çok Etketli Distilasyon (MED)	0.52 ≈ 0.85 \$/m ³	+ % 50,19
Buhar Sıkıştırırmalı (VC)	0.87 ≈ 0.95 \$/m ³	+ % 70,22
DeneySEL Çalışma	0,259 \$/m ³	± % 0,00
1 \$ = 1.58 TL, 1 € = 2.24 TL		

Çizelge 4.5 de verilen maliyet değerleri, literatürdeki çalışmaların minimum ve maksimum işletme maliyet girdilerini belirtmektedir. Bu çalışmanın 1m³/h lik işletme maliyeti de dolar bazında 0,259 \$/m³ olarak hesaplanmıştır. Yeni çalışmanın işletme giderleri, diğer çalışmalarının minimum işletme giderleri ile karşılaştırılarak elde edilen maliyet farkı Çizelge 4.5 de verilmiştir.

BÖLÜM V

SONUÇLAR

Yeryüzünde kullanılabilir su bilançosundaki açığı kapatabilmenin en etkin yolu, deniz suyunu arıtarak içme ve kullanma suyu haline dönüştürmektir. Bu alanda uzun süreden beri yapılan çalışmalarla birçok teknikler geliştirilerek kullanım alanına sunulmuş olmasına rağmen, kullanılan teknikler hala yüksek maliyetler içerdiğinden dolayı zorunluluk haricinde fazla tercih edilmemektedir. Bu amaçla özellikle deniz suyunun arıtılmasında kullanılabilecek daha ekonomik yatırım ve işletme maliyeti olan arıtma sistemi dizaynı yapılarak laboratuvar ölçeğinde tuzlu sudan içme ve kullanma suyu eldesi çalışmaları yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada aşağıda belirtilen sonuçlar elde edilmiştir.

Tasarımı yapılan yeni sistem, buharlaşma ve yoğuşma prensibi ile çalışmakta olup atmosfere kapalı şekilde tasarımı yapılmıştır. Vakum pompası ile iç basınç düşürülerek (100 °C nin altında) daha düşük sıcaklıklarda atık suyun buharlaştırılması sağlanabilmiştir.

Deneysel çalışmalar 45 ile 60 °C arasında iki aşamada yürütülmüş, birinci aşamada sistemin arıtma verimi belirlenmiştir. 0.113 m²'lik atıksu buharlaştırma yüzey alanından ortalama 0.65 L/h temizsu elde edilmiş, lineer enterpolasyonla 1 m²'lik yüzey alandan 5.75 L/h verim elde edilebileceği belirlenmiştir. İkinci aşamada tuzlu suyun arıtılması çalışmaları yapılmıştır. %1 ile %7 arasında değişen tuzlu su çözeltisinin atıksu tankında ve temizsu tankındaki elektriksel iletkenlik değerleri ölçülmek suretiyle arıtım verimi belirlenmiştir. Atık tuzlu suyun her orandaki çözeltisinde yaklaşık %99,72 oranında tuzdan arındırılabilirdiği gözlenmiştir.

Düşük buharlaşma basıncı altında atıksuyun buharlaştırılarak yoğunlaşmasının sağlanması ile deniz suyundan içme ve kullanma suyu eldesinde, teknolojiye kullanımda olan diğer sistemlere göre; mühendislik girdileri, yatırım, işletme ve bakım maliyetleri daha düşük, kısmen her bölge ve mekanda kolaylıkla uygulanabilecek yeni bir alternatif yöntem geliştirilmiştir.

Sistemin enerji girdisini azaltmak için 45 ile 60 °C arasında düşük sıcaklıklarda atık suyun kaynatılarak buharlaştırılması sağlanmış, atıksuyun kaynamasını sağlamak içinde enerji, güneş enerjisinden sağlanması planlanarak sistem daha ekonomik hale getirilmiştir.

Laboratuar ortamında sistemden elde edilen 0.65 L/h üretim için elektrik enerjisi kullanılarak 3,023 kW enerjiye ihtiyaç duyulmakta olup 0.315 \$ işletme maliyetine karşılık geldiği belirlenmiştir. Ancak sistem enerjisini güneşten karşıladığı takdirde diğer enerji girdileri 1,023 kW olmakta ve işletme maliyeti 0.106 \$'a düştüğü tespit edilmiştir.

Laboratuar ölçeğinden elde edilen datalar doğrultusunda, sistem enerjisini güneşten karşılamak koşuluyla 1 m³/h arıtılmış suyun gerçekleşebilmesi için 191.6 m² atıksu yüzey alanına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu büyüklükteki sistemin işletme girdileri de enterpolasyonla 2.48 kW/h olarak belirlenmiş ve sistemin 1 m³/h'lik işletme giderlerinin 0.259 \$/m³ olduğu hesaplanmıştır. Genel bir yaklaşımla, teknolojiye kullanımda olan farklı desalinizasyon sistemleri ile mukayese edildiğinde ortalama %58,45 oranında daha düşük işletme maliyetine karşılık geldiği görülmüştür.

Sistemin çalışmasında yoğunlaştırma tankında bulunan soğutma panelleri ısısının -25 °C kadar düşürülmesi sistem verimine belirgin bir katkı sağlamadığı gözlenmiştir. Bu nedenle daha yüksek ısılarda tutularak enerji tasarrufu sağlanabileceği sonucuna varılmıştır.

Çalışmada kullanılan sistemde, atıksu haznesinde oluşan buhar, yoğunlaşma haznesine borular ile taşınmaktadır. Borularda oluşan izolasyon ve sirkülasyon zorluğu arıtma verimini olumsuz şekilde etkilemektedir. Sistem yeniden tasarlandığı takdirde buharın borularla yoğunlaşma tankına taşınmasının önüne geçilmesi, arıtma verimini önemli miktarda etkileyebileceği kanaatine varılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Akın, M. ve Akın, G., Suyun önemi, Türkiye’de su potansiyeli, su havzaları ve su kirliliği, Ankara Üniversitesi Dil Ve Tarih – Coğrafya Fakültesi Dergisi, 47, 105-118, 2007.
- [2] Samsunlu, A., Atık Suların Arıtılması, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2006.
- [3] Samsunlu, A., Su Getirme ve Kanalizasyon Yapılarının Projelendirilmesi, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2005.
- [4] Yıldırım, A.K., Eysel atıksu arıtma tesislerinde debi-maliyet ilişkileri, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2006.
- [5] Doğan, M. ve Soylak, M., Su Kimyası, Erciyes Üniversitesi Yayınları, No 120, Kayseri, 2000.
- [6] T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, Kimya Teknolojisi – Su Arıtma, Mesleki Eğitim ve Öğretim Sistemlerinin Güçlendirilmesi Projesi, Ankara, 2008.
- [7] Çevre ve Orman Bakanlığının 20.03.2010 tarih ve 27527 sayılı Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği.
- [8] Öztürk, M., Atıksu arıtmada ızgaralar, <http://www.mozturk.net/?Type=1&Id=749>, 01.06.2010.
- [9] Uzman, H.Ö., Mağusa için en uygun biyolojik arıtma teknolojisinin seçimi ve tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, 2006.
- [10] Şengül, F., Fiziksel ve Kimyasal Arıtma Üniteleri, Birleşmiş Milletler Sınai Kalkınma Teşkilatı Yayını, Ankara, 1983.
- [11] Arık, P., Pamuklu tekstil endüstrisinde uygun atıksu arıtma teknolojisi seçimi, Arbiogaz Çevre Teknolojisi İnşaat San. ve Tic. A.Ş.
- [12] Azman, H.R., Eysel atıksuların arıtılmasında arıtma verimi – enerji ilişkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2005.
- [13] Sarı, İ., Kahramanmaraş (merkez) evsel ve endüstriyel atıksuların toplanıp uygun bir arıtma yöntemi seçilerek arıtılması, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2005.
- [14] Öztürk, İ., Anaerobik Biyoteknoloji, Su Vakfı Yayını, İstanbul, 1999.
- [15] Öztürk, İ., Timur, H. ve Koşkan, U., Atıksu Arıtma Esasları, T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, İstanbul, 2005.

- [16] Menemen Toprak ve Su Kaynakları Enstitüsü, İzmir, http://www.menementopraksu.gov.tr/v1/index.php?option=com_content&view=article&id=192&Itemid=227, 2009.
- [17] Abacı, G., İyon değiştirici reçineler, Su Ve evre Dergisi, 3, 2005.
- [18] Khne, G., Praxis der ionenaustauscher in der trinkwasseraufbereitung, Bayer, Leverkusen, 1973.
- [19] Deda, .N., Deniz suyundan tatlı su eldesinin Bursa'da uygulanabilirliğinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, U. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 1998.
- [20] Can, M., Etemoğlu, A.B., Avcı, A., Deniz suyundan tatlı su eldesinin teknik ve ekonomik analizi, Uludağ Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 7, Sayı 1, 2002.
- [21] Alkan, E., İyon değiştirici membranlar kullanılarak sudaki florür iyonunun uzaklaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2006.
- [22] engeloğlu, Y., Tor, A., Kr, E. ve Ersöz, M., Transport of hexavalent chromium through anion exchange membranes, Desalination, 239-246, 2003.
- [23] kotec evre Teknolojisi ve Kimya San. Ltd. şti., İstanbul, <http://www.okotek.com.tr/tr/uygulamaalani.php?id=1>, 2011
- [24] uha, D., Deniz suyu ve kuyu suyunun tuzdan arıtılması, Su Ve evre Dergisi, 18, 2008.
- [25] Arı, P.H., zgn, H., Erşahin, M.E. ve Koyuncu, İ., Membran sistemleri ile su arıtma maliyeti, Membran Teknolojileri ve Uygulamaları Sempozyumu Bildiriler Kitabı, İstanbul, 9 – 12 , 2009.
- [26] Güler, E., Yavuz, E., Solak, S., Sert, G., Arda, M., Yüksel, M., Yüksel, ., Gündoğdu, V. ve Kabay, N., Deniz suyundan kullanım suyu üretiminde ters ozmos yöntemi - doğal deniz suyu ortamında ters ozmos membranlarının performans karşılaştırması, Membran Teknolojileri ve Uygulamaları Sempozyumu Bildiriler Kitabı, İstanbul, 159 – 161 , 2009.
- [27] Babucu, F.O. ve ağlar, S., Avşa (Balıkesir) Belediyesine içme suyu temini amaçlı denizsuyundan ters ozmos yöntemi ile arıtma tesisi projelendirilmesi ve yapımı, Membran Teknolojileri ve Uygulamaları Sempozyumu Bildiriler Kitabı, İstanbul, 1 – 4 , 2009.
- [28] Koçak, İ., Ters osmoz sistemi ile sudan borun uzaklaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2007.

- [29] Turek M., Dydo, P. and Wiltowski, T., Electrodialysis as an alternative seawater desalination method, AICHE 2005 Annual Meeting, Cincinnati, OH, October 30, 2005.
- [30] Turek, M., Cost effective electrodialytic seawater desalination, *Desalination*, 371-376, 2002.
- [31] Torunoğlu, R.O., Orhon, D., Türkiye’de kurulabilecek tuz gideren membran teknolojisi sistemleri için bilimsel esaslı tasarıma dayalı maliyet analizlerinin yapılması, *İ.T.Ü. Dergisi*, 1, 97-110, 2010.
- [32] Awerbuch, L., Günümüzde desalinasyon uygulamalarına genel bakış, *Juturne Dergisi*, 2, 12-14, 2005.
- [33] Wade, N.M., Distillation plant development and cost update, *Desalination*, Brighton, 136, 3-12, 2001.
- [34] Blanco, J., Zarza, E., Alarcón, D., Malato, S. and León, J., Advanced multi-effect solar desalination technology: the PSA experience,
- [35] Turek, M., Seawater desalination and salt production in a hybrid membrane-thermal process, *Desalination*, 173–177, 2002.
- [36] Helal, A.M., El-Nashar, A.M., Al-Katheeri, E.S. and Al-Malek, S.A., Optimal desing of hybrid RO/MSF desalination plants part II: results and discussion, *Desalination*, 13-27, 2004.
- [37] Borsani, R. and Rebagliati S., Fundamentals costing of MSF desalination plants and comparison with other technologies, *Desalination*, 29-37, 2005.
- [38] Wittholz, M.K., O’Neill, B.K., Colby, C.B. and Lewis, D., Estimating the cost of desalination plants using a cost database, *Desalination*, 10-20, 2008.
- [39] Eren, H. ve Batur, B., Tuzdan arındırma (desalination) sistemleri ve bir güç santralinin tuzdan arındırma tesisinin incelenmesi, *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 100, 42-46, 2006.
- [40] Karakaya, N., Gönenç, İ.E., Alternatif Su Kaynakları, 2. Ulusal Su Mühendisliği Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, DSİ, İzmir, 2005.
- [41] Günerhan, H. ve Erkek, M., Isı Transferi, Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, Ders Notu Özet Bilgileri, İzmir, 2006.
- [42] Günerhan, H. ve Balta, M. T., Isı Transferi II, Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, Ders Notu Özet Bilgileri, İzmir, 2008.
- [43] TS-266, Sular – insani tüketim amaçlı sular, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2005.

EK-A
Suyun Bilinen Özgöl Isıları

Madde	Hal	Cp (J/kg·K)
	1 atm, 273 K	4217
	1 atm, 280 K	4198
	1 atm, 300 K	4179
Su	1 atm, 320 K	4180
	1 atm, 340 K	4188
	1 atm, 360 K	4203
	1 atm, 373 K	4218

EK-B
Doymuş Su – Sıcaklık Tablosu

Sıcaklık °C	Doyma Basıncı kPa	Özgül Hacim m ³ /kg		İç Enerji kJ/kg			Entalpi kJ/kg			Entalpi ki/(kg·K)		
		Doymuş sıvı uf	Doymuş buhar vg	Doymuş sıvı uf	Doymuş buhar ufg	Doymuş buhar ug	Doymuş sıvı hf	Doymuş buhar hfg	Doymuş buhar hg	Doymuş sıvı sf	Doymuş buhar sfg	Doymuş buhar sg
Tdoyma	P	uf	vg	uf	ufg	ug	hf	hfg	hg	sf	sfg	sg
0.01	0.6113	0.001000	206.14	0.0	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562	9.1562
5	0.8721	0.001000	147.12	20.97	2361.3	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	0.0761	8.9496	9.0257
10	1.2276	0.001000	106.38	42.00	2347.2	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	0.1510	8.7498	8.9008
15	1.7051	0.001001	77.93	62.99	2333.1	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	0.2245	8.5569	8.7814
20	2.339	0.001002	57.79	83.95	2319.0	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	0.2966	8.3706	8.6672
25	3.169	0.001003	43.36	104.88	2304.9	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	0.3674	8.1905	8.5580
30	4.246	0.001004	32.89	125.78	2290.8	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	0.4369	8.0164	8.4533
35	5.628	0.001006	25.22	146.67	2276.7	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	0.5053	7.8478	8.3531
40	7.384	0.001008	19.52	167.56	2262.6	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	0.5725	7.6845	8.2570
45	9.593	0.001010	15.26	188.44	2248.4	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	0.6387	7.5261	8.1648
50	12.349	0.001012	12.03	209.32	2234.2	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	0.7038	7.3725	8.0763
55	15.758	0.001015	9.568	230.21	2219.9	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	0.7679	7.2234	7.9913
60	19.940	0.001017	7.671	251.11	2205.5	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	0.8312	7.0784	7.9096
65	25.03	0.001020	6.197	272.02	2191.1	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	0.8935	6.9375	7.8310
70	31.19	0.001023	5.042	292.95	2176.6	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	0.9549	6.8004	7.7553
75	38.58	0.001026	4.131	313.90	2162.0	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	6.6669	7.6824
80	47.39	0.001029	3.407	334.86	2147.4	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	6.5369	7.6122
85	57.83	0.001033	2.828	355.84	2132.6	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	6.4102	7.5445
90	70.14	0.001036	2.361	376.85	2117.7	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	6.2866	7.4791
95	84.55	0.001040	1.982	397.88	2102.7	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	6.1659	7.4159

