

T.C.
MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜNEŞ HAVUZLARINDA GÜNEŞ ENERJİSİNİN TOPLAMA VE DEPOLAMA
KARAKTERİSTİKLERİNİN DENEYSEL VE TEORİK OLARAK
İNCELENMESİ

HÜSEYİN KURT

DOKTORA TEZİ

97569

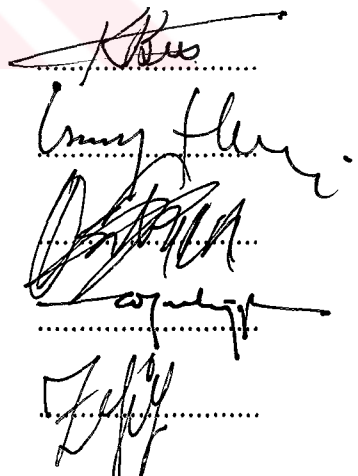
Danışman ve Koordinatör : Doç. Dr. A. Korhan BİNARK

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Osman F. GENÇELİ

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Osman ISIKAN

Jüri Üyesi : Doç. Dr. Cem PARMAKSIZOĞLU

Jüri Üyesi : Doç. Dr. M. Zafer GÜL


T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

İSTANBUL-2000

ÖNSÖZ

Son günlerde çok sık duymaya başladığımız enerji darboğazı, bütün dünya ülkelerinin karşı karşıya kaldığı en büyük sorunlardan birisidir. Petrol, doğalgaz, kömür gibi mevcut doğal enerji kaynaklarının sınırlı olması, insanoğlunu yeni enerji kaynakları arayışına itmiştir. Yeni veya yenilenebilir enerji kaynakları arasında alternatiflerine göre bir çok avantaja sahip olan güneş enerjisi her geçen gün popüler hale gelmiştir. Güneş enerjisinin iki temel karakteristiği olan düzensizlik ve düşük enerji yoğunluğu nedeniyle toplanması yanında, uzun süre depolanması zorunluluğunun olması, güneş enerjisinden faydalanmayı kısıtlayan en önemli problemlerdir. Bu konuda yapılan çalışmalar sonucunda, toplanması ve depolanması bakımından en uygun sistem, güneş havuzları gözükmektedir. Bu çalışmada da güneş enerjisinin tuz tabakalı güneş havuzlarında toplama ve depolama karakteristiği deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Yapılan bu çalışma ile, ilk defa yeni bir tuz (soda) çeşidi kullanılarak oluşturulan tuz yoğunluk gradyenli güneş havuzunda ısı depolanabileceği gösterilerek, literatüre bu konuda yeni sonuçlar kazandırılmıştır. Bu çalışmanın, ileride bu konuda yapılacak çalışmalara öncülük etmesini ve elde edilecek sonuçların enerji darboğazına bir nebze de olsa katkıda bulunmasını ümit etmekteyiz.

Yapmış olduğum bu çalışmada, beni yönlendirerek bugünlere gelmemde büyük emeği olan tez danışmanım Sayın Doç.Dr. A. Korhan BİNARK'a, tezimin yazım aşamasında bilgisayar konusunda yapmış olduğu yardımlar sayesinde bir çok problemin üstesinden gelmemde yardımlarını esirgemeyen Sayın Yrd. Doç. Dr. Bülent ÖZDALYAN'a ve Yrd.Doç. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK'a, yine tez çalışmam esnasında yabancı dil konusunda yapmış olduğu katkılardan dolayı Sayın Yrd. Doç. Dr. Cevdet GÖLOĞLU'na, ayrıca burada isimlerini tek tek zikredemediğim Karabük Teknik Eğitim Fakültesi ve Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi'ndeki değerli hocalarıma ve araştırma görevlisi arkadaşlarıma ve tez çalışmam süresince, özellikle deneysel çalışma sırasında bana katlanmak zorunda kalan aynı evi paylaştığımız Sayın Arş. Gör. Ender NALÇACIOĞLU'na ayrı ayrı teşekkür ederim.

Yine bugünlere gelmeme vesile olan başta anneme ve babama, öğretmenlerime ve hocalarıma maddi ve manevi katkılarından dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

YENİLİK SAYFASI

Bu çalışmada, tuz tabakalı güneş havuzlarının (TTGH) tuz yoğunluk gradyenlerinin oluşturulmasında bu güne kadar kullanılmamış olan soda (sodyum karbonat- Na_2CO_3) tuzunun, TTGH'larda ilk defa kullanılarak yoğunluk gradyeninin kararlılığı açısından uygun bir tuz olup olmadığı araştırılmış ve soda çözeltili havuzun ısı depolama karakteristiği deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda, 60x50x60 cm boyutlarında 1.5 mm kalınlığında galvanizli paslanmaz sacdan laboratuvar ölçekli bir güneş havuzu inşa edilerek, laboratuvar şartlarında deneysel bir çalışma yapılmıştır. TTGH'ların ısı depolama karakteristiğini gösterebilmek ve ilk defa soda tuzu kullanılarak oluşturulan tuz yoğunluk gradyenli havuzun ısı ve kütle davranışını karşılaştırabilmek amacıyla, aynı şartlarda tatlı suyla bir ve TTGH'larda kullanılan en genel tuz çeşidi olan NaCl çözeltisiyle iki farklı deney yapılmıştır. Daha sonra soda çözeltisiyle dört farklı deney yapılarak, havuzda ısı depolanabilmesi için gerekli olan yoğunluk gradyeni büyüklüğü tespit edilmeye çalışılmıştır. Deney sonuçlarının geçerliliğini gösterebilmek için enerjinin ve kütlenin korunumu prensibine göre TTGH'nın bir boyutlu zamana bağlı ısı ve kütle transferi matematik modeli oluşturularak, sonlu farklar metodu ile nümerik olarak çözülmüştür.

Deney ve model çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre, soda çözeltisiyle başlangıçta yeterli büyüklükte bir tuz yoğunluk gradyeni oluşturulduğu ve gradyenin kararlılığı sağlandığı takdirde, havuzda toplanan ısıyı enerji formunda uzun süre depolanabilmesi mümkün gözükmemektedir. Böylece yapılan bu çalışmayla, bilinen bir sistem olan TTGH'larda ilk defa yeni bir tuz çeşidi olan soda tuzu kullanılarak, soda çözeltili havuzun ısı depolama karakteristiği ile ilgili deney ve model sonuçları literatüre yenilik olarak kazandırılmıştır.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
SEMBOLLER LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ	x
ÖZET	xi
SUMMARY	xiii
BÖLÜM.1	
GİRİŞ	1
1.1. Güneş Havuzu	2
1.1.1. Taşınımsız Güneş Havuzları	6
1.1.1.1. Tuz Tabakalı Güneş Havuzları	7
1.1.2. Taşınımlı Güneş Havuzları	13
1.2. TTGH'ın Uygulanabilirliği ve Uygulama Alanları	16
1.3. Türkiye Şartlarında TTGH'ın Uygulanabilirliği	21
BÖLÜM 2.	
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	23
2.1. Doğal Güneş Gölleri	23
2.2. Yapay Güneş Havuzları	24
BÖLÜM 3.	
TUZ TABAKALI GÜNEŞ HAVUZLARININ FİZİKSEL ÖZELİKLERİ	45
3.1. Güneş Işınımının Su İçerisinde Soğurulması	45
3.2. Havuz Yüzeyine Gelen Işınım İlgili Formülasyon	50
3.3. Havuzdan Isı Alma Yöntemleri	51
3.4. Havuzun Doldurulması İşlemi	53
3.5. Tuz Yoğunluk Gradyeninin Korunması	55
3.6. Tuz Yoğunluk Gradyeninin Kararlılık Koşulları	58
BÖLÜM 4.	
MATERYAL ve METOT	62
4.1. TTGH Isı ve Kütle Transferi Analizi	62
4.1.1. İletim Yoluyla Olan Isı Akısı	63
4.1.2. Taşınım Yoluyla Olan Isı Akısı	63
4.1.3. Işınım Yoluyla Olan Isı Akısı	64
4.2. TTGH'da Meydana gelen Isıl Kayıplar	65
4.3. TTGH Isı ve Kütle Transferi Matematik Modeli	67
4.3.1. Matematik Modelleme	67
4.3.2. Model TTGH'ın Fiziksel Parametreleri	67
4.3.3. TTGH Isı Transferi Matematik Modelinin Oluşturulması	70
4.3.3.1. Isı Transferi Matematik Modelinin Nümerik Çözümü	72
4.3.3.2. TTGH Sıcaklık Dağılımının Bilgisayar Yardımıyla Hesaplanması ...	78
4.3.4. TTGH Kütle Transferi Matematik Modelinin Oluşturulması	79
4.3.4.1. TTGH Yoğunluk Dağılımının Bilgisayar Yardımıyla Hesaplanması	84

BÖLÜM 5.	
DENEYLER	85
5.1. Deney Tesisatı	86
5.2. Enerji Kaynağı	88
5.3. Sıcaklık Ölçümü	94
5.4. Yoğunluk Ölçümü	96
5.5. Havuzun Doldurulması	97
5.6. Tuz Yoğunluk Gradyenini Koruma Düzeneği	98
5.7. Deneyler	101
5.7.1. Tatlı Su ile Yapılan Deney	101
5.7.2. Sodyum Klorür (NaCl)-Su Çözeltili Deneyler	101
5.7.3. Sodyum Karbonat (Na ₂ CO ₃)-Su Çözeltili Deneyler	102
5.7.4. Deneylerin Yapılışı	106

BÖLÜM 6.	
DENEY ve MODEL SONUÇLARI	110
6.1. Deney Sonuçları	110
6.1.1. Tatlı Su Deney Sonuçları	110
6.1.2. NaCl-Su Çözeltili Deney Sonuçları	112
6.1.3. Soda-Su Çözeltili Deney Sonuçları	121
6.2. Deney Sonuçlarının Literatürdeki Çalışmalarla Karşılaştırılması	131
6.3. Matematik Model Sonuçları	136
6.4. Deney-Model Sonuçlarının Karşılaştırılması	139
6.5. Deneysel Sonuçların Hata Analizi	143
6.5.1. Deneysel Hata Tipleri ve Nedenleri	143
6.5.2. Sıcaklık Ölçümü Hata Analizi	144
6.5.3. Yoğunluk Ölçümü Hata Analizi	145
6.5.4. Işınım Ölçümü Hata Analizi	146
6.6. NaCl ve Soda Tuzlarının Maliyet Analizi	147
6.7. Deneylerde Oluşturulan Tuz Yoğunluk Gradyeninin Kararlılık Analizi ..	150

BÖLÜM 7.	
SONUÇ ve ÖNERİLER	157

KAYNAKLAR	162
EKLER	

EK-A	TTGH Sıcaklık Dağılımını Hesaplayan Bilgisayar Programının Akış Şeması	168
EK-B	TTGH Yoğunluk Dağılımını Hesaplayan Bilgisayar Programının Akış Şeması	170
EK-C	Bilgisayar Programlarında Kullanılan Değişkenler	172
EK-D	TTGH Sıcaklık Dağılımını Hesaplamak İçin Yazılan Fortran Bilgisayar Programı	174
EK-E	TTGH Yoğunluk Dağılımını Hesaplamak İçin Yazılan Fortran Bilgisayar Programı	179
EK-F	Işınım Ölçüm Değerleri	181
EK-G	Deneylerde Ölçülen Yoğunluk Değerleri	185
EK-H	Deneylerde Ölçülen Sıcaklık Değerleri	200

ÖZGEÇMİŞ

SEMBOLLER LİSTESİ

a	: Su yüzeyinin ışıınımı yansıtma oranı (Albedo) (%)
ATB	: Alt Taşınımli Bölge
C	: Çözeltilinin tuz konsantrasyonu (kg/m^3)
C_a	: Havanın özgül ısısı ($J/kg^\circ C$)
C_p	: Çözeltilinin özgül ısısı ($J/kg^\circ C$)
D	: Çözeltilinin kütle yayılım katsayısı (m^2/s)
g	: Yerçekimi ivmesi (m/s^2)
h_c	: Isı taşınım katsayısı ($W/m^2^\circ C$)
h_e	: Çözeltilinin buharlaşma gizli ısısı (J/kg)
I	: Işınım şiddeti (W/m^2)
$I(\lambda,0)$	: Havuz yüzeyine gelen λ dalga boyundaki ışıınım şiddeti (W/m^2)
$I(\lambda,x)$	: x derinliğine kadar ulaşan λ dalga boyundaki ışıınım şiddeti (W/m^2)
$I(x)$	: Derinliğe bağılı ışıınım şiddeti (W/m^2)
I_o	: Havuz yüzeyinden havuza giren ışıınım şiddeti (W/m^2)
I_r	: Havuz yüzeyinden yansıyan ışıınım şiddeti (W/m^2)
I_s	: Havuz yüzeyine gelen ışıınım şiddeti (W/m^2)
J	: Kütle difüzyon akısı (kg/m^2s)
k	: Çözeltilinin ısı iletim katsayısı ($W/m^\circ C$)
Le	: Lewis sayısı
m	: Çözeltilinin kütlesi (kg)
N	: Tabaka sayısı
n	: Sonlu farklar formülasyonunda zaman değışkeni
n_d	: 1 Ocak tarihinden itibaren başlayan gün sayısı
n_{hava}	: Havanın ışıınımı kırma indisi
n_{su}	: Suyun ışıınımı kırma indisi
P_∞	: T_∞ sıcaklığında çözeltilinin buhar basıncı (Pa)
P_{atm}	: Atmosfer basıncı (Pa)
Pr	: Prandtl sayısı
P_s	: T_s sıcaklığında çözeltili buharının kısmi basıncı (Pa)
q	: Isı akısı (W/m^2)
Q_c	: Havuz yüzeyinden taşınımli olan ısı kayıp (W/m^2)
Q_e	: Havuz yüzeyinden buharlaşma ile olan ısı kayıp (W/m^2)
Q_L	: Havuz yüzeyinde meydana gelen toplam ısı kayıp (W/m^2)
Q_r	: Havuz yüzeyinden ışıınımli olan ısı kayıp (W/m^2)
r_α	: Isı transferi denkleminin nümerik çözüm kararlılık kriteri

Ra_S	: Tuzluluk Rayleigh sayısı
Ra_T	: Isıl Rayleigh sayısı
rd	: Kütle transferi denkleminin nümerik çözüm kararlılık kriteri
R_h	: Bağıl nem oranı (%)
S	: Çözeltinin tuzluluk oranı (%)
t	: Zaman (s)
T	: Sıcaklık
T_∞	: Ortam sıcaklığı (°C)
T_{ATB}	: ATB sıcaklığı (°C)
T_{havuz}	: Havuz çalışmaya başladığı andaki sıcaklık dağılımı (°C)
T_s	: Yüzey sıcaklığı (°C)
T_{sky}	: Gökyüzü sıcaklığı (°C)
$TTGH$	: Tuz Tabakalı Güneş Havuzu
$T_{ÜTB}$	: ÜTB sıcaklığı (°C)
TZB	: Taşınımsız Ara Bölge
$ÜTB$	: Üst Taşınımlı Bölge
V	: Çözeltinin hacmi (m ³)
V_r	: Rüzgar hızı (m/s)
w_p	: Yoğunluk ölçümünde yapılan hata oranı
w_m	: Numunenin ağırlığının ölçümünde yapılan hata oranı
w_v	: Numune hacminin belirlenmesinde yapılan hata oranı
x	: Havuz derinliği (m)
X_{ATB}	: ATB tabaka kalınlığı (m)
X_{TZB}	: TZB tabaka kalınlığı (m)
$X_{ÜTB}$	: ÜTB tabaka kalınlığı (m)
z	: Işınının havuz içinde izlediği optik yol (m)
$\dot{q}$	: Işınının soğurulmasıyla oluşan iç ısı üretimi (W/m ³)
η	: Spektrum içindeki enerji oranı
μ	: Soğurma katsayısı (m ⁻¹)
β	: Havuz yüzeyinde ince bir tabakada soğurulan kızılötesi ışıının oranı (%)
τ	: Havuza giren ışıının miktarı (%)
δ	: Deklinasyon açısı (°)
ϕ	: Enlem açısı (°)
ψ	: Saat açısı (°)
ρ	: Çözeltinin yoğunluğu (kg/m ³)
ν	: Çözeltinin kinematik viskozitesi (m ² /s)
α	: Çözeltinin ısı yayılım katsayısı (m ² /s)

λ	: Işınının dalga boyu (μm)
σ	: Stefan-Boltzman Sabiti ($\text{W/m}^2\text{K}^4$)
ω	: Taşınım hareketinin düşey doğrultudaki ortalama hızı (m/s)
β_1	: Sabit katsayı
β_2	: Sabit katsayı
θ_g	: Işınının geliş açısı ($^\circ$)
θ_k	: Işınının kırılma açısı ($^\circ$)
β_s	: Çözeltinin kütle genleşme katsayısı (%)
τ_s	: Lewis sayısının tersi
Δt	: Zaman aralığı (s)
β_T	: Çözeltinin ısı genleşme katsayısı ($^\circ\text{C}^{-1}$)
ε_w	: Su yüzeyinin neşretme katsayısı
Δx	: Tabaka kalınlığı (m)



ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil.1.1 Tipik bir tuz tabakalı güneş havuzu enerji dengesi	3
Şekil.1.2 Tuz tabakalı güneş havuzunun fiziki yapısı	9
Şekil 1.3 Tuz tabakalı güneş havuzunun yoğunluk ve sıcaklık gradyenleri	9
Şekil 1.4 Sığ güneş havuzunun fiziki yapısı	14
Şekil 1.5 Jel (gel) tabakalı güneş havuzunun fiziki yapısı	14
Şekil 1.6 Bal peteği güneş havuzunun fiziki yapısı	15
Şekil 1.7 Bal peteği örtüsünün bir göle uygulanması	16
Şekil 1.8 TTGH'lardan elektrik enerjisi üretimi uygulamasına ait ısı-elektrik enerjisi dönüşüm çevrimi	19
Şekil 1.9 Teksas Üniversitesi'nde yapılan bir güneş havuzu uygulaması (El-Paso güneş havuzu)	19
Şekil 4.1 Model TTGH'ın fiziksel özellikleri ve havuzda meydana gelen ısı akısı	68
Şekil 4.2 Model TTGH'ın fiziksel özellikleri ve havuzda meydana gelen kütle difüzyonu	80
Şekil.5.1 Deney havuzunun şematik olarak görünümü	87
Şekil 5.2 Deneye hazır hale getirilmiş olan deney havuzu	87
Şekil 5.3 Lamba yanal ekseninde (major) tek lambadan ölçülen bağıl ısıtım değerleri	91
Şekil 5.4 Lamba dikey ekseninde (minor) tek lambadan ölçülen bağıl ısıtım değerleri	91
Şekil 5.5 Simülatörün deney tesisatından alınmış görüntüsü	92
Şekil 5.6 Deneylerin yapıldığı enerji kaynağı düzeneği	93
Şekil 5.7 Lambaların yanal ve dikey eksenleri boyunca, havuz yüzeyinin dörtte birine gelen ısıtım şiddeti (W/m^2) oranları	93
Şekil 5.8 Deney havuzundan sıcaklık ölçümü sırasında alınmış bir kesit	95
Şekil 5.9 Havuz yoğunluk dağılımının ölçümü sırasında deney tesisatından alınmış görüntüler	97
Şekil 5.10 Tuz yoğunluk gradyenini koruma düzeneğinin havuz içerisine yerleştirilmesi	100
Şekil 5.11 Deneylerin yapılması sırasında deney havuzundan alınmış görüntüler ...	108
Şekil 6.1 Tatlı su deneyi havuz sıcaklık dağılımı	111
Şekil 6.2 Tatlı su deneyi havuz yoğunluk dağılımı	111

Şekil 6.3	NaCl-Su çözeltili birinci deneyde havuz ışıma maruz kalmadan önceki havuz yoğunluk dağılımı	113
Şekil 6.4	NaCl-su çözeltili birinci deneyde havuz ışıma maruz kaldıktan sonraki havuz yoğunluk dağılımı	113
Şekil 6.5	NaCl-Su çözeltili birinci deneyde havuz ışıma maruz kaldıktan sonraki havuz sıcaklık dağılımı	115
Şekil 6.6	NaCl-Su çözeltili birinci deneyde, deney bittikten sonraki soğuma periyodu havuz sıcaklık dağılımı	115
Şekil 6.7	NaCl-Su çözeltili ikinci deneyde havuz ışıma maruz kalmadan önceki havuz yoğunluk dağılımı	117
Şekil 6.8	NaCl-Su çözeltili ikinci deneyde havuz ışıma maruz kaldıktan sonraki havuz yoğunluk dağılımı	117
Şekil 6.9	NaCl-Su çözeltili ikinci deneyde, deney bittikten sonraki soğuma periyodu havuz yoğunluk dağılımı	118
Şekil 6.10	NaCl-Su çözeltili ikinci deneyde havuz ışıma maruz kaldıktan sonraki havuz sıcaklık dağılımı	118
Şekil 6.11	NaCl-Su çözeltili ikinci deneyde, deney bittikten sonraki soğuma periyodu havuz sıcaklık dağılımı	119
Şekil 6.12	Soda-su çözeltili birinci deneyde havuz ışıma maruz kalmadan önceki havuz yoğunluk dağılımı	120
Şekil 6.13	Soda-su çözeltili birinci deneyde havuz ışıma maruz kaldıktan sonraki havuz yoğunluk dağılımı	120
Şekil 6.14	Soda-su çözeltili birinci deneyde havuz ışıma maruz kaldıktan sonraki havuz sıcaklık dağılımı	122
Şekil 6.15	Soda-su çözeltili birinci deneyde, deney bittikten sonraki soğuma periyodu sıcaklık dağılımı	122
Şekil 6.16	Soda-su çözeltili ikinci deneyde havuz ışıma maruz kalmadan önceki havuz yoğunluk dağılımı	123
Şekil 6.17	Soda-su çözeltili ikinci deneyde havuz ışıma maruz kaldıktan sonraki havuz yoğunluk dağılımı	124
Şekil 6.18	Soda-su çözeltili ikinci deneyde havuz ışıma maruz kaldıktan sonraki havuz sıcaklık dağılımı	124
Şekil 6.19	Soda-su çözeltili ikinci deneyde, deney bittikten sonraki soğuma periyodu havuz sıcaklık dağılımı	125
Şekil 6.20	Soda-su çözeltili üçüncü deneyde havuz ışıma maruz kalmadan önceki havuz yoğunluk dağılımı	126
Şekil 6.21	Soda-su çözeltili üçüncü deneyde havuz ışıma maruz kaldıktan sonraki havuz yoğunluk dağılımı	126
Şekil 6.22	Soda-su çözeltili üçüncü deneyde havuz ışıma maruz kaldıktan sonraki havuz sıcaklık dağılımı	127

Şekil 6.23	Soda-su çözeltili üçüncü deneyde, deney bittikten sonraki soğuma periyodu havuz sıcaklık dağılımı	128
Şekil 6.24	Soda-su çözeltili dördüncü deneyde havuz ışıma maruz kalmadan önceki havuz yoğunluk dağılımı	128
Şekil 6.25	Soda-su dördüncü deneyde havuz ışıma maruz kaldıktan sonraki havuz yoğunluk dağılımı	130
Şekil 6.26	Soda-su çözeltili dördüncü deneyde havuz ışıma maruz kaldıktan sonraki havuz sıcaklık dağılımı	130
Şekil 6.27	Soda-su çözeltili dördüncü deneyde, deney bittikten sonraki soğuma periyodu havuz sıcaklık dağılımı	131
Şekil 6.28	Leshuk ve arkadaşlarının [18] yapmış oldukları deneysel çalışmadan elde etmiş oldukları havuz sıcaklık dağılımı	132
Şekil 6.29	Leshuk ve arkadaşlarının [18] yapmış oldukları deneysel çalışmadan elde etmiş oldukları havuz yoğunluk dağılımı	132
Şekil 6.30	Göktun'un [83] yapmış olduğu deneysel çalışmadan elde etmiş olduğu havuz sıcaklık dağılımı (havuz devamlı ışıma maruz)	134
Şekil 6.31	Göktun'un [83] yapmış olduğu deneysel çalışmadan elde etmiş olduğu havuz sıcaklık dağılımı (havuz periyodik olarak ışıma maruz)	134
Şekil 6.32	Göktun'un [83] yapmış olduğu deneysel çalışmadan elde etmiş olduğu havuz yoğunluk dağılımı	135
Şekil 6.33	NaCl çözeltili ikinci deneye göre yapılmış model havuz yoğunluk dağılımı	137
Şekil 6.34	NaCl çözeltili ikinci deneye göre yapılmış model havuz sıcaklık dağılımı	138
Şekil 6.35	Soda çözeltili dördüncü deneye göre yapılmış model havuz yoğunluk dağılımı	138
Şekil.6.36	Soda çözeltili dördüncü deneye göre yapılmış model havuz sıcaklık dağılımı	139
Şekil 6.37	NaCl çözeltili ikinci deney-model havuz yoğunluk dağılım sonuçlarının karşılaştırılması	140
Şekil 6.38	NaCl çözeltili ikinci deney-model havuz sıcaklık dağılım sonuçlarının karşılaştırılması	140
Şekil 6.39	Soda çözeltili dördüncü deney-model havuz yoğunluk dağılım sonuçlarının karşılaştırılması	141
Şekil 6.40	Soda çözeltili dördüncü deney-model havuz sıcaklık dağılım sonuçlarının karşılaştırılması	142

TABLolar LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1 Dünya üzerinde bulunan güneş havuzları uygulamaları	18
Tablo 5.1 NaCl-su çözelti deneme deneyinde havuza doldurulan çözeltinin bölgelere göre tuzluluk oranları ve yoğunluk dağılımları	103
Tablo 5.2 NaCl-su çözelti birinci deneyde havuza doldurulan çözeltinin bölgelere göre tuzluluk oranları ve yoğunluk dağılımları	103
Tablo 5.3 NaCl-su çözelti ikinci deneyde havuza doldurulan çözeltinin bölgelere göre tuzluluk oranları ve yoğunluk dağılımları	103
Tablo 5.4 Soda-su çözelti birinci deneyde havuza doldurulan çözeltinin bölgelere göre tuzluluk oranları ve yoğunluk dağılımları	104
Tablo 5.5 Soda-su çözelti ikinci deneyde havuza doldurulan çözeltinin bölgelere göre tuzluluk oranları ve yoğunluk dağılımları	105
Tablo 5.6 Soda-su çözelti üçüncü deneyde havuza doldurulan çözeltinin bölgelere göre tuzluluk oranları ve yoğunluk dağılımları	105
Tablo 5.7 Soda-su çözelti dördüncü deneyde havuza doldurulan çözeltinin bölgelere göre tuzluluk oranları ve yoğunluk dağılımları	105
Tablo 6.1 Nümerik çözümde kullanılan fiziksel özellik değerleri	136
Tablo 6.2 NaCl-su çözelti dördüncü deneyde her bir tabaka için kullanılan tuz miktarı	149
Tablo 6.3 Soda-su çözelti dördüncü deneyde her bir tabaka için kullanılan soda miktarı	149
Tablo 6.4 NaCl ve soda tuzlarının maliyet hesapları	149
Tablo 6.5 Deneylerde oluşturulan tuz yoğunluk gradyanlarının kararlılık analiz değerleri	154
Tablo 6.6 TZB ara yüzey kararlılık analiz değerleri	156

ÖZET

GÜNEŞ HAVUZLARINDA GÜNEŞ ENERJİSİNİN TOPLAMA VE DEPOLAMA KARAKTERİSTİKLERİNİN DENEYSEL VE TEORİK OLARAK İNCELENMESİ

Güneş enerjisi, son yıllarda artan enerji ihtiyacı karşısında yenilenebilir enerji kaynakları arasında popüler hale gelmiştir. Teknolojinin hızla gelişmesiyle birlikte, günlük yaşamımızda ihtiyaç duyduğumuz sıcak suyun ısıtılmasından, elektrik üretimine kadar değişik uygulama alanları mevcuttur. Güneş enerjisi uygulamalarında karşılaşılan en önemli sorun, güneş enerjisinin sürekli ve yoğun bir enerji türü olmaması nedeniyle uzun süre depolama gerektirmesidir. Bu nedenle, maliyeti düşük ve verimi yüksek toplayıcı ve depolayıcı sistemlerinin geliştirilmesi zorunlu hale gelmiştir.

Günümüzde güneş enerjisinin toplanması ve depolanması bakımından geliştirilmiş sistemler arasında en uygun olanı, yüzeyine gelen güneş ışınımının % 20-30'unu toplayıp, topladığı bu ışınımın yaklaşık % 15'ini depolayabilen tuz tabakalı güneş havuzlarıdır. Güneş ışınımını toplayan ve topladığı bu ışınımı ısı enerjisi formunda aynı ortamda uzun zaman aralığında depolayabilen bir güneş enerjisi sistemi olan tuz tabakalı güneş havuzları (TTGH), alternatif güneş enerjisi sistemlerine göre düşük maliyetli, basit bir sistemdir.

Bu çalışmanın amacı, bugüne kadar bu alanda test edilmemiş olan çamaşır sodası olarak bilinen sodyum karbonat tuzunun (Na_2CO_3), TTGH'ların yoğunluk gradyeninin oluşturulmasında uygun bir tuz olup olmadığını araştırmak ve havuzun ısı depolama karakteristiğini deneysel ve teorik olarak incelemektir. Bu amaç doğrultusunda, 60x50x60 cm boyutlarında 1.5 mm kalınlığında galvanizli paslanmaz sacdan laboratuvar ölçekli bir güneş havuzu inşa edilerek, 2x1000 W Philips halojen lambalardan oluşan güneş simülatörü enerji kaynağı olarak kullanılmak suretiyle laboratuvar şartlarında deneysel bir çalışma yapılmıştır.

Deneylere TTGH'nın fiziki yapısını incelemek ve ısı depolama karakteristiğini gösterebilmek amacıyla ilk olarak tatlı sulu bir ortamda gerçekleşen olayların

gözlemlenmesiyle başlanmıştır. Daha sonra, TTGH'larda yoğunluk gradyeninin oluşturulmasında ilk defa kullanılacak olan soda çözeltili deney sonuçlarını karşılaştırabilmek için aynı şartlarda NaCl çözeltisiyle İki farklı deney yapılmıştır. Tatlı su ve NaCl çözeltili deneylerden sonra, soda çözeltisiyle dört farklı deney yapılarak, havuzda ısı depolanabilmesi için gerekli olan tuz yoğunluk gradyeni büyüklüğü belirlenmeye çalışılmıştır. Soda çözeltili havuzda ısı depolanabilmesi için başlangıçta havuz içerisinde % 12 büyüklüğünde tuzluluk oranına sahip bir yoğunluk gradyeninin oluşturulması gerektiği tespit edilmiştir. NaCl çözeltili deneylerden havuz tabanı ile yüzeyi arasında maksimum 13 °C sıcaklık farkı elde edilirken, soda çözeltili deneylerden maksimum 12 °C sıcaklık farkı elde edilmiştir.

Deney sonuçlarının geçerliliğini gösterebilmek amacıyla, enerjinin ve kütlenin korunumu prensibine göre TTGH'nın bir boyutlu zamana bağlı ısı ve kütle transferi matematik modeli oluşturulmuş, modeli oluşturan diferansiyel denklemler sonlu farklar metodu kullanılarak nümerik olarak çözülmüştür.

Deney ve modelden elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak, her iki sıcaklık ve yoğunluk profillerinin benzer temayüller içinde değişim gösterdiği, TTGH sıcaklık dağılımına göre nitelik bakımından birbirleriyle uyum içinde oldukları görülmüştür.

Elde edilen sonuçlara göre, soda çözeltisiyle yeterli büyüklükte bir tuz yoğunluk gradyeni oluşturularak, gradyenin kararlılığı sağlandığı takdirde, havuzda toplanan ışıının uzun zaman aralığında depolanabilmesi mümkün gözükmemektedir.

Anahtar Kelimeler : Tuz Tabakalı Güneş Havuzları, Matematik Model, Nümerik Çözüm, Sonlu Farklar Metodu, Deneysel Çalışma, Sodyum Karbonat Tuzu

SUMMARY

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL INVESTIGATION OF COLLECTING AND STORING CHARACTERISTICS OF SOLAR ENERGY IN THE SOLAR PONDS

Solar energy has become popular among the renewable energy sources due to increasing energy requirements in recent years. Therefore, it found a variety of application fields including hot water for domestic uses and electricity production. The main problem in solar energy applications is the long term storage requirement of the energy. This is because, solar radiation is discontinuous and is of low energy density. Therefore, collector and storage technology with low cost and high efficiency is required and a device that keeps the energy for a sufficiently long period of time has to be developed.

Nowadays, among the developed systems, which collect and store solar energy, the most suitable one is salt gradient solar pond (SGSP). This system can store 20-30 % of incident solar energy. SGSP is a simple and low cost solar energy system which collects solar radiation and stores it as thermal energy in the same medium for a long period of time. For this reason, SGSP becomes more attractive among the alternative solar energy systems.

The objective of this study is to investigate experimentally and theoretically whether sodium carbonate (Na_2CO_3) salt is suitable for establishing density gradient in SGSP or not, and to examine the ability of heat storage of a solar pond. For this purpose, a prismatic solar pond sized 60x50x60 in cm with 1.5 mm of thickness of galvanized sheet metal was built. The experiments were carried out with a solar simulator designed with two 1000 W Philips halogen lamps whose radiation spectrum are close to the solar radiation.

For the experiments, pure water and sodium chloride salt solutions in different concentrations which were tested earlier as cited in literature, were firstly tested. Then, the pond was filled with sodium carbonate salt solution, which has not been investigated earlier as seen from the literature, in different concentration and was tested first time for this purpose, and the heat storage capability of SGSP has been examined.

Moreover, a one dimensional transient mathematical model that determines the thermal and mass transfer behaviour of the SGSP was developed by using the mass and energy balances in the zones of SGSP. Heat and mass balance equations were written in terms of differential equations and these were solved numerically using finite difference method.

It was found from the experiments that the density gradient, which must be 12 % salinity difference in the pond achieved using sodium carbonate, can suppress the convection from the bottom to the top surface of the pond. Hence, it was seen that heat can be stored at the bottom of SGSP with the sodium carbonate solution. Unlike the sodium chloride solution which was saturated at the bottom of the pond, the sodium carbonate solution was not saturated. However, the density gradient achieved with sodium carbonate salt was more stable than that achieved with sodium chloride.

When the temperature profile of SGSP with sodium carbonate solution was compared to the temperature profile of SGSP with sodium chloride solution, it was seen that they were both similar to the physics of a SGSP.

The experimental results were compared to the results obtained from mathematical model analysis. Temperature and density values obtained from both the experimental and the mathematical model showed similar trends. They are qualitatively in good agreement in terms of the physics of a SGSP.

According to the results obtained, it is concluded that if SGSP is correctly designed, thermal energy storage for a sufficiently long time period can be possible. Therefore, SGSP can be an alternative energy source in thermal applications.

Keywords: Salt Gradient Solar Pond, Mathematical Model, Numerical Solution, Finite Difference Method, Experimental Study, Sodium Carbonate Salt

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Dünya enerji tüketimi, nüfus artışına, sanayileşmeye ve teknolojik gelişmelere paralel olarak, baş döndürücü bir hızla artmaktadır. Mevcut doğal enerji kaynaklarının kısıtlı ve sınırlı olması nedeniyle yakın bir gelecekte bütün dünya ülkelerinde enerji ihtiyacı sorunu baş gösterecektir. Bu nedenle, her geçen gün artan enerji ihtiyacı, yeni arayışlar ve araştırmaları gündeme getirmiştir.

Enerji kaynakları fosil kaynaklar ve yenilenebilir kaynaklar olarak iki grupta toplanmaktadır. Fosil kaynaklar, bugün geniş bir şekilde tüketilmekte olan kömür, petrol, doğal gaz gibi alışılmış enerji kaynaklarıdır. Yenilenebilir enerji kaynakları ise, belirli sınırlar içinde kendi kendini yenileyebilen veya tüketilmesi mümkün olmayan temiz doğal kaynaklardır. Zamanla tükenmekte olan fosil kaynaklara alternatif olduğundan, bu tür kaynaklara alternatif enerji kaynakları da denilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları içinde en önemli kaynak, hidrolik enerji kaynağıdır. Diğer kaynaklar ise, güneş enerjisi, jeotermal enerji, rüzgar enerjisi, biyogaz enerjisi ve tropik bölgelerdeki okyanuslarda görülen sıcaklık gradyan enerjisidir. Fosil yakıtlar dahil, bütün enerji kaynaklarının hepsinin ana kaynağı güneştir. Doğrudan veya dolaylı olarak güneşten kaynaklanırlar [1].

Gün geçtikçe fosil enerji kaynaklarının sağlanmasında çeşitli sorunlarla karşılaşmaktadır. Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynaklarının araştırılması ve ekonomik olarak kullanılabilir hale getirilmesi hususunda yoğun çalışmalara başlanmıştır. Her ülke elverdiğince bol ve ucuz alternatif enerji kaynakları konusunda araştırma ve geliştirme çalışmalarını geniş ve detaylı bir şekilde devam ettirmektedirler. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında ucuz, çevre kirletmeyen ve kolayca faydalanılabilen enerji kaynağı denilince güneş enerjisi dikkat çekmektedir. Son zamanlarda, özellikle petrol fiyatlarında görülen büyük artışlar ve bu artışların doğal sonucu olarak baş gösteren enerji darboğazı ve ekonomik bunalım güneş enerjisini güncel bir konu haline getirmiştir [1,2].

Yenilenebilir enerji kaynakları konusunda yapılan uygulamalar ve araştırmalar sonucunda, Türkiye için önem taşıyan yeni ve temiz enerji kaynaklarının güneş, jeotermal, rüzgar, biyogaz ve hidroelektrik enerji kaynakları olduğu görülmüştür. Mevcut zorluklara rağmen, Türkiye, yenilenebilir enerji kaynakları grubunda yer alan hidrolik, jeotermal ve güneş

enerjisi potansiyeli açısından varlıklı ülkeler sınıfına girmektedir. Özellikle güneş enerjisi, jeotermal enerji, küçük hidroelektrik santraller, biyogaz ve bazı bölgelerde rüzgar enerjisi kullanma potansiyeli yüksek kaynaklar olarak kabul edilmektedir [1].

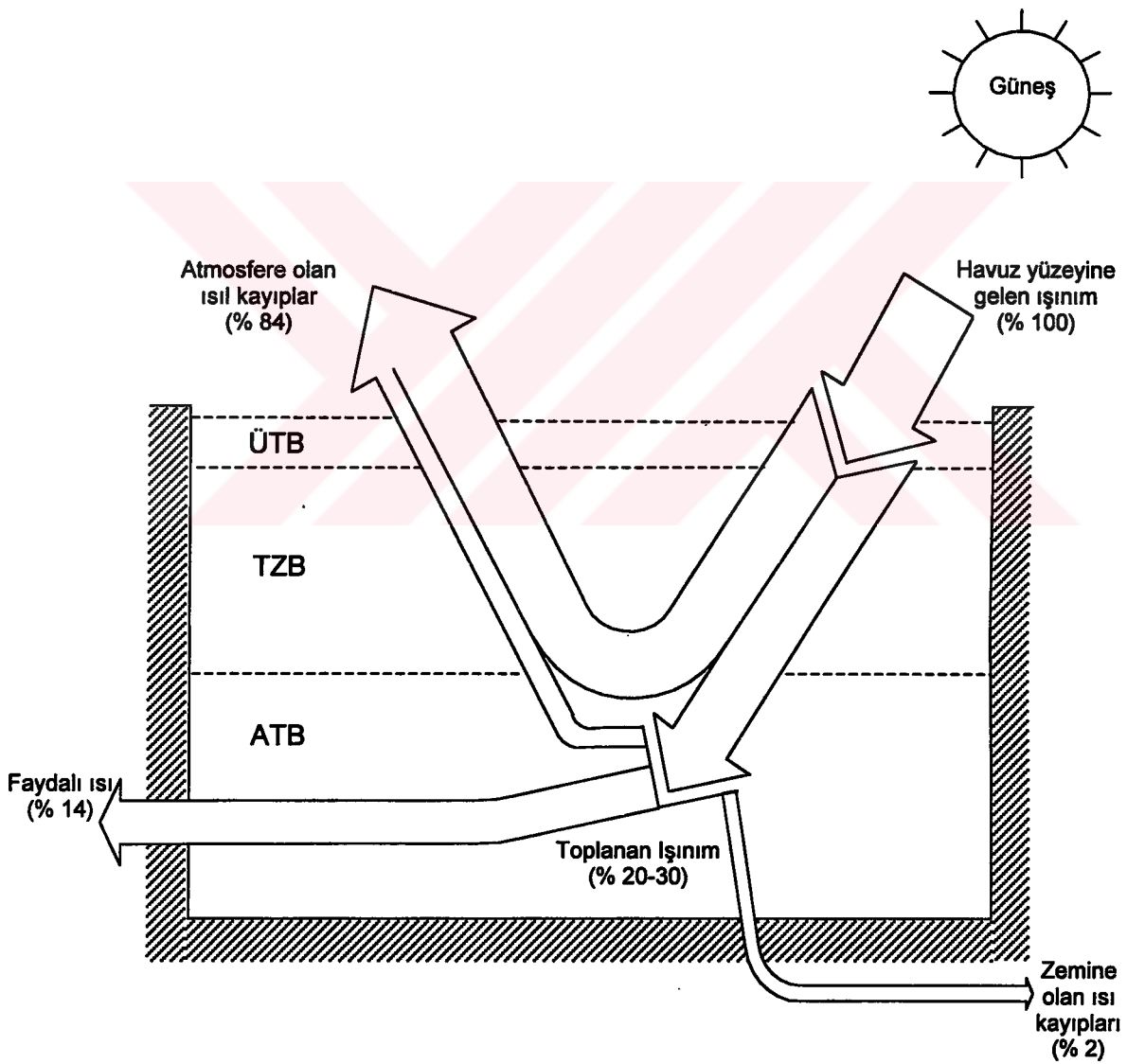
Güneş enerjisinden büyük ölçekli yararlanmada, güneş ışınımının iki temel karakteristiği olan düzensizlik ve düşük enerji yoğunluğu nedeniyle toplanması yanında uzun süre depolamayı gerektirmesi gibi zorluklarla karşılaşmaktadır. Düşük enerji yoğunluğu, çok büyük boyutlarda toplama aygıtı gerektirmektedir. Bundan dolayı güneş enerjisinden daha iyi faydalanabilmek için düşük maliyetli ve yüksek verimli toplayıcı ve depolayıcıların geliştirilmesi zorunlu hale gelmiştir [2,3].

Depolama, güneş enerjisinin kesintili olarak elde edilmesi nedeniyle güneş enerjisi uygulamalarının en kritik problemlerinden birisidir. Güneş enerjisi dönüşüm sistemlerinin enerji kayıpları nedeniyle depolama verimleri düşük olduğu gibi, elde edilen kullanılabilir enerjinin maliyeti de oldukça yüksektir. Düşük sıcaklık uygulamaları için depolama probleminin mantıklı çözümü, Şekil 1.1’de görüldüğü gibi yüzeyine gelen güneş ışınımının % 20-30’unu toplayabilen ve topladığı bu ışınımı ısı enerjisi formunda uzun süre depolayabilen güneş havuzlarıdır. Depolanan bu ısının, % 15 dolayındaki miktarı, kullanılmak üzere faydalı ısı olarak havuzdan çekilebilmektedir. Güneş havuzlarında toplama ve depolama sistemleri arasında bir fark yoktur, her iki işlem aynı ortamda yapılmaktadır. Bu nedenle, güneş havuzları, güneş enerjisi çevrim sistemleri arasında toplama ve depolama işlemlerinin her ikisini de aynı ortamda yapmasından dolayı, alternatif dönüşüm sistemlerine göre büyük bir avantaja sahiptir [4-7].

1.1. Güneş Havuzu

Güneş havuzları, güneş enerjisinin su kütlesi içerisinde doğrudan aynı ortamda toplanıp ve depolandığı düşük maliyetli, basit bir teknolojiye sahip bir güneş enerjisi sistemidir. Su kütlesinin güneş ışınlarını soğurmasıyla birlikte sıcaklığı hissedilebilir bir şekilde artarak ısınır. Su kütlesi içerisindeki bu ısıyı tutacak bir metot kullanılmadıkça, ısınıp atmosfere kaybedecektir. Su, ısınmasıyla birlikte genişleyeceği ve yoğunluğu azalacağından dolayı yüzeye doğru yükselerek taşınım ve buharlaşma ile ısınıp yüzeyinden atmosfere kaybederek soğuyacaktır. Suyun soğuması sonucu yoğunluğu artacağından, yüzeydeki su

molekülleri daha ağır olacaktır. Yüzeyde yoğunluğu fazla ve daha ağır olan su molekülleri aşağıya doğru hareket ederek, tabanda daha sıcak ve yoğunluğu yüzeye göre daha az olan su molekülleri ile yer değiştirmek isteyecektir. Böylece, su kütlesi içerisinde taban ile yüzey arasındaki sıcaklık farkından dolayı doğal taşınım sirkülasyonu oluşarak, su kütlesinin kararsız bir yapıya sahip olmasına neden olacaktır. Kararsız bir su kütlesi, sürekli olarak atmosfere ısı kaybedeceğinden, soğurulan ışıının neden olduğu ısı enerjisinden faydalanılamaz. [8-10].



Şekil.1.1. Tipik bir tuz tabakalı güneş havuzu enerji dengesi

Güneş havuzu fikri, bu yüzyılın başlarında, Romanya'nın Karpat Dağları eteklerinde Transylvania tuz bölgesinde doğal olarak bulunan Medve Gölü'nün Kaleczinsky tarafından keşfedilmesi sonucu ortaya çıkmıştır. Gölde, eylül ayında 1.32 m derinlikte 70 °C sıcaklık ölçülmüştür [2,4,11].

Yapay güneş havuzu inşası fikri ise, ilk olarak İsrail'li bilim adamı Rudolp Bloch'un, İsrail Ulusal Araştırma Kurumuna Medve Gölü'nde gözlemlenen olayların pratik uygulaması konusunda bir çalışma önermesiyle başlamıştır. İlk olarak Medve Gölü'nde doğal güneş gölü özeliği araştırılmış ve gölde yüksek sıcaklığa neden olan olaylar incelenmiştir. Gölde yapılan ölçümlerde, gölün dip kısımları daha sıcak olmasına rağmen daha yoğun olduğu görülmüş, bu duruma da gölün içerisinde bulunan doğal bir tuz yoğunluk gradyeninin neden olabileceği düşünülmüştür. Göl içerisinde doğal olarak bulunan tuz yoğunluk gradyeni nedeniyle alt kısımlar daha sıcak iken daha yoğun olabilmektedir. Böylece, göl içerisinde ışıının soğurulmasıyla başlayacak olan doğal taşınım hareketleri, yoğunluk gradyeni vasıtasıyla önlenmiş olabileceğinden gölün alt tabakalarında soğurulan ışıının ısı enerjisi olarak depolandığı sonucuna varılmıştır. Taşınım hareketlerinin önlenmesiyle, gölün alt kısımlarından ısı sadece iletim yoluyla kaybolabilmekte, suyun ısı iletim kabiliyetinin de zayıf olması nedeniyle ısı kaybı miktarı da oldukça düşük olmaktadır. Böylece, göl içerisinde soğurulan güneş ışıının gölün alt kısımlarında hissedilebilir bir sıcaklık yükselmesine neden olduğu, yaz aylarında yapılan ölçümlere göre 1.3 m derinlikte sıcaklığın 70 °C'ye kadar ulaşabildiği gözlemlenmiştir. Gölde doğal olarak bulunan tuz yoğunluk gradyeninin, göl tabanındaki tuz kaynağı ve göle akan tatlı sulu nehirler tarafından doğal olarak korunmakta olduğu yapılan ölçümler sonucunda ortaya çıkarılmıştır. Tuz yoğunluk gradyeni, gölün tabanındaki tuz tortuları nedeniyle alt bölgelerde doyma konsantrasyonuna yaklaşırken, üst bölgelerde göle akan nehirlerin tatlı sularıyla seyrelmektedir [2,4,12].

Bloch'un önerdiği bu çalışma sonucunda elde edilen tecrübeler, İsrail'de yapay güneş havuzu inşası fikrinin uygulamaya geçmesini sağlamış ve diğer İsraili bir bilim adamı olan Tabor tarafından ilk güneş havuzu uygulaması 1954 yılında gerçekleştirilmiştir [2,3,12].

İsrail'deki bu çalışmalar, genellikle güneş havuzundan elde edilen kullanılabilir ısı enerjisinin düşük maliyetli güç üretmek amacıyla Rankin çevrimi kullanılarak elektrik

üretiminde kullanılması potansiyeli üzerine yoğunlaşmıştır. Daha sonraki yıllarda, Amerika'da, güneş havuzlarını düşük maliyetli ve düşük dereceli proses ısısı uygulamalarında kullanmak amacıyla bir dizi çalışmalar yapılmıştır. İsrail'de düşük maliyetli güç üretmek, Amerika'da ise düşük sıcaklık gerektiren proseslere ısı sağlamak amacıyla yapılan bu çalışmaları, Hindistan, Rusya, İngiltere, İran, Avustralya, Japonya, Ürdün, Katar, Finlandiya ve Türkiye gibi ülkelerde değişik amaçlı yapılan çalışmalar takip etmiştir [2,11].

Güneş havuzları, toplama ve depolama işlemlerinin her ikisini de aynı ortamda yapması, güneş enerjisi dönüşüm sistemleri arasında, topladığı ve depoladığı birim ısı enerjisi miktarına göre düşük maliyetli bir sistem olmaktadır. Güneş kolektörleri ve güneş pilleri daha yüksek ısı ve elektrik dönüşüm verimlerine sahip olmalarına rağmen, güneş enerjisini toplama sisteminin yanı sıra ek olarak pahalı depolama sistemleri gerektirmesi nedeniyle maliyetleri oldukça yüksek olmaktadır [13,14].

Uygun bir şekilde dizayn edildiği takdirde problemsiz bir şekilde çalışabilen güneş havuzları, güneşlenme oranının yüksek olduğu yaz aylarında güneş ışıınımını toplayarak, güneşlenme oranının düşük olduğu kış aylarında kullanılmak üzere uzun süre ısı enerjisi formunda depolayabilmektedir. Bu nedenle, güneş havuzları uzun dönem mevsimsel enerji depolama gerektiren uygulamalarda ve yağmurlu mevsimlerde, bulutlu ve güneşsiz günlerde kullanılmak için ideal bir enerji depolama sistemi olmaktadır. Özellikle tropik bölgeler, güneş havuzu teknolojisinin ticari amaçlı olarak kullanılması açısından uygun bölgelerdir [14-16].

Isıl enerjinin uzun dönem depolanabilmesi, depolanan ısıнын kullanım esnekliğini arttırdığından, güneş havuzları diğer klasik enerji sistemlerine göre bu konuda da alternatif bir sistem olmaktadır. Güneş enerjisi dönüşüm sistemlerine göre, belli başlı en önemli avantajları; maliyetlerinin düşük olması, uzun dönem ısı depolayabilme kabiliyeti, basit bir teknoloji gerektirmesi, kurulması ve işletmesinin kolay olması, uzun dönem ısı depolaması nedeniyle zamana ve mevsime bakılmadan hemen hemen her iklimde çalışabilmesi olarak sıralanabilir [8,17-19].

Performanslarının zamanla kötüye gitmesi, ısı verimlerinin çok düşük olması, geniş alan gerektirmesi nedeniyle çatılara kurulamaması güneş havuzlarının en büyük dezavantajlarıdır [5,20].

Güneş havuzlarının belli başlı taşınımlı ve taşınımsız olmak üzere iki çeşidi vardır. Taşınımsız havuzlar, havuz içerisinde derinliğe bağlı olarak soğurulan ışınlama, tabakalar arasında oluşan sıcaklık farkının zamanla artması sonucu başlayan doğal taşınım hareketlerinin yapay olarak oluşturulan yoğunluk gradyanıyla önlenmesine dayalı olarak geliştirilmişlerdir. Taşınımlı havuzlar ise, havuz yüzeyi şeffaf bir örtü ile kaplanarak havuz yüzeyinden taşınım ve buharlaşmayla olan ısı kayıplara engel olunmak suretiyle, yüzeyden ısı kayıpları azaltma mantığına göre dizayn edilmişlerdir. Bu nedenle, taşınımlı havuzlar tuzsuz güneş havuzları olarak da adlandırılmaktadır [21,22].

Taşınımsız güneş havuzları uzun dönem enerji depolayabilirken, taşınımlı güneş havuzlarında depolama sıcaklığı hızlı bir şekilde yükselmesi nedeniyle, bu tip havuzlar kısa dönem enerji depolamada daha uygun olmaktadır [21].

1.1.1. Taşınımsız Güneş Havuzları

Güneş ışınlamının havuz içerisinde derinliğe bağlı olarak soğurulmasıyla, yüzey ile taban arasında oluşan sıcaklık farkının neden olduğu taşınım hareketlerini bastırmak ve engelleyebilmek için çeşitli teknikler geliştirilmiştir. Taşınımsız güneş havuzları, İsrailli bilim adamı Rudolph Bloch'un, Kaleczinsky'nin Medve Gölü'ndeki keşfine dayanarak ileri sürdüğü yapay güneş havuzu inşası fikrinden esinlenerek, ışınlamın soğurulmasıyla başlayan doğal taşınım hareketlerini, havuz içerisinde yapay olarak oluşturulan ve derinlikle yoğunluğu artan tuz yoğunluk gradyanı ile yok etme mantığına dayalı olarak dizayn edilmişlerdir. Havuz içerisinde oluşan ısı kararsızlığın neden olduğu doğal taşınım hareketlerinin engellenmesi, yüzey ile taban arasında oluşturulan yoğunluk gradyanının büyüklüğüne ve kararlılığına bağlıdır. Yoğunluk gradyanı uygun ve yeterli büyüklükte oluşturulduğu takdirde, havuz içerisinde taşınım hareketi olmayacak, havuzun alt bölgelerinde soğurulan ısı enerjisi formunda yine soğurulduğu bölgede depolanabilecektir [2-5].

Taşınımsız havuzların, tuz tabakalı veya tuz gradyenli güneş havuzu ve zar tabakalı güneş havuzu olmak üzere belli başlı iki çeşidi vardır. En çok çalışılan ve kullanılan taşınımsız havuz çeşidi, genel olarak bilinen tuz tabakalı güneş havuzlarıdır. Tuz tabakalı güneş havuzlarında, havuz içerisinde ısınımın soğurulmasıyla başlayan taşınım hareketleri, havuz içerisinde farklı yoğunlukta ince tabakalar halinde yapay olarak oluşturulan tuz yoğunluk gradyeni ile engellenmektedir. Diğer bir taşınımsız güneş havuzu çeşidi ise, zar tabakalı güneş havuzudur. Bu tip havuzlarda, taşınım hareketleri, havuz içerisinde fiziksel olarak oluşturulan ince, şeffaf bir zar tabakasıyla engellenmektedir [5,21,22].

1.1.1.1.Tuz Tabakalı Güneş Havuzları

Genel olarak üst yüzeyi daha sıcak olan akışkan tabakası kararlıdır. Suyun 0 °C ile +4 °C arasındaki ters davranışı göz önüne alınmaz ise, üstten ısıtılan akışkan tabakasında en sıcak, dolayısıyla yoğunluğu en az olan kısım üstte bulunacaktır. Bu durumda, akışkan zerreleri düşey doğrultuda hareket etme eğilimi göstermeyeceklerdir [23].

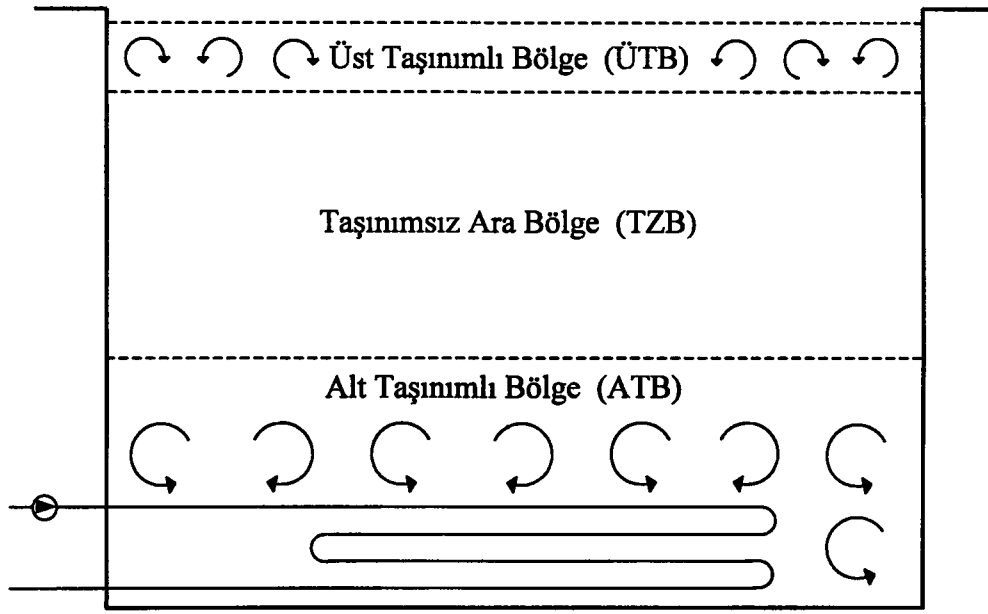
Herhangi bir akışkan kütlesi, ısıtıldığında sıcaklığı arttığından dolayı yoğunluğu azalır. Daha sıcak akışkanın ağırlığı azalarak yüzeye doğru yükselmeye başlar ve yüzey sıcaklığından daha soğuk olan ortam sıcaklığı arasındaki farka göre, yüzeyinden buharlaşma ile ısı kaybeder. Yüzeydeki akışkan tabakası soğur ve ağırlığı artacağından havuz tabanına tekrar geri döner. Bu akışkan hareketi, akışkanların kaldırma kuvvetine göre olmaktadır. Bu hareket, akışkanın ısı akısına maruz kaldığı müddetçe sürekli olarak devam eder ve akışkan yüzeyinden atmosfere sürekli olarak ısı kaybeder. Böyle bir ortamda ısının tutulması ve depolanması mümkün değildir. Bu tür olaya tabiatta göllerde, denizlerde ve bahçe havuzlarında rastlanmaktadır. Havaların ısınmasıyla birlikte, havuzun üst yüzeyi hızla ısınır ve havuz suyu içerisindeki sıcaklık derinlikle azalır. Havaların soğumasıyla birlikte havuz yüzeyinden olan ısı kayıpları artacağından havuz yüzeyi, alt tabakalara nazaran daha soğuk olacaktır. Böylece göl veya havuz içerisinde ters bir sıcaklık gradyeni oluşur ve sistemi kararsız hale getirir [23].

Sıcaklık farkının neden olduğu bu taşınım hareketlerini bastırmak için çeşitli teknikler geliştirilmiştir. Bunlar arasında tuz tabakalı güneş havuzları (TTGH) çok çalışılan genel bir tekniktir. TTGH teknolojisinde, havuz içerisinde yapay olarak oluşturulan ve derinlikle

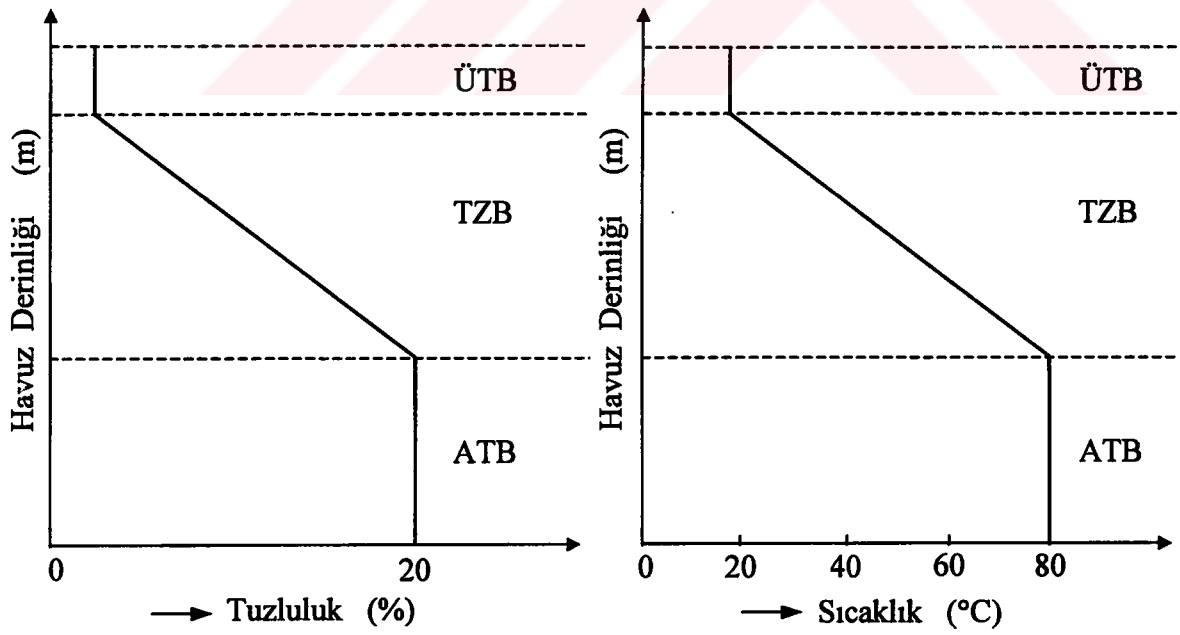
artan tuz yoğunluk gradyeniyle havuzun alt tabakalarında ısınan suyun yüzeye yükselmesi önlenir. Alt tabakalarda akışkan sıcaklığı, bu tabakalara kadar gelen güneş ışıınının soğurulmasıyla yükselir ve akışkanın yoğunluğunun azalmasına neden olur. Alt tabakalarda hafifleyen bu akışkan zerrelere etki eden kaldırma kuvvetinin, yerçekimi kuvvetinin üzerine çıkmasına rağmen, tuz yoğunluk gradyeninin büyüklüğüne bağlı olarak etkisinin azalması nedeniyle doğal olarak başlayan taşınım hareketi başlayamaz. Havuz içerisinde doğal taşınım hareketlerinin başlayabilmesi için kaldırma kuvvetinin sürtünme kuvvetini yenmesi gerekir. TTGH'larda yapay olarak oluşturulan ve derinlikle artan tuz yoğunluk gradyeni, yeterli büyüklükte olması halinde sistemi kararlı hale getirecek ve havuz içerisinde taşınım rejimine geçişi zorlaştıracaktır. Böylece, havuz tabanına kadar ulaşan güneş ışıınının, aynı ortamda toplanması ve depolanması sağlanmış olur [4-7,23].

TTGH'lar, güneş ışıınının soğurulmasıyla oluşan doğal taşınım hareketlerini yapay olarak oluşturulan kararlı bir tuz yoğunluk gradyeniyle önleyen sığ bir akışkan kütesinden oluşmaktadır. Tuz yoğunluk gradyeni, taşınım hareketlerini önlemesiyle birlikte sıcaklık gradyeni oluşmaya başlar. Gradyen bölgenin saydam ve yalıtıcı bir fonksiyona sahip olması, suyun iletim kabiliyetinin de çok düşük olması nedeniyle soğurulan ışıının, havuzun alt bölgelerinde ısı enerjisi olarak tutulur ve depolanır. Böylece, güneş havuzları, güneş ışıınının büyük bir kısmını toplayabilen ve topladığı bu ışıınını aynı ortamda hissedilebilir ısıya dönüştüren ve bu ısıyı da uzun dönem depolayabilen bir sistem olmaktadır [8-10]

Şekil 1.2'de tuz tabakalı güneş havuzunun fiziki yapısı, Şekil 1.3'de ise, tipik bir TTGH'ın yoğunluk ve sıcaklık profilleri görülmektedir. Şekillerden de görülebileceği gibi, TTGH'lar genellikle üst taşınımlı bölge (upper convective zone-UCZ), taşınımsız ara bölge (non convective zone-NCZ) ve alt taşınımlı bölge (lower convective zone-LCZ) olmak üzere farklı üç bölge içermektedir. Alt taşınımlı bölge (ATB), tuz konsantrasyonunun en fazla olduğu bölge olup, sabit bir yoğunluğa sahiptir. Güneş enerjisi bu bölgede ısı enerjisi olarak depolandığı için bu bölge depolama bölgesi olarak da adlandırılabilir. ATB üzerinde, şeffaf yalıtıcı bir malzeme gibi hareket eden ve üst taşınımlı bölgeye doğru azalan bir yoğunluk gradyeni içeren taşınımsız ara bölge (TZB) bulunmaktadır. TZB, TTGH'ların en önemli kısmı olup, içerdiği tuz yoğunluk gradyeninin yeterli miktarda büyük olmasıyla, havuzun tabanı yüzeyine oranla daha sıcak olmasına rağmen taşınım hareketinin başlaması



Şekil.1.2. Tuz tabakalı güneş havuzunun fiziki yapısı



Şekil 1.3. Tuz tabakalı güneş havuzunun yoğunluk ve sıcaklık gradyanları [24]

zorlaşacaktır. Böylece, havuz tabanında soğurulan güneş ışıını, ATB'de depolanabilecektir. Üst taşınımlı bölge (ÜTB), genellikle tuzsuz su ihtiva eden bölge olup, ince bir tabaka kalınlığına sahiptir. Bu bölgenin oluşturulması, havuzun ekonomikliğı ve gradyenin kararlılığı açısından önemlidir [5-7].

İnce bir ÜTB tabakasının oluşturulması, güneş kayıplarını azaltması ve havuz maliyetini düşürmesi nedeniyle TTGH'ların ekonomikliğı açısından önemlidir. Bu avantajlara rağmen, minimum ÜTB kalınlığını fiziksel olarak sınırlayan faktörler mevcuttur. Havuzun yerleşimi, boyutları, bulunduğu ortamdaki rüzgar hızı ÜTB tabaka kalınlığını etkileyen en önemli parametrelerdir.

ÜTB tabaka kalınlığı olması gerekenden daha ince olduğunda, gün içindeki sıcaklık değişiminden dolayı, ÜTB içerisinde ısıl kararsızlık oluşacak ve ÜTB-TZB ara yüzeyinde farklı yoğunluktaki çözeltiler birbirine karışarak tuz yoğunluk gradyeninin özeliğı bozulacaktır. Ayrıca, havuz yüzeyinde aşırı rüzgar nedeniyle oluşan dalgalar, ÜTB içerisinde TZB'ye doğru aşırı bir hareketlenmenin başlamasına neden olur. Şayet ÜTB tabaka kalınlığı, bu tip problemler dikkate alınmadan oluşturulduğunda, dalgaların neden olduğu hareketlenme TZB'ye doğru ilerleyerek tuz yoğunluk gradyeninin bozulmasına neden olacaktır. Buna bağılı olarak, ATB'den ÜTB'ye doğru olan ısıl kayıplara karşı TZB'nin direnci azalacağından havuzun kararlılığı bozulacaktır. Bu nedenle, ÜTB tabakasının rüzgarın neden olduğu aşırı karışıma karşı koruyucu görevi yapabilmesi için yeterli büyüklükte derinliğe sahip olması gerekir [11].

TZB, yalıtıcı tabaka olarak bilinir ve tabaka boyunca ATB'de depolanan ısının taşınım yoluyla kaçmasını önler. Böylece ATB'den sadece TZB boyunca iletimle ısı kaybı olur. Suyun ısıl iletkenliğinin düşük olması nedeniyle, ATB'den ÜTB'ye doğru iletimle olan ısı kaybı da oldukça düşük olacak, havuz yanlardan ve alttan yalıtıldığı takdirde ise mevcut ısıl kayıplar önemli miktarda azalacaktır. Bu durum, güneş havuzlarının sadece güneş enerjisini toplayan değil, aynı zamanda mevsimsel olarak ısı enerjisi formunda ısı depolayan bir sistem olmasını sağlar. ATB'de soğurulan ışıını, ısıl enerjiye dönüştürülerek, hissedilebilir ısı enerji formunda uzun dönem depolanabilmektedir [11,13,25,26].

TZB kalınlığı, havuzun kararlı ve verimli bir şekilde çalışabilmesi için çok önemlidir. TZB kalınlığının artması, daha iyi bir yalıtım sağlayacağından, TZB boyunca ATB'den ÜTB'ye

doğru olan ısı kayıpları azalır ve ATB sıcaklığı artar. Fakat bu kalınlık gereğinden fazla olduğunda, ATB'ye ulaşacak olan ısı miktarını azaltacağından havuzun performansı düşecektir. Bu nedenle, TZB'nin etkili bir yalıtıcı görevi yapabilmesi için, optimum kalınlığa sahip olması gerekir. Optimum TZB kalınlığı, havuza giren ısı miktarının, havuzdan çekilen ısı miktarı ve çalışma sıcaklığının bir fonksiyonu olarak değişiklik gösterir. Ortam sıcaklığının ve güneş ısı miktarının nispeten düşük olduğu kış aylarında TZB'nin optimum kalınlığı büyük olmalı, yaz aylarında ise daha düşük olmalıdır [11,27-28].

ATB tabaka kalınlığı ise, havuzun ısı performansı açısından önemli bir parametredir. ATB kalınlığı arttıkça, bu bölgede soğurulan ısı miktarı artacağından, havuzda depolanan ısı miktarı artacaktır. ATB kalınlığı ince olduğunda ise, depolama sıcaklığı artarken depolanan ısı miktarı azalacaktır. ATB'de soğurulan ısı, faydalı ısıya dönüşerek, kullanılmak üzere havuzdan çekilir. ÜTB ve TZB'de soğurulan ısı ise, ATB'de depolanan faydalı ısı miktarının yükselmesine yardımcı olur ve ısı kayıpları olarak dış ortama kaybolur. ATB'nin kalınlığı havuzun çalışma şartlarına bağlı olarak değiştirilebilir. Güneş enerjisinin bol olduğu bölgelerde, uzun dönem enerji depolanacak ise ATB kalınlığının derin olması, kısa zamanda maksimum sıcaklık isteniyorsa, ATB tabaka kalınlığının az olması gerekir [11,27,29].

ATB'de depolanan ısı, istenilen değere ulaştığı zaman kullanılmak üzere belirli aralıklarla havuzdan çekilmelidir. Bu yapılmadığı takdirde, ATB alt yüzeyi ile üst yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı zamanla artacağından, ATB-TZB ara yüzeyinde salınlı bir hareketlenmenin başlamasına öncülük edecektir. Bu salınlı hareketlenme, zamanla ATB-TZB ara sınırının TZB'ye doğru ilerlemesine, dolayısıyla TZB tabaka kalınlığının küçülmesine ve tuz yoğunluk gradyanının erozyona uğramasına neden olacaktır [30].

ATB tabaka kalınlığı yeteri kadar büyük olduğu takdirde, depolama sıcaklığı değeri, ısı miktarı şiddetindeki ve hava sıcaklığındaki günlük dalgalanmalardan önemli derecede etkilenmez. ATB sıcaklığındaki günlük değişim, 1-2 °C arasında olurken, yıllık değişim 10-20 °C dolayında olmaktadır [11,26].

Tuz yoğunluk gradyanının kararlı hale gelebilmesi için havuz doldurulduktan sonra, havuzun büyüklüğüne bağlı olarak, 3 ile 10 gün arasında değişen belirli bir sürenin geçmesi

gerekmektedir. Kararlı bir yoğunluk gradyeninin oluşmasıyla birlikte, yüzeyinden ışıma maruz kalan havuzda, sıcaklık gradyeninin oluşabilmesi için ışımanın soğurulmaya başlamasından sonra kesin bir zaman periyoduna ihtiyaç vardır. Bu zaman periyodu; havuzun boyutlarına, havuz depolama bölgesinde soğurulan ışıma enerjisine, havuzdan dış ortama olan ısı kayıplarına, kararlı ve uygun bir yoğunluk gradyeninin oluşturulmasına bağlı olarak değişebilmektedir [8,26].

TTGH'ların performansı, havuzun bulunduğu yerin meteorolojik şartları, havuz zemini, tuz yoğunluk gradyeninin oluşturulmasında kullanılan çözeltinin berraklığı, çözeltinin ışıma geçirgenliği, havuz geometrisi, havuzu oluşturan bölgelerin tabaka kalınlıkları, havuzdan çekilen ısı, tuz yoğunluk gradyeninin büyüklüğü ve korunması gibi parametrelerden etkilenir. Bu parametreler arasında meteorolojik etkenler, havuz performansını etkileyen en önemli faktörlerdendir [4,22,27,31].

İyi bir toplama verimi elde edebilmek için, havuzda kullanılan çözeltinin ışıma geçirgenliğinin mükemmel olması ve yeterli şeffaflığa sahip olması gerekir. Güneş ışımasının su içerisinde ilerlemesi, çözelti içerisinde bulunan çözünmemiş tuz ve asılı partiküllerin bulunmasına, suyun temizliğine, şeffaflığına ve kalitesine bağlı olarak değişir [32,33].

TTGH'lar, depolamayla birleşmiş düşük maliyetli güneş kolektörleri gibi düşünülebilir. Uygun bir yerde inşa edildikleri takdirde, düz plakalı güneş kolektörlerine göre daha az maliyetli bir sistem olmaktadır. Belli başlı avantajları, aşağıdaki şekilde sıralanabilir [6,7,11].

- Toplama alanına göre düşük yatırım maliyetine sahiptirler.
- Toplama ile depolama işlemlerinin her ikisi de aynı ortamda yapıldığından, ek olarak depolama maliyeti gerektirmezler.
- Geniş yüzey alanlı olarak inşa edilebileceklerinden, büyük ölçekli enerji elde edilebilmektedir.
- Toplanan enerjiyi uzun dönem aralığında depolayabilme kabiliyetine sahiptirler.

Düşük sıcaklıkta ısı sağlaması, toplama veriminin oldukça düşük olması ve büyük miktarda tuz gereksinimine ihtiyaç duyması ise TTGH'ların belli başlı dezavantajlarından. TTGH'ların deniz kıyısı, tuz göletleri veya tuz kayalarının bulunduğu bölgelere veya bu bölgelerin yakınına kurulması sistemin maliyetini düşürdüğü gibi, ekonomikliğini artırır [34].

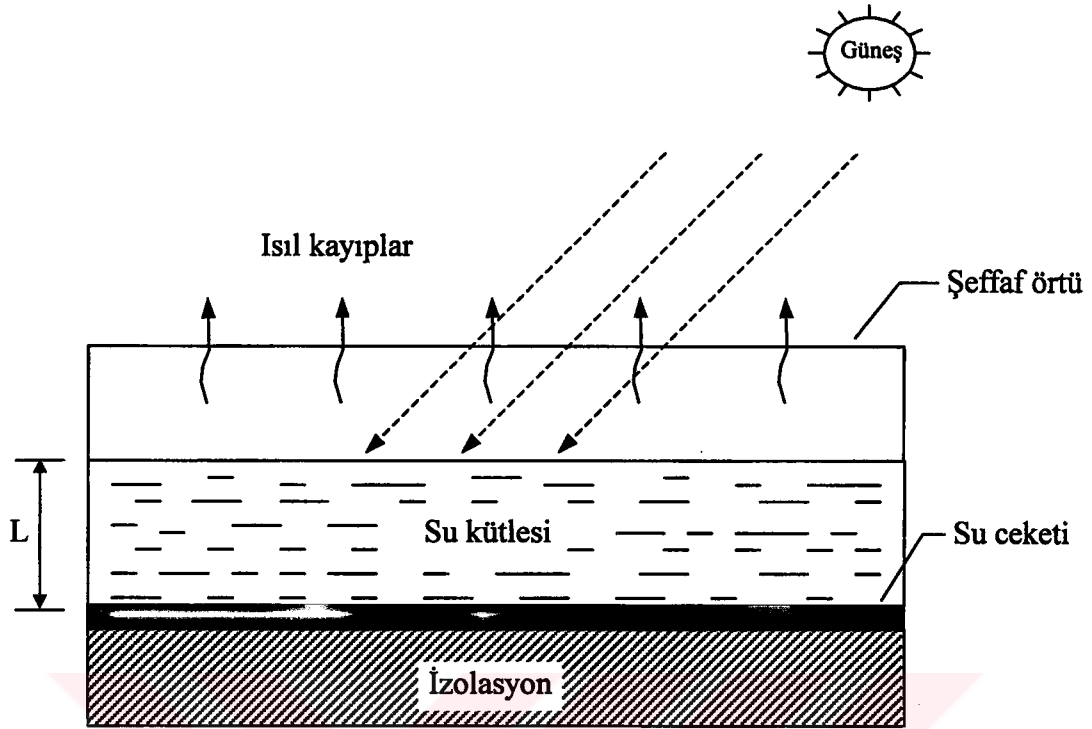
TTGH'larda, tuz yoğunluk gradyeni genellikle sodyum klorür (NaCl) tuzu kullanılarak oluşturulmaktadır [9,32]. Uygun tuzun seçiminde asıl kriter, daha düşük sıcaklıklarda daha az çözünmeli ve sıcaklıkla basamak basamak çözünürlüğü artmalıdır. Ayrıca tuz kararlı, çözelti içerisinde renksiz, zehirsiz, ucuz, kolaylıkla elde edilebilir ve çevreye uygun olmalıdır [35].

1.1.2. Taşınımlı Güneş Havuzları

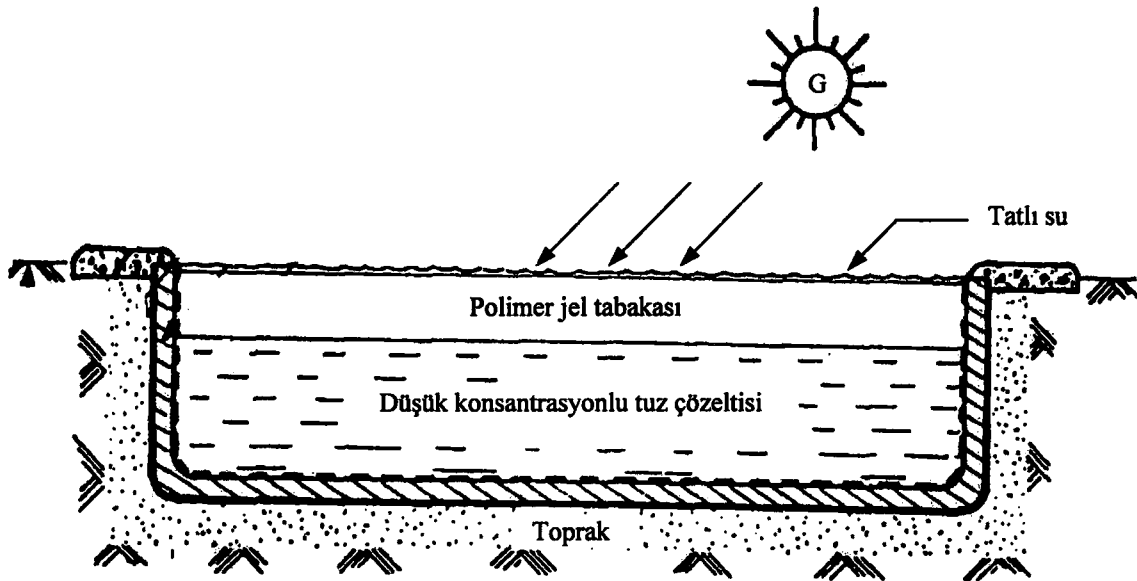
En çok çalışılan ve araştırılan taşınımlı havuz çeşidi sıg havuzdur. Son yıllarda taşınımlı güneş havuzları konusunda yapılan çalışmalarla, derin tuzsuz güneş havuzu, jel (gel) havuzu, bal peteği (honeycomb) havuzu, ince zar örtülü güneş havuzu, yüzen kollektör tip güneş havuzu olmak üzere değişik tip taşınımlı güneş havuzları geliştirilmiştir [21,22].

Sıg güneş havuzları, taşınımına müsaade eden, fakat buharlaşmaya engel olan büyük bir cep ile çevrili temiz ve tatlı su içeren bir sistemdir. Havuz tabanı siyaha boyalı, zemini bir izolasyon malzemesiyle yalıtılmış, üstü ise cam çatı ile örtülüdür. Güneş, gün boyunca cep içindeki suyu ısıtır. Gece ise sıcak su, ısı kayıplarını minimuma indirmek için büyük bir ısı depolama tankına pompalanır, gündüz ise tekrar sisteme geri gönderilir. Şekil 1.4'de şematik olarak sıg bir güneş havuzunun fiziki yapısı görülmektedir [36].

Diğer bir taşınımlı havuz tipi, derin ve tuzsuz güneş havuzlarıdır. Bu taşınımlı güneş havuzunun sıg güneş havuzlarından farkı, sadece ısınan suyun depolama ortamına veya başka bir yere pompalanmasının gerekmemesidir. Havuzun üzeri çift camla örtülüdür. Gece ise camın üzeri yalıtılarak ısı kayıpları azaltılabilmektedir. Derin tuzsuz güneş havuzlarının geliştirilmesiyle, sıg taşınımlı güneş havuzlarında, sıcak suyun depolama tankına pompalanmasıyla meydana gelen ısı kayıpların üstesinden gelinmiştir [37].

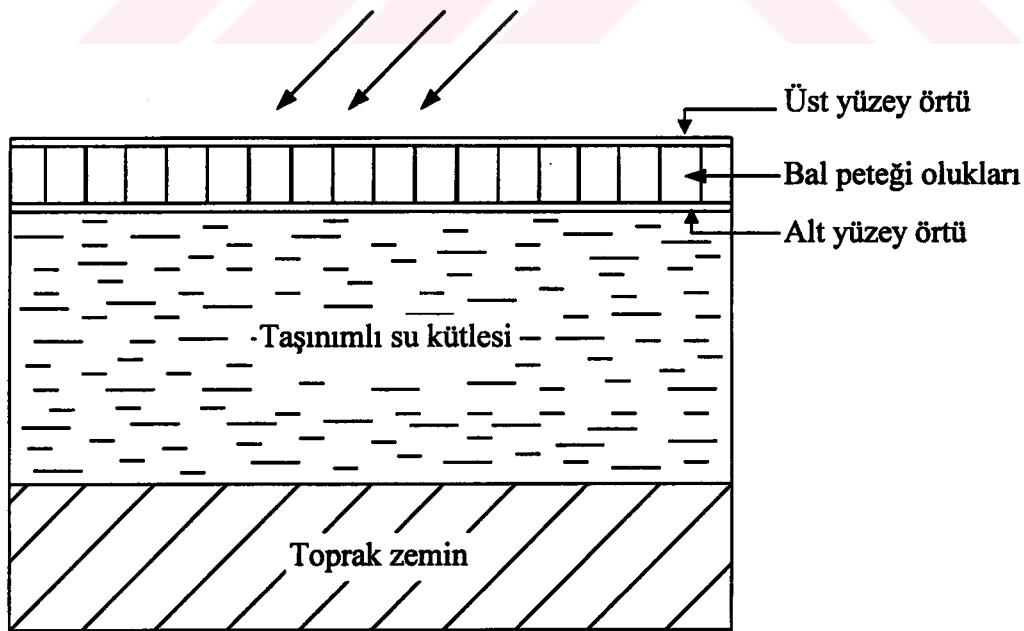


Şekil 1.4. Sığ güneş havuzunun fiziki yapısı [36]

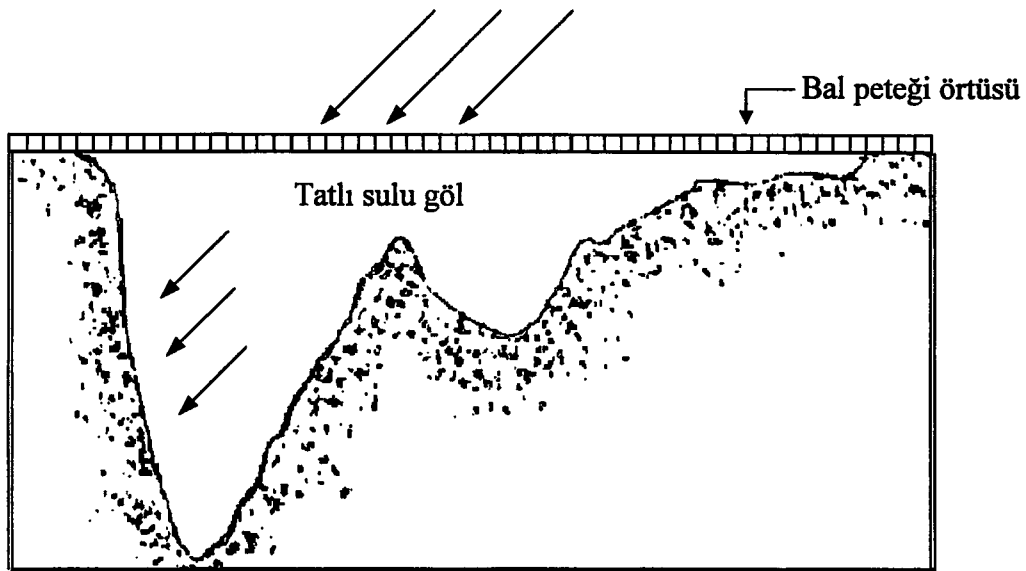


Şekil 1.5. Jel (gel) tabakalı güneş havuzunun fiziki yapısı [37]

Jel havuz teknolojisi, TTGH'lardaki tuz yoğunluk gradyeninin görevini yerine getirmesi amacıyla, iyi bir ısı yalıtıma ve optik özeliğe sahip olan polimer jel kullanılarak ilk olarak Wilkins ve Lee [37] tarafından geliştirilmiştir. Polimer jeller, güneş ışınım geçirgenliği oldukça iyi olan şeffaf bir maddedir. Bu tip havuzlara, tuz yoğunluk gradyeni yerine su ve polyacrylamid maddesinin değişik oranlardaki bileşiminden oluşan jel tabakası kullanılması nedeniyle jel güneş havuzu denilmektedir. Jel tabakası, havuzun depolama bölgesi üzerinde yüzen oldukça şeffaf, yapışkan, taşınım ile ısı kaybını önleyen yarı katı bir tabakadır. Depolama bölgesi, üzerinde jel tabakasının yüzmesini muhafaza edebilmesi için tuzluluk oranı % 2 ile % 7 arasında değişen, çok küçük oranda tuz çözeltisi içerir. Havuz yüzeyine düşen toz toprak ve zararlı maddelerin jel tabakasına zarar vermemesi için jel tabakası üzeri ince tatlı bir su tabakası ile örtülür. Jel güneş havuzlarının geliştirilmesiyle, TTGH'ların sahip olduğu tuz yoğunluk gradyeni kararsızlığı ve yoğunluk gradyenini daima kontrol altında tutma probleminin üstesinden gelinmiştir. Ayrıca, jel tabakası, havuz yüzeyindeki rüzgarın ve buharlaşmanın etkisini önemli derecede azaltmaktadır. Böylece, TTGH'lardaki bir çok problemin üstesinden gelinerek, havuz performansı önemli derecede artmış olmaktadır. Şekil 1.5'de tipik bir jel tabakalı güneş havuzunun fiziki yapısı görülmektedir [37,38].



Şekil 1.6. Bal peteği güneş havuzunun fiziki yapısı [39]



Şekil 1.7. Bal peteği örtüsünün bir tatlı sulu göle uygulanması [39]

Bal peteği güneş havuzu, doğal bal peteği şekline benzer yarı saydam plastik bir malzemeden yapılmış, içerisi hava dolu petek tabakasının tatlı suyun üzerine yerleştirilmesiyle meydana gelen taşınımlı bir havuz çeşididir. Şekil 1.6'da, bal peteği güneş havuzunun şematik olarak fiziki yapısı görülmektedir. Sistemde, bal peteği tabakası, su kütlesi ile dış ortam arasındaki ısı kayıpları önleyen bir çeşit örtü görevi yapmaktadır. Bal peteği havuzunun en önemli avantajı, sistemin işleyişinde tuz gerektirmemesidir. Bu tip havuzlarda, tuz kullanılmaması nedeniyle depolama bölgesi daha derin olabilmektedir. Bal peteği havuzlarında akışkan olarak tatlı su kullanılması, son yıllarda yapılan çalışmalarda, bal peteği örtüsünün doğal göllere ve yapay tanklara uygulanabilmesini gündeme getirmiştir. Şekil 1.7'de, bal peteği örtüsünün doğal bir göle yerleştirilmesiyle oluşturulan tipik bir bal peteği güneş havuzu kesiti görülmektedir [39].

1.2. TTGH'nin Uygulanabilirliği ve Uygulama Alanları

Literatüre bakıldığında, son 20 yılda güneş havuzlarında güneş enerjisinin toplanması ve depolanmasıyla ilgili çalışmaların fark edilebilecek kadar dikkat çektiği görülür. TTGH'nin ısı kaynağı olarak kullanılması, günümüzde enerji talebinin artmasıyla daha da ilgi çekici gözükmemektedir. TTGH'lar, güneş enerjisini büyük ölçekli toplayan, ekonomik bir sistem

olarak önemli bir potansiyele sahiptir. Son yıllarda yapılan çalışmalarla, güneş havuzlarının teknik olarak uygulanabilirliği bilimsel olarak kanıtlanmıştır [20,40,41].

Dünyanın bir çok yerinde, TTGH'lar, tuzlu su damıtılmasında, tuz rafinesinde, tuz üretiminde, konut ısıtmasında, elektrik enerjisi üretiminde ve değişik proseslere ısı kaynağı olarak ekonomik yönden benzer sistemlerle rekabet edebilmektedir [15].

TTGH'ların verimli bir şekilde çalışabilmesi için, yüksek güneşlenme oranı, düşük yağış, rüzgarsız bir ortam, su kaçaklarına karşı sızdırmaz sert bir zemin, ucuz ve kullanılmaya elverişli tuz ve temiz tatlı su temininin kolaylığı gibi faktörlerin havuz inşa edilmeden önce detaylı olarak incelenmesi gerekir. Havuz inşasının yapılıp yapılmamasına, inceleme sonucunda elde edilen verilere göre karar verilmelidir [2,3].

TTGH'ların inşasında, teknik ve fiziksel olarak dikkat edilmesi gereken dört temel gereksinime ihtiyaç vardır. Bunlar, yüksek güneşlenme oranı, ucuz olarak elde edilebilecek bir tuz çeşidi, sızdırmaz sağlam bir zemin ve temiz bir su kaynağıdır [2,11,34,42].

Bunlardan güneş ışınım potansiyeli ve tuz elde edilebilirliği en önemli gereksinimlerdenidir. Tuz, havuz maliyetini arttıran bir gereksinim olup, ilk yatırım maliyetinin % 15-20'si dolayında bir miktarını oluşturmaktadır. Sistemin işleyişi sırasında sürekli olarak sisteme ilave edilmesi nedeniyle, tuz TTGH'lar için yakıt gibi düşünülebilir [2].

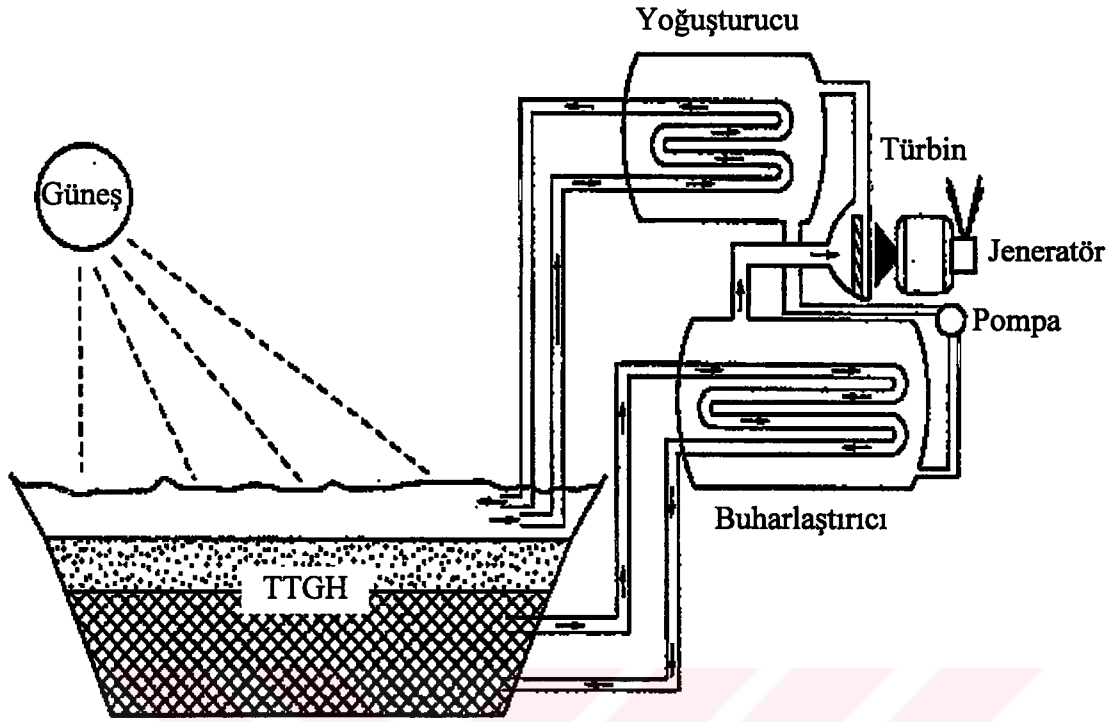
TTGH'ların deniz kıyısı, tuz göletleri veya tuz kayaları gibi tuz kaynaklarına yakın bölgelere kurulması, tuz elde edilebilirliğini kolaylaştırması nedeniyle sistemin maliyetini önemli derecede düşürmektedir [2,11,34,42].

Çeşitli ülkelerde yapılan TTGH uygulamalarına ait örnekler, Tablo 1.1'de görülmektedir. Tablodan da görülebileceği gibi, TTGH uygulamaları, İsrail'de büyük ölçekli elektrik üretimi, Amerika ve diğer ülkelerde ise düşük sıcaklık gerektiren uygulamalarda etkili olmuştur [4,14,16].

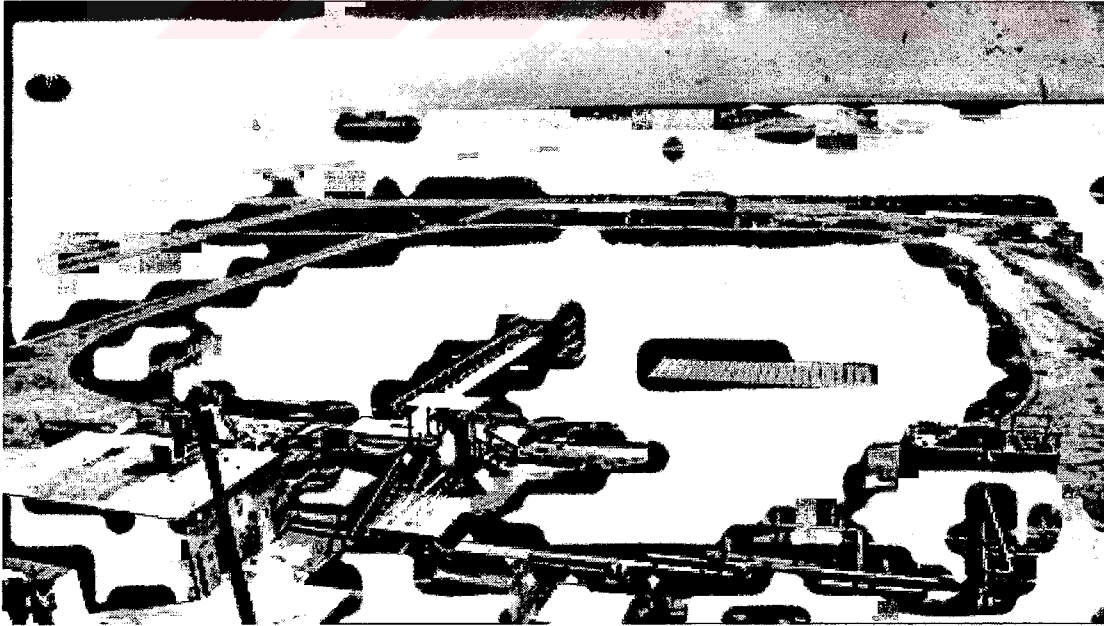
Yapılan çalışmalar sonucunda, TTGH'ların elektrik üretimi ve 80 °C altında sıcaklık gerektiren proseslerde ısı kaynağı olarak kullanılmasının ekonomik olabileceği görülmüştür [3,11,34,42]. Şekil 1.8'de, TTGH'dan sağlanan düşük dereceli ısı enerjisinden elektrik

Tablo 1.1. Dünya üzerinde bulunan güneş havuzları uygulamaları [4,16].

No	Bulunduğu yer	Alanı (m ²)	Derinliği (m)	Mak. Sıcaklık °C	Kapasitesi (kW)	Verimi (%)	Uygulama Alanı
1	Salton Sea, USA.	10 ⁶			5000		
2	Beit Haarava, İsrail	250.000			5000		Elektrik üretimi
3	Margherita di Savoia Salt Work Area, İtalya	20.000					HVAC ve deniz suyu damıtma
4	Ein Bokek, İsrail, 1979	7500	2,6	92	150-170	15-19,4	Elektrik üretimi
5	Chattanooga Tenn., USA., 1982	4000					Tarım sektöründe ısı kaynağı
6	Texas Üniversitesi, El Paso, USA	3355	3	87	100		Isı kaynağı, elektrik üretimi ve damıtma
7	Alice Springs, Avustralya, 1981	2100	2,3	82	2		Elektrik üretimi, damıtma ve endüstriyel proses ısı kaynağı
8	Miamisburg, Ohio, USA., 1978	2020	3,5	66		15	Yüzme havuzu ısıtması
9	Bhavnagar, Hindistan	1600					Isı kaynağı
10	Yavne, İsrail, 1977	1500		90	6		Elektrik üretimi
11	Dead Sea Potash Works, İsrail, 1975	1100		103		15	Isı alma deneyleri
12	Eilat, İsrail, 1975	1100		82			Isı kaynağı
13	Argonne, Ill., USA., 1980	1082				4,3	
14	Laverton solar pond, Chelham Salts, Victoria, Avustralya	1000					Düşük sıcaklıklı endüstriyel ısı kaynağı
15	Flagstaff, Ariz, USA., 1982	800					150 m ² 'lik bir binanın ısıtılması
16	Montreal, Kanada, 1981	700	2	70	360GJ/yıl		Endüstriyel kurutmada ön ısıtma ısısı
17	Dead Sea Potash Woks, İsrail, 1960	625	0,8	96			Güneş havuzu fikrinin araştırılması
18	Ohio State Üniversitesi, USA., 1980	400			4,5		Kurutma - ısıtma
19	Arjantin	400-800					Kinyasal tuz rafinesi
20	Ohio State Üniversitesi, USA., 1980	200	2,5	66			Kurutma - ısıtma
21	Los Alamos, New Meksika, USA.	200					Deneyisel
22	New Meksika Üni., USA., 1975	175	2,5	109	63GJ/yıl	9	Isıtma
23	Wooster, Ohio, USA., 1975	155	3				Sera ısıtması
24	Aspendale, Avustralya, 1964	100					Deneyisel
25	Truscott, Texas, USA.				1200		
26	Jyoti solar pond, Vadodara, Hindistan	100					Isıtma, soğutma, sıcak su elde etme



Şekil 1.8. TTGH’lardan elektrik enerjisi üretimi uygulamasına ait ısı-elektrik enerjisi dönüşüm çevrimi [4]



Şekil 1.9. Teksas Üniversitesi’nde yapılan bir güneş havuzu uygulaması (El-Paso güneş havuzu) [45]

enerjisi üretmek amacıyla kurulmuş olan ısı-elektrik enerjisi dönüşüm çevrimi görülmektedir. Şekil 1.9'da ise, Amerika da Teksas Üniversitesinde, proje kapsamında, elektrik üretimi ve damıtma amaçlı uygulaması yapılmış ve halen çalışmaları devam eden TTGH'nin resmi görülmektedir.

Elektrik üretimi, TTGH'ların en ilginç uygulamalarından birisidir. TTGH'lar, elektrik şebekesine uzak, nüfus yoğunluğunun düşük olduğu yerleşim bölgelerinde, sağladığı ısı enerjiden elektrik enerjisi üretiminde alternatif bir sistem olarak son 25 yıldır kullanılmaktadır. TTGH'lardan elde edilen ısıнын düşük sıcaklıkta olması nedeniyle enerji dönüşüm veriminin düşük olmasına rağmen, yüksek güneşlenme oranı, tuz, su ve sızdırmaz bir zeminin bulunduğu ve klasik sistemlerle elektrik enerjisinin ulaştırılmasının pahalı olduğu yerleşim bölgelerinde, TTGH'lar dikkat çeken bir sistem olmaktadır. Bu tür uygulamalarda tercih edilmelerinin sebebi, basit bir teknoloji gerektirmesi, toplama ve depolama işlemlerinin her ikisini de aynı ortamda yapması nedeniyle diğer güneş enerjisi sistemlerine göre maliyetlerinin oldukça düşük olmasıdır [2,34,40,43].

TTGH'lardan elde edilecek olan ısı, konut ısıtmasında, soğutmasında, tuzlu su damıtmasında, tuz rafinerisinde, düşük sıcaklık gerektiren endüstriyel ve tarımsal proseslerde, yüksek sıcaklık gerektiren endüstriyel proses uygulamalarında ön ısıtma ısı kaynağı olarak kullanılabilir. TTGH'lar, düşük sıcaklık gerektiren işlemlerde geniş bir uygulama alanına ve ekonomik potansiyele sahip olan en ucuz güneş enerjisi dönüşüm sistemidir [1,3,35,44].

TTGH, deniz suyunun damıtılmasında geniş bir şekilde kullanılabilir. Deniz kıyısına yakın yerleşim yerlerinde içme suyu olarak tatlı su ihtiyacı oldukça fazla olacağından, bu bölgelerde geniş ölçekli damıtma tesisleri inşa edilerek günlük tatlı su ihtiyacı karşılanabilir. Bu uygulama, etrafı denizle çevrili ve tatlı su ihtiyacı oldukça fazla olan Arabistan, İsrail, Libya, Mısır, Japonya, Meksika gibi ülkelerde yapılmaktadır [34].

TTGH'ların maliyetini etkileyen önemli belli başlı parametreler; meteorolojik şartlar, çevresel etkiler, çözelti tipi ve miktarı, havuz tesisatının uygulama ömrü ve yoğunluk gradyeninin kararlılığını korumak için gerekli bakımıdır [4,18]

Ekonomik olarak TTGH'nin maliyeti, güneş kolektörü sistemlerinin beşte birine eşdeğerdir. TTGH'ların düşük maliyetli bir sistem olması, ekonomik yönden düz plakalı kolektör ile karşılaştırıldığında TTGH'ların uygulanabilirliğinin bir göstergesi olabilir [2,7].

Tuz gradyeninin oluşturulması, korunması, havuzdan ısı çekme, ısı depolama, rüzgarın neden olduğu olumsuzluklar, toplama verimi, TTGH'nin pratik olarak uygulamasında karşılaşılan özel problemlerdir [3]. Bu konuda yapılan bir çok çalışma sayesinde uygulamada karşılaşılabilecek bu tür problemlerin çözüm yolları ve yapılması gereken işlemler açıklığa kavuşturulmuştur. Bunlara dikkat edildiği takdirde, sistem problemsiz olarak uygulama amacı doğrultusunda verimli bir şekilde çalışabilecektir.

1.3. Türkiye Şartlarında TTGH'nin Uygulanabilirliği

TTGH'ların inşası için gerekli olan yüksek güneşlenme oranı, ucuz bir tuz, sızdırmaz sağlam bir zemin ve temiz bir su kaynağı açısından bakıldığında, ülkemizin bu yönden çok zengin olduğu görülür. Bu yüzden ülkemizde güneş havuzu teknolojisinin gelişmemesi için herhangi ciddi bir engel gözükmemektedir [1].

TTGH'lar için en önemli gereksinimlerden biri olan yüksek güneşlenme açısından ülkemizin güney bölgeleri çok iyi durumdadır. Örnek olarak, Akdeniz sahili boyunca günlük güneşlenme oranının yıllık ortalaması 8.7 saat, yıllık toplam güneş yoğunluğu ise 7 GJ/m²yıl'dır. Bu değerler, kuzey kıyılarımızda 4.5 saat ve 4.75 GJ/m²yıl olmaktadır. Bu sayısal değerler, güneş enerjisi dönüşümünden maksimum derecede faydalanan ülkelerle karşılaştırıldığında ülkemizin oldukça yüksek bir güneş potansiyeline sahip olduğu görülür [1,2].

Tuz maliyeti, TTGH uygulamalarında ilk yatırım maliyetinin % 10-20 arasında değişen miktarını oluşturması nedeniyle TTGH'ların ekonomikliği açısından oldukça önemli bir parametre olmaktadır. Türkiye, tuz rezervleri yönünden dünyada en zengin ülkelerden birisidir [1,2].

Ülkemizin denizlerle çevrili bir ülke olduğunu düşünürsek, ülkemizde TTGH teknolojisinin pratikte gelişimi için gerekli olan malzeme sınırsızdır. Buna rağmen, Türkiye'de pratik

olarak güneş havuzu konusunda yeterli şekilde çalışma yapılmamıştır. Optimum şartlarda, güneş havuzları Türkiye’de yıllık konut ısıtmasının % 50-80 dolayında miktarını karşılayabilir. 1 km² dolayındaki bir havuzun elektrik üretim kapasitesi, iklim ve çalışma şartlarına bağlı olarak, 4-22 MW arasında değişebilir. Tuz gölü, bir yıl zarfında 12500 km²’lik bir havuzun tuz gereksinimini sağlayabilecek kapasitededir. Böyle bir havuzdan da 50-275 GW/yıl elektrik üretimi sağlanabilir. TTGH’tan elektrik üretim maliyeti 1 kWh için ortalama 8 cent olmaktadır. Türkiye’nin toplam enerji tüketiminin % 44’ü ithal edilen yakıtlardan karşılanmakta olup, bu enerjinin %14’ü 90 °C altındaki düşük sıcaklık uygulamalarında tüketilmektedir. Bu nedenle, TTGH’lar, Türkiye şartlarında düşük dereceli ısıtma uygulamalarında çok uygun ve elverişli bir şekilde kullanılabilir [1,2].

TTGH teknolojisinin ülkemizde de diğer ülkelerdeki gibi gelişip uygulamaya geçilebilmesi için bu konuda farklı amaçlar doğrultusunda pratik ve teorik olarak çalışmaların yapılması gerekir. Literatüre bakıldığında diğer ülkelerde yapılan çalışmalar ile ülkemizde yapılan çalışmalar karşılaştırıldığında, ülkemizde bu konuda yapılan çalışmaların yetersiz olduğu görülür. TTGH uygulamasının yapılabilmesi için ülkemiz şartları dikkate alınarak bu konuda detaylı çalışmaların yapılması gerekmektedir. İsrail’de bu konuda yapılan Ölü Deniz projesi örnek alınarak, Tuz Gölü, Van Gölü gibi büyük göllerimizin TTGH özeliği açısından incelenmesi verimli bir çalışma programı olarak ülkemizde de TTGH uygulamasına geçişte başlangıç olabilir.

Yapılan bu çalışmayla, sodyum klorür tuzu içeren Tuz Gölü ve sodyum karbonat tuzu içeren Van Gölünden faydalanarak yapay TTGH teknolojisinin gelişimine katkıda bulunmak amaçlanmaktadır. Literatürde şu ana kadar TTGH’larda tuz yoğunluk gradyenini oluşturmak için daha çok sodyum klorür tuzu ile ilgili çalışmalar yapılmış olup, sodyum karbonat olarak bilinen soda tuzu ile ilgili yapılmış herhangi bir çalışmaya rastlanılamamıştır. Bu nedenle yapılan bu çalışma, literatüre soda tuzu ile oluşturulan tuz yoğunluk gradyenli TTGH’ların ısı depolama karakteristiği ile ilgili yeni ve önemli katkılar sağlayacaktır.

BÖLÜM 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Doğal Güneş Gölleri

İlk doğal güneş gölüne referans, bu yüzyılın başlarında Kalecsinsky tarafından keşfedilen Romanya'nın Karpat Dağları eteklerinde Transylvania bölgesinde (46° 35' K, 26° 6' D), derinliği 15 m, yüzey alanı 42.000 m² olan Medve Gölü'dür. Gölde yapılan ölçümlere göre; eylül ayında, gölün 1.32 m derinliğinde sıcaklığın 70 °C'ye kadar çıktığı, baharın başlangıcında ise 26 °C'ye kadar düştüğü görülmüştür. Bu yüksek sıcaklığa, güneşlenme oranının yüksek olduğu yaz aylarında, gölün çeşitli derinliklerinde güneş ışıınının soğurulmasıyla oluşan ısının, yine göl içinde doğal olarak bulunan tuz yoğunluk gradyeni tarafından taşınımıyla kaybının engellenmesiyle ulaşıldığı tespit edilmiştir. Kalecsinsky, yine ilk defa yoğunluğu derinliğin fonksiyonu olarak bu gölde ölçmüştür. Sodyum klorür (NaCl) tuzu içeren bu gölde, tuz konsantrasyonunun yüzeyde % 5, 1 m derinlikte ise % 24 olduğu görülmüştür [2-4].

Daha sonraki yıllarda, Rozsa adındaki bir araştırmacı yine Romanya'da bulunan Boran Gölü'nün mevsimsel sıcaklık değişimini ölçtüğünde, bu gölünde Medve Gölü yapısına benzer bir yapıda olduğunu tespit etmiştir. Ocak ayında göl yüzeyi buzla kaplı olmasına rağmen, sıcaklığın 1 m derinlikte 10 °C, 2 m derinlikte 23 °C civarında, temmuz ayında yüzey sıcaklığının 27 °C olduğu bir zamanda ise, 1 m derinlikte 40 °C, 2 m derinlikte 50 °C civarında sıcaklık değeri ölçülmüştür [6-7].

Bu keşiften sonra Anderson, Orovillve'de Washington State yakınlarında Orovillve'de bir gölde 2 m derinlikte yaz aylarında sıcaklığın 50 °C'ye kadar ulaştığını gözlemlemiştir [2,3].

Wilson ve Wellman, Antartika'da bulunan ve yüzey alanı 11.7 km², maksimum derinliği 66 m olan Vanda Gölünde, göl yüzeyinin buzla kaplı olmasına rağmen ve ortam sıcaklığının -20 °C olduğu bir zamanda, 65 m derinlikte sıcaklığın 25 °C olduğunu rapor etmişlerdir. Yine aynı bölgede bulunan ve yüzey alanı 5.94 km², derinliği 30 m civarında olan Bonney Gölü'nde aynı şartlarda, yaklaşık aynı sıcaklık artışı olduğu gözlemlenmiştir. Araştırmacılar bu olayı, sürekli rejimde bir boyutlu ısı geçişi problemi olarak ele almış ve yapmış oldukları ısı analizlerinde bu sıcaklık farkına, göllerdeki buz tabakasının mevsimlere

göre kısmi olarak erimesinden ve donmasından dolayı meydana gelen yoğunluk gradyeninin ve bu buz tabakasından geçen ışınların sebep olduğunu göstermişlerdir [2,3].

İsrail’de Sina Yarımadasındaki (Sinai Peninsula) Eliat Gölü’nde Cohen ve arkadaşları tarafından yapılan sıcaklık ve tuz konsantrasyon ölçümlerinde, göl yüzey sıcaklığının 38 °C olduğu bir zamanda, 3 m derinlikte 50 °C civarında sıcaklık değeri ölçülmüştür [5-7].

Kaliforniya’da bulunan Castle Gölü’nde sistematik olarak gerçekleştirilen ölçümler sonucunda, gölün 5 m derinliği ile yüzeyi arasında 20 °C sıcaklık farkı olduğu tespit edilmiştir [5-7].

En son keşiflerden biriside Hudec ve Sonnenfield tarafından Venezualla kıyıları yakınlarında Los Roques adasında bulunan tuzlu küçük sığ bir göl olan Pueblo Gölü’dür. Yapılan ölçümlerde, göl yüzey sıcaklığının sonbaharda 25 °C olduğu bir zamanda, 0.5 m derinlikte sıcaklığın 47 °C olduğu görülmüştür [2,7].

Yukarıda belirtilen doğal güneş göllerinden başka, A.B.D.’de bulunan Sıcak Göl (Hot Lake), Büyük Tuz Gölü (Great Salt Lake), Salton denizi ve Uganda’da bulunan Mahega Gölü’nün tuz tabakalı güneş havuzu özelliğine sahip olduğu rapor edilmektedir[5-7].

2.2. Yapay Güneş Havuzları

Yapay güneş havuzları konusundaki çalışmalar, 1950’lili yıllarda İsrail’de Ölü Deniz (Dead Sea) çalışma projesiyle başlanmış olup, ilk deneysel yapay güneş havuzu, İsrail’de 1959 yılında Ölü Deniz’in kıyısında tuz elde edilmesinde kullanılan 25x25x1 m boyutlarındaki eski bir havuzun güneş havuzuna çevrilmesiyle başlamıştır. Tuz konsantrasyonunun yapay olarak oluşturulduğu havuzda, yüzey sıcaklığının 28 °C ile 32 °C arasında değiştiği bir zamanda, 80 cm derinlikte 90 °C sıcaklık değeri ölçülmüştür. Havuz, yan duvarlarında meydana gelen çökmeler nedeniyle bir yıl sonra terkedilmiştir [12].

Daha sonraki yıllarda yine İsrail’de Hayfa yakınlarında bir tuz bataklığının üzerine 1375 m² yüzey alanına sahip ve 1.5 m derinliğinde daha büyük bir havuz daha inşa edilmiştir. Havuz zemininin sızdırmazlığının sağlanamaması nedeniyle havuz sıcaklığı 60 °C’ye kadar

çıkabilmiştir. İsrail’de yapılan bu çalışmalara, o yıllardaki petrol fiyatlarındaki artışlar nedeniyle genellikle düşük maliyetli güç üretmek amacıyla başlanmıştı. Güneş havuzlarından elde edilen yüksek sıcaklıktaki çözeltinin ısısından faydalanarak bir buhar türbini çevriminin çalıştırılması düşünülmüştür [46,47].

Assaf [46] İsrail’de bulunan Ölü Denizi büyük bir güneş havuzuna dönüştürmek amacıyla proje kapsamında bir program geliştirmiştir. Denizin büyüklüğü nedeniyle elde edilecek olan enerji büyük olacağından, deniz suyu damıtmasında ve güç üretiminde kullanılabilme potansiyeli oldukça yüksek olacaktır. Projenin Ölü Denize benzer göllere uygulamasının mümkün olması, yapılan çalışmanın önemini göstermektedir. Projenin temel fikri, su yüzeyine rüzgar kırıcılar yerleştirilerek göl üzerinde rüzgarın neden olduğu dalgalanmayı ve karışımı önlemek veya azaltmaktır. Rüzgar kırıcılar, su yüzeyinde yüzebilen 1 m’den küçük ve bir kaç cm yüksekliğinde ve kısmen suya batmış durumda olup, gemi demirleriyle göle yerleştirilebileceği önerilmektedir.

Tabor ve Doron [47], İsrail’de 1958 yılında başlayan güneş havuzu çalışmaları sonucunda elde edilen tecrübelerle dayalı olarak, devlet destekli 5 MW(e) elektrik üretimi yapan bir güneş havuzu güç tesisinden elde ettikleri gözlemleri sunmuşlardır. Havuz 1 km² yüzey alanına ve 5 m derinliğe sahip olup, yoğunluk gradyeni için gerekli olan çözelti Ölü Denizden sağlanmıştır. Havuzun depolama bölgesinden çekilen kullanılabilir ısı enerjisi, düşük sıcaklıklı Rankin çevrimi kullanılarak elektrik enerjisine dönüştürülmüştür.

İsrail’de başlayan ve gelişerek devam eden güneş havuzu konusundaki çalışmalar, zamanla diğer ülkelerinde ilgisini çekmeye başlamış, güneş havuzu teknolojisini geliştirmek ve uygulamaya geçmek amacıyla değişik amaçlı bir çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar; güneş havuzunun nasıl çalıştığını anlayabilmek için yapılan matematik modelleme, güneş havuzunun performansını teorik olarak analiz edilebilmek için yapılan simülasyon, havuzun performansını etkileyen parametrelerin deneysel olarak incelenmesi, güneş havuzunun en önemli problemi olan yoğunluk gradyeninin oluşturulması, korunması ve kararlılığının sağlanması ve havuz içinde güneş ışıınının soğurulması gibi konuları kapsamaktadır.

Güneş havuzlarının fiziksel davranışıyla ilgili ilk matematik modeli Weinberger [12] geliştirmiştir. Yapılan bu çalışma, güneş havuzu konusunda yapılan çalışmalara referans

olmuş, bir çok araştırmacının yapmış olduğu çalışmanın temelini oluşturmuştur. Hull [25], Akbarzadeh ve Ahmadi [48], Rubin ve arkadaşları [8] Weinberger'ın bu çalışmasını temel alarak, bu çalışmanın geçerliliğini incelemek amacıyla birer çalışma yapmışlardır.

Weinberger [12], taşınımlı bölgeleri olmayan, yüzeyden tabana kadar tuz yoğunluk gradyeni içeren bir güneş havuzunun matematik modelini yapmıştır. Taşınımlı bölgesi olmayan havuz modeli, ilk defa İsrail'de incelendiğinden literatürde bu tip havuzlara İsrail tipi güneş havuzları denilmektedir. Taşınımlı bölgesi olan güneş havuzu fikri ise, ilk defa Amerika'da ortaya çıktığından bu havuz tipine de A.B.D. tipi güneş havuzları denilmektedir. Weinberger [12], sulu çözeltilerin suyun optik özeliğini etkilemediğini ve çözeltinin fiziksel özelliklerinin sıcaklık ve konsantrasyonla değişmediğini kabul ederek havuz içindeki sıcaklık profilini, zamana bağlı bir boyutlu iç ısı üretimli ısı iletim denklemini çözerek bulmuştur. Ayrıca güneş havuzunun işlevini yapabilmesi için havuz içindeki yoğunluk gradyeninin korunması ve sürekliliğinin sağlanması gerektiğinden havuzun ısı kararlılığını incelemek ve havuz içindeki konsantrasyon dağılımını belirlemek amacıyla bir boyutlu kütle difüzyon denklemini havuzun kararlı ve sürekli rejim şartlarında çalıştığını kabul ederek analitik olarak çözmüştür. Yapılan çalışma sonucunda, derinlikle artan yoğunluk gradyeninin sadece taşınım ısı kaybını önlemek için yeterli olacağı, fakat havuz içinde zamanla oluşan ve büyüyerek devam eden salınımlı bir harekete mani olmak için büyük bir yoğunluk gradyeninin gerektiği, $MgCl_2$ tuzu kullanılarak oluşturulan yoğunluk gradyeninin, $NaCl$ tuzuna göre daha kararlı olduğu tespit edilmiştir.

Akbarzadeh ve Ahmadi [48], Weinberger'ın [12] önermiş olduğu matematik modeli kullanarak, İran şartlarında çalışan bir güneş havuzunun performansı üzerine bir bilgisayar modeli geliştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre; havuz depolama sıcaklığının $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar ulaşabileceği, güneş havuzunun günlük ve haftalık iklim şartlarının değişmesinden önemli bir şekilde etkilenmediği, hatta bir ay boyunca hava bulutlu olsa bile (ışınım minimum) havuz sıcaklığındaki düşüşün $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ dolayında olduğu görülmüştür. Bu sonuçlara göre, İran'ın güneyinde güneş havuzlarının güneş kollektörü olarak sıcak su üretiminde kullanılmasının oldukça uygun olacağı söylenmektedir.

Hull [25], tuz çözeltisinin yoğunluk, ısı kapasitesi, ısı iletim katsayısı gibi fiziksel parametrelerin sıcaklık ve konsantrasyonla değişmediğini, Weinberger'ın [12] kullanmış

olduğu matematik modeli temel alarak bir bilgisayar modeli geliştirmiştir. Güneş havuzunun ısı davranışı, ortam sıcaklığına, havuz yüzeyine gelen güneş ışınlamına ve havuzun ısı geçirgenliğine kuvvetli bir şekilde bağlı olduğu, fiziksel parametrelerin sabit kabul edilmesinin ısı davranışı çok fazla etkilemediği görülmüştür.

Rubin ve arkadaşları [8], güneş havuzunda depolanan ısıyı ve bu ısının havuzdan çekilmesini etkileyen fiziksel parametrelerin analizini yapan bir simülasyon prosedürü geliştirmişlerdir. Parametrik analizi basitleştirmek için havuz içinde gerçekleşen fiziksel olayların bir boyutlu olduğu düşünülmüştür. Havuz içindeki ısı transferinin simülasyonu, Weinberger'ın [12] önermiş olduğu iç ısı üretimli ısı iletim denklemi kullanılarak yapılmış ve sonlu farklar metoduyla nümerik olarak çözülerek havuz içindeki sıcaklık profili bulunmuştur.

Kamiuto [49], üst taşınımlı bölgesi olmayan taşınımsız güneş havuzlarının güneş enerjisini toplama verimini ve toplanan ışınlamın ısı enerjisine dönüşüm verimini teorik olarak incelemiştir. Havuz içindeki sıcaklık dağılımını, zamana bağlı bir boyutlu ve iç ısı üretimli ısı iletim denklemini kullanarak, sonlu farklar metodu yardımıyla nümerik olarak çözmüştür. Havuz depolama sıcaklığı 60 °C'ye kadar ulaşabilmiştir. Elde edilen sonuçlar, bu konuda daha önce yapılmış üst taşınımlı bölgesi olan güneş havuzlarından elde edilen sonuçlarla karşılaştırmış, ÜTB'si olmayan güneş havuzlarının ÜTB'si olan güneş havuzlarına göre toplama veriminin ve depolama sıcaklığının daha düşük olduğu görülmüştür.

Munoz ve Almanza [34], ısı ve kütle transferine dayalı teorik bir model kullanarak, güneş havuzu sıcaklık davranışının zamanın bir fonksiyonu olduğunu göstermişlerdir. Model, her bir bölgenin enerji dengesinden elde edilen kısmi diferansiyel denklemlerden oluşmaktadır. TZB için oluşturulan enerji dengesi denklemi, ÜTB ve ATB için oluşturulan enerji dengelerinden oluşan adi diferansiyel denklem sistemi ile birlikte çözülmüştür. Çözümde, TZB'de ısı difüzyonu ile, ÜTB'de ise ışınlam, buharlaşma ve taşınım ile ısı kaybı olduğu dikkate alınmıştır.

Esas olan güneş havuzunun performansını deneysel olarak incelemektir. Fakat deneysel çalışmanın pahalı olması ve çok zaman alması nedeniyle, genellikle havuzun simülasyonu

yapılmakta ve havuzu etkileyen parametreler incelenmektedir. Güneş havuzunun fiziğini daha iyi anlayabilmek için matematik modelinin yapılarak havuzun davranışının analiz edilmesi gerekir. Yapılan bu teorik analizler ve bilgisayar simülasyonu, alternatif yaklaşımlar sağlayarak güneş havuzu teknolojisinin gelişimine katkıda bulunmaktadır [15,17].

Kamal [17], Katar şartlarında 100 m^2 'den daha küçük havuzlar için yapmış olduğu parametrik çalışma sonucunda, optimum havuz derinliğinin 2 m olması, bu derinliğinde en az 1.5 m.'sinin TZB tabakasını oluşturması gerektiğini, küçük boyutlu havuzlarda depolama bölgesi kalınlığını artırmanın herhangi önemli bir depolama avantajı sağlamadığı, yaz aylarında yapılan uygulamalar için 0.5-0.75 m arasında değişen ince bir depolama bölgesinin ideal olabileceğini tespit etmiştir.

Al-Jamal ve Khashan [50], Ürdün şartlarında TTGH'ların performansını etkileyen değişik parametreleri belirlemek için bir matematik model geliştirmiş ve TTGH'ın optimum dizayn parametrelerini belirlemişlerdir. Çalışma sonucunda, TZB kalınlığının ATB sıcaklığı üzerinde önemli rol oynadığı, dolayısıyla optimum TZB kalınlığının 1 m dolayında olması gerektiği, ATB tabaka kalınlığının ise, TTGH'ın uygulamasına bağlı olarak maksimum ATB sıcaklığına ve uzun dönem enerji depolama şartlarına göre değişebileceği tespit edilmiştir.

Khalil [51], Ürdün şartlarında elektrik üretimi için güneş havuzunun kullanılma potansiyelini araştırmıştır. Güneş havuzu güç ünitesi modeli, havuzun düşük ve yüksek sıcaklıkları arasında çalışan ısı makinası gibi genel bir çevrim olan Rankin çevriminden oluşmaktadır. Güneş havuzunun ısıl karakteristiğini incelemek için bir boyutlu matematik model kullanılmıştır. Rankine çevriminin ısı kaynağı olarak havuzun ATB sıcaklığı belirlenmiş, buna göre güneş havuzu-Rankin çevrimi birleşik güç ünitesinin performansı incelenmiştir. Sonuç olarak, güneş havuzu ile Rankin çevriminin oluşturduğu birleşik güç ünitesi, Ürdün şartlarında elektrik üretimi için oldukça iyi bir potansiyele sahip olabileceği, sistemin büyüklüğünün ise iklim şartlarına, özellikle de havuz yüzeyine gelen güneş ışınlamına bağlı olarak değişebileceği görülmüştür.

Subhaker ve Murthy [29], doymuş güneş havuzunun performansını etkileyen ÜTB, TZB, ATB tabaka kalınlıkları, havuzda kullanılan tuz çeşidi ve tuz çözeltisinin termofiziksel

özellikleri, havuz tabanının yansıtıcılığı, taşınım, buharlaşma ve ısıtım ile olan ısı kayıpları ve havuzdan ısı çekme gibi parametreleri incelemişlerdir. TZB ve ATB tabaka kalınlıklarının artmasıyla ATB sıcaklığının arttığı, ÜTB kalınlığının artmasıyla ise havuz sıcaklık profilinin negatif yönde etkilendiği, havuzda kullanılan tuz çözeltisinin ısıtım geçirgen kabiliyetinin havuz performansı üzerinde önemli rol oynadığı, havuz yüzeyinden olan kayıplar arasında ısıtım ile olan ısı kaybının, taşınım ve buharlaşmayla olan kayıplara oranla daha etkili olduğu çalışmadan elde edilen sonuçlardır.

Lund ve Routti [52], kuzey Finlandiya'nın meteorolojik verilerini kullanarak yapmış oldukları bir bilgisayar simülasyonu ile yüksek enlemlerde ve soğuk iklimlerde konut ısıtması için TTGH'ların ısı performansını ve TTGH'ın inşaat fizibilitesi çalışmasını yapmışlardır. Soğuk iklimlerde ve yüksek enlemlerde güneşli ısıtmanın etkili bir şekilde uygulanabilmesi için mevsimsel depolama gerektiği, TZB ve ATB tabaka kalınlıklarının sıcaklık profiline etkisi, özellikle soğuk iklimlerde, mevsimsel ısı depolayabilmek ve havuzun performansını iyileştirebilmek için önemli olduğu söylenmektedir.

Shah ve arkadaşları [13], güneş enerjisini yıllık olarak toplayan ve depolayan bir sistem olan TTGH'ın dinamik bir bilgisayar modelini geliştirmişlerdir. Modelde, kısmen ısıya ihtiyaç duyan bir sera için kışın gerekli olan ısıya göre dizayn edilen 18.3x8.5x3 m boyutlarındaki güneş havuzundan elde edilen veriler kullanılmıştır. Yapılan modele göre, depolanan enerjiyi maksimum yapabilmek için optimum TZB kalınlığının 1 m, kış aylarında ise bu değerin 1 m'den daha fazla olması gerektiği, güneş havuzlarının uygulamada atmosfere açık olarak çalıştıklarından kış aylarında atmosfere olan kayıpların % 50-60 civarında olduğu, uzun dönem depolama yapabilmek için kış aylarında havuzun üzerinin bir izolasyon malzemesi ile kapatılarak atmosfere olan kayıpların azaltılabileceği önerilmektedir.

Kooi [53], diğer bir çalışmada TTGH'ı sürekli rejimde çalışan düz plakalı bir güneş kollektörü gibi düşünerek havuzun performansını analiz etmiştir. TZB'nin ince olması halinde taşınım ile olan ısı kaybının artacağı, büyük olduğunda ise ATB'ye ulaşacak olan ısıtım miktarının azalacağı düşünülerek, havuzu oluşturan tabaka kalınlıkları, havuzun verimi maksimum olacak şekilde ayarlanmıştır. Ayrıca havuz tamamen yalıtılmış kabul edilerek, alttan ve yanlardan olan ısı kayıpları ihmal edilmiştir. Sıcaklık dağılımı, sürekli

rejimde bir boyutlu ısı iletim denklemi çözülerek hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlardan, TTGH ile düz plakalı güneş kollektörü kıyaslandığında, güneş ışıyım şiddetinin yüksek olduğu günlerde kollektör veriminin, az olduğu günlerde ise havuz veriminin daha iyi olduğu görülmüştür. Yapılan çalışma neticesinde, havuzdan maksimum 55 °C sıcaklık elde edilmiştir.

Bir TTGH'nin performansını optimize etmek için bilgisayar simülasyonu üzerine yapılan parametrik çalışma oldukça ekonomiktir [48]. Batty ve arkadaşları [27], Alagao [54], Subhaker ve Murthy [35], Refaee ve Marafie [55], Hawlader ve Brinkworth [56], Joshi ve Kishore [57], Wang ve Akbarzadeh [15], tarafından yapılan çalışmalar bunlardan bir kaçıdır.

Wang ve Akbarzadeh [15], sürekli rejim şartlarında bir boyutlu bir matematik model geliştirerek güneş havuzunun ısı analizini yaparak, ÜTB ve TZB tabaka kalınlıklarının, zeminden olan ısı kayıpların ve havuz altındaki zeminin ısı özelliklerinin havuz performansına etkisini parametrik olarak incelemişlerdir. ÜTB tabaka kalınlığı azaldıkça, TZB tabaka kalınlığı ise arttıkça havuzun performansının arttığı görülmüştür.

Alagao [54], kapalı çevrim olarak çalışan bir TTGH'nin Wang ve Akbarzadeh [15] tarafından yapılan simülasyon modeline benzer bir boyutlu bir simülasyon modeli geliştirmiş ve güneş havuzunun zamana bağlı ısı davranışını incelemiştir. Modelde, ÜTB ve ATB tamamen taşınımli bir tabaka, TZB ise eşit kalınlıkta N tane tabakaya bölünmüş varsayılmıştır. Modelden elde edilen denklemler sonlu farklar metodu kullanılarak nümerik olarak çözülmüştür. Güneş havuzu içinde güneş ışıyımının soğurulması, Bryant ve Collbeck tarafından önerilen fonksiyon kullanılarak hesaplanmıştır. Havuz çalışmaya başladıktan bir ay sonra ATB sıcaklığı 70 °C'ye kadar ulaşabilmiştir.

Batty ve arkadaşları [27], optimum TZB kalınlığını belirlemek amacıyla yeni bir simülasyon modeli geliştirmişlerdir. Modelde, havuz N tane sonlu elemana bölünerek ÜTB ve ATB bölgeleri homojen bir eleman gibi düşünülmüş, TZB ise N-2 elemana bölünerek her bir eleman için ayrı ayrı hesaplama yapılmıştır. Havuzun performansındaki önemli düzeltilmelerin, TZB kalınlığının aylık, mevsimsel ve yıllık olarak ayarlanmasıyla sağlanabileceği, optimum tabaka kalınlığının yaz aylarında 72 cm dolayında, kış aylarında ise 86 cm dolayında değiştiği elde edilen sonuçlar arasındadır.

Subhaker ve Murthy [35], doymuş bir güneş havuzunun nümerik olarak ısı performansını incelemek amacıyla kütle ve enerji dengelerini lineer olmayan diferansiyel denklemlerle ifade ederek bir simülasyon modeli geliştirmişlerdir. Matematiksel olarak ifade edilen lineer olmayan bu diferansiyel denklemler uygun sonlu farklar metodunda yazılarak uygun sınır şartlarında nümerik olarak çözülmüştür. Modelde, ÜTB ve ATB tek tabaka olarak, TZB ise N tane eşit tabakaya bölünmüştür. Havuzda, çözünürlüğü sıcaklıkla artan $MgCl_2$ ve KNO_3 tuzları kullanıldığı kabul edilmiştir. Simülasyon sonucunda; $MgCl_2$ ile doymuş hale getirilen havuzdan maksimum 85 °C, KNO_3 ile doymuş hale getirilen havuzdan ise 80 °C depolama sıcaklığı elde edilmiştir.

Refae ve Marafie [55], TTGH'larının ısı performansını analiz etmek amacıyla etraflı bir hesaplama algoritması oluşturabilmek için bir boyutlu zamana bağlı matematik model geliştirmişlerdir. Model, zamanla parabolik olarak değişen kısmi diferansiyel denklemlerden oluşmaktadır. Bu denklemler, sonlu farklar tekniği kullanılarak Gauss-Seidel yaklaşımıyla nümerik olarak çözülmüştür. Modelden elde edilen sonuçlar, daha önce deneysel amaçlı kurulmuş 1740 m² yüzey alanlı bir güneş havuzundan elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmış, sonuçların çok fark olmamakla birlikte uyum içinde olduğu görülmüştür. Modelden 65 °C, deneysel çalışmadan ise 60 °C dolayında depolama sıcaklığı elde edilmiştir. Ayrıca, araştırmacılar optimum ATB ve TZB tabaka kalınlıklarını belirlemek için parametrik bir çalışma yapmışlar, optimum TZB tabaka kalınlığı için 1.3 m, ATB için ise 1.4 m değerlerini elde etmişlerdir.

Hawlader ve Brinkworth [56], İngiltere şartlarında taşınımsız güneş havuzlarının ısı davranışını incelemek için saatsel meteorolojik verileri kullanarak, temel enerji denklemlerini Crank-Nicholson yaklaşımıyla nümerik olarak çözmüşlerdir. Yapılan bu çalışmada, havuz sıcaklığının, güneş ışınımının su içinde soğurulma katsayısına ve havuzdan olan ısı kayıplara etkili bir şekilde bağlı olduğu görülmüştür. Havuz sıcaklığı bu değerlere bağlı olarak ortalama 80 °C olarak kaydedilmiştir.

Joshi ve Kishore [57], sürekli rejim şartlarında bir TTGH'nın ısı performansını, yapmış oldukları simulasyondan elde ettikleri sonuçlarla karşılaştırmışlardır. TTGH'ların sürekli rejim analizi ilk olarak Kooi [53] tarafından yapılmış, daha sonra Hawlader [26], Wang ve Akbarzadeh [15], Joshi ve Kishore [57], Tsilingiris [58] tarafından sürdürülmüştür. Sürekli

rejim denklemleri, güneş havuzlarının ısı performansını belirlemede analitik ve geçici rejim modellerine göre daha kolay ve daha hızlı bir yaklaşım sağladığı görülmüştür. Nümerik modelde, bir boyutlu zamana bağlı ısı iletim denklemi Crank-Nicolson yaklaşımıyla sonlu farklar formunda zamana bağlı üst ve alt sınır şartlarında çözülmüştür.

Antonopoulos ve Rogdakis [59], Atina ve Atina iklimine benzer iklimlerde yıl boyunca veya yılın belirli mevsimlerinde TTGH'dan maksimum faydalı ısı alabilmek için basit bir korelasyon geliştirmişlerdir. Korelasyon, sonlu farklar metodu kullanılarak güneş havuzunun zamana bağlı olarak çalışmasını saatlik olarak hesaplayan bir simülasyondan elde edilmiştir. Faydalı ısıyı maksimum yapan optimum TZB kalınlığı, havuzdan elde edilen depolama sıcaklığına ve havuz yüzeyine gelen ışıyım şiddetine göre her mevsim için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Styris ve arkadaşları [60], taşınımsız güneş havuzlarının ısıtma ve proses ısısı elde etmek amacıyla kullanılmasının ekonomik olarak uygunluğunu teorik olarak incelenmiştir. Konut ısıtması, tahıl kurutması ve kağıt endüstrisinde proses ısısı için gerekli havuz boyutları ve havuz maliyeti belirlenerek klasik ısı enerji kaynakları ile ekonomikliği karşılaştırılmıştır. Havuz maliyetinin kararlılık için gerekli olan tuz miktarıyla kontrol edilebileceği, ekonomik açıdan ise bazı klasik ısı enerji kaynaklarıyla rekabet edebileceği tespit edilmiştir.

Penian ve Hongfei [28], optimum verim ve depolama sıcaklığının maksimum olabilmesi için optimum TZB kalınlığını, havuza gelen güneş enerjisi ve havuzdan kaybolan ısı kayıplarını dikkate alarak hesaplamışlardır. ATB ile dış ortam arasındaki sıcaklık farkı büyüdükçe, TZB tabaka kalınlığının artması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Valov [61], güneş havuzunu ısı enerji depolama sistemi ile birleşmiş bir güneş kolektörü gibi düşünerek güneş havuzunun enerji karakteristiğini hesaplayan bir prosedür geliştirmiştir.

Wu ve Blank [40], güneş havuzunu ısı makinası gibi düşünerek elde edilebilecek enerjiyi termodinamik açıdan analiz etmişlerdir. Havuzdaki çözelti ısı makinasının çalışma akışkanı, havuz yüzeyine gelen güneş enerjisi giren ısıyı, ortam havası da ısının atıldığı ortam olarak kabul edilmiştir.

Beniwal ve arkadaşları [24], yalıtılmış ve yalıtılmamış TTGH'nun tabanından ve yan duvarlarından olan ısı kayıpları teorik bir yaklaşım ile incelemişlerdir. Havuzda yeterli miktarda yalıtım yapıldığı takdirde, uzun dönem ısı depolanabilmesi açısından yalıtımın oldukça etkili olduğu görülmüştür.

Lodhi [4], güneş havuzlarının değişik uygulama alanları için teknik ve ekonomik fizibilitesini yaparak, güneş havuzlarının ısı kaynağı olarak ve elektrik üretimi uygulamasında ekonomik olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

Fagbenle [16], TTGH'larının Nijerya gibi tropikal bölgelerde tarımsal alanda, endüstride, konut ısıtmasında, ticari alanda uygulamalarını teknik ve ekonomik olarak incelemiştir. Nijerya şartlarında kararlı bir güneş havuzunda optimum sıcaklık 86 °C dolayında olmuştur. Küçük ölçekli güneş havuzlarının, tarımsal ürünlerin kurutmasında ve endüstride proses ısısı elde etme uygulamalarında ekonomik olarak kullanılabileceği görülmüştür.

Tabor [3], havuzun performansına dayalı ekonomik analizini, maliyet hesabını ve güneş havuzlarının güç üretimi alanında uygulanabilirliğini incelemiştir. Güneş havuzlarının, konut ısıtmasında, soğutmasında, elektrik enerjisi üretiminde, tuzlu su damıtmasında ve tuz üretiminde ekonomik olarak kullanılabilir olduğu yapılan teorik analiz ile gösterilmiştir.

Hassab ve El-Masry [62], küçük ölçekli havuzlarda güneş enerjisinin toplanmasına yan duvarların gölge etkisini incelemişlerdir. Küçük ölçekli havuzlarda, sistemin ısı analizi yapılırken yan duvarların gölge etkisinin hesaba katılması gerektiğine dikkat çekmektedirler.

Meyer [63], ÜTB, TZB ve ATB bölgeleri arasındaki ara yüzey sınırlarının zamana bağlı tuzluluk ve sıcaklık profillerini belirleyen bir çalışma yapmıştır. Havuz tabanından yüzeyine doğru olan tuz difüzyonunun; zamanla ÜTB'nin tuzluluk oranını arttıracığından ÜTB ile TZB arasındaki sınırı aşağıya doğru hareket ettireceği, ATB alt sınırı ile üst sınırı arasındaki sıcaklık farkının neden olduğu doğal salınımların ise; TZB alt yüzeyini yukarıya doğru hareket ettireceğinden TZB tabaka kalınlığının zamanla azalacağı, TZB kalınlığının azalmasıyla da yalıtım görevinin bozulacağı ve ATB'de depolanan ısınn ÜTB'ye doğru daha hızlı kaybolacağı çalışmadan elde edilen sonuçlardır.

Kooi [64], doymuş güneş havuzunda havuz tabanının yansıtıcılığının havuz kararlılığına ve performansına etkisini araştırmıştır. Havuz tabanının yansıtıcı bir özeliğe sahip olması, güneş havuzunun performansını negatif yönde etkilediği, bu etkinin küçük boyutlu ve sığ havuzlarda daha da büyük olduğu tespit edilmiştir.

Hull [65], yansıtıcı bir tabana sahip güneş havuzunun ısı verimini belirleyen bir hesaplama prosedürü geliştirmiştir. Yapılan hesaplama sonucunda, havuz tabanının yansıtıcı bir yüzey olması havuz performansını önemli derecede düşürdüğü, bu düşüşün sığ havuzlarda daha etkili olduğu görülmüştür.

Hawlder [26], soğurma katsayısının güneş havuzu performansına etkisini, Kooi'nin [53] çalışmasını temel alarak bir boyutlu ısı difüzyon denklemini sürekli rejim şartlarında çözerek incelemiştir. Yapılan çalışmada, güneş havuzunun veriminin önemli bir şekilde soğurma katsayısından etkilendiği, soğurma katsayısı büyüdükçe havuzun veriminin düştüğü görülmüştür. Bundan dolayı da soğurma katsayısının güneş havuzlarının analizinde dikkate alınması gereken önemli bir parametre olduğu söylenmektedir.

Newell [66], TTGH performansını arttırmak amacıyla ATB ile TZB arasına bir bölge daha ekleyerek 4 bölgeli TTHG'ın performansını analiz etmek için tarafından yapılan simülasyona benzer bir simülasyon yapmıştır. Model güneş havuzu ile klasik bir TTGH'ın performansı arasındaki değişimi görebilmek için simülasyondan elde edilen sonuçlar, Hull [25], Akbarzadeh ve Ahmadi [48], tarafından yapılan simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Buna göre, haziran ayında model güneş havuzundan 85 °C sıcaklık elde edilirken, klasik TTGH'dan 65 °C gibi bir sıcaklık değeri elde edilebileceği görülmüştür.

Tsilingiris [58], havuzun sürekli rejim ve zamana bağlı performans analizlerini yaparak, bu iki analiz arasındaki farklılıkları araştırmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, iki analiz arasında pek fark olmadığı, değerlerin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Çalışma sonucunda, havuz dizaynı, havuzun çalışması ve iklim şartları sürekli rejim analizi hesaplarının doğruluğunu etkileyen parametreler olduğu sonucu elde edilmiştir.

Zangrando [30], kütle ve enerji dengesi, gradyen tabakasının oluşumu, kararlılığı ve korunması, havuzdan enerji çekimi, bölge ara yüzeylerinin hareketliliği ve havuz duvarının havuz performansına etkileyen hidrodinamik problemleri incelenmiştir.

Sherman ve Imberger [14], bir güneş havuzundan yıl boyunca başarılı bir şekilde yüksek sıcaklık elde edebilmek için havuzun kontrol stratejilerini incelemişlerdir. Bir güneş havuzunun başarılı bir şekilde çalışması için ATB'ye ulaşan ısı miktarını mümkün olduğunca maksimum yapmak gerektiğinden havuz içindeki çözeltinin temiz ve berrak olması, ATB'de depolanan ısının belirli aralıklarla çekilmesi, TZB içinde oluşan taşınım hareketlerinin önlenmesi, ÜTB'nin rüzgarın etkisiyle derinleşmesi ve gradyen bölgeye nüfus edici taşınım hareketlerinin oluşumunun kontrol edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Ücra yerleşim bölgelerinde küçük ölçekli elektrik üretmek amacıyla Avustralya'da test amaçlı 1600 m² yüzey alanına sahip bir güneş havuzu inşa etmişler, havuzda yukarıdaki şartları sağlayarak 3-4 ay gradyen kararlılığı problemiyle karşılaşmadan 85 °C dolayında ATB sıcaklığı elde etmişlerdir.

Zhang ve Wang [67], havuz zemininde zamana bağlı ısı enerji depolama kapasitesine, havuz parametrelerinin ve zemin özelliklerinin etkisini geliştirmiş oldukları simülasyonu nümerik olarak çözerek incelemişlerdir.

Chang ve Bannerot [68], güneş havuzunun zamana bağlı ısı performansını belirlemek amacıyla bir boyutlu bir matematik model oluşturmuştur. Modelde, bir boyutlu ısı difüzyon denklemini sonlu farklar metodu ile nümerik olarak çözülmüş ve havuzdan 70 °C dolayında sıcaklık elde edilmiştir.

Prasad ve Rao [69], TTGH'ların tabanının girintili olarak yapılmasının havuzda depolanan ısıyı arttıracak düşüncesiyle havuz zemininin ek bir ısı depolama ortamı olarak kullanılabileceğini ileri sürmüşlerdir. Bu fikir doğrultusunda, havuz zemininin düz, trapezoid ve dikdörtgensel biçimde şekillendirildiği varsayılarak farklı boyutlardaki bu çukurların havuz performansına etkisini teorik olarak incelemişlerdir. Trapezoid şeklindeki çukurlarda meydana gelen ısı transferi olayı fin kanatçıklı yüzeylerdeki ısı transferi olayına benzetilerek analiz edilmiştir. Depolama bölgesinden zemine olan ısı kayıpları, çukurlarda bulunan çözelti tarafından değerlendirildiğinden havuzun performansının arttığı söylenmektedir. Çalışma sonucunda, enerji depolanmasında dikdörtgensel çukurların, trapezoid çukurlara oranla daha etkin olduğu tespit edilmiştir.

Srinivasan ve Guha [20], havuz tabanında zamanla oluşan kirliliğin ve çözünmemiş tuz bulunmasının havuz performansına etkisini zamana bağlı matematik bir modeli nümerik olarak çözerek incelemişlerdir. Model, havuzu oluşturan her bir bölge için ayrı ayrı enerji dengeleri yazılarak elde edilen diferansiyel denklemlerden oluşmaktadır. Modelde TZB'deki sıcaklık profili, ATB'den TZB'ye iletimle olan ısı kaybının tahmin edilenden daha fazla olduğu düşünülerek quadratik olarak kabul edilmiştir. Çözümünden elde edilen sonuçlara göre, havuz tabanında çözünmemiş tuz bulunmasının havuz tabanı yansıtıcılığını arttırdığından havuz performansının düştüğü görülmüştür.

Al-Nimr [70], güneş ışıyım şiddetindeki ani değişimler nedeniyle TTGH'nin zamana bağlı ısı davranışını bir boyutlu bir modelle ifade etmiş ve Green's fonksiyonunu kullanarak elde ettiği kısmi diferansiyel denklemleri analitik olarak çözmüştür. Modelde, havuzdan çekilen faydalı ısı oranı, havuz performansı, havuz performansına farklı geometrik dizayn ve atmosferik parametrelerin etkisi incelenmiştir.

Folchitto [71], güneş havuzunun temel malzemesi olan tuz ve suyu denizden sağlayarak 1 km² bir güneş havuzu inşa etmek için bir metot önermiştir. Alternatif ve klasik enerji kaynaklarının enerji maliyetini, tuz ve su kaynağı olarak denizi kullanan bir güneş havuzunun maliyetiyle karşılaştırarak deniz kıyısında inşa edilen güneş havuzlarının hem diğer güneş enerjisi sistemlerinden hem de klasik enerji kaynaklarından daha ucuz olduğunu göstermiştir. Deniz suyunun tuz konsantrasyonu, güneş havuzu için gerekli olan tuz konsantrasyon değerinden daha düşüktür. Folchitto, bir çok deniz kıyısının yeterli güneş enerjisine ve deniz suyundaki tuz miktarını arttırabilecek yeterli buharlaşma sıcaklığına sahip olduğu, dolayısıyla deniz suyunun buharlaştırılmasıyla içerdiği tuz konsantrasyonu artacağından güneş havuzu için yeterli konsantrasyona sahip çözeltinin bu yolla elde edilebileceği önerilmektedir.

Srinivasan [42], 240 m² yüzey alanına sahip bir güneş havuzunun 5 yıllık çalışması sonucu elde ettiği sonuçları yorumlamıştır. Gradyenin erozyona uğraması ve iç taşınım bölgelerinin oluşmasına dikkat çekerek, gradyenin korunması ve muhafazası için havuz ortasına dikey olarak bir boru yerleşmiş ve borunun ATB bölgesi içinde kalan kısmı üzerine 5 cm çapında 8 adet delik delerek, üstten içerisine tuz konsantrasyonu yüksek çözelti eklemek suretiyle pasif tuz ekleme tekniğinin tabandan yüzeye doğru olan tuz difüzyonu için alternatif

olabileceğini göstermiştir. Ayrıca, havuzdan farklı teknikler ile ısı çekme metotları müzakere edilerek havuz tabanına bakır ısı eşanjörü yerleştirmek suretiyle havuzdan ısı çekme metodunun uygun ve kullanışlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Akbarzadeh ve Golding [72], havuz yan duvarlarının açılı olarak yapılmasının havuza gelen güneş ışınlamı ve havuz kararlılığı açısından etkisini deneysel olarak laboratuvar şartlarında incelemişlerdir. Havuzun yan duvarlarının açılı olması, duvar yüzeylerinin dik olmasına göre daha fazla ışınlama maruz kaldığından, yoğunluk gradyeni kararlılığının bozulmasına neden olan bölgesel taşınım hareketlerinin oluşmasına neden olduğu deney esnasında çekilen fotoğraflarla tespit edilmiştir.

Leshuk ve arkadaşları [18], taşınımsız güneş havuzlarının düzgün bir şekilde çalışması için gerekli olan tuzluluk gradyeninin uzun dönem muhafazası ve korunması için gerekli kriterleri belirlemek amacıyla laboratuvar şartlarında 61x50x30 cm boyutlarında küçük bir güneş havuzunda güneş havuzu kararlılığı hakkında deneysel bir çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda, havuz içinde zamanla oluşan bölgesel taşınım hareketlerinin başta büyük bir yoğunluk gradyeni oluşturmakla ve doğal tuz difüzyonu ile kontrol edilebileceği önerilmektedir. Havuzdan maksimum 76 °C depolama sıcaklığı ölçülmüştür.

Banat ve arkadaşları [22], güneş enerjisinin güneş havuzlarında depolanması ve depolanan bu enerjiden faydalanma yollarını araştırmak amacıyla 2x1x1 m. boyutlarında galvanizli yumuşak çelik plakalardan bir güneş havuzu inşa ederek deneysel bir çalışma yapmışlardır. Havuzda KCl, MgCl₂, 6H₂O ve NaCl tuzlarının karışımından oluşan ve İsrail'de Ölü Denizden elde edilen karnalite adı verilen bir tuz çeşidi kullanılmıştır. TTGH teknolojisinin gelişmesinde karşılaşılan problemleri belirlemek ve TTGH'ın pratik olarak uygulanabilirliğini göstermek amacıyla 16 hafta gibi bir zaman aralığında deneysel çalışma devam ettirilmiştir. Havuz yüzey sıcaklığının 20 °C, dış ortam sıcaklığının ise 25 °C olduğu bir zamanda havuzda maksimum depolama sıcaklığı 50 °C olarak ölçülmüştür.

Vitner ve arkadaşları [73], laboratuvar şartlarında doymuş güneş havuzlarının kararlılığını sistematik olarak incelemiş ve kendi kendine oluşan yoğunluk gradyenini etkileyen çalışma parametrelerini belirlemek amacıyla 30 cm çapında, 1 m derinliğinde plastik bir tankta potasyum alüminyum sülfat tuzu kullanarak deneysel bir çalışma yapmışlardır.

Newell ve arkadaşları [44], ABD’de Illinois Üniversitesinde mısır kurutma gibi düşük sıcaklık uygulamalarında kullanılmak amacıyla 2000 m² yüzey alanına ve 3 m derinliğindeki TTGH’nın konstrüksiyonu ve çalışma parametreleri üzerinde elde ettikleri sonuçları sunmuşlardır. Maksimum sıcaklık, eylül ayında 70 °C olarak ölçülmüştür.

Jubran ve arkadaşları [9], yan duvarları eğimli olan bir güneş havuzu içinde oluşan küçük ve bölgesel taşınım hareketlerinin oluşumunu etkileyen duvarların eğim açısı, duvar yüzeylerinin pürüzlülüğü, kullanılan tuz çeşidi gibi değişik parametreleri deneysel olarak incelemişlerdir. Duvar açıları 30°, 45°, 60°, 90°, tuz olarak sodyum klorür, potasyum nitrat, potasyum klorür, amonyum sülfat ve karnalite kullanılmıştır. Deneyde, yan duvarların eğiminin artması taşınım hareketinin oluşum aktivitesini azalttığı, taşınım hareketlerinin oluşumunun daha çok kullanılan tuzun çeşidine bağımlı olduğu, amonyum sülfat tuzunun sodyum klorür ve potasyum klorür tuzlarıyla karşılaştırıldığında taşınım hareketinin oluşumunu daha az etkilediği, yüzey pürüzlülüğünün ise taşınım hareketi aktivitesini azalttığı gözlemlenmiştir.

Pawar ve Chapgaon [74], 1x1x1.25 m. boyutlarında sac metalden yapılmış bir havuzda, yoğunluk gradyenini tarımsal gübre olarak kullanılan ve üre olarak bilinen NH₂CONH₂ tuzu ile oluşturarak havuzun sıcaklık ve yoğunluk profillerini incelemişlerdir. ÜTB ve ATB arasındaki tuzluluk farkı % 35 iken gradyen bölgesinde hiç bir kararsızlık olmadan ÜTB ile ATB arasında 23 °C’lik sıcaklık farkı elde edilmiştir.

Mehta ve arkadaşları [75], Hindistan şartlarında güneş havuzunun performansını analiz etmek amacıyla 1600 m² yüzey alanına ve 2.3 m derinliğe sahip bir güneş havuzu inşa etmişlerdir. Havuzun yoğunluk gradyeni deniz suyu kullanılarak oluşturulmuştur. Havuz içinde ışıının ilerlemesi, havuz içine yerleştirilen silikon güneş hücreleri ile ölçülmüş ve hesaplamalarda bu değerler kullanılmıştır. Sıcaklık, hareketli bir plaka üzerine yerleştirilen platin termistör sensörü ile 2.5, 5 ve 10 cm aralıklarla ölçülmüştür. Yoğunluk ise, 10 cm aralıklarla havuzdan vakumlu tüplerle çözelti alınarak laboratuarda ölçülmüştür. Ayrıca Kooi [53] tarafından yapılan sürekli rejim performans analiz modeli kullanılarak deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlarla model sonuçları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda model sonuçları ile deney sonuçları arasında % 8-10 dolayında farklılıklar olduğu görülmüştür.

Subhakar ve Murthy [76,77], daha önceki çalışmalarında geliştirmiş oldukları matematik model sonuçlarının geçerliliğini, deneysel olarak göstermek amacıyla magnezyum klorür tuzu kullanarak 1 m çapında 0.7 m derinliğinde paslanmaz çelikten dairesel bir güneş havuzu inşa etmişlerdir. Model sonuçlarıyla deneyden elde ettikleri sıcaklık profillerini karşılaştırdıklarında sonuçların uyum içinde olduğu görülmüştür. Havuz yüzey sıcaklığı 30 °C olduğu bir zamanda, depolama sıcaklığı 55 °C olarak ölçülmüştür.

Kanayama ve arkadaşları [19], 44 m çapında ve 3 m derinliğindeki bir havuzdan elde edilen deneysel sıcaklık ve konsantrasyon profillerinin geçerliliğini yaptıkları simülasyon hesaplamalarından elde edilen sıcaklık ve konsantrasyon profilleriyle karşılaştırarak göstermişlerdir. Simülasyonda, TZB 15 eşit tabakaya bölünerek, bu bölgede sadece ısı iletimiyle ısı transferi gerçekliği varsayılmıştır. ÜTB ve ATB'deki sıcaklık ve yoğunluk değerleri, tabaka kalınlığı boyunca sabit olarak kabul edilmiştir. Yapılan bu kabuller sonrasında, havuzdan eylül ayında 70 °C civarında depolama sıcaklığı elde edilmiştir.

Akoshile [78], 28 cm derinliğinde kilden yapılmış hiperbolik bir testiyi deney havuzu olarak kullanarak doğal bir deneysel çalışma yapmıştır. Havuzun iç yüzeyi siyaha boyanarak, deneyde sırasıyla su, NaCl ve MgCl₂ çözeltileri kullanılmıştır. NaCl çözeltili havuzda 20 cm derinlikte yüzey ile taban arasındaki sıcaklık farkı 20 °C olarak ölçülmüştür. Yapılan deneysel çalışma tamamen doğal şartlar altında yapılmış olması nedeniyle, sonuçların doğal güneş göllerinden elde edilen sıcaklık değerlerine yakın değer olduğu görülmüştür.

Alagao ve arkadaşları [79], 5 m çapında ve 1 m derinliğinde silindirik bir havuzu bir inşaatın çatısına inşa ederek havuzun çalışma karakteristiğini ve yapmış oldukları sürekli rejim analizinin geçerliliğini incelemişlerdir. Havuzdan kasım ayında yüzey sıcaklığı 20 °C iken maksimum 70 °C civarında depolama sıcaklığı ölçülmüştür.

Zhang ve Nielsen [80], laboratuvar şartlarında 1.2 m derinliğinde 0.75 m. çapında plastik bir güneş havuzunda, ÜTB'ye tuzluluğun ve hava sıcaklığı değişiminin etkisini incelemişlerdir. ÜTB'deki tuzluluk oranının artmasıyla ÜTB-TZB sınırının TZB'ye doğru ilerlediği, dolayısıyla ÜTB kalınlığının artmakta olduğu TZB kalınlığının ise azalmakta olduğu tesbit edilmiştir. Ortam sıcaklığındaki günlük değişimlerin ise, ÜTB üzerinde çok etkili olmadığı gözlemlenmiştir.

Keren ve arkadaşları [81], TTGH'nın performansını arttırmak amacıyla TTGH'ın ara taşınımsız bölgesi ile alt taşınımlı bölgesi arasına “stratified flowing” tabakası olarak adlandırılan ek bir tabaka ekleyerek yeni bir TTGH modeli geliştirmişlerdir. Model havuzun TTGH'a göre farkı, havuzun toplam tuzluluk oranının artmasıdır. Böylece tabandan yüzeye doğru olan tuz difüzyonu ile yüzeydeki tuzluluk oranı artacak ve havuzun ÜTB'sinden atmosfere olan buharlaşma ısı kaybı azalacaktır. Eklenen bu yeni tabaka ATB üstündeki sıcaklık gradyenini azaltacağından iletimle olan ısı kaybı azalacak ve ATB depolanan ısı artacaktır. Keren ve arkadaşları, bu amaçla 916x600x162 cm boyutlarında betondan bir güneş havuzu inşa ederek laboratuvar şartlarında havuzun performansını incelemişlerdir. Çalışmada, güneş ışınımı yerine 10x1000 W'lık metal halide lambalar kullanılarak dizayn edilen simülatör kullanılmıştır. Tuz yoğunluk gradyeni, $MgCl_2$ tuzu kullanılarak oluşturulmuştur. Deneyde, 24 saat ısıtma periyodu, 12 saat soğuma periyodu olarak düşünülmüş ve havuz 24 saat ışıma, 12 saat karanlığa maruz bırakılmıştır. Bu şartlar altında, havuzdan yaklaşık 75 °C sıcaklık elde edilmiştir. Klasik TTGH ile önerilen yeni havuz modeli karşılaştırıldığında, yeni havuz modelinin havuz performansını düzelttiği görülmüştür.

Ülkemizde ise güneş havuzlarıyla ilgili ilk bilimsel araştırma Kayalı [82] tarafından 1979 yılında Çukurova Üniversitesinde 4.5x4.5x1.5 m boyutlarında deneme amaçlı bir tuz tabakalı güneş havuzu inşa edilerek başlatılmıştır. Bu deneme havuzundan elde edilen sonuçlara göre; havuzun veriminin %16 dolayında, havuzun metre karesinden yılda alınacak enerji miktarının 35 kg fuel-oile eşdeğer olduğu, düzlemsel kollektörler ile karşılaştırıldığında metre kare başına maliyetinin 2.5 kat daha az olduğu, hiçbir önlem alınmadığı takdirde yoğunluk gradyeninin yaz mevsimlerinde 2-3 ay, kış mevsimlerinde 4-5 ay sonra tamamen bozulduğu görülmüştür. Bu nedenle, havuzda yoğunluk gradyeninin uzun süre bozulmadan korunmasını sağlayacak düzeneklerin geliştirilmesi gerektiği tespit edilmiştir. Ayrıca deneysel çalışmanın yanısıra aynı havuzun matematik modeli yapılarak elde edilen sonuçlar deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Havuzun çalışması yaklaşık 7-8 ay boyunca gözlemlenmiş ve 60 °C dolayında depolama sıcaklığı elde edilmiştir. Bu deneme havuzundan kazanılan tecrübeler ve deneyimlerden yararlanılarak, bu konudaki çalışmalar daha sonraki yıllarda değişik araştırmacılar tarafından Çukurova Üniversitesinde devam ettirilmiştir.

Ünal ve arkadaşları [83], Çukurova Bölgesi'nde uygulanabilir boyutlarda bir güneş havuzunun performansını deneysel ve teorik olarak belirlemek amacıyla Tübitak ve Çukurova Üniversitesi destekli bir proje gerçekleştirmişlerdir. İlk olarak Çukurova Üniversitesi Kampüsünde 10x10x2.5 m boyutlarında betondan yalıtımsız bir güneş havuzu inşa etmişlerdir. Havuzda akışkan olarak, NaCl tuzlu çözelti kullanılmıştır. Havuzda, yaklaşık bir yıl boyunca sıcaklık ve yoğunluk ölçümleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar yapılan bir boyutlu matematik model sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Model, havuzu oluşturan her bölge için ayrı ayrı yazılan enerji denge denklemlerinden oluşmaktadır. Maksimum deneysel ve model sıcaklık değerleri Ağustos ayında 64 °C ve 70 °C olarak elde edilmiştir. Çalışma sonucunda, güneş havuzlarının uygulamada Çukurova Bölgesi gibi güneşlenme oranı yüksek bölgelerde alternatif ve ekonomik bir enerji sistemi olabileceği görülmüştür.

Göktun [84], 5 mm kalınlığında saydam pleksiglas malzemeden 29x19x24 cm boyutlarında bir güneş havuzu inşa ederek, güneş havuzlarında güneş enerjisinin depolanması olayını incelemiştir. Ayrıca, teorik olarak yapılan taşınımsız ara bölgenin kararlılık koşullarının geçerliliği deneysel olarak araştırılmıştır. Deneylerde akışkan olarak, potasyum nitrat (KNO_3) tuzuyla elde edilen çeşitli konsantrasyonlardaki çözeltiler kullanılmıştır. Deneyler laboratuvar şartlarında, güneş ışıınımı yerine 1000 W'lık tungsten halojen quartz lamba kullanılarak devamlı ve periyodik olarak ışıınıma maruz bırakılarak yapılmıştır. TZB'nin kararlılığının sağlanabilmesi, başlangıçta havuz yüzeyi ile dibi arasında en az 100 kg/m^3 'lük bir konsantrasyon farkının tesis edilmesine bağlı olduğu tespit edilmiştir. Havuzdan yaklaşık 90 saat sonra 65-70 °C dolayında depolama sıcaklığı ölçülmüştür.

Taşdemiroğlu [2], güneş havuzu konusunda dünyadaki gelişmeleri gözden geçirerek Ülkemiz açısından güneş havuzlarının uygulanabilirliğini araştırmıştır. Güneş havuzunun temel maddelerinden güneş ve tuz yönünden oldukça zengin olan Ülkemizde bu konuda yeterli çalışmanın yapılmadığı, özellikle Tuz Gölü'nün bu yönden incelenmesi gerektiğini söylemektedir.

TTGH, yapılan çalışmalar sayesinde oldukça geniş ve gelişmiş bir teknolojiye sahip olmasına rağmen, havuz içinde yoğunluk gradyeninin oluşturulması, kararsızlığı ve korunarak sürekliliğinin sağlanması gibi problemlere sahiptir [12,38,76]. Bu problem, bir çok araştırmacıyı güneş havuzunda yoğunluk gradyeninin görevini yapabilecek yeni

teknolojilerin geliştirilmesine yöneltmiştir. Bu konuda, Taga ve arkadaşları [21] havuz çatısı çift tabakalı şeffaf bir örtü ile kaplı tuzsuz güneş havuzunun uygulanabilirliğini ve performansını incelemişlerdir. TTGH'lar genellikle uzun dönem enerji depolama için avantajlı olurken, tuzsuz güneş havuzlarında havuz suyu sıcaklığı çok hızlı bir şekilde yükseldiğinden bu tip havuzların kısa dönem enerji depolama için daha uygun olduğu tespit edilmiştir. Uygulanabilir şartlarda yapılan kabuller altında, maksimum havuz suyu sıcaklığı 80 °C'ye kadar çıkmıştır.

Wilkins [38], TTGH teknolojisinin sahip olduğu problemlerin üstesinden gelecek jel tabakalı güneş havuzu olarak adlandırılan yeni bir havuz modeli geliştirmiştir. Modelde, tuz yoğunluk gradyeni yerine %98.3 su ve %1.7 poliakrilikten oluşan jel (gel) tabakası kullanılmıştır. Jel tabakası, depolama bölgesi üzerinde yüzmekte ve taşınımsız ara bölgenin görevini yapmaktadır. Jel tabakasının yüzmesini sağlamak için depolama bölgesi %2 ile %7 arasında değişen tuz çözeltisi ile doldurulmuştur. Böyle bir havuz modeli; rüzgarın ve buharlaşmanın havuz yüzeyindeki etkisini önemli derecede düşürmekte, havuz yüzeyinde iletimle olan ısı transferini elimine etmekte, gradyen kararsızlığını ve havuzdan ısı çekme esnasında meydana gelen kararsızlıkları ortadan kaldırmaktadır. Wilkins, bir fabrikanın ısı ihtiyacını karşılamak amacıyla 400 m² yüzey alanına, 60 cm jel tabakasıyla birlikte 5 m derinliğe sahip bir jel tabakalı güneş havuzu inşa etmiştir. Havuz çalışmaya başladıktan bir yıl sonra 60 °C sıcaklık elde edilmiştir. Jel tabakalı güneş havuzu konusundaki çalışmalar, Wilkins ve Lee [37] tarafından devam ettirilerek jel havuzu teknolojisinin geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Bir başka farklı havuz modeli olan bal peteği güneş havuzu (honeycomb) fikri, Schaefer ve Lowrey [39] tarafından ortaya atılmıştır. Havuz, yüzeyinde yüzen yarı saydam plastik bir yapıya sahip ve uzun dalga boylu ışıınımı geçirmeyen bal peteğine benzer bir örtü ile kaplıdır. Schaefer ve Lowrey, bal peteği örtüsünün ışıınım geçirgenliği, ışıınıma, taşınıma ve iletime göre ısı kayıplar ve örtü hücreleri içindeki taşınım kararlılığını dikkate alarak bal peteği güneş havuzunun ısı performansını hesaplayan bir simülasyon yapmışlardır. Simülasyondan elde edilen sonuçlara göre, bal peteği havuzunun performansı TTGH'lara göre yaklaşık yüzde yüz artmıştır.

Sharma ve Kaushika [85], bal peteği güneş havuzunun dizayn ve performans karakteristiklerini incelemişlerdir. Uygun bir şekilde dizayn edildiği takdirde, klasik TTGH'lara göre bal peteği güneş havuzu veriminin iki katına kadar çıkabileceği tespit edilmiştir.

Gonzalez ve arkadaşları [36], siyaha boyanmış su ceketini ile sığ güneş havuzlarının performansını belirleyen bir matematik model yapmışlardır. Sığ güneş havuzları, ısıtma ve su depolamak için kullanılan güneş kolektörleridir. Temel parçaları, esnek bir malzemeden yapılmış su ceketini, şeffaf bir örtü, yanal destekler ve yalıtılmış zemindir. Araştırmacılar, ayrıca matematik model sonuçlarıyla karşılaştırma yapmak amacıyla, 8x5 m boyutlarında güneş ışınlamını soğurma oranı % 91 olan özel bir malzemeden yapılmış iki siyah su ceketine sahip bir havuzda deneysel çalışma yapmışlar ve havuzdan yaklaşık 46 °C sıcaklık elde etmişlerdir.

Giestas ve arkadaşları [10], TZB'de güneş enerjisinin soğurulduğunu dikkate alarak, bir güneş havuzunun gradyen bölgesinin kararlılığını analiz etmiştir. Güneş ışınlamının havuz içinde geçtiği yol boyunca soğurulması lineer olmayan sıcaklık profilinin oluşumuna neden olur. TZB'de ışınlamın soğurulmasıyla ısı üretiminin olduğu düşünülerek yapılan bu analizde sınır şartları daha az sınırlayıcı olmakta ve taşınım hareketini önlemek için daha az tuz gerekmektedir. Gradyenin lineer ve lineer olmayan kararlılık analizleri yapılarak, sonuçların birbirleriyle uyum içinde olduğu görülmüştür.

Viskanta ve Toor [43], ışınlamın su tarafından soğurulmasını, yayılmasını, havuz tabanından ve su yüzeyinden yansımalarını dikkate alarak ve ışınlam transferi teorisini kullanarak güneş havuzu içinde, güneş ışınlamın soğurulmasının bölgesel oranlarını tahmin eden bir analiz yapmışlardır.

Çengel ve Özışık [41], güneş havuzu içindeki katmerli yansımaların etkisini dikkate alarak havuz içinde ışınlamın soğurulmasını dört banda ayırarak dördüncü dereceden polinomial bir denklemle ifade ederek hesaplanabileceği yeni bir soğurma modeli önermişlerdir. Ayrıca havuz tabanı yansıtıcılığının, havuz derinliğinin, ışınlam çeşidinin havuzun ısı performansına etkisini, deneysel olarak 8x30x1.35 m boyutlarında bir güneş havuzunda yapılan ölçümlerle destekleyerek incelemişlerdir. Kooi [64], ve Hull [65], havuz tabanı yansıtıcılığının artmasıyla havuz performansının lineer olarak azalacağı sonucuna varırken,

Çengel ve Özişik [41], havuz tabanı yansıtıcılığının artmasıyla depolama bölgesinde soğurulan enerjinin artacağı sonucuna varmışlardır. Havuz tabanında bulunan kirliliğin havuz performansını esas itibariyle etkilemediği, çözünmemiş tuz bulunması ise depolama sıcaklığını ve ısı çekme verimini düşürdüğü, kısmen yansıtıcılığı yüksek bir taban kullanmak havuzun ısı verimini arttıracakı tespit edilen sonuçlar arasındadır.

Lund ve Keinonen [32], farklı çözeltilerin soğurma katsayısını ve ışıyım geçirgenliğini, derinliğin fonksiyonu olarak küçük bir laboratuvar havuzunda ölçmüşlerdir. Deneyde ışıyım kaynağı olarak Thorn CSI 1000 W iyotlu lamba kullanılmıştır. Işıyım şiddeti, havuz içinde farklı derinliklere yerleştirilmiş olan silikon güneş hücreleriyle ölçülmüştür. Güneş havuzu içinde ışıyımın ilerlemesi ve soğurulması basit eksponensiyel bir fonksiyon ile hesaplanmıştır. Lund ve Keinonen, özellikle kış aylarında düşük ışıyım şiddetine sahip ve mevsimsel depolama gerektiren durumlarda, tuz seçiminin oldukça önemli olduğunu söylemektedirler.

Tsilingiris [33], güneş ışıyımının havuz içinde ilerlemesini ve soğurulmasını tuzluluk gradyeninin hissedilebilir bir şekilde azaltarak etkilediğini Beer Kanununa dayalı yaklaşımla nümerik olarak göstermiştir.

Wang ve Yagoobi [86], su içerisinde güneş ışıyımının ilerlemesine, bulanıklığın ve tuz konsantrasyonunun etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Tuz konsantrasyonunun etkisi, derinliğin fonksiyonu olarak havuz içine yerleştirilmiş bir pironometre ile ölçülmüştür. Deney sonuçlarına göre, tuz konsantrasyonunun su içerisinde güneş ışıyımının ilerlemesini önemli derecede etkilemediği, bulanıklığın ise suyun ışıyım geçirgenliğini önemli derecede zayıflattığı görülmüştür.

Kanayama ve Baba [87], tatlı suyun ve tuz konsantrasyonu % 5-20 arasında değişen sodyum klorür tuzu içeren çözeltilerin ışıyım geçirgenliğini belirlemek amacıyla, laboratuvar şartlarında tungsten bir lambayı ışık kaynağı olarak kullanarak deneysel bir çalışma yapmışlardır. Ölçümlerden elde edilen sonuçlara göre, ışıyım geçirgenliğinin çözelti içerisindeki tuz konsantrasyonun artmasıyla arttığı görülmüştür.

BÖLÜM 3. TUZ TABAKALI GÜNEŞ HAVUZLARININ FİZİKSEL ÖZELİKLERİ

3.1. Güneş Işınımının Su İçerisinde Soğurulması

Yatay düzleme gelen güneş ışınımı; enleme, yılın günlerine, günün zamanına ve atmosferik şartlara bağlı olarak değişiklik gösterir. Direkt ve yayılı olarak yeryüzüne gelen ışınım, morötesi (ultraviyole), kızılötesi (enfraruj) ve görülebilen ışınım olarak değişik dalga boylarında bir spektrum içermektedir [12,88].

Sıvıların güneş ışınımını soğurması, katı ve gazların soğurmasından farklı bir özellik gösterir. Su görülebilen ışınları geçirebilen, fakat kızılötesi ışınları geçirmeyen bir maddedir [3,4,16,25,26]. Güneş ışınımının su içerisinde soğurulması, güçlü bir şekilde dalga boyuna bağlıdır. Işınımın dalga boyu küçüldükçe, su tabakası içerisinde daha derinlere ulaşarak soğurulabilmektedir. Bu yüzden, havuz yüzeyine gelen güneş ışınımının spektral dağılımının bilinmesi, havuz içerisinde soğurulan ışınım miktarını belirlemede önemli bir parametre olmaktadır [26,41,56].

Su seçici bir soğurucu olmasına rağmen, aynı zamanda ışınımı yayıcı bir özeliğe sahiptir [33,41,43,62]. Bir su kütesine yüzeyinden giren ışınım, su içerisinde soğurularak, su içerisinde bulunan asılı parçacıklar tarafından yayılarak ve saçılarak su tabakasının derinliklerine doğru ilerler [3,16,56]. Yayılmaya, su içerisindeki şeffaf organizmalar, asılı partiküller ile su molekülleri neden olur. Su içerisinde bulunan çözünmemiş tuz, askıda kalan partiküller, biyolojik maddeler ve bulanıklık gibi faktörler ışınımın su içerisinde ilerlemesini, şiddetini, miktarını azaltarak engeller ve aynı zamanda yayılmasına neden olur. Temiz ve berrak doğal bir su kütlesi içerisinde, su moleküllerinin neden olduğu yayılma ve saçılma toplam yayılmanın % 7'si kadardır. Bu nedenle, su içerisindeki yayılma ve saçılma daha çok şeffaf biyolojik organizmalar ve asılı partiküller tarafından olmaktadır [26,41,62].

Soğurulma, ışınımı direkt olarak ısı enerjisine çeviren bir prosestir. Işınımın su içerisinde soğurulması, suyun yoğunluğuna bağımlı değildir. Bu nedenle, farklı konsantrasyonlardaki tabakalardan oluşan güneş havuzları içerisinde gerçekleşen soğurulma olayı, su içerisindeki soğurulmadan farklı değildir. [89].

Güneş spektrumunun kısa ve orta dalga boylu kısmı olan görülebilen ışınım, havuz içerisinde geçtiği yol boyunca soğurularak, yayılarak ve saçılarak havuz tabanına kadar ulaşır. Spektrumun uzun dalga boylu kısmı olan kızılötesi ışınım ise, suyun moleküler yapısından dolayı yüzeyde birkaç cm'lik ince bir tabaka tarafından soğurularak, havuz yüzeyinden taşınım, buharlaşma ve ışınım yoluyla atmosfere ısı kaybı olarak kaybolur. Bu enerjinin havuz yüzeyinden ortama ısı kayıp olarak kaybolması önlenemediği takdirde, depolama bölgesi sıcaklığının daha hızlı artmasına yardımcı olunabilir [3,4,16,25,26].

Havuz yüzeyine direkt ve yayılı olarak gelen ışınımın bir kısmı havuz yüzeyinden yansiyacak, geri kalan kısmı da havuz içerisine doğru ilerleyecektir. Havuz yüzeyine gelen ışınımın % 2-6 arasındaki kısmı su yüzeyinin yansıtma özeliği nedeniyle yüzeyden yansır, geriye kalan % 94-98'lik kısmı ise havuz içerisine doğru ilerler. Bu ışınımın % 20 dolayındaki miktarı ise, havuz içerisinde 1.2 m derinliğe kadar ulaşabilmektedir [34].

Havuz yüzeyine gelen güneş ışınımının, % 23.7'si 0.2-0.6 μm , % 19.3'ü 0.6-0.73 μm , % 57'si 0.75-1.2 μm dalga boyunda olup, bu oran spektrumun kızıl ötesi kısmına tekabül etmektedir. [81]. Kızılötesi ışınım, havuz yüzeyinde ince bir tabaka tarafından soğurulması nedeniyle havuzun verimine bir katkı sağlamamaktadır. Işınımın dalga boyu küçüldükçe, havuz içerisinde daha derinlere gidebilmekte ve havuzun depolama bölgesinde toplanarak ısı enerjisi formunda depolanabilmektedir. Buna göre, güneş ışınımı spektrumunun dalga boyu dağılımına bakıldığında, güneş ışınlarının yaklaşık yarısı güneş havuzları için faydasız ışınım olmaktadır.

Havuz içerisinde herhangi bir noktaya ulaşan ışınım miktarı, güneşin pozisyonu, günün zamanı, havuzun yerleşimi, havuz içerisinde ışınımın hareket mesafesi, ışınımın dalga boyu, havuzda kullanılan tuz çözeltisi çeşidi, çözeltinin sıcaklığı, çözeltinin konsantrasyonu, çözelti içindeki şeffaf biyolojik organizmalar ve asılı partiküller gibi bir çok parametreye bağlı olarak değişim gösterir [5,35].

Güneş havuzunun derinliği boyunca ışınım geçirgenliği, havuzun performansını hissedilebilir derecede etkilemekte ve şartlara bağlı olarak önemli miktarda değiştirebilmektedir [15,89]. Bu nedenle, havuzun depolama bölgesine ulaşan ışınım miktarı, havuzun performansı açısından önemli bir parametre olmaktadır. Havuz tabanına

kadar ulaşan ışıınım enerjisi, havuzdaki çözeltinin berraklığına ve ışıının önemli bir kısmının havuz yüzeyinde soğurulmasına ve havuz derinliğine bağılı olarak azalır. Havuz derinliğinin artmasıyla depolama bölgesine ulaşacak olan ışıınım miktarı azalacaktır. Havuz tabanında soğurulacak ışıınım miktarı, havuz tabanı siyaha boyanarak ve havuzun derinliği sınırlandırılarak artırılabilir [24].

İşıının havuzu içerisinde soğurulması modellenirken, çözelti içindeki yansımalar, saçılmalar ve ışıının yön olarak dağılımı ihmal edilebilir. Havuz içerisinde ışıının soğurulmasını tam olarak anlayabilmek için, sığ havuzların fiziksel özelliklerini ifade eden daha gerçekçi bir model yapmak gerekir. Güvenilir bir tahmin metodu geliştirmek, havuz içerisinde güneş enerjisi depolama işleminin fiziksel olarak daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunacaktır [43].

Havuzun farklı derinliklerinde çözelti tarafından soğurulan ışıınım miktarının doğru olarak bilinmesi, enerji denkleminin çözümünde ve havuz içerisindeki zamana bağılı sıcaklığın belirlenmesinde önemli rol oynar. Bu nedenle, havuz içerisinde ışıının soğurulması ile ilgili olarak bir çok çalışma yapılarak bir çok yaklaşım ve formülasyon geliştirilmiştir. Genel olarak, bir su tabakası içerisindeki soğurulma olayı derinliğin fonksiyonu olarak,

$$I(x) = I_s \sum_{i=1}^n \eta_i e^{-\mu_i z} \quad (3.1)$$

şeklinde ifade edilebilir [5,25,82]. Denklemden, $I(x)$; x derinliğinde soğurulan ışıınım miktarını (W/m^2), I_s ; havuz yüzeyine gelen ışıınım şiddetini (W/m^2) μ_i ; spektrumun i 'nci kısmı için soğurma katsayısını (m^{-1}), η_i ; spektrumun i 'nci kısmı içindeki enerji oranını, z ; ışıının su içerisinde izlediği optik yolu (m) göstermektedir.

Rabl ve Nielsen 0.2-1.2 μm dalga boyları arasındaki spektrumu dört eşit banda ayırarak her bir spektrum için farklı soğurulmanın olduğunu düşünerek, havuz içerisindeki soğurulma olayını,

$$I(x) = I_s \sum_{i=1}^4 \eta_i e^{-\mu_i z} \quad (3.2)$$

eşitliği ile ifade etmişlerdir [25,35,48,59]. Bryant ve Colbeck, yapmış oldukları bir çalışmayla, Rabl ve Nielsen'in soğurma fonksiyonu ile uyum içinde olan, berrak ve temiz bir su kütlesi içerisindeki soğurulma olayını ifade eden basit bir hesaplama fonksiyonunun,

$$I(x) = 0.36 - 0.08 \ln(z) \quad (3.3)$$

şeklinde logaritmik bir fonksiyonla temsil edilebileceğini göstermişlerdir [35,53,82]. Denklemden, z ; ışınının havuz içerisinde izlediği optik yolu (m) göstermektedir.

Hull [25], 0.3125-1.3125 μm dalga boyları arasındaki spektrumu kırk eşit parçaya bölerek yaptığı hesaplama elde ettiği sonuçların,

$$I(x) = 0.727 - 0.056 \ln(z) \quad (3.4)$$

şeklinde logaritmik bir fonksiyonla uyum içinde olduğunu göstermiştir. Denklemden, z ; ışınının havuz içinde izlediği optik yolu (m) göstermektedir. Bu fonksiyona göre yapılan hesaplamalardan, Rabl ve Nielsen'in soğurma fonksiyonu ile yapılan hesaplamalara göre %10 daha fazla enerji soğurulacağı, bu enerjinin de bir yılın sonunda 15-20 °C dolayında bir sıcaklık farkına eşit olabileceği ileri sürülmektedir.

Çengel ve Özişik [41], yapmış oldukları çalışma sonucunda, güneş havuzu içerisinde soğurulan ışınım miktarının belirlenmesinde, dördüncü dereceden bir polinomla ifade edilen aşağıdaki eşitliği önermektedirler.

$$I(x) = H_D \sum_{n=0}^4 D_n \left(\frac{z}{L} \right)^n + H_d \sum_{n=0}^4 d_n \left(\frac{z}{L} \right)^n \quad (3.5)$$

Denklemden, H_D ve H_d ; havuz yüzeyine direkt ve yayılı gelen ışınım miktarlarını (W/m^2), D_n ve d_n ışınım ile ilgili sabitleri, L ; havuzun derinliğini (m), z ; ışınının havuz içerisinde izlediği optik yolu (m) göstermektedir.

Subhaker ve Murthy [35], Kanayama ve Baba [87], havuz içerisindeki herhangi bir noktada soğurulan ışınım miktarını, soğurulmanın derinlikle eksponensiyel olarak azaldığını ifade

eden Beer kanunundan,

$$I(\lambda, x) = I(\lambda, 0) e^{-\mu(\lambda)z} \quad (3.6)$$

hesaplamışlardır. Dake ve Harleman [90], Hawlader ve Brinkworth [56], Refaee ve Marafie [55], Lund ve Keinonen [32], Keren ve arkadaşları [81], yapmış oldukları çalışmayla, bir su tabakası içerisinde gerçekleşen soğurulmanın, Beer Kanununun basitleştirilmiş şekli olan aşağıdaki eksponensiyel eşitlikten hesaplanabileceğini göstermişlerdir.

$$I_0 = (1 - a)I_s \quad (3.7)$$

$$I(x) = I_0 \quad x = 0 \quad (3.8)$$

$$I(x) = (1 - \beta)I_0 e^{-\mu z} \quad x > 0 \quad (3.9)$$

$$I(x) = (1 - a)(1 - \beta)I_s e^{-\mu z} \quad x > 0 \quad (3.10)$$

Dake ve Harleman [90], önerdikleri bu eşitliğin su içerisindeki soğurulmanın hesaplanmasında kullanılabileceğini çeşitli göllerde yapılan ölçümler sonucunda elde edilen verilerle desteklemişlerdir. Denklemden, $I(x)$; havuzun x derinliğine kadar ulaşan ışıyım şiddetini (W/m^2), I_0 ; havuz yüzeyinden havuza giren ışıyım şiddetini (W/m^2), I_s ; havuz yüzeyine direkt ve yayılı olarak gelen ışıyım şiddetini (W/m^2), β ; havuz yüzeyinde ince bir tabaka tarafından soğurulan kızılötesi ışıyım oranını, μ ; soğurma katsayısını (m^{-1}), a ; su yüzeyinin ışıyımı yansıtma oranını, z ; ışıyımın havuz içerisinde takip ettiği optik yolu (m) göstermektedir.

Bu çalışmada, ışıyımın havuz içerisindeki soğurulması, Dake ve Harleman [90], Hawlader ve Brinkworth [56], Refaee ve Marafie [55], Keren ve arkadaşlarının [81] önermiş oldukları eksponensiyel fonksiyon kullanılarak hesaplanmıştır. Bu fonksiyonun kullanılması, önerilen fonksiyonun doğal şartlarda yapılan ölçümlerden elde edilen sonuçlarla desteklenmesinden kaynaklanmaktadır.

Eşitlikteki β parametresi, spektrumun kızıl ötesi kısmını temsil eden ve yüzeyde ince bir tabaka tarafından soğurulan ışıının oranını göstermektedir. Bu oran, toplam ışıının % 40 kadarı olup, zamana bağlı olmayan sabit bir değerdir. Bu ışıının oranının soğurulduğu tabaka kalınlığı ise, 6 cm civarında ince bir tabakadır [50,56,90].

Soğurma katsayısı μ 'nın değerini ise, Giestas ve arkadaşları [10] 0.2-0.8 m^{-1} , Dake ve Harleman [90] 0.05 m^{-1} , Hawlader ve Brinkworth [56] 0.32-1 m^{-1} , Keren ve arkadaşları [81] 0.7 m^{-1} , Lund ve Routti [52] 0.5 m^{-1} , Viskanta ve Toor [43] 0.027 m^{-1} olarak almışlardır. Soğurma katsayısı, kuvvetli bir şekilde ışıının dalga boyuna bağlıdır ve havuz içerisindeki çözeltinin kalitesinden, berraklığından ve temizliğinden etkilenmektedir.

Su yüzeyinin ışıının yansıtma faktörü albedo ise, (yansıyan ışıının şiddetinin soğurulan ışıının şiddetine oranı) % 2-6 arasında değişmektedir [56,90].

3.2. Havuz Yüzeyine Gelen Işıınınla İlgili Formülasyon

Havuz yüzeyine direkt olarak gelen güneş ışıınının bir kısmı suyun yansıtma özeliği nedeniyle atmosfere geri yansır, geri kalan kısmı da havuz içerisine doğru ilerler. Havuza giren ışıının oranı, ışıının geliş ve kırılma açısına bağlı olarak Fresnel eşitliğinden,

$$\tau = 1 - \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\theta_k - \theta_g)}{\sin^2(\theta_k + \theta_g)} + \frac{\tan^2(\theta_k - \theta_g)}{\tan^2(\theta_k + \theta_g)} \right] \quad (3.11)$$

bulunur [12,13,35,59]. Denklemden, θ_k ; kırılma açısını ($^\circ$), θ_g ; geliş açısını ($^\circ$) göstermektedir.

Havuz yüzeyine gelen ışıının geliş açısı, güneş zenit açısına eşit olup, ışıının deklinasyon açısına, havuzun bulunduğu enlem açısına ve saat açısına bağlı olarak,

$$\cos\theta_g = \cos(\delta) \cos(\phi) \cos(\psi) + \sin(\delta) \sin(\phi) \quad (3.12)$$

eşitliğinden hesaplanabilir [13,35,59]. Denklemden, δ ; deklinasyon açısını ($^\circ$), ϕ ; enlem

açısını ($^{\circ}$), ψ ; saat açısını ($^{\circ}$) göstermektedir. Aylara ve mevsimlere göre değişiklik gösteren güneş deklinasyon açısı ise,

$$\delta = 23.45 \sin\left(\frac{360(284 + n_d)}{365}\right) \quad (3.13)$$

eşitliğinden hesaplanır [13,35,59]. Denklemdaki n_d parametresi 1 Ocak tarihinden itibaren başlayan gün sayısını göstermektedir.

Havuz yüzeyine gelen ışınımın su içerisinde ilerlediği optik yol, aşağıda (3.14) eşitliğinde verilen Snell Kanunundan ışınımın su yüzeyindeki kırılma açısı bulunarak belirlenebilir.

$$\frac{\sin\theta_g}{\sin\theta_k} = \frac{n_{su}}{n_{hava}} = 1.333 \quad (3.14)$$

Su yüzeyinin ışınımı kırma açısı ,

$$\sin\theta_k = \frac{\sin\theta_g}{1.333} \quad (3.15)$$

eşitliğinden bulunarak, ışınımın havuz içerisinde ilerlediği optik yol, havuz derinliğinin, kırılma açısının kosinüsüne bölünmesiyle,

$$z = \frac{x}{\cos\theta_k} \quad (3.16)$$

eşitliğinden bulunur [13,35,56,59]. Denklemden, z ; ışınımın havuz içerisinde takip ettiği optik yolu, x ; havuzun derinliğini temsil etmektedir.

3.3. Havuzdan Isı Alma Yöntemleri

Havuzun depolama bölgesinde depolanan ısı, havuzdan iki yolla çekilebilir. Depolama bölgesine yerleştirilen bir ısı değiştiricisinden düşük sıcaklıkta buharlaşabilen bir soğutucu

akışkan çok düşük hızlarda sirkülasyon yaptırılarak, diğer yol ise, depolama bölgesindeki sıcak çözelti, bir pompa yardımıyla havuzdan dışarıya alınarak, dışarıya yerleştirilmiş olan bir ısı değiştiricisinde ısısı alındıktan sonra soğumuş olarak tekrar havuza geri gönderilmek suretiyle havuzda depolanan ısı kullanılmaya hazır hale gelmiş olur [3,29,30,91].

Her iki yöntemin, uygulamada karşılaşılan çeşitli avantajları ve dezavantajları vardır. Isı değiştiricisi havuz içerisine yerleştirildiğinde, ısı alma esnasında ısı değiştiricisi etrafındaki çözelti ani olarak soğuyacağından depolama bölgesinin alt yüzeyi ile üst yüzeyi arasında bir sıcaklık farkı oluşacaktır. Bu sıcaklık farkının büyümesi, depolama bölgesi içerisinde zaten var olan doğal taşınım hareketinin artmasına ve zamanla büyüyerek gelişecek olan salınımlı hareketlerin başlamasına öncülük eder. Bu salınımlı hareketler, ATB-TZB ara yüzeyinde karışıklığa yol açarak, TZB tabaka kalınlığının küçülmesine ve yoğunluk gradyeni kararlılığının bozulmasına neden olur. Ayrıca, bu yöntem kullanıldığında, iyi bir ısı çekme verimi elde edebilmek için çok büyük ısı değiştiricisi kullanmak gerekmekte, ısı değiştiricisinin tamiri, bakımı ve kontrolü oldukça zor olmakta, çözeltinin korozyon etkisi ısı değiştiricisinin ömrünü azalttığından ekonomik olmamaktadır. Bu yöntem, bu nedenlerden dolayı, daha çok küçük ölçekli güneş havuzlarında etkili olmaktadır [30].

Depolama bölgesinden çekilen sıcak çözelti, havuz dışına kurulmuş olan bir ısı değiştiricisinde ısısı alındıktan sonra tekrar soğumuş olarak havuza geri gönderildiğinde, depolama bölgesi net bir yanal harekete maruz kalarak, bölge içerisinde var olan taşınım hareketleri daha da hızlanarak yoğunluk gradyeninin bozulmasına yol açabilir. Bu nedenle, havuzdan sıcak çözelti çekilirken ve soğumuş olarak tekrar havuza geri gönderilirken yoğunluk gradyenini etkilemeyecek şekilde, çok düşük hızlarda yapılmalı, çekilen çözelti kadar yerine çözelti gönderilmelidir. Havuzdan çözelti çekme ve geri gönderme hızı, bu yöntemde en çok dikkat edilmesi gerekli olan parametredir [30,48].

Havuzun ısısının dışarıya kurulan bir ısı değiştiricisinde alınmasının sağladığı avantaj ise, ısı taşınım katsayısı daha yüksek bir ısı değiştiricisi kullanılabilmesi olasılığının olmasıdır. Ayrıca, havuz dışına yerleştirilen ısı değiştiricisinin kurulması, işletmesi ve bakımı daha kolaydır [91].

Tuz yoğunluk gradyeni oluşturulduktan ve kararlılığı sağlandıktan sonra, kullanılmak üzere

ısı enerjisinin havuzdan çekilebilmesi için, depolama sıcaklığının uygun ve yeterli bir değere ulaşması gerekir. Depolama sıcaklığı, havuz çalışmaya başlamasından belirli bir süre geçtikten sonra ısı çekebilecek değere ulaşabilmektedir. Depolama sıcaklığı istenilen değere ulaştığında ise, havuzun performansının düşmemesi için ısı çekimi periyodik olarak yapılmalıdır [54].

3.4. Havuzun Doldurulması İşlemi

TTGH içerisinde tuz yoğunluk gradyenini oluşturabilmenin değişik yöntemleri vardır. En eski yöntemlerden birisi, havuzun tabanından yarısına kadar olan kısmı tuz çözeltisi ile doldurulur, geriye kalan kısmı ise tatlı su ile doldurularak havuz kendi haline bırakılır. Altaki yüksek konsantrasyonlu bölgeden, tatlı sulu bölgeye doğru yoğunluk farkından dolayı tuz difüzyonu olacağından, zamanla tabandan yüzeye doğru azalan lineer bir yoğunluk gradyeni oluşacaktır. Yüzeydeki ve tabandaki konsantrasyon sabit tutulduğu anda, yoğunluk gradyeni oluşmaya başlar. Gradyenin oluşabilmesi için belirli bir zaman periyoduna ihtiyaç vardır. Bu zaman periyodu tuz difüzyonunun hızına bağlı olarak değişebilmektedir. Çözelti içerisinde difüzyon katsayısı yüksek olan bir tuz kullanıldığı takdirde, gradyenin oluşması fazla zaman almayacaktır. Bu yolla havuz doldurma yönteminde, prosedürün tamamlanması kolay, fakat büyük ölçekli havuzlarda gradyenin oluşabilmesi için uzun zaman gerektirmektedir [34,74].

Diğer bir eski yöntem ise, en yoğun tabakanın üzerine daha az yoğun tabakayı yerleştirmek suretiyle, merdiven basamağına benzer şekilde tabakalar halinde havuzun doldurulmasıdır. İlk olarak yüksek konsantrasyonlu çözelti içeren tabakadan başlanarak, bu tabakanın üzerine yüzeye doğru konsantrasyonu periyodik olarak azalan tabakalar üst üste gelecek şekilde, havuz doldurularak doldurma işlemi tamamlanmış olur. Havuz içerisindeki çözelti, yüksek konsantrasyonlu tabakaların üzerine, yüzeye doğru tuz konsantrasyonu azalan tabakaların yerleştirilmesiyle, aralarında küçük yoğunluk farkı olan tabakalardan oluşmaktadır. Tabakalar arasındaki yoğunluk farkının küçük olması, merdiven basamağı şeklindeki yoğunluk profilinin, tabakalar arasında meydana gelecek olan tuz difüzyonuyla, kısa bir süre içerisinde lineer yapıya benzer hale gelmesini sağlar. Böylece, yoğunluk gradyeni, aralarında küçük yoğunluk farkı olan tabakalar arasında kısa sürede gerçekleşen tuz difüzyonu ile kendiliğinden oluşmuş olmaktadır. Doldurma işlemi sırasında, tabakaların

birbirine karışmasını önlemek için havuz doldurma işlemi, çözelti, yüzeyinde yüzebilen bir madde üzerine dökülerek gerçekleştirilir [22,34,35,42,74].

Bu yöntemler, küçük ölçekli havuzların doldurma işlemi için yeterli görünmesine rağmen, büyük ölçekli ve ticari amaçlı güneş havuzu uygulamalarında zaman alıcı ve ek bir karışım tankı gerektirdiğinden maliyetli olmaktadır. Ayrıca üst üste yerleştirilen tabakaların sık sık ayarlanması gerektiğinden, havuzun çalışması esnasında çeşitli problemlerle karşılaşılmalıdır [34,35].

Zangrando [35], klasik havuz doldurma modeline karşı, basit ve her boyuttaki TTGH'lar için oldukça uygun bir doldurma tekniği geliştirmiştir. Havuzun depolama bölgesi yüksek konsantrasyonlu çözelti ile doldurulduktan sonra, doldurulan çözeltinin üst kısmına yerleştirilen ve dikey olarak havuz içerisinde hareket edebilen difüzör yardımıyla belirli miktarda tatlı su pompalamak suretiyle havuz doldurma işlemi tamamlanmış olmaktadır. Difüzör yüzeye doğru belirli aralıklarla hareket ettirilerek, yüksek konsantrasyonlu çözelti difüzör yüzeye doğru yükseldikçe derece derece seyreleceğinden, yüzey ile taban arasında derinlikle artan bir yoğunluk gradyeni oluşacaktır. Küçük bir boşluk ile ayrılan paralel iki plakadan oluşan difüzör, havuz içerisine bir sistem aracılığıyla yerleştirilmekte veya çözelti yüzeyinde yüzebilmektedir. Difüzör merkezine pompalanan çözelti, oluşan tabakaları minimum şekilde etkilemesi için difüzörün çevresinden yatay olarak çıkmaktadır. Bu yöntemde, tuz difüzyonunun oluşması beklenilmediğinden gradyenin oluşumu oldukça kısa bir sürede gerçekleşmektedir. Bu nedenle, bu yöntem büyük ölçekli ve ticari amaçlı TTGH'ların doldurma işlemi için oldukça pratik ve kolay bir yol olup, uygulamada başarılı bir şekilde kullanılmaktadır.

Zangrando [92] diğer bir çalışmasında daha önce önermiş olduğu yöntemle benzer alternatif bir havuz doldurma prosedürü geliştirmiştir. Havuzun depolama bölgesi derinliği ile gradyen bölgesi derinliğinin yarısının toplamı kadar kısmı yüksek konsantrasyonlu çözelti ile doldurulmaktadır. Daha sonra, havuz içerisinde dikey olarak hareket edebilen bir difüzör yardımıyla gradyenli bölgenin başlangıcından itibaren havuza tatlı su enjekte edilmektedir. Bu işlem, difüzör havuz yüzeyine kadar hareket ettirilerek devam eder. Böylece, havuz doldurma işlemi tamamlanarak, bir önceki yöntemde olduğu gibi yoğunluk gradyeni kısa sürede oluşturulmuş olmaktadır [22,42].

3.5. Tuz Yoğunluk Gradyeninin Korunması

TTGH'lar, termodinamik açıdan kararlı bir sistem değildir. Yoğunluk gradyeni, tabanda tuz konsantrasyonu yüksek çözelti ile yüzeydeki düşük konsantrasyonlu tabakalar arasındaki tuz difüzyonu nedeniyle zamanla bozulmaktadır [73].

TTGH'larda yoğunluk gradyeninin korunması ve sürekliliğinin sağlanması, havuzun verimli bir şekilde çalışabilmesi açısından oldukça önemli bir kriterdir. Tuz yoğunluk gradyeni, havuzun farklı konsantrasyonlarda çözelti içeren tabakalarla doldurulmasından belirli bir müddet sonra kendiliğinden kararlı hale gelmektedir. Kararlı hale gelen gradyen kontrol altında tutulmadığı takdirde, havuz içerisinde gerçekleşen ısı ve kütleli olaylar sonucunda kararlılığını kaybedecektir [3,12,74,92].

Kararlı bir yoğunluk gradyeni oluşturabilmek için havuzun doldurulması aşamasında, ÜTB'nin tuz konsantrasyonu oldukça düşük, ATB'nin tuz konsantrasyonu ise yeteri kadar büyük olmalıdır. Böylece, havuz içerisinde küçük hareketlenmelerden etkilenmeyen kararlı bir tuz yoğunluk gradyeni oluşturulmuş olur. İstenilen yoğunluk gradyeni oluşturulduğunda ise, tabandan yüzeye doğru çok düşük hızlarda olan tuz difüzyonu nedeniyle havuz yüzeyinin tuz konsantrasyonu artar, tabanındaki tuz konsantrasyonu ise azalır. Gradyenin korunması ve kararlılığını sürdürebilmesi için, bu tuzun yüzeyden atılarak, tekrar havuz tabanına geri gönderilmesi gerekir. Böylece, yapay olarak oluşturulan tuz yoğunluk gradyeni, havuz tabanındaki ve yüzeyindeki tuz yoğunluğunu kontrol etmek suretiyle korunmuş ve sürekliliği sağlanmış olmaktadır [3,11,42].

Yoğunluk gradyeni kararlılığının sağlanması ve korunması, TTGH'ların sahip olduğu en önemli problemlerden birisidir. Bu nedenle, bu konuda bir çok çalışma yapılarak, yoğunluk gradyeninin korunabilmesi için uygulanabilir yöntemler bulunmaya çalışılmıştır. Srinivasan [42], yoğunluk gradyeninin korunması ve sürekliliğinin sağlanabilmesi için havuz ortasına yerleştirdiği bir borunun ATB bölgesi içinde kalan kısmı üzerine küçük delikler açarak, üstten boru içerisine tuz konsantrasyonu yüksek çözelti eklemek suretiyle, pasif tuz ekleme tekniğinin tabandan yüzeye doğru olan tuz difüzyonunu dengelemek için alternatif bir yöntem olabileceğini yaptığı deneysel çalışma ile göstermiştir.

Sreenivas ve arkadaşları [93], TZB tabaka kalınlığının büyümesi ve erozyona uğramasına tuz difüzyonunun ve taşınım hareketlerinin etkisini incelemişlerdir. TZB’de kararlı bir yoğunluk gradyeninin oluşturulabilmesinin, sıcaklık ve tuzluluk gradyenleri yanı sıra ATB’nin tabaka kalınlığına bağlı olduğunu tespit etmişlerdir.

Kooi [64], doymuş güneş havuzunda havuz tabanının yansıtıcılığının havuz kararlılığına ve performansına etkisini araştırmıştır. Çalışma sonucunda, yansıtıcı bir özeliğe sahip olan havuz tabanının, havuzun performansını düşürdüğü, küçük ölçekli ve sık havuzlarda bu düşüşün daha büyük olduğu görülmüştür.

Zangrando [30], havuzda gerçekleşen hidrodinamik olayları göz önüne alarak kütle ve enerji dengesinin, gradyen tabakanın oluşturulmasının, gradyenin kararlılığı ve korunmasının, havuzdan enerji çekilmesinin ve havuzu oluşturan bölgelerin ara yüzey hareketliliğinin havuz performansına etkisini incelemiştir.

Atkinson [31], havuz yüzeyinin buzla kaplı olmasının TTGH sıcaklık dağılımına ve yoğunluk gradyenine etkisini incelemek için bir simülasyon modeli geliştirmiştir. Havuz yüzeyinin buzlanması ve buzun erimesinin, havuz içerisinde tabandan yüzeye doğru olan tuz difüzyonunu dengeleyen doğal bir mekanizma sağladığı görülmüştür. Böylece, yoğunluk gradyeninin korunabileceği ve sürekliliğinin sağlanabileceği ileri sürülmektedir.

Leshuk ve arkadaşları [18], tuz yoğunluk gradyeninin korunması ve sürekliliğinin sağlanabilmesi için gerekli kriterleri belirlemek amacıyla deneysel bir çalışma yapmışlardır. Yapılan deney sonucunda, havuz içerisinde zamanla oluşan bölgesel taşınım hareketlerinin, başlangıçta oluşturulacak yeteri kadar büyük bir yoğunluk gradyeni ve doğal tuz difüzyonu ile kontrol edilebileceği görülmüştür.

Subhaker ve Murthy [29,35,76], Vitner ve arkadaşları [73], ve Kooi [64], çözünürlüğü sıcaklıkla artan tuz kullanılarak oluşturulan tuz yoğunluk gradyenli havuzlarda, yerel sıcaklığa bağlı olarak yoğunluk gradyeninin korunabileceğini yapmış oldukları çalışmalar ile göstermişlerdir. Bu tip havuzlarda, tuz, su içerisinde sıcaklığa bağlı olarak çözündüğünden, havuz içerisindeki çözelti tuza doymuş hale gelmektedir. Bu nedenle bu tip havuzlara, doymuş tuz tabakalı güneş havuzu denilmektedir.

Doymuş güneş havuzlarında, havuz çözünürlüğü sıcaklık ile artan magnezyum klorür ($MgCl_2$), potasyum nitrat (KNO_3), boraks gibi tuz kullanılarak doymuş hale getirilir. Böylece bu tip havuzlarda, yoğunluk gradyeni yerel sıcaklığa bağlı olarak kendi kendini koruyarak sürekliliğini devam ettirmektedir [32,35,64,73,76].

Anati [94], taşınımsız güneş havuzlarında havuz büyüklüğünün ve eğimli havuz yan duvarlarının havuz yoğunluk gradyenine etkisini incelemiştir. Havuz duvarlarının eğimli olmasıyla, havuz yüzeyi tabanına göre daha büyük olacağından, tabandan yüzeye doğru olan tuz difüzyonu artacak ve yoğunluk gradyeni daha kısa sürede bozulacaktır. Ayrıca, duvarların eğimli olması taban ile yüzey arasındaki tuz difüzyonunu dengelemek için daha çok tuz gerektirmektedir.

Ayrıca, Anati [94] TTGH'ların yoğunluk gradyeni kararlılığının sağlanmasında alternatif bir yöntem olan havuz çökeltme (falling pond) teorisini ve bu teorinin uygulanabilirliğini parametrik olarak incelemiştir. Benzer bir çalışma, Wang ve Akabarzadeh [95] tarafından yapılarak yöntemin uygulanabilirliği desteklenmiştir. Havuz çökeltme teorisi; TZB'nin alt kısmından bir miktar çözelti çekilerek, havuzun içerisindeki çözeltiye aşağıya doğru bir hız kazandırılarak, tabandan yüzeye doğru olan tuz difüzyonunun dengelenmesi mantığına dayanmaktadır. Havuz içerisindeki tuz difüzyonu dengelendiği için net tuz akısı sıfır olmaktadır. Havuzdan çekilen çözeltilerden tatlı su ayrılarak havuzun ÜTB'sine, geriye kalan konsantrasyonu yüksek çözelti ise havuz tabanına enjekte edilerek, havuz içerisindeki tuz dengesi sağlanmaktadır. Böylece, havuza tuz eklemekten yoğunluk gradyeni korunmuş olmaktadır.

Yapılan çalışmalarla, yoğunluk gradyenini korumak için geliştirilen ve pratikte uygulanan teknikler şu şekilde sıralanabilir.

1. Doğal güneş göllerinde olduğu gibi, havuz tabanına tuz ekleyerek yüzeyini de tatlı ve temiz su ile yıkayarak yoğunluk gradyeni korunabilir [3,42,73].
2. Sisteme uygun yoğunluk koruma düzenekleri dizayn ederek, havuza belirli noktalardan belirli yoğunlukta çözelti enjekte etmek suretiyle yoğunluk gradyeni korunabilir ve sürekliliği sağlanabilir [42,83].

3. Çözünürlüğü sıcaklıkla artan bir tuz kullanmak suretiyle havuz doymuş hale getirilir ve yerel sıcaklığa bağlı olarak yoğunluk gradyeni kendi kendine korunmuş olur [29,35,64,73,76].
4. Difüzyon olayı ile birlikte havuz yüzeyinde zamanla artan tuz oranı yüksek çözelti, havuz yüzeyinden dışarıdaki bir kaba alınarak, yerine tatlı su eklemek ve yüzeyden alınan tuz oranı yüksek çözeltiyi de depolama bölgesi yoğunluğuna eşit olacak şekilde hazırladıktan sonra havuz tabanına göndermek suretiyle yoğunluk gradyeni korunabilir [42,54,94].
5. Yukarıda teorisinden bahsedilen havuz çökeltme teorisi uygulanarak yoğunluk gradyeni korunarak ve sürekliliği sağlanabilir [54,94,95].

3.6. Tuz Yoğunluk Gradyeninin Kararlılık Koşulları

TTGH'lar, havuz tabanından yüzeyine doğru olan tuz difüzyonu nedeniyle tuz kararlılığının korunması konusunda probleme sahiptirler. Sistemin etkili bir şekilde çalışabilmesi, havuz içerisinde ışıınının soğurulmasıyla oluşan ısı kararsızlığın neden olduğu taşınım hareketlerine karşı tuz yoğunluk gradyeninin kararlılığına bağlıdır. Taşınım hareketleri, havuz tabanından yüzeyine doğru olan tuz difüzyonu ile birlikte ısı transferine de neden olacağından, TZB'nin yalıtım etkisi bozulacak ve sistem ısı depolama özelliğini kaybedecektir [12,30,38,76].

Havuz içerisinde ışıınının soğurulmasıyla oluşan sıcaklık farkı, derinlikle azalan bir yoğunluk gradyeninin oluşmasına neden olur. Yoğunluğun derinlikle azalması, havuz içerisinde, tabanda daha sıcak ve daha az yoğun olan akışkan moleküllerinin, yüzeyde daha soğuk ve daha yoğun olan akışkan molekülleriyle yer değiştirmek istemesine neden olan kaldırma kuvvetinin oluşumuna öncülük eder. Sıcaklık farkının çok küçük olduğu durumda, yerçekimi ve sürtünme kuvvetleri kaldırma kuvvetinin üstesinden gelecek ve akışkan hareketsiz kalacaktır. Sıcaklık farkı belirli bir değeri aştığında, kaldırma kuvveti yerçekimi ve sürtünme kuvvetlerini yenerek, çözelti içerisinde bir hareketlenme başlatacaktır. Tabanda sıcaklığı artan çözelti, yüzeye doğru hareket etmeye başlayacak, yüzeydeki soğuk çözelti ile temas edince soğuyacak ve yoğunluğunun artması nedeniyle tabana doğru hareket ederek, çözelti içerisinde doğal bir sirkülasyonun başlamasına neden olacaktır. Bu durum, TTGH'larda, yapay olarak derinlikle artan bir tuz yoğunluk gradyeni oluşturularak

dengelemektedir. Böylece, havuz tabanı ile yüzeyi arasındaki sıcaklık farkının belirli bir değerine kadar havuzun kararlılığı sağlanmış olur. Havuz içerisinde kararlılığın sağlanabilmesi için havuzun statik olarak kararlı olması gerekir. Havuzun statik olarak kararlı olabilmesi, sıcaklık farkının neden olduğu derinlikle azalan yoğunluk gradyenini dengeleyecek derinlikle artan bir yoğunluk gradyeni içermesine bağlıdır [12,18,35,64]. Buna göre, havuz içerisinde aşağıda (3.17) eşitliğiyle verilen şartın yerine getirilmesi gerekir.

$$\frac{d\rho}{dx} \geq 0 \quad (3.17)$$

Tuz çözeltisi yoğunluğunun, tuzluluğa ve sıcaklığa bağlı olarak değiştiği dikkate alındığında, havuz içerisindeki yoğunluk gradyeni,

$$\frac{d\rho}{dx} = \frac{\partial\rho}{\partial S} \frac{\partial S}{\partial x} + \frac{\partial\rho}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x} \geq 0 \quad (3.18)$$

veya,

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dx} = \beta_S \frac{\partial S}{\partial x} - \beta_T \frac{\partial T}{\partial x} \geq 0 \quad (3.19)$$

$$\beta_S = \frac{1}{\rho} \frac{\partial\rho}{\partial S} \quad (3.20)$$

$$\beta_T = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial\rho}{\partial T} \quad (3.21)$$

eşitlikleri ile ifade edilebilir [12,18,30,35,64]. Denklemlerde, ρ ; çözeltinin yoğunluğunu (kg/m^3), S ; çözeltinin tuzluluk oranını (%), $\partial\rho/\partial x$; yoğunluk gradyenini (kg/m^4), $\partial S/\partial x$; tuzluluk gradyenini (%/m), $\partial T/\partial x$; sıcaklık gradyenini ($^{\circ}\text{C}$), $\partial\rho/\partial T$; yoğunluğun sıcaklıkla değişimini, $\partial\rho/\partial S$; yoğunluğun tuzlulukla değişimini, β_S ; çözeltinin kütle genleşme katsayısını ($1/\%$), β_T ; çözeltinin ısı genleşme katsayısını ($1/^{\circ}\text{C}$) göstermektedir. Bu eşitlikler, havuz içerisinde farklı tuz konsantrasyonu ile oluşturulan yoğunluk gradyeni

yanında, sıcaklık artışı ile oluşan bir yoğunluk gradyeninin oluştuğunu ifade etmektedirler. Tuz yoğunluk gradyeni yapay olarak oluşturulur, sıcaklığın neden olduğu yoğunluk gradyeni ise ısıtımın soğutulmasından belirli bir müddet geçtikten sonra kendiliğinden doğal olarak oluşur [30,63]. Havuz içerisinde bir birinden bağımsız olarak oluşan bu yoğunluk gradyenleri, havuzun statik kararlılığını etkileyen en önemli parametrelerdir. Aşağıda (3.19) veya (3.20) eşitliklerinde ifade edildiği gibi, havuz içerisinde oluşturulan tuz yoğunluk gradyeninin, sıcaklık gradyeni ile birlikte oluşan negatif yoğunluk gradyeninden daha büyük olduğu durumda, TTGH'nin statik kararlılığı sağlanmış olur [12,18,30,35,64].

$$\frac{\partial \rho}{\partial S} \frac{\partial S}{\partial x} \geq - \frac{\partial \rho}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial S}{\partial x} \geq \frac{\beta_T}{\beta_S} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (3.23)$$

Havuz statik kararlılık şartının sağlanmasıyla statik olarak kararlı hale gelmesine rağmen, tuz yoğunluk gradyeni, havuz içerisinde küçük boyutlarda oluşan salınımlı hareketlere ve zamanla büyüyerek devam eden bölgesel taşınım hareketlerine karşı çok hassastır. Tabakalar arasındaki ısı kararsızlık sonucu oluşan bu taşınım hareketleri, TZB içerisinde hidrodinamik kararsızlıkların başlamasına ve dolayısıyla tuz yoğunluk gradyeninin bozulmasına neden olurlar. Bu nedenle, statik kararlılık şartı sıradan bir taşınım hareketini önlemek için yeterli olabilirken, zamanla artan taşınım hareketlerini önlemek için havuzun dinamik analizinin yapılması gerekir [10,12,30,50,64].

Kararlı bir ortamın sıcaklık ve tuzluluk gibi fiziksel özelliklerinde meydana gelen sonsuz küçüklükteki ani değişiklikler ortamın kararlı yapısını bozabileceği gibi, tuzlu ortamlarda tuz ve ısı yayılım katsayıları arasındaki farkın büyük olması ($\alpha=1.47 \times 10^{-7} \gg D=1.8 \times 10^{-9}$), salınımlı kararsızlık olarak adlandırılan duruma neden olabilmektedir. Havuz içerisinde statik kararlılık şartının sağlanmasına rağmen, tuz yoğunluk gradyeni bu tür salınımlı kararsızlıklara karşı kendini koruyamaz ve zamanla erozyona uğrayarak özeliğini kaybeder. Bu nedenle, tuz yoğunluk gradyeninin bu tür kararsızlıklara karşı dinamik kararlılığının sağlanması gerekir. Havuz, tuz yoğunluk gradyeni ile sıcaklık farkının neden olduğu yoğunluk gradyeni arasındaki bağıntıdan elde edilen aşağıdaki (3.24) veya (3.25) eşitliğinin

taşıyımatsız ara bölgede sağlanmasıyla dinamik olarak kararlı hale gelir [14,30,63].

$$(\nu + \alpha) \frac{\partial \rho}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x} + (\nu + D) \frac{\partial \rho}{\partial S} \frac{\partial S}{\partial x} \geq 0 \quad (3.24)$$

$$\frac{\partial S}{\partial x} \geq - \left(\frac{\partial \rho}{\partial S} \right)^{-1} \left[\frac{(\nu + \alpha) \frac{\partial \rho}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x}}{(\nu + D)} \right] \quad (3.25)$$

Denklemden, ν ; çözeltinin kinematik viskozitesini (m^2/s), α ; çözeltinin ısı yayılım katsayısını (m^2/s), D ; çözeltinin kütle yayılım katsayısını (m^2/s), ρ ; çözeltinin yoğunluğunu (kg/m^3), S ; çözeltinin tuzluluk oranını (%) göstermektedir.

Havuz içerisinde oluşturulan tuz yoğunluk gradyanının statik ve dinamik olarak kararlılığı sağlandığı takdirde, havuzun tabanı yüzeyine göre daha sıcak olmasına rağmen, havuz içerisinde doğal taşınım olmayacak, havuzun depolama bölgesinde toplanan ısı uzun süre ısı enerjisi formunda depolanabilecektir.

BÖLÜM 4. MATERYAL ve METOT

4.1. TTGH Isı ve Kütle Transferi Analizi

TTGH'lar, ısı ve kütle transferi olaylarının gerçekleştiği hidrolik bir sistemdir. Sistemi oluşturan çözelti içerisinde meydana gelen fiziksel olaylar, oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu nedenle, TTGH'ın ısı analizi yapılırken, havuzun homojen olmayan bir sistem olduğuna dikkat edilmelidir [5-8,30].

Havuz içerisindeki sıcaklık dağılımı, havuzun bulunduğu yerin meteorolojik şartlarına, soğurulan ısıtım enerjisine, havuz içerisinde meydana gelen düşey taşınım hareketlerine, havuz yüzeyinden taşınım, buharlaşma ve ısıtım ile olan ısı kayıplara bağlı olarak değişiklik gösterir [4-7,27].

TTGH'lar, depolama bölgesinde soğurulan ısıtım enerjisini hissedilebilir ısıya dönüştürerek, aynı ortamda uzun zaman aralığında depolayabilmektedirler. Havuza giren ısı enerjisi ile havuzdan kaybolan ısı enerjisi arasındaki fark, havuz tabanında depolanan ısıya eşit olmaktadır. Havuz içerisinde oluşturulan tuz yoğunluk gradyeni yeteri kadar büyük olduğu takdirde, TZB iyi bir ısı yalıtıcı özelliği göstereceğinden dolayı, depolanan ısı ATB'den ÜTB'ye doğru sadece iletimle kaybolabilecektir. Böylece, TTGH'lar sadece bir toplayıcı değil, aynı zamanda bir ısı depolayıcı sistem olmaktadır [24].

Şekil 1.1'de görüldüğü gibi, TTGH'larda, havuz yüzeyine gelen ısıtımın % 20-30 dolayındaki miktarı depolama bölgesinde toplanabilmekte, toplanan bu enerjisinin % 14 dolayındaki miktarı ise, faydalı ısı olarak kullanılmak üzere havuzdan çekilebilmektedir. Geriye kalan kısım ise, su tarafından yansıtılmakta, saçılmakta ve depolama bölgesine kadar ulaşmaya kadar geçtiği yol boyunca soğurulmaktadır. ÜTB ve TZB'de soğurulan ısıtımın havuz depolama sıcaklığına fazla bir etkisi yoktur, havuz yüzeyinden ısı kaybı olarak ortama kaybolmaktadır. Havuz yüzeyinden olan ısı kayıplar azaltıldığı takdirde, ÜTB ve TZB'de soğurulan ısıtım depolama sıcaklığının yükselmesine yardımcı olabilir.

Havuz içerisinde ısıtımın soğurulmasıyla birlikte ilk olarak iletim rejimi başlar. ATB ve ÜTB'de taşınım ile ısı ve kütle transferi meydana gelirken, TZB'de ise iletimle ısı ve kütle

transferi gerçekleşmektedir. Havuz içerisinde geçtiği yol boyunca soğurularak ilerleyen ışınlam ise, soğurulduğu her noktada bir ısı akısının oluşmasına neden olur. Bu nedenle, TTGH'da meydana gelen ısı olayları, iletim, taşınım ve ışınlamla olmak üzere üç ayrı grupta incelemek doğru olacaktır [7,29,68].

4.1.1. İletim Yoluyla Olan Isı Akısı

Bir akışkan tabakası içerisinde, derinliğe bağlı olarak soğurulan ışınlamın, tabakalar arasında neden olduğu sıcaklık farkı sonucunda, daha sıcak akışkan moleküllerinin kendisinden daha soğuk olan komşu moleküllere elastik çarpmasıyla birlikte ilk olarak iletimle ısı transferi başlar. Bu nedenle, havuz içerisinde ışınlamın soğurulmasıyla tabakalar arasında oluşan sıcaklık farkından dolayı, daha sıcak tabakalar ile daha soğuk tabakalar arasında daima iletim yoluyla olan bir ısı transferi vardır [5,23]. Havuz içerisinde Δx kalınlığındaki bir tabakada, sıcaklık farkına bağlı olarak iletimle oluşan ısı akısı,

$$q = -k \left(\frac{\Delta T}{\Delta x} \right) \quad (4.1)$$

şeklinde Fourier ısı iletim denklemiyle ifade edilir [24,28,55]. Denklemden, k ; ısı iletim katsayısını ($W/m^{\circ}C$), ΔT ; sıcaklık farkını ($^{\circ}C$), Δx ; tabaka kalınlığını (m) göstermektedir.

4.1.2. Taşınım Yoluyla Olan Isı Akısı

Havuz içerisinde taşınım ile olan ısı transferi, tabakalar arasındaki sıcaklık farkının neden olduğu yoğunluk farkından dolayı, akışkanın kaldırma kuvvetinin yerçekimi ve sürtünme kuvvetlerini yenmesiyle birlikte daha hafif olan akışkan moleküllerinin daha ağır olan akışkan molekülleriyle yer değiştirmek istemesi sonucu başlayacak olan taşınım hareketleriyle oluşmaktadır. Havuz içerisinde yeteri kadar büyük bir tuz yoğunluk gradyeni oluşturulduğu ve kararlılığı sağlanabildiği takdirde, ATB ile ÜTB arasında sıcaklık farkı olmasına rağmen, TZB'nin kararlı olması nedeniyle havuz içerisinde taşınım hareketi olmayacak, ATB'de depolanan ısı, ÜTB'ye doğru sadece iletimle kaçabilecektir. Bu nedenle, havuz içerisinde taşınım hareketinin başlaması, ATB ile ÜTB arasındaki sıcaklık farkının büyüklüğüne ve yoğunluk gradyeninin kararlılığına bağlıdır. Tuz yoğunluk

gradyeni, başlangıçta yeteri kadar büyük oluşturulmadığı takdirde, ATB'den ÜTB'ye doğru olan tuz difüzyonu nedeniyle kısa sürede gradyenin kararlılığı bozulacak ve ATB ile ÜTB arasındaki sıcaklık farkı belirli bir değeri geçtikten sonra havuz içerisinde taşınım hareketi başlayacaktır. ATB'den ÜTB'ye doğru başlayan bu taşınım hareketinin neden olduğu ısı akısı,

$$q = \rho C_p \omega T \quad (4.2)$$

eşitliği ile ifade edilebilir [5-7]. Denklemden, ρ ; çözeltinin yoğunluğunu (kg/m^3), C_p ; çözeltinin özgül ısısını ($\text{J/kg}^\circ\text{C}$), ω ; taşınım hareketinin düşey doğrultudaki ortalama hızını (m/s), T ; çözelti sıcaklığının ortalama değeri üzerinde sıcaklık dalgalanmasına neden olan sıcaklık değerini (K) göstermektedir.

4.1.3. Işınım Yoluyla Olan Isı Akısı

TTGH içerisinde ışınım enerjisi ile oluşan ısı akısı, ışınımın havuz içerisinde geçtiği yol boyunca soğurulmasıyla meydana gelmektedir. Işınımın havuz içerisinde soğurulması, havuz derinliğiyle azalmaktadır. Buna göre, ışıınımla oluşan ısı akısı havuzun derinliğiyle orantılı olup, havuz içerisinde herhangi bir noktada soğurulan ışınımın neden olduğu ısı akısı,

$$q = I(x) \quad (4.3)$$

eşitliği ile ifade edilebilir. Bu çalışmada, havuz içerisinde herhangi bir noktada soğurulan ışınım oranı, çözelti içerisinde soğurulan ışınımın havuz derinliği ile eksponensiyel olarak azaldığını ifade eden Beer Kanununun basitleştirilmiş şekli olan aşağıdaki eksponensiyel eşitlik kullanılarak bulunmuştur.

$$I(x) = (1 - a)(1 - \beta)I_s e^{-\mu z} \quad (4.4)$$

Buna göre, havuz içerisinde herhangi bir noktadaki çözelti tabakasında ışınımın soğurulmasıyla oluşan ısı akısı tekrar yazılacak olursa,

$$q = (1 - a)(1 - \beta)I_s e^{-\mu z} \quad (4.5)$$

eşitliği elde edilir [55,56,90]. Işınımın soğurulduğu tabakanın birim hacminde, birim zamanda üretilen ısı miktarı ise,

$$\dot{q} = -\frac{\partial I(x)}{\partial x} \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial I(x)}{\partial x} = -\mu(1 - a)(1 - \beta)I_s e^{-\mu z} \quad (4.7)$$

$$\dot{q} = \mu(1 - a)(1 - \beta)I_s e^{-\mu z} \quad (4.8)$$

şeklinde olur [12,88,90]. Denklemden, $I(x)$; havuzun x derinliğine kadar ulaşan ışınım şiddetini (W/m^2), I_s ; havuz yüzeyine direkt ve yayılı olarak gelen ışınım şiddetini (W/m^2), β ; havuz yüzeyinde ince bir tabaka tarafından soğurulan kızılötesi ışınım oranını, μ ; soğurma katsayısını (m^{-1}), a ; su yüzeyinin ışınımı yansıtma oranını, z ; ışınımın havuz içerisinde takip ettiği optik yolu (m) göstermektedir.

4.2. TTGH'larda Meydana Gelen Isıl Kayıplar

TTGH'larda ısı kaybı, havuz içerisinde yeteri kadar büyük bir tuz yoğunluk gradyeni oluşturulduğu takdirde, havuz zemininden, havuzun yan duvarlarından ve havuz yüzeyinden olmaktadır. Havuz zemininden ve yanlarından iyi bir şekilde yalıtıldığında ise, zemin ve yanlardan olan ısı kayıpları ihmal edilebilecek kadar küçük bir değer olmaktadır. Yapılan bu çalışmada, ele alınan güneş havuzu yanlarından ve zemininden tamamen yalıtılmış olduğundan, havuzdan meydana gelen ısı kayıpların havuz yüzeyinden taşınım, buharlaşma ve ışınım yoluyla olduğu kabul edilmiştir. Buna göre, havuz yüzeyinden ortama olan toplam ısı kaybı,

$$Q_L = Q_c + Q_e + Q_r \quad (4.9)$$

eşitliğinden hesaplanmıştır [7,35,55]. Q_c ; taşınım, Q_e ; buharlaşmayla, Q_r ; ışınım ile olan ısı

kayıplarını (W/m^2) göstermektedir. Taşınım ile olan ısı kaybı,

$$Q_c = h_c (T_s - T_\infty) \quad (4.10)$$

$$h_c = 5,7 + 3,8 V_r \quad (4.11)$$

eşitliğiyle hesap edilebilir [35,55,96,97]. Denklemden, h_c ; ısı taşınım katsayısını ($W/m^2\text{°C}$), T_s ; yüzey sıcaklığını (°C), T_∞ ; ortam sıcaklığını (°C), V_r ; rüzgar hızını (m/s) temsil etmektedir.

Buharlaşma ile olan ısı kaybı, atmosferdeki su buharının kısmi basıncı, suyun buhar basıncı ve ısı taşınım katsayısına bağlı olarak, aşağıdaki eşitliklerden hesaplanabilir [7,55,96].

$$Q_e = \frac{h_e h_c (P_s - P_\infty)}{1,6 C_a P_{atm}} \quad (4.12)$$

$$P_s = 133,3 \exp \left(18,403 - \frac{3885}{T_s + 230} \right) \quad (4.13)$$

$$P_\infty = 133,3 R_h \exp \left(18,403 - \frac{3885}{T_\infty + 230} \right) \quad (4.14)$$

Denklemden, h_e ; çözeltinin buharlaşma gizli ısısını (J/kg), h_c ; ısı taşınım katsayısını ($W/m^2\text{°C}$), P_s ; T_s (°C) sıcaklığındaki çözeltinin buhar basıncını (Pa), P_∞ ; T_∞ (°C) sıcaklığındaki atmosferdeki su buharının kısmi basıncını (Pa), C_a ; havanın özgül ısısını ($J/kg\text{°C}$), P_{atm} ; atmosfer basıncını (Pa), R_h ; yüzde bağıl nem oranını göstermektedir.

TTGH'larda en etkin ısı kaybı ışıyım ile olan ısı kaybıdır. Sıcaklıkları farklı akışkan yüzeyi ile atmosfer arasındaki elektromagnetik dalgaların neden olduğu bu ısı kaybı ise, aşağıda verilen şu eşitliklerden,

$$Q_r = \epsilon_w \sigma \left((T_s + 273,15)^4 - (T_{sky} + 273,15)^4 \right) \quad (4.15)$$

$$T_{sky} = T_{\infty} + \left(0,55 + 0,704 \left(\sqrt{P_{\infty}}\right)\right)^{0,25} \quad (4.16)$$

hesaplanabilir [35,55,97]. Denklemden, ϵ_w ; havuzdaki akışkan yüzeyinin neşretme katsayısını, σ ; Stefan-Boltzman Sabitini ($5.68 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$), T_s ; çözeltinin yüzey sıcaklığını ($^{\circ}\text{C}$), T_{sky} ; gökyüzü sıcaklığını ($^{\circ}\text{C}$), T_{∞} ; ortam sıcaklığını ($^{\circ}\text{C}$), P_{∞} ; T_{∞} ($^{\circ}\text{C}$) sıcaklığındaki atmosferdeki su buharının kısmi basıncını (Pa) temsil etmektedir.

4.3. TTGH Isı ve Kütle Transferi Matematik Modeli

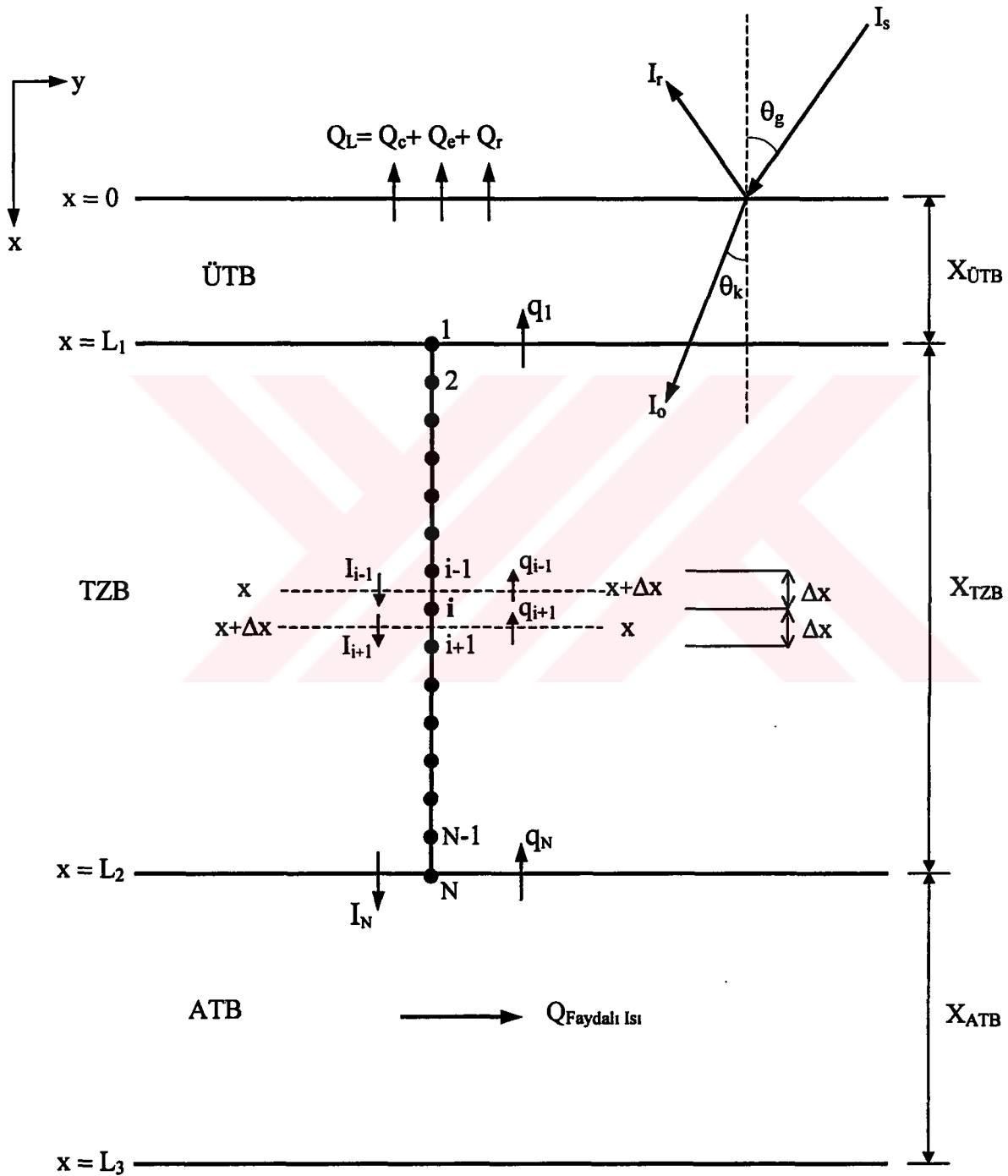
4.3.1. Matematik Modelleme

TTGH'nin performansını etkileyen parametreleri incelemek için bu konuda yapılan deneysel araştırmalar esas olmasına rağmen, deneysel çalışma çok zaman almakta ve oldukça maliyetli olmaktadır. Bu nedenle, bir çok araştırmacı TTGH'nin performans analizini, sistemi etkileyen değişik faktörlerin parametrik çalışmasını yaparak incelemişlerdir. TTGH'nin fiziğini ve nasıl çalıştığını anlayabilmek için matematik model gerekir. Bu konuda yapılan teorik analizler ve bilgisayar simülasyonları, TTGH teknolojisinin uygulanabilirliğini gösterebilme açısından alternatif yaklaşımlar sağladığı gibi, TTGH teknolojisine de katkıda bulunmaktadır. Yapılacak teorik bir çalışma sonucunda, havuzun gerçek ve teorik performansları arasındaki farkın nedenleri ve teorik performansa yaklaşılabileceği yolları araştırılabilecektir. Bu nedenle, deneysel çalışmaların yanı sıra havuzda gerçekleşen fiziksel olaylar göz önüne alınarak, havuzun teorik analizinin yapılması faydalı bir çalışma olacaktır [4,15,17].

4.3.2. Model TTGH'nin Fiziksel Parametreleri

Matematik model, havuzu oluşturan bölgelerdeki enerji ve kütle dengesi prensibine göre oluşturulmuştur. Şekil 4.1'de model TTGH'nin fiziksel özellikleri ve koordinatları görülmektedir. Model TTGH, ÜTB, TZB ve ATB olmak üzere üç farklı bölgeden oluşmaktadır. $X_{ÜTB}$; ÜTB tabaka kalınlığını, X_{TZB} ; TZB tabaka kalınlığını, X_{ATB} ; ATB tabaka kalınlığını göstermektedir. TTGH'nin ÜTB ve ATB bölgelerinde, taşınım ile ısı ve kütle transferi etkin olduğundan, bu bölgelerin sıcaklıkları ve yoğunlukları üniform olup, tabaka kalınlıkları boyunca sabit kalmaktadır. Bu nedenle, ÜTB ve ATB tek nokta olarak,

TZB ise her biri Δx büyüklüğünde N tane eşit noktaya bölünmüştür. Havuz yüzeyinden tabanına doğru, $x=0$; havuz yüzeyini, $x=L_1$; ÜTB-TZB ara yüzeyini, $x=L_2$; TZB-ATB ara yüzeyini, $x=L_3$; havuz tabanını göstermektedir.



Şekil 4.1. Model TTGH'nin fiziksel özellikleri ve havuzda meydana gelen ısı akısı

İçerisinde farklı fiziksel olayların meydana geldiği bir sistemde, sistemin çalışmasında etkili olan bütün fiziksel parametrelerin dikkate alınarak matematik modelinin oluşturulması oldukça zor ve karmaşık bir iştir. Bir sistem içerisindeki fiziksel olayların nasıl gerçekleştiği, birbirini ne derecede etkilediği, sistemin çalışma şartlarının bu olaylara etkisinin ne olduğunu tam olarak bilmek mümkün değildir. Bu nedenle, matematik model oluşturulurken, sistem içerisinde gerçekleşen fiziksel olaylar, sistemin özeliğini bozmayacak şekilde yapılacak varsayımlarla tanımlanmalıdır. Yapılacak olan varsayımlar, matematik modelin oluşturulması yanında, modelin çözümünün de yapılabilmesini sağlayacak şekilde olmalıdır. Sistemin tanımlanmasında, sistemin üzerindeki etkisi ihmal edilebilecek kadar küçük olan fiziksel parametrelerin dikkate alınması modelin çözümünü zorlaştırıyorsa, bu özellikler yapılacak varsayımlarla ihmal edilebilmektedir. Bu amaç doğrultusunda, bu konuda yapılan çalışmalar dikkate alınarak, TTGH matematik modelinin oluşturulabilmesi için aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır.

1. Modelde, havuzun yatay doğrultudaki sıcaklık değişiminin çok küçük olduğu düşünülerek, sadece dikey doğrultudaki sıcaklık değişimi dikkate alınmış ve havuzun ısı analizi bir boyutlu olarak yapılmıştır.
2. Havuz Şekil 4.1’de görüldüğü gibi ÜTB, TZB ve ATB olmak üzere üç farklı bölgeden oluşmaktadır. ATB ve ÜTB’de taşınım ile ısı transferi etkin olduğundan bu bölgelerin sıcaklık ve yoğunlukları tabaka kalınlıkları boyunca uniformdur.
3. Sıcaklıkları ve yoğunlukları tabaka kalınlıkları boyunca sabit olduğundan, ÜTB ve ATB tek nokta, TZB ise her biri Δx büyüklüğünde N tane noktaya bölünmüş eşit büyüklükte tabakalardan oluşmaktadır.
4. ATB-TZB ve TZB-ÜTB bölge sınırları havuzun çalışması esnasında hareket etmeyip, sabittir.
5. Havuz tabanının siyah cisim olması nedeniyle ışıınımı yansıtmadığı, havuz tabanına kadar ulaşan ışıının tamamı yine havuz tabanında soğurulmaktadır.
6. Havuz zemini ve yan duvarları tamamen yalıtılmış olduğundan, ısı kaybı sadece havuz yüzeyinden taşınım, buharlaşma ve ışıınım yoluyla olmaktadır.
7. Havuzda kullanılan çözeltinin ısı iletim katsayısı, yoğunluğu, özgül ısı gibi fiziksel parametrelerinin sıcaklık ve konsantrasyonla değişmeyip, havuz derinliği boyunca sabit olduğu varsayılmıştır.

4.3.3. TTGH Isı Transferi Matematik Modelinin Oluşturulması

Isı transferi matematik modeli, birim zamanda iletim, taşınım ve ışıınım yoluyla tabakaya giren ve çıkan enerjinin, o tabakada depolanan enerjiye eşit olması ilkesine dayanmaktadır. TTGH'nin TZB bölgesinde, Δx kalınlığındaki yatay bir akışkan tabakasında, zamana bağlı olarak oluşan enerji dengesi yazıldığında,

$$\left[\begin{array}{c} \text{Tabakaya} \\ \text{iletimle} \\ \text{giren ısı} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Tabakadan} \\ \text{iletimle} \\ \text{çıkan ısı} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Tabakaya} \\ \text{taşınım} \\ \text{giren ısı} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Tabakadan} \\ \text{taşınım} \\ \text{çıkan ısı} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Tabakaya} \\ \text{giren} \\ \text{ışınım} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Tabakadan} \\ \text{çıkan} \\ \text{ışınım} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Tabakada} \\ \text{depolanan} \\ \text{ısı} \end{array} \right]$$

şeklinde bir ifade elde edilir. Bu ifade, Şekil 5.1'de görülen (i) noktası için matematiksel olarak yazılacak olursa,

$$(q_{i+1})_i - (q_{i-1})_i + (q_{i+1})_t - (q_{i-1})_t + (I_{i-1})_i - (I_{i+1})_i = \rho C_p \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \Delta x \quad (4.17)$$

$$(q_x)_i - (q_{x+\Delta x})_i + (q_x)_t - (q_{x+\Delta x})_t + (I_x)_i - (I_{x+\Delta x})_i = \rho C_p \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \Delta x \quad (4.18)$$

$$\left[q_x - \left(q_x + \frac{dq_x}{dx} \Delta x \right) \right]_i + \left[q_x - \left(q_x + \frac{dq_x}{dx} \Delta x \right) \right]_t + \left[I(x) - \left(I(x) + \frac{dI(x)}{dx} \Delta x \right) \right]_i = \rho C_p \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \Delta x \quad (4.19)$$

şeklinde bir eşitlik elde edilir. Isı akısına bağlı olarak yazılan enerji dengesi, sıcaklık cinsinden yazıldığında ise,

$$\left[\left(-k \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right) - \left(-k \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(-k \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \Delta x \right) \right) \right] + \left[(\rho C_p \omega T(x,t)) - \left(\rho C_p \omega T(x,t) + \rho C_p \omega \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \Delta x \right) \right] + \left[I(x) - \left(I(x) + \frac{dI(x)}{dx} \Delta x \right) \right] = \rho C_p \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \Delta x \quad (4.20)$$

eşitliği elde edilir. Matematik modelden elde edilen bu denklemin tamamı ele alındığında, çözümü oldukça karmaşık ve zordur. Denklemin çözümünün yapılabilmesi için bazı kabuller yaparak denklemin basitleştirilmesi gerekmektedir. Tuz tabakalı güneş havuzlarının yapısı gereği, TZB'nin içermiş olduğu tuz yoğunluk gradyeni yeteri kadar büyük olduğunda, havuz tabanını yüzeyine göre daha sıcak olmasına rağmen, havuz içerisinde taşınım hareketi olmayacaktır. Bu nedenle, model güneş havuzunun oldukça büyük bir tuz yoğunluk gradyenine sahip olduğu düşünülerek, taşınım ile olan ısı akısı terimleri ihmal edilmiştir. Buna göre, yukarıdaki (4.20) denkleminde gerekli düzenlemeler yapıldığında, enerji denge denklemi,

$$\left(-k \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right) - \left(-k \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(-k \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right) \Delta x \right) + I(x) - \left(I(x) + \frac{dI(x)}{dx} \Delta x \right) = \rho C_p \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \Delta x \quad (4.21)$$

$$-k \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} + k \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right) \Delta x + I(x) - I(x) - \frac{dI(x)}{dx} \Delta x = \rho C_p \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \Delta x \quad (4.22)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right) \Delta x - \frac{dI(x)}{dx} \Delta x = \rho C_p \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \Delta x \quad (4.23)$$

şeklinde olur. Elde edilen (4.23) eşitliğinin her iki tarafı Δx ile bölündüğünde ise, (4.24) denklemi elde edilir.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right) - \frac{dI(x)}{dx} = \rho C_p \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \quad (4.24)$$

Elde edilen bu denklem, TTGH sıcaklık dağılımını bulmak için yapılan matematik modelden elde edilebilecek en sade denklemdir. Her bir tabakaya giren ve çıkan ısıtım enerjisi farkı, o tabakada ısıtımın soğurulmasıyla oluşan ısı üretimine eşittir. ısıtımının soğurulmasıyla tabakada, birim hacimde, birim zamanda oluşan ısı üretimi, ısıtımın tabakada soğurulma terimine bağlı olarak,

$$\dot{q} = -\frac{dI(x)}{dx} \quad (4.25)$$

eşitliği ile ifade edilir. Bu eşitlik, (4.24) denkleminde yerine yazıldığında, TTGH ısı transferi matematik model denklemi,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right) + \dot{q} = \rho C_p \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \quad (4.26)$$

şeklinde son halini alır. Taşınımsız ara bölgenin küçük bir kontrol hacminde enerji dengesinin yazılmasıyla elde edilen bu eşitlik, bir boyutlu, iç ısı üretimli, zamana bağlı ısı iletim denklemdir.

4.3.3.1. Isı Transferi Matematik Model Denkleminin Nümerik Çözümü

Zamana bağlı ısı iletim problemleri, ısı iletimi diferansiyel denklemlerinin konum ve zamana bağlı değişkenler ile sonlu farklar formülasyonuna dönüştürülerek nümerik olarak çözülebilir. Bu amaçla, ısı iletim denklemlerinin sonlu farklar formunda gösterimi için değişik metotlar geliştirilmiştir. Bu çalışmada, bu metotlardan birisi olan açık şema (explicit) metodu kullanılmıştır.

Yukarıda TZB için elde edilen ısı iletim denklemi, birinci dereceden zamana ve ikinci dereceden konuma bağlı olması nedeniyle denklemin çözümünün yapılabilmesi için, bir başlangıç ve iki sınır şartına ihtiyaç vardır. Başlangıç şartı olarak, havuz ilk sıcaklık dağılımının, havuz çalışmaya başladığı andaki sıcaklık dağılımına eşit olduğu, sınır şartları olarak ise, ÜTB sıcaklığı ($x=L_1$) ve ATB sıcaklığı ($x=L_2$) kabul edilebilir. Buna göre, TZB sıcaklık dağılımını veren ısı iletim denklemi, sınır şartları ile birlikte yazılacak olursa,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right) - \frac{dI(x)}{dx} = \rho C_p \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \quad L_1 < x < L_2 \quad (4.27)$$

$$T = T_{\text{havuz}} \quad 0 \leq x \leq L_3 \quad t = 0 \quad (4.27a)$$

$$T = T_{\text{ÜTB}} \quad x = L_1 \quad t > 0 \quad (4.27b)$$

$$T = T_{\text{ATB}} \quad x = L_2 \quad t > 0 \quad (4.27c)$$

şeklinde olur. ÜTB ve ATB sıcaklıkları, TZB boyunca ATB'den ÜTB'ye doğru iletimle ısı transferi ve ÜTB'den buharlaşma, taşınım ve ışıyım yoluyla ısı kaybı olduğu dikkate alınarak, her iki bölge için ayrı ayrı enerji dengesinin yazılması ile elde edilen eşitliklerden bulunabilir. Buna göre, ÜTB için enerji dengesi yazıldığında,

$$k \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=x_1} + \left(I|_{x=0} - I|_{x=L_1} \right) - Q_L = \rho C_p \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} X_{\text{ÜTB}} \quad x = L_1 \quad (4.28)$$

eşitliği elde edilir. Denklemden, birinci terim $x = L_1$ sınırında TZB'den ÜTB'ye iletimle olan ısı kaybını, ikinci terim ÜTB'de soğurulan net ışıyım akısını, üçüncü terim yüzeyden atmosfere olan ısı kaybını, dördüncü terim ise ÜTB içerisindeki enerji artışını göstermektedir.

Aynı şekilde ATB için enerji dengesi yazıldığında ise;

$$-k \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=L_2} + \left(I|_{x=L_2} \right) = \rho C_p \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} X_{\text{ATB}} \quad x = L_2 \quad (4.29)$$

şeklinde bir eşitlik elde edilir. Denklemden birinci terim, $x=L_2$ sınırında ATB'den TZB'ye iletimle kaybolan ısı kaybını, ikinci terim ATB'de soğurulan net ışıyım akısını, üçüncü terim ise ATB içerisindeki enerji artışını göstermektedir. Birbiriyle ilişkili olan (4.27), (4.28), (4.29) denklemleri, lineer olmayan ve zamanla parabolik olarak değişen kısmi diferansiyel denklemlerdir [35,55].

Subhaker ve Murthy[35], Antonopoulos ve Rogdakis [59], Chang ve Bannerot [68], Al-Jamal ve Khashan [50], El-Refae ve Al-Marafie [55], Zhang ve Wang [67], Rubin ve Benedict [8], Wang ve Yagoobi [88], Bozdemir ve Kayalı [82], havuz sıcaklık dağılımını bulmak için yapmış oldukları çalışmalarda, yukarıda elde etmiş olduğumuz ısı iletim denklemini uygun sınır şartlarında sonlu farklar metodunu kullanarak nümerik olarak çözmüşlerdir. Yapılan bu çalışmalar dikkate alınarak, model güneş havuzunun ısı analizi, yukarıda TZB için elde edilen enerji denge denklemini, sınır şartları olarak kabul edilen ÜTB ve ATB için elde edilen enerji denge denklemleriyle birlikte, sonlu farklar yaklaşımının açık şema (explicit) metodu kullanılarak nümerik olarak çözülmüştür.

Elde edilen enerji denge denklemlerinin nümerik çözümünün yapılabilmesi için, ilk olarak denklemler sonlu farklar yaklaşımı açık şema (explicit) metodu formunda yazılmıştır. Buna göre, TZB enerji dengesini gösteren (4.27) denklemi sonlu farklar formülasyonuna dönüştürüldüğünde,

$$k \frac{T(t, x_{i+1}) - 2T(t, x_i) + T(t, x_{i-1}))}{(\Delta x)^2} - \frac{1}{\Delta x} \left[I \left(\frac{x_i + x_{i-1}}{2} \right) - I \left(\frac{x_{i+1} + x_i}{2} \right) \right] = \rho C_p \frac{T(t + \Delta t, x_i) - T(t, x_i)}{\Delta t} \quad (4.30)$$

$$L_1 < x < L_2 \quad (4.30a)$$

şeklinde bir eşitlik elde edilir. ÜTB ve ATB bölgelerinin enerji dengelerinden elde edilen (4.28) ve (4.29) denklemleri, yukarıda TZB için yazılan sonlu farklar formülasyonuna benzer şekilde yazıldığında,

ÜTB için:

$$k \frac{T(x_2, t) - T(x_1, t)}{\Delta x} + I(x_1) - Q_L = \rho C_p X_{\text{ÜTB}} \frac{T(x_1, t + \Delta t) - T(x_1, t)}{\Delta t} \quad x = L_1 \quad (4.31)$$

ATB için:

$$-k \frac{T(x_N, t) - T(x_{N-1}, t)}{\Delta x} + I(x_N) = \rho C_p X_{\text{ATB}} \frac{T(x_N, t + \Delta t) - T(x_N, t)}{\Delta t} \quad x = L_2 \quad (4.32)$$

eşitlikleri elde edilir. Sonlu farklar formülasyonuna dönüştürülen (4.30), (4.31) ve (4.32) denklemlerini, daha sade bir şekilde yazabilmek için, eşitliklerde konum ve zaman koordinat değişkenleri olarak yer alan x ve t terimleri aşağıdaki şekilde tanımlanabilir [98].

$$x = i \Delta x \quad i = 0, 1, 2, 3, \dots, N ; \quad x = N \Delta x \quad (4.33)$$

$$t = n \Delta t \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (4.34)$$

$$T(x, t) = T(i \Delta x, n \Delta t) = T_i^n \quad (4.35)$$

Yapılan bu tanımlamaya göre, yukarıdaki (4.30) eşitliği tekrar yazıldığında,

$$k \frac{T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n}{(\Delta x)^2} - \frac{1}{\Delta x} \left[I \left(\frac{x_{i-1} + x_i}{2} \right) - I \left(\frac{x_{i+1} + x_i}{2} \right) \right] = \rho C_p \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} \quad (4.36)$$

şeklinde olur. Her bir tabakaya giren ve çıkan ısıtım enerjisi farkı, o tabakada soğurulan ısıtım akısına eşittir. Eşitliğin sol tarafındaki ikinci terimde, parantez içerisindeki ifade, tabakaya giren ve çıkan ısıtım enerjisi farkını, terimin tamamı ise, her bir tabakada ısıtımın soğurulmasıyla oluşan ısı üretimini göstermekte olup, aşağıdaki (4.37) eşitliğini ifade etmektedir.

$$\dot{q} = - \frac{\Delta I(x)}{\Delta x} \quad (4.37)$$

Bu eşitlik, (4.36) denkleminde yerine yazıldığında,

$$k \frac{T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n}{(\Delta x)^2} + \dot{q} = \rho C_p \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} \quad (4.38)$$

şeklinde bir eşitlik elde edilir. T_i^n , Şekil 4.1’de görülen (i) noktasının, T_{i+1}^n ve T_{i-1}^n (i) noktasına komşu iki noktanın (n) zaman aralığındaki sıcaklık değerleridir. T_i^{n+1} ise, (i) noktasının (n+1) zaman sonraki sıcaklık değeridir. Denkleminde, (n) ve (n+1) olmak üzere iki farklı zamandaki sıcaklık değerleri mevcuttur. (n+1) zamanı, (n) zamanına göre bir sonraki zaman aralığını gösterdiğinden, denkleminde bilinmeyen T_i^{n+1} sıcaklık değeridir. Buna göre, (4.38) denklemi, T_i^{n+1} sıcaklık değerini belirlemek üzere düzenlendiğinde,

$$T_i^{n+1} = r_\alpha (T_{i+1}^n + T_{i-1}^n) + (1 - 2r_\alpha) T_i^n + \frac{\alpha \Delta t}{k} [\dot{q}] \quad (4.39)$$

eşitliği elde edilir. Denklemindeki iç ısı üretimi terimi yerine (4.8) eşitliğindeki açık ifadesi yazıldığında ise,

$$T_i^{n+1} = r_\alpha (T_{i+1}^n + T_{i-1}^n) + (1 - 2r_\alpha) T_i^n + \frac{\alpha \Delta t}{k} [\mu(1 - a)(1 - \beta) I_s e^{-\mu z}] \quad (4.40)$$

$$i = 2, 3, 4, \dots, N - 1 \quad (4.40a)$$

$$n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (4.40b)$$

$$r_\alpha = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2} \quad (4.40c)$$

eşitliği elde edilir. Sonlu farklar formülasyonunda yazılan (4.40) denkleminde, r_α parametresiyle gösterilen katsayı nümerik hesaplamanın kararlılık kriteridir. Denklemin çözümündeki kararsızlık, zamanın artmasıyla kararlı durum şartlarından uzaklaşma ve bunun sonucunda hatalı sonuçların elde edilmesi olarak karakterize edilebilir. Bu kriter sağlanmadığı takdirde, nümerik hesaplamanın kararlılığı bozulacağından elde edilen sonuçlar gerçek sonuçlardan oldukça uzak sonuçlar olacaktır. Bu nedenle, r parametresi hesaplama üzerinde bir tahdit şartı oluşturmaktadır. Kararlılık kriterinin hesaplama sonuçları üzerindeki etkisini açıklayabilmek için, (4.40) denkleminde T_{i+1}^n ve T_{i-1}^n sıcaklık değerlerinin eşit ve T_i^n sıcaklık değerinden küçük olduğunu varsayalım. $(n+1)$ zaman sonra T_i^{n+1} sıcaklık değeri, T_{i+1}^n ve T_{i-1}^n sıcaklık değerlerinden daha düşük olamaz. Aksi halde ısı, alçak sıcaklıktan yüksek sıcaklığa akmış olur ki, bu durumda termodinamiğin ikinci kanununa aykırı bir olaydır. Bu nedenle, (4.40) denkleminde ki T_i^n 'nin sıcaklığının katsayısı negatif olmamalıdır. Buna göre, nümerik hesaplamanın kararlılık kriteri,

$$1 - 2r_\alpha \geq 0 \quad (4.41)$$

$$0 < r_\alpha \leq \frac{1}{2} \quad (4.42)$$

$$0 < \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2} \leq \frac{1}{2} \quad (4.43)$$

şeklinde olur. Denklem (4.43)'de görüldüğü gibi, kararlılık kriterini ifade eden r_α parametresi, Δx ve Δt değerleri üzerinde bir tahdit oluşturmaktadır. Bu nedenle, Δx ve Δt parametrelerinin değerleri belirlenirken, kararlılık kriterini sağlayacak şekilde seçilmelidir [98].

Sınır şartları olarak kabul edilen (4.31) ve (4.32) eşitlikleri de, (4.30) denkleminin yazıldığı şekilde sonlu farklar formunda yazıldığında,

$$T_1^{n+1} = r_\alpha \left[\beta_1 T_2^n + \beta_1 \frac{\Delta x}{k} (I(1) - Q(n)) \right] + (1 - r_\alpha \beta_1) T_1^n \quad i = 1 \quad (4.44)$$

$$\beta_1 = \frac{\Delta x}{X_{UTB}} \quad (4.44a)$$

$$T_N^{n+1} = r_\alpha \left[\beta_2 T_{N-1}^n + \beta_2 \frac{\Delta x}{k} I(N) \right] + (1 - r_\alpha \beta_2) T_N^n \quad i = N \quad (4.45)$$

$$\beta_2 = \frac{\Delta x}{X_{ATB}} \quad (4.45a)$$

$$n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (4.46)$$

$$r_\alpha = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2} \quad (4.47)$$

eşitlikleri elde edilir. Sınır şartları için geçerli olan tahdit şartı ise, yukarıda (4.40) denkleminde açıklandığı gibi, (4.44) denklemindeki T_1^n ve (4.45) denklemindeki T_N^n sıcaklık değerlerinin katsayıları olan $(1 - r_\alpha \beta_1)$ ve $(1 - r_\alpha \beta_2)$ değerleri negatif olmamalıdır. Buna göre, sınır şartları için gerekli olan kararlılık kriteri ise,

$$1 - r_\alpha \beta_1 \geq 0, \quad 0 < r_\alpha \leq \frac{1}{\beta_1}, \quad 0 < \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2} \leq \frac{X_{UTB}}{\Delta x} \quad i = 1 \quad (4.48)$$

$$1 - r_\alpha \beta_2 \geq 0, \quad 0 < r_\alpha \leq \frac{1}{\beta_2}, \quad 0 < \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2} \leq \frac{X_{ATB}}{\Delta x} \quad i = N \quad (4.49)$$

şeklinde olur. (4.44) ve (4.45) denklemlerindeki r_α parametresi, (4.40) denkleminde tanımlanan kararlılık kriteridir. Nümerik çözümün kararlı olabilmesi için, (4.40), (4.44) ve (4.45) denklemlerinde kararlılık kriteri olarak tanımlanan r_α parametresi, (4.42), (4.48) ve

(4.49) denklemlerinde verilen tahdit şartlarını birlikte sağlaması gerekir [98]. Bu çalışmada, kararlılık kriterini etkileyen konum aralığı, Δx değeri 0.05 m, zaman aralığı Δt değeri ise, 1 saat olarak seçilmiştir. Yapılan hesaplama sonucunda, kararlılık kriteri r_α parametresinin değeri 0.21168 olarak bulunmuştur. Δx ve Δt için seçilen bu değerler, (4.42), (4.48) ve (4.49) denklemlerinde sağlanması gereken kararlılık kriterini yerine getirmektedir.

4.3.3.2. TTGH Sıcaklık Dağılımının Bilgisayar Yardımıyla Hesaplanması

Zamana bağlı ısı iletim problemlerinin nümerik çözümü, en genel metotlardan birisi olan sonlu farklar yaklaşımı kullanılarak yapılabilir. Problemi oluşturan kısmi diferansiyel denklemler, konuma ve zamana bağlı sonlu farklar formülasyonuna dönüştürülerek nümerik olarak çözülebilir. Çözümü yapılacak denklemlerin sonlu farklar formunda yazılabilmesi için çeşitli metotlar geliştirilmiştir. Bu çalışmada, TTGH matematik modelinden elde edilen diferansiyel denklemler açık şema (eksplicit) metodu kullanılarak sonlu farklar formunda yazılmıştır. Açık şema (explicit) metoduna göre, hesaplanması istenen (i) noktasının (n+1) zaman aralığındaki sıcaklık değeri T_i^{n+1} , (i) noktasına komşu iki noktanın bir önceki zaman aralığındaki (n) sıcaklık değerlerinden hesaplanmaktadır [98].

Hesaplama prosedürü, n değerine sıfır (t=0) değeri verilerek, ilk başlangıç şartı olarak kabul edilen havuz çalışmaya başladığı andaki sıcaklık değerleriyle başlar ve sırasıyla $T_1^1, T_2^1, \dots, T_{N-1}^1, T_N^1$ sıcaklık değerleri hesaplanır. ÜTB sıcaklık değeri olan T_1^1 , (4.44) denkleminde, TZB sıcaklık değerleri olan $T_2^1, T_3^1, T_4^1, \dots, T_{N-1}^1$ sıcaklıkları (4.40) denkleminde, ATB sıcaklık değeri olan T_N^1 (4.45) denkleminde hesaplanır. Hesaplamanın yapıldığı ilk zaman aralığında (n=0), (4.40), (4.44) ve (4.45) denklemlerinin sağ tarafındaki sıcaklık değerleri, ilk şart olarak kabul edilen havuz sıcaklık değerleridir [98].

Daha sonra, zaman değişkeni (n) parametresinin değeri bir arttırılarak (t+ Δt) yeniden başa dönmek suretiyle, bir önceki zaman aralığında (n=0) hesaplanan $T_1^1, T_2^1, T_3^1, \dots, T_N^1$ sıcaklık değerleri kullanılarak yine sırasıyla $T_1^2, T_2^2, T_3^2, \dots, T_N^2$ sıcaklık değerleri hesaplanır. Hesaplama prosedürü, (n) parametresinin değeri her defasında bir arttırılmak suretiyle, sıcaklık değerleri istenilen zaman aralığına kadar, bir önceki zaman aralığında

hesaplanan sıcaklık değerlerine bağlı olarak devam eder [98]. Hesaplama sonuçları, Ek. A'da verilmiş olan akış şemasına göre Fortran bilgisayar dilinde yazılan bilgisayar programı yardımıyla hızlı bir şekilde elde edilmiştir. Bilgisayar programında kullanılan değişkenlerin listesi ve açıklaması Ek.C'de, bilgisayar programı ise Ek.D'de sunulmuştur.

4.3.4. TTGH Kütle Transferi Matematik Modelinin Oluşturulması

Havuz içerisindeki kütle dengesi, kütle korunum denkleminde, ortamda kimyasal reaksiyonun olmadığı, kütle miktarının değişmeyip sabit kaldığı, kütle transferinin kütsel difüzyonla gerçekleştiği, tuz difüzyonunun sıcaklık ve konsantrasyonla değişmeyip havuz içerisindeki her noktada sabit olduğu varsayılarak,

$$\left[\begin{array}{c} \text{Tabakaya difüzyonla} \\ \text{giren kütle miktarı} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Tabakadan difüzyonla} \\ \text{çıkan kütle miktarı} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Tabakadaki} \\ \text{kütle artış miktarı} \end{array} \right]$$

şeklinde ifade edilebilir. Şekil 4.2'de görüldüğü gibi, Δx kalınlığındaki bir diferansiyel hacim elementi için x yönünde bir boyutlu kütle difüzyonu, kütle korunumuna göre matematiksel bir ifade ile yazıldığında,

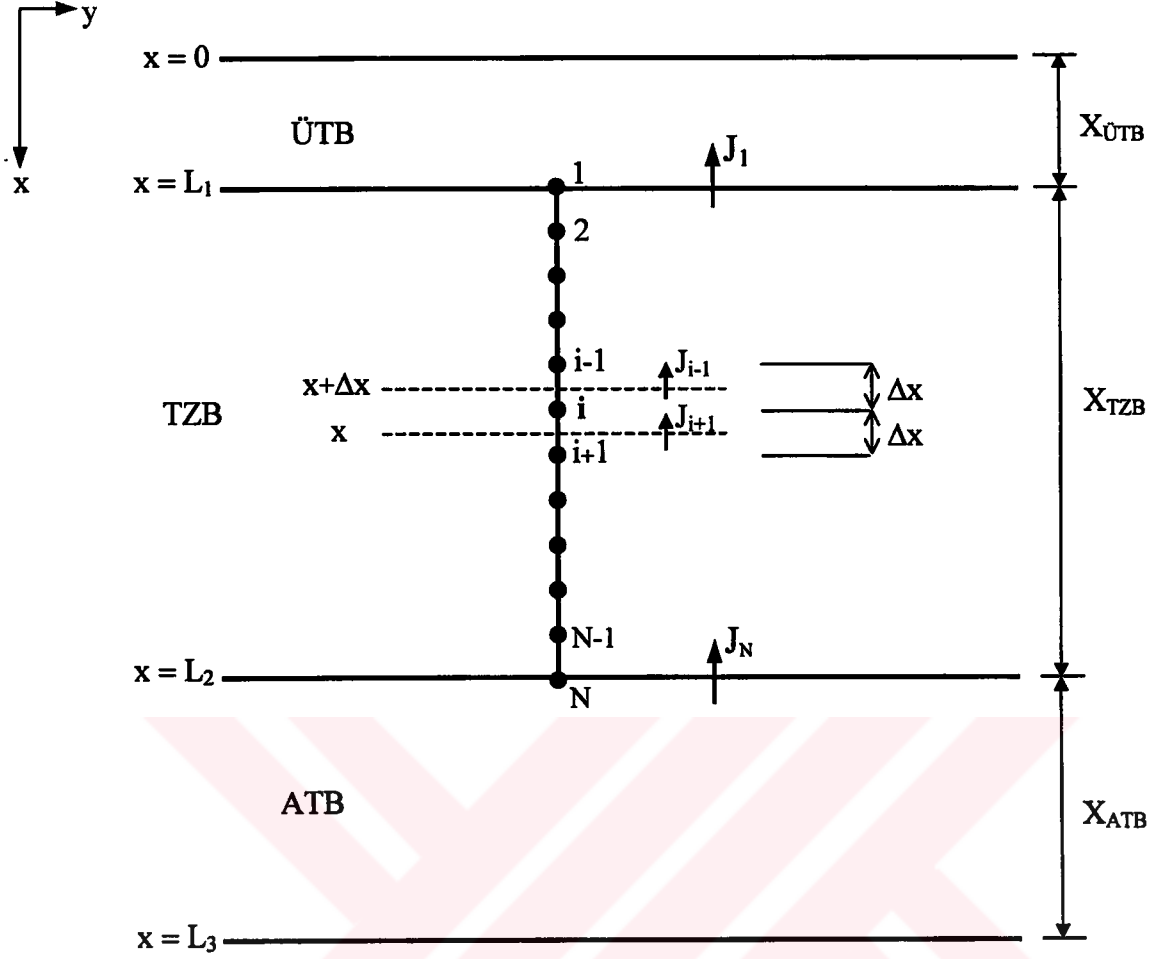
$$(J_{i+1}) - (J_{i-1}) = \left(\frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} \right) \Delta x \quad (4.50)$$

$$(J_x - J_{x+\Delta x}) = \left(\frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} \right) \Delta x \quad (4.51)$$

eşitliği elde edilir. Denklemden, J ; kütsel difüzyon akısını ($\text{kg/m}^2\text{s}$), ρ ; çözeltinin yoğunluğunu (kg/m^3), t ise zamanı (s) göstermektedir.

Denklem (4.47)'de gerekli düzenlemeler yapıldığında,

$$-\left(\frac{(J|_{x+\Delta x} - J|_x)}{\Delta x} \right) = \frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} \quad (4.52)$$



Şekil 4.2. Model TTGH'nin fiziksel özellikleri ve havuzda meydana gelen kütle difüzyonu

şeklinde bir eşitlik elde edilir. Δx değerinin sıfıra yakın küçük bir değer olduğu kabul edildiğinde, eşitliğin sol tarafındaki terim, kütle akısı J 'nin x 'e göre türevi olarak aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$-\frac{\partial J}{\partial x} = \frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} \quad (4.53)$$

Fick kütle difüzyon kanununa göre, kütle difüzyon akısı,

$$J = -D \frac{\partial \rho(x, t)}{\partial x} \quad (4.54)$$

eşitliğinden elde edilerek, (4.53) denkleminde yerine yazıldığında,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial \rho(x, t)}{\partial x} \right) = \frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} \quad (4.55)$$

şeklinde TTGH'nin yoğunluk dağılımını belirleyen kütle difüzyon denklemi elde edilmiş olur. Denkleminde, ρ ; çözeltinin yoğunluğunu (kg/m^3), D ; çözeltinin kütle yayılım katsayısını (m^2/s), t ; zamanı (s), x ; havuz derinliğini (m) göstermektedir. Elde edilen bu denklem, TTGH yoğunluk dağılımının hesaplanmasında çeşitli araştırmacılar tarafından kullanılmıştır [35,99].

TTGH'nin kütle transferi matematik modelinden elde edilen bu denklem, zamana bağlı iç ısı üretimsiz ısı iletim denkleminde benzerdir. Bu nedenle, ısı iletim denklemini çözmek için önerilen çözüm prosedürü bu denkleminde uygulanabilir. Isı iletim denkleminin çözümü için gerekli bütün şartlar, bu denklemin çözümü içinde geçerlidir. Buna göre, (4.55) denklemini çözebilmek için ısı iletim denkleminde olduğu gibi bir başlangıç ve iki tanede sınır şartına ihtiyaç vardır. Başlangıç şartı olarak, havuzun doldurulduğu andaki yoğunluk değerleri kullanılabilir. Sınır şartları olarak ise, ATB ve ÜTB taşınımlı bölge olmaları nedeniyle tabaka kalınlığı boyunca üniform yoğunluğa sahip olduklarından, TZB'nin alt ve üst sınırları düşünülebilir. Şekil 4.2'de görüldüğü gibi, $x = L_2$ sınırında ATB'den TZB'ye, $x = L_1$ sınırında ise TZB'den ÜTB'ye doğru tuz difüzyonu olduğu kabul edilerek, bu sınırlarda yazılan kütle dengesinden sınır şartları oluşturulur. Yapılan bu kabullere göre, (4.55) denklemi tekrar yazıldığında,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial \rho(x, t)}{\partial x} \right) = \frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} \quad L_1 < x < L_2 \quad (4.56)$$

$$\rho = \rho_{\text{havuz}} \quad 0 \leq x \leq L_3 \quad t = 0 \quad (4.56a)$$

$$\rho = \rho_1 \quad 0 \leq x \leq L_1 \quad t > 0 \quad (4.56b)$$

$$\rho = \rho_N \quad L_2 \leq x \leq L_3 \quad t > 0 \quad (4.56c)$$

şeklinde çözüme hazır bir denklem takımı elde edilir. Sınır şartı olarak kabul edilen TZB'nin ÜTB ve ATB sınırlarında ki kütle dengesi yazıldığında,

$$D \frac{\partial \rho(x, t)}{\partial x} = X_{\dot{U}TB} \frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} \quad x = L_1 \quad t > 0 \quad (4.57)$$

$$-D \frac{\partial \rho(x, t)}{\partial x} = X_{ATB} \frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} \quad x = L_2 \quad t > 0 \quad (4.58)$$

eşitlikleri elde edilir. Elde edilen bu denklemler, ısı iletim denklemlerinde olduğu gibi sonlu farklar formülasyonuna dönüştürüldüğünde,

TZB için:

$$D \frac{\rho(t, x_{i+1}) - 2\rho(t, x_i) + \rho(t, x_{i-1}))}{(\Delta x)^2} = \frac{\rho(t + \Delta t, x_i) - \rho(t, x_i)}{\Delta t} \quad L_1 < x < L_2 \quad (4.59)$$

$$D \frac{\rho_i^n - 2\rho_i^n + \rho_{i-1}^n}{(\Delta x)^2} = \frac{\rho_i^{n+1} - \rho_i^n}{\Delta t} \quad (4.60)$$

$$\rho_i^{n+1} = r_D (\rho_{i+1}^n + \rho_{i-1}^n) + (1 - 2r_D) \rho_i^n \quad (4.61)$$

$$r_D = \frac{D\Delta t}{(\Delta x)^2} \quad (4.62)$$

$i = 2, 3, 4, \dots, N-1$

$n = 0, 1, 2, 3, \dots$

ÜTB için:

$$D \frac{\rho(x_2, t) - \rho(x_1, t)}{\Delta x} = X_{\dot{U}TB} \frac{\rho(x_1, t + \Delta t) - \rho(x_1, t)}{\Delta t} \quad x = L_1 \quad (4.63)$$

$$\rho_1^{n+1} = r_D \beta_1 \rho_2^n + (1 - r_D \beta_1) \rho_1^n \quad i = 1 \quad (4.64)$$

$$\beta_1 = \frac{\Delta x}{X_{\dot{U}TB}} \quad (4.65)$$

$$r_D = \frac{D \Delta t}{(\Delta x)^2} \quad (4.66)$$

$n = 0, 1, 2, 3, \dots$

ATB için:

$$-D \frac{\rho(x_N, t) - \rho(x_{N-1}, t)}{\Delta x} = X_{ATB} \frac{\rho(x_N, t + \Delta t) - \rho(x_N, t)}{\Delta t} \quad x = L_2 \quad (4.67)$$

$$\rho_N^{n+1} = r_D \beta_2 \rho_{N-1}^n + (1 - r_D \beta_2) \rho_N^n \quad i = N \quad (4.68)$$

$$\beta_2 = \frac{\Delta x}{X_{ATB}} \quad (4.69)$$

$$r_D = \frac{D \Delta t}{(\Delta x)^2} \quad (4.70)$$

$n = 0, 1, 2, 3, \dots$

denklemleri elde edilir. Kütle transferi denklemlerinin sonlu farklar formülasyonuna dönüştürülmesinde, ısı transferi matematik model denklemlerinde takip edilen metot kullanıldığından denklemlerin elde edilişi kısa olarak anlatılmıştır.

Isı transferi denklemlerinde olduğu gibi, sonlu farklar formunda yazılan kütle transferi denklemlerinin çözümünden kararlı sonuçlar elde edilebilmesi için, (4.61), (4.64) ve (4.68) denklemlerindeki r_D parametresi ile gösterilen kararlılık kriterinin sağlanması gerekir. Isı transferi denklemlerinde geçerli olan bütün kararlılık kriter şartları, kütle transferi kararlılık kriterleri içinde geçerlidir. Buna göre, kararlılık kriterinin kütle transferi denklemlerinin çözümü üzerinde oluşturduğu tahdit şartları,

$$1 - 2r_D \geq 0, \quad 0 < r_D \leq \frac{1}{2}, \quad 0 < \frac{D \Delta t}{(\Delta x)^2} \leq \frac{1}{2} \quad 1 < i < N \quad (4.71)$$

$$1 - r_D \beta_1 \geq 0, \quad 0 < r_D \leq \frac{1}{\beta_1}, \quad 0 < \frac{D\Delta t}{(\Delta x)^2} \leq \frac{X_{\text{ÜTB}}}{\Delta x} \quad i = 1 \quad (4.72)$$

$$1 - r_D \beta_2 \geq 0, \quad 0 < r_D \leq \frac{1}{\beta_2}, \quad 0 < \frac{D\Delta t}{(\Delta x)^2} \leq \frac{X_{\text{ATB}}}{\Delta x} \quad i = N \quad (4.73)$$

şeklinde olmaktadır.

4.3.4.1. TTGH Yoğunluk Dağılımının Bilgisayar Yardımıyla Hesaplanması

TTGH yoğunluk dağılımı, sıcaklık dağılımında olduğu gibi sonlu farklar yaklaşımının açık şema (explicit) metodu kullanılarak hesaplanmıştır. Bu nedenle, sıcaklık dağılımının hesaplanmasında izlenen yol, aynı şekliyle yoğunluk dağılımının hesaplanmasında da izlenmiştir.

Hesaplama prosedürüne sıcaklık dağılımında olduğu gibi, n değerine sıfır ($t=0$) değeri verilerek, ilk başlangıç şartı olarak kabul edilen havuzun doldurulduğu andaki yoğunluk değerleriyle başlanır ve sırasıyla $\rho_1^1, \rho_2^1, \dots, \rho_{N-1}^1, \rho_N^1$ yoğunluk değerleri hesaplanır. ÜTB yoğunluk değeri olan ρ_1^1 , (4.64) denkleminde, TZB yoğunluk değerleri olan $\rho_2^1, \rho_3^1, \rho_4^1, \dots, \rho_{N-1}^1$ yoğunlukları (4.61) denkleminde, ATB yoğunluk değeri olan ρ_N^1 (4.68) denkleminde hesaplanır. Hesaplamanın yapıldığı ilk zaman aralığında ($n=0$), (4.61), (4.64) ve (4.68) denklemlerinin sağ tarafındaki yoğunluk değerleri, ilk şart olarak kabul edilen havuz doldurulduğu andaki yoğunluk değerleridir [98].

Daha sonra, zaman değişkeni (n) parametresinin değeri bir arttırılarak ($n=1$) yeniden başa dönmek suretiyle, bir önceki zaman aralığında ($n=0$) hesaplanan $\rho_1^1, \rho_2^1, \rho_3^1, \dots, \rho_N^1$ yoğunluk değerleri kullanılarak, yine sırasıyla $\rho_1^2, \rho_2^2, \rho_3^2, \dots, \rho_N^2$ yoğunluk değerleri hesaplanır. Hesaplama prosedürü, (n) parametresinin değeri her defasında bir arttırılmak suretiyle, yoğunluk değerleri istenilen zaman aralığına kadar, bir önceki zaman aralığında hesaplanan yoğunluk değerlerine bağlı olarak devam eder [98]. Hesaplama sonuçları, Ek. B'de verilmiş olan akış şemasına göre Fortran bilgisayar dilinde yazılan bilgisayar programı yardımıyla hızlı bir şekilde elde edilmiştir. Bilgisayar programında kullanılan değişkenlerin listesi ve açıklaması Ek.C'de, bilgisayar programı ise Ek.E'de sunulmuştur.

BÖLÜM 5. DENEYLER

TTGH içerisinde meydana gelen olayların nasıl gerçekleştiğini anlayabilmek için matematik model yanında, laboratuvar şartlarında yapılan çalışmalara da ihtiyaç vardır. Ticari amaçlı büyük ölçekli TTGH'lar inşa edebilmek için, model çalışmalarından çok deneysel çalışmaların yapılması gerekir. Laboratuvar şartlarında kontrollü olarak yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ve tecrübeler, TTGH teknolojisinin gelişmesine ve uygulamada karşılaşılabilecek sorunların çözümüne katkıda bulunacaktır.

Ülkemiz, TTGH teknolojisinin uygulanması açısından oldukça elverişli olmasına rağmen, literatüre bakıldığında bu konuda pek fazla çalışma yapılmadığı görülmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada TTGH'ların matematik modellemesi yanında, yapılan deneysel çalışma ile TTGH teknolojisinin gelişimine katkıda bulunulmuştur.

Sodyum klorür (NaCl) çözeltisi içeren doğal güneş göllerinden esinlenerek, NaCl tuzu içeren çözeltiyle yapay olarak oluşturulan yoğunluk gradyenli TTGH'larda ısı depolanabildiği, bu güne kadar yapılan deneysel çalışmalarla ispatlanmıştır. TTGH'larla ilgili yapılan deneysel çalışmalarda, tuz yoğunluk gradyeni genelde NaCl tuzu kullanılarak oluşturulmuştur. Yapay TTGH fikrinin, keşfedilen NaCl çözeltili doğal güneş göllerinden esinlenerek ortaya çıkmış olması, sadece NaCl çözeltili ortamlarda ısı depolanabileceğini göstermez. Doğal güneş göllerinde görülen benzer özellikler, farklı çözelti içeren göllerde de görülebilir. Bu düşünceden yola çıkarak, ülkemizin ikinci büyük gölü olan ve çamaşır sodası olarak bilinen sodyum karbonat çözeltisi içeren Van Gölü'nde böyle bir özeliğin olup olmadığını araştırmadan önce, sodyum karbonat çözeltili bir ortamda ısı depolanıp depolanamayacağının araştırılmasının gerektiği kanaatine varılmıştır. Bu amaç doğrultusunda yapılan literatür çalışması sonucunda, TTGH'ların yoğunluk gradyeninin oluşturulmasında, bu güne kadar potasyum sülfat, potasyum nitrat (KNO_3), potasyum klorür (KCl), amonyum sülfat, amonyum nitrat (NH_4NO_3), magnezyum klorür ($MgCl_2$) gibi farklı tuzlar kullanılarak deneysel çalışmalar yapılmış olmasına rağmen, sodyum karbonat tuzu kullanılarak oluşturulmuş yoğunluk gradyeni içeren TTGH'da yapılmış bir çalışmaya rastlanılamamıştır. Sadece, Lund ve Keinonen [32]'nin, küçük bir laboratuvar havuzunda değişik tuzların yanında, farklı konsantrasyonlardaki soda-su çözeltisinin soğurma katsayısını ve ısıtım geçirgenliğini havuz derinliğinin fonksiyonu olarak ölçmüş oldukları

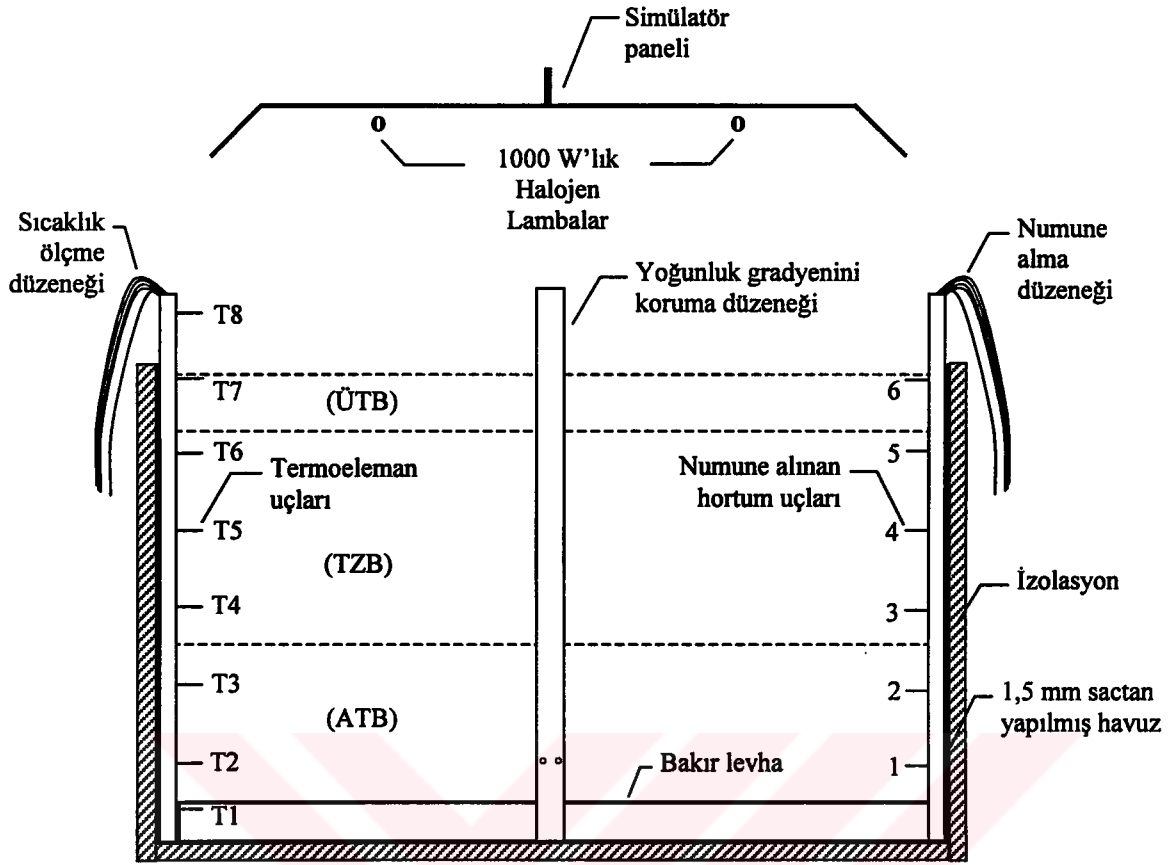
görülmüştür. Ölçüm sonuçlarına göre; sodanın ısıtım geçirgenliği yönünden, TTGH'larda kullanılan KNO_3 ve MgCl_2 tuzlarıyla aynı özelliğe sahip olduğu, soğurma katsayısı açısından ise, MgCl_2 , NaNO_3 tuzları ve sodanın TTGH'lar için uygun, kabul edilebilir tuzlar olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan bu çalışmanın amacı, bu güne kadar TTGH'larda tuz yoğunluk gradyeninin oluşturulmasında kullanılmamış olan sodanın, bu amaç doğrultusunda kullanılarak, soda-su çözeltisi ile oluşturulan bir havuzda ısı depolanıp depolanamayacağını incelemek ve sodanın TTGH'lar için uygun bir tuz olup olmadığını ortaya çıkarmaktır. Bu amaç doğrultusunda, deneysel çalışmanın laboratuvar şartlarında yapılabilmesi için küçük ölçekli bir deney tesisatı hazırlanmıştır.

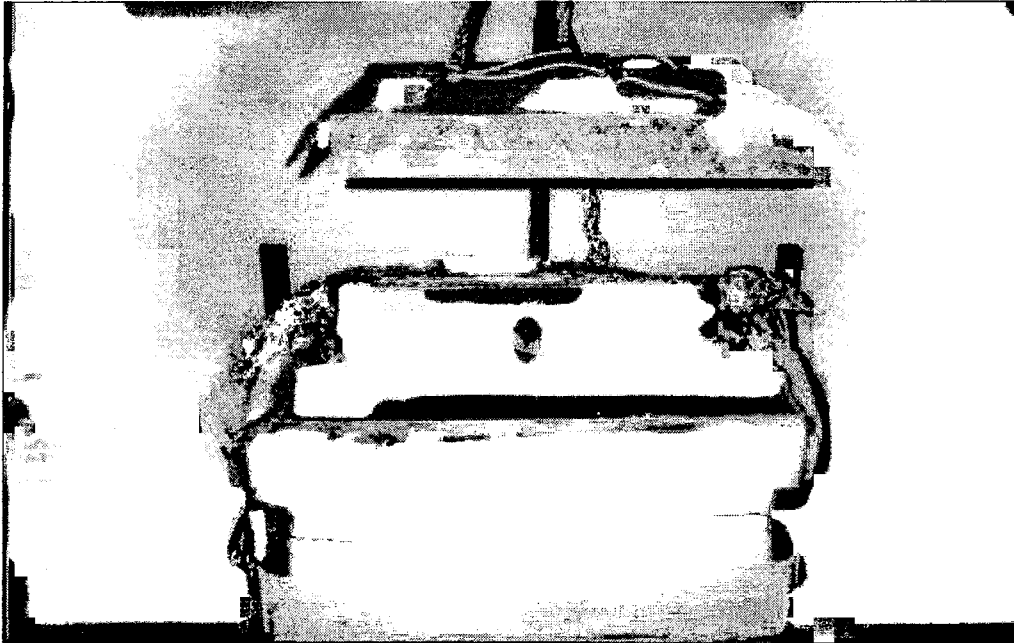
5.1. Deney Tesisatı

Deneylerin yapılabilmesi için Karabük Teknik Eğitim Fakültesi'nde, $60 \times 50 \text{ cm}^2$ yüzey alanına, 60 cm derinliğe sahip, 1.5 mm galvanizli paslanmaz sactan bir deney havuzu hazırlanmıştır. Şekil 5.1'de deney havuzunun şematik olarak fiziki yapısı, Şekil 5.2'de ise deneye hazır hale getirilmiş olan havuzun resmi görülmektedir. Tuzlu suyun korozyon etkisini önlemek amacıyla havuzun iç yüzeyi gri renkte mat antipas boya ile boyanmıştır. Daha sonra, havuz içerisindeki sıcaklık dağılımını ölçmek için, bir boru üzerine yerleştirilmiş olan termoeleman düzeneği havuzun bir tarafına, havuz yoğunluk dağılımını belirlemek için yine bir boru üzerine yerleştirilmiş olan havuz içerisinden numune alma düzeneği ise havuzun diğer tarafına sabitlenmiştir. Havuzun tam orta noktasına ise, havuz içerisinde oluşturulan tuz yoğunluk gradyeninin başlangıçtaki büyüklüğünü koruyabilmek amacıyla, 5 cm çapında, 70 cm uzunluğunda plastik bir borudan oluşan yoğunluk koruma düzeneği yerleştirilmiştir.

Havuz tabanına kadar ulaşan ısıtımın su tarafından yansıtılmadan ve saçılmadan soğurulabilmesi ve depolama bölgesindeki sıcaklığın homojen olarak dağılımını sağlaması amacıyla havuz tabanına, tabandan yüksekliği 5 cm olacak şekilde, yüzeyi siyah mat boya ile boyanmış 1 mm kalınlığında bir bakır levha yerleştirilmiştir.



Şekil.5.1. Deney havuzunun şematik olarak görünümü



Şekil 5.2. Deneye hazır hale getirilmiş olan deney havuzu

Havuzun zemin ve yan duvarlarından olacak olan ısı kayıpları önlemesi için, havuz zemininden ve yanlarından 2 cm kalınlığında cam yünüyle, cam yünü üzeri ise 3 cm kalınlığında strafor ile kaplanarak iyi bir şekilde yalıtılmıştır. Havuz deneye hazır hale getirildikten sonra, enerji kaynağı düzeneğinin ortasına yerleştirilerek deneylere başlanmıştır.

5.2. Enerji Kaynağı

Güneş enerjisiyle ilgili deneyler, deneyi etkileyen parametrelerin açık hava ortamında istenilen şartlarda kontrolünün sağlanamaması nedeniyle çok zaman almakta ve bu deneylerden çoğu zaman beklenen sonuçlar elde edilememektedir. Bir güneş simülatörü kullanmak suretiyle, yapılacak deneyler laboratuvar ortamında istenilen şartlarda kontrollü olarak yapılabilir. Güneş simülatörü, gerçek güneş radyasyonuna yakın spektral ışıyım veren bir ışık kaynağıdır. Simülatörün ışıyım akısı, değişik şiddetlerde ve sınırlarda ayarlanabilmektedir. Böylece, yapılacak deneyler, laboratuvar şartlarında sürekli olarak daha kısa zamanda yapılabilir [100,101].

Güneş enerjisi konusunda çalışan bir çok araştırmacı, yapmış oldukları deneyleri laboratuvar şartlarında, dizayn ettikleri güneş simülatörü ile yapmışlardır. Göktun [84], McMillan ve Peterson [100], Kiatsiriroat ve Thalang [101], Kıran ve İnan[102], Shobokshy ve Hussein [103], Alekseeva ve arkadaşları [104], Govaer [105], Kenny ve Davidson [106], Indrajit ve arkadaşları [107], Garg ve arkadaşları [108] bunlardan bir kaçıdır.

Göktun [84], güneş enerjisine yakın bir spektrum ve paralel bir ışıyım elde etmek amacıyla silindirik-parabolik şeklindeki alüminyum bir levhayı yansıtıcı olarak kullanmış ve levhanın merkezine 1000 W'lık, 220-240 V Sylvania tungsten-halojen quartz bir lamba yerleştirmek suretiyle, bir simülatör dizayn ederek, laboratuvar şartlarında güneş havuzunda enerji depolama olayını ve havuz kararlılık teorisini incelemiştir.

Kıran ve İnan [102], güneş pillerinin enerji dönüşüm verimini belirleyebilmek için 12 V-50 W'lık 42 tane Philips GLS ampullerden oluşan bir güneş simülatörü dizayn etmişlerdir.

Shobokshy ve Hussein [103], güneş pillerinin performansını etkileyen parametreleri, bir

eksen üzerinde hareket edebilen panel üzerine monte edilmiş, 3 tane 1000 W'lık tungsten halojen lambadan oluşan bir güneş simulatörü yardımıyla incelemişlerdir.

Güneş kolektörlerinin performansını sürekli rejim şartlarında test etmek için; Indrajit ve arkadaşları [107] 14 adet 1000 W'lık Philips halojen lamba kullanarak, Kiatsiriroat ve Thalang [101] 115 Osram HQT-R 250 W/DL lambalar kullanarak, Alekseeva ve arkadaşları [104] DRI-1000-6 tipi 25 W lambalar kullanarak, Govaer [105] 120 V'luk gerilim değerinde çalışan 300 W'lık 66 Sylvania Ps 30/8 akkor lambaları alüminyum bir reflektöre monte ederek, Indrajit ve arkadaşları [107] ise, 14 adet 1000 W'lık Philips halojen lamba kullanarak, bir güneş simulatörü dizayn etmişlerdir.

Kenny ve Davidson [106], 28 tane compact civa iyotlu gaz boşaltmalı lamba kullanarak düşük maliyetli ve geniş ölçekli bir simulatör dizayn etmişlerdir. Simulatörden elde edilen ışıının karakteristiği, bir lambadan elde edilen ışıının şiddetinin dağılımı ölçülerek belirlenmiştir. Çoklu lamba kullanılması durumunda, ASHRAE tarafından belirlenmiş olan ışıının şiddeti ayarı, ışıının monotonluğu, kararlılığı, sürekliliği ve istikrarının sağlanabilmesi oldukça zordur.

McMillan ve Peterson [100], 650 W Sylvania tungsten halojen lamba kullanarak dizayn etmiş oldukları simulatörlerde, kızılötesi ışıının fazlalığını optik bir filtre kullanarak gidermeye çalışmışlardır. Ayrıca, değişik seçici yüzeyler kullanarak, bu problemi çözmenin yollarını araştırmışlardır.

Garg ve arkadaşları [108], laboratuvar şartlarında bir güneş simulatörü dizayn ederek güneş kolektörleri için bir prosedür önermişlerdir. Simulatör, 1x1 m² alanı test edebilen 14 tane Philips quartz halojen lambadan oluşmakta ve 400-1500 W/m² arasında değişen ışıının sağlayabilmektedir. Simulatörün karakteristiği, bir lambanın karakteristiği incelenerek belirlenmiştir.

Leshuk ve arkadaşları [18], laboratuvar şartlarında kontrollü olarak ışıının enerjisi elde edebilmek için üç eksen boyunca ayarlanabilen bir panel üzerine monte edilmiş 4x1000 W quartz iyotlu lambadan oluşan düşük maliyetli bir güneş simulatörü dizayn ederek, güneş havuzunun performansını incelemişlerdir. Simulatör yansıtıcı bir yüzeye monte edilerek havuz yüzeyine gelen ışıının yatay ve dikey düzlemdeki değişimi azaltılmıştır.

Keren ve arkadaşları [81], 10x1000 W'lık metal halide lamba kullanmak suretiyle güneş ışınlamını simüle ederek laboratuvar şartlarında, 916x600x162 cm boyutlarındaki bir güneş havuzunun performansını deneysel olarak incelemişlerdir.

Lund ve Keinonen [32], ışınlam kaynağı olarak Thorn CSI 1000 W iyotlu lamba kullanarak, küçük ölçekli laboratuvar havuzunda, farklı çözeltilerin soğurma katsayısı ve ışınlam geçirgenliğini havuz derinliğinin fonksiyonu olarak ölçmüşlerdir.

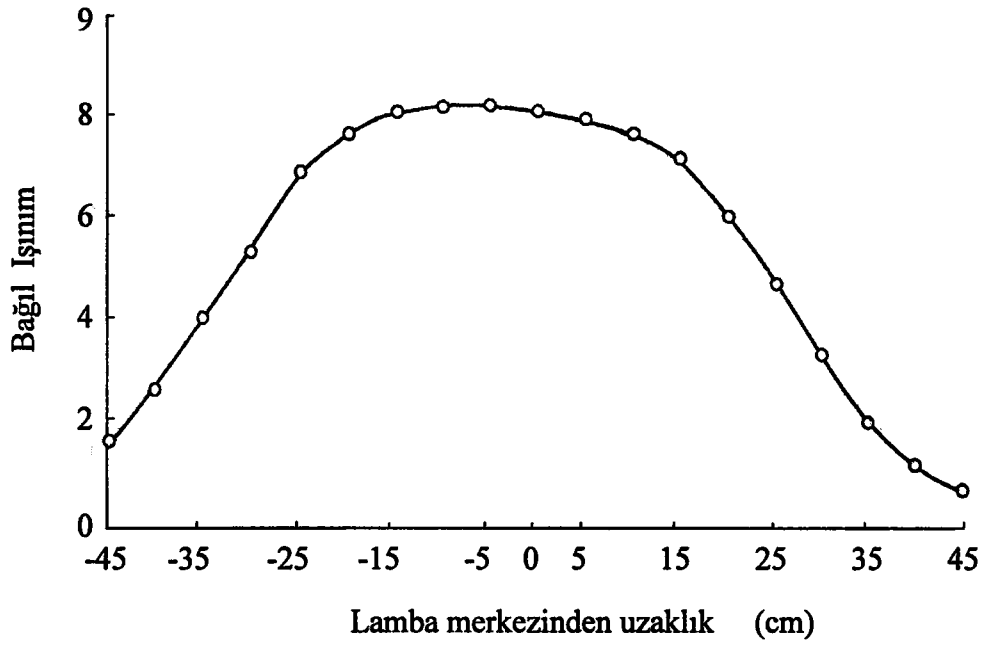
Kanayama ve Baba [87], tatlı suyun ve tuz konsantrasyonu % 5-20 arasında değişen sodyum klorür tuzu içeren çözeltilerin ışınlam geçirgenliğini belirlemek amacıyla yaptıkları deneysel çalışmada, tungsten bir lambayı ışık kaynağı olarak kullanmışlardır.

Bir güneş simulatörünün kalitesi, güneş spektrumuna benzer bir spektral dağılım, ışınlamın monotonluğu, kararlılığı, ayarlanabilirliği, ışınlamın akı şiddeti, akının kararlılığı, sabitliği, sürekliliği ve elde edilebilen ışınlam şiddeti gibi standartlar ile belirlenebilir. Bu standartlardan spektral kaliteyi elde edebilmek oldukça zordur. Bu nedenle, asla tam bir simülasyon gerçekleştirilemez. Bunun için özel lambalar ve filtreler gerekir [105,108].

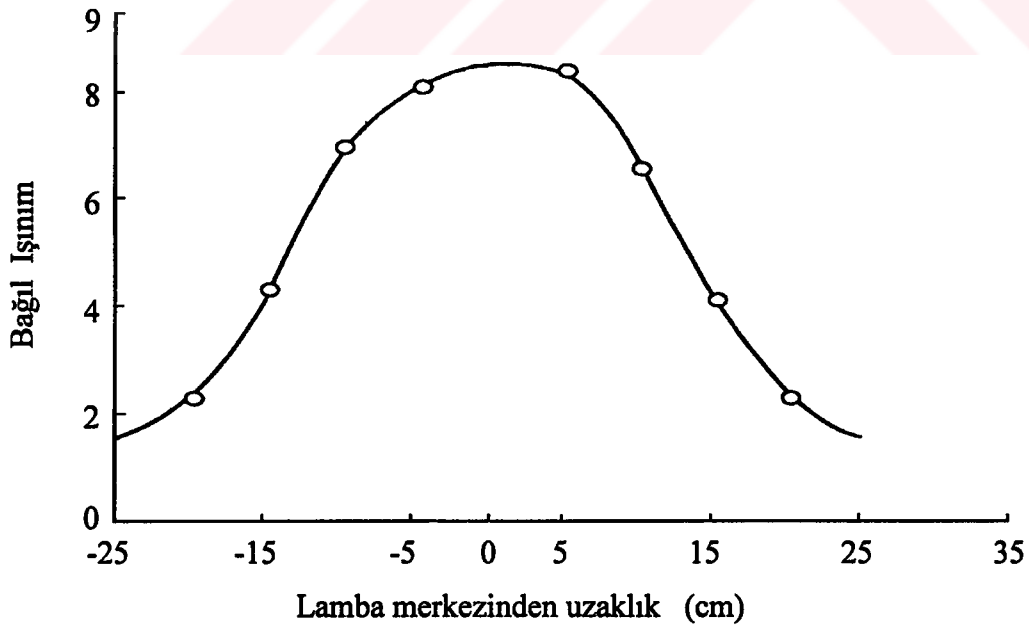
Çoklu lamba kullanılarak dizayn edilen simülatörlerde, ışınlamın test edilecek yüzeye uniform olarak gelmesi, kullanılan lambadan çok, lambaların yerleşimine bağlıdır. Optimum yerleşim düzeni, farklı ışınlam şiddeti değerlerinde, farklı lamba yerleşimleri denenerek belirlenebilir. Simulatörün ışınlam şiddeti ve spektral dağılımı, lambaların direncine bağlı olarak, simulatör ile test ekipmanı arasındaki uzaklık veya simulatör devresinin voltajını artırıp azaltarak kontrol edilebilir [105,108].

İdeal bir güneş simulatörü tasarımında, ışınlam kaynağının güneş ışınlamına benzer bir spektruma sahip olmasına, ışınlamın spektrum yapısı etkilenmeden farklı giriş voltajlarında ışınlam şiddetinin değiştirilebilmesine, test ekipmanı yüzeyine gelen ışınlam şiddetinin üniform olmasına dikkat edilmelidir [108].

Şekil 5.3 ve 5.4'de, Garg ve arkadaşlarının [108] yapmış oldukları deneylerde kullandıkları Philips marka halojen lambadan yanal (major) ve dikey (minor) eksenler boyunca ölçmüş oldukları bağıl ışınlam değerleri görülmektedir. Ölçümler tek lambadan elde edilmiş olup, ışınlam değerleri, lamba merkezinden uzaklaştıkça bağıl olarak azalmaktadır.



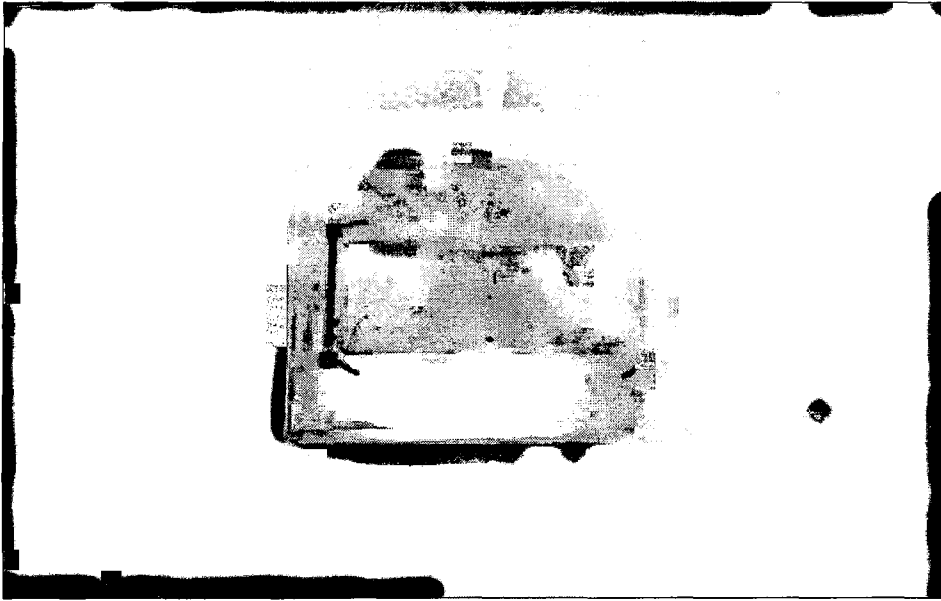
Şekil 5.3. Lamba yanal ekseninde (major) tek lambadan ölçülen bağlı ışınlam değerleri [108]



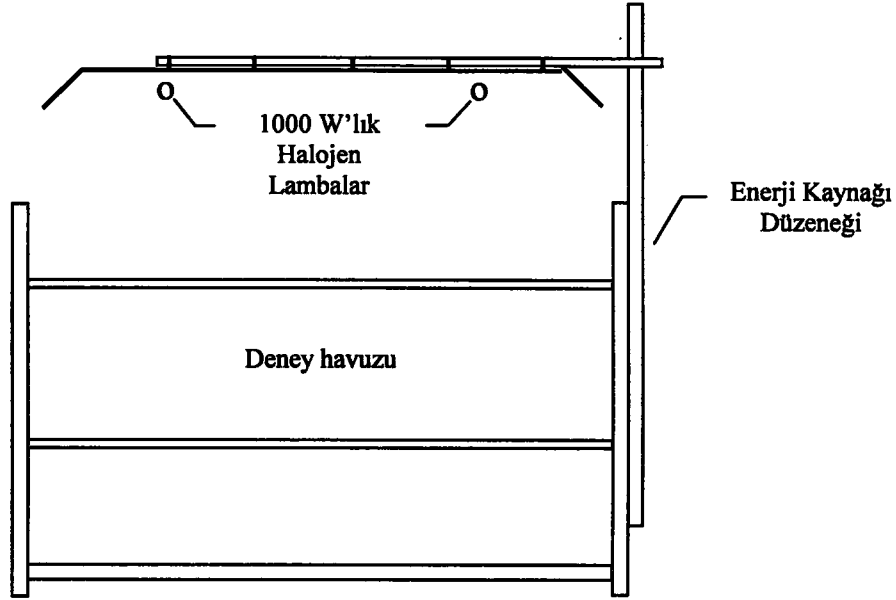
Şekil 5.4. Lamba dikey ekseninde (minor) tek lambadan ölçülen bağlı ışınlam değerleri [108]

Lamba, yanal eksenini boyunca yaklaşık 30 cm bir yüzeye, dikey eksenini boyunca ise 15 cm bir yüzeye eşit ışınlam sağlayabilmektedir. Garg ve arkadaşlarının yapmış oldukları bu çalışma, güneş ışınlamına yakın bir ışınlam spektrumu elde edebilmek için güneş simülatörü dizayn etmek isteyen araştırmacılara fikir vermesi açısından faydalı bir çalışma olabilir.

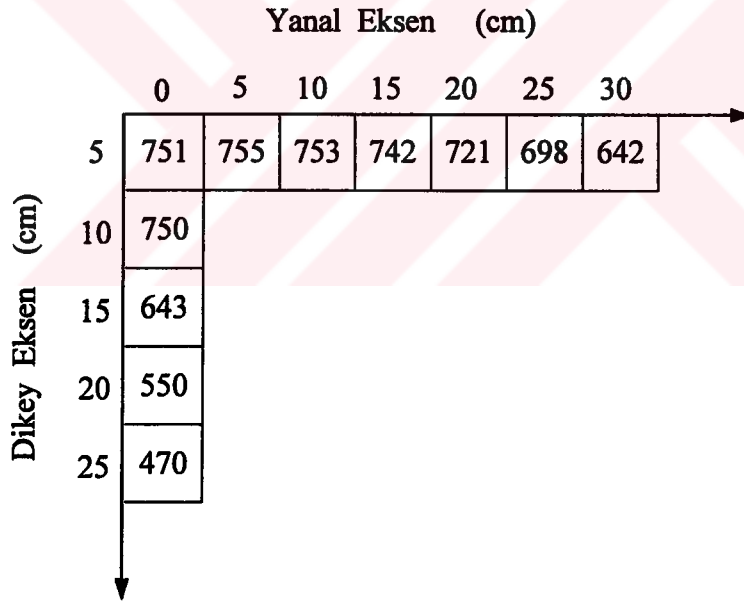
Simülatör ile ilgili yapılan bu çalışmalar referans alınarak, TTGH'nin enerji toplama ve depolama karakteristiğini laboratuvar şartlarında inceleyebilmek amacıyla bir güneş simülatörü dizayn edilmiştir. Simülatör, 50x40 cm boyutlarında, 2 mm kalınlığındaki paslanmaz bir sac üzerine monte edilen 1000 W, 220-230 V, 6.5 A, 25 000 lm ışık akısına sahip, 12 mm çapında, 189 mm uzunluğunda iki tane Philips tungsten halojen lambadan oluşmaktadır. Işınlamın etrafa yayılmasını önleyebilmek ve ışınlamı havuz yüzeyine odaklayabilmek amacıyla lambaların monte edildiği panelin etrafı, panel ile 45° açı yapacak şekilde 10 cm genişliğinde sac ile perde şeklinde çevrilmiştir. Lambaların monte edildiği sac yüzeyinin yansıtıcı bir yüzey olması için sac yüzeyi parlak gri renk bir boya ile boyanmıştır. Şekil 5.5'de, simülatör panelinin deney tesisatından alınmış bir resmi görülmektedir. Lambaların monte edildiği bu panel, düşey doğrultuda hareket edebilecek şekilde yapılmış olup ve Şekil 5.6'da görülen enerji kaynağı düzeneğine yerleştirilmiştir.



Şekil 5.5. Simülatörün deney tesisatından alınmış görüntüsü



Şekil 5.6. Deneylerin yapıldığı enerji kaynağı düzeneği



Şekil 5.7. Lambaların yanal ve dikey eksenleri boyunca havuz yüzeyinin dörtte birine gelen ısıtım şiddeti (W/m^2) oranları

Isınım ölçümleri, ilk olarak Türkiye Elektrik İşleri Etüd İdaresi, Güneş Enerjisi Şubesinde PSP model Eppley Radiometer ile gerçekleştirilmiştir. Burada yapılan ölçümler, ölçüm sistemi bağımsız olmadığından sınırlı olmuş, daha sonra aynı kurumdan solar 130 tipi bir pironometre ve dijital okuma cihazı ile birlikte Karabük Teknik Eğitim Fakültesine hibe

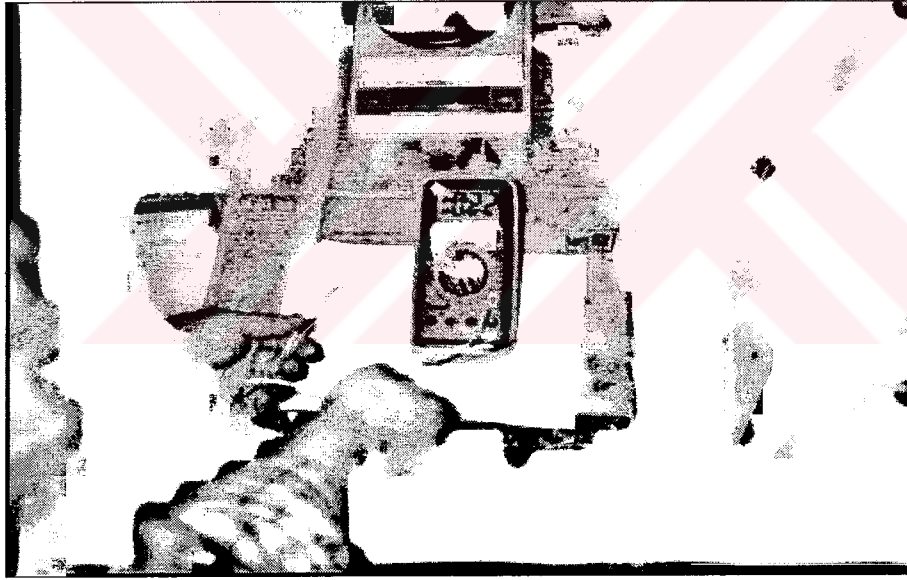
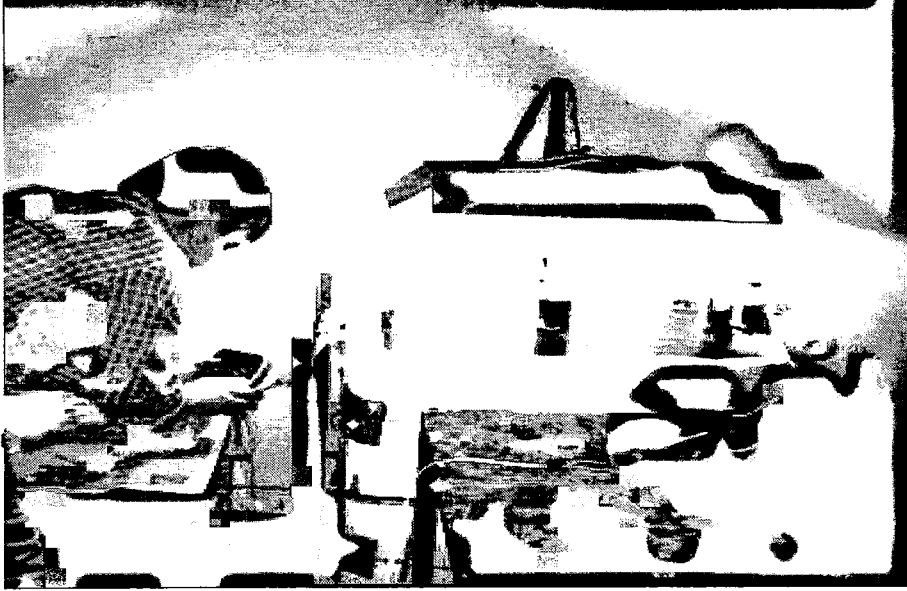
olarak alınarak, ölçümler istenildiği şekilde ve detaylı olarak yapılabilmektedir. Spektral değeri optik olarak kalibre edilmiş silikon bir güneş hücresinden oluşan pironometre, düz bir yüzey üzerindeki ışıınım kanuna göre, $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık arasında, $\pm\text{ }1.5\%$ hassasiyette 1500 W/m^2 'ye kadar ölçüm yapabilmekte, ölçülen değerler dijital ekrandan okunabilmektedir.

Literatürdeki güneş simülatörü ile ilgili çalışmalar ışığında, ilk olarak simülatörün ışıınım karakteristiğini belirlemek amacıyla tek lambadan elde edilebilecek olan ışıınım değerleri belirlenmiştir. Lamba paneli dikey doğrultuda belirli aralıklarla hareket ettirilerek yatay düzlemdeki ışıınım değerleri ölçülmüştür. Elde edilen değerlere göre, lambaların panel üzerine monte edilirken iki lamba arasındaki uzaklık değeri tespit edilmeye çalışılmıştır. İlk olarak, iki lamba arasındaki uzaklık 30 cm olarak alınmış, lamba paneli belirli aralıklarla düşey doğrultuda hareket ettirilerek, test yüzeyi ile lamba düzlemi arasındaki $25, 30, 35, 40, 50, 75\text{ cm}$ mesafelerde ışıınım değerleri ölçülmüştür. Daha sonra, iki lamba arasındaki uzaklık 40 cm olarak alınmış, lamba paneli, test yüzeyi ile lamba düzlemi arasında 5 cm aralıklarla hareket ettirilerek 25 cm ile 75 cm arasında 5 cm aralıklarla ışıınım değerleri ölçülmüştür. Yapılan ölçümlerden elde edilen değerler Ek.F'de sunulmuştur.

Lambalar arasındaki iki farklı mesafede yapılan ışıınım ölçümleri sonucu, lambaların panele 40 cm aralıkla monte edildiğinde, havuz yüzeyinin her noktasına yaklaşık eşit ışıınım düştüğü görülmüş ve lambaların bu şekilde yerleşiminin havuz yüzeyine gelecek ışıınım açısından daha uygun olacağı kanaatine varılmıştır. Deneylerde havuz yüzeyine gelen ışıınım şiddeti olarak düşünülen 750 W/m^2 'lik ışıınım değeri, lamba panelinin havuz yüzeyinden 35 cm yükseklikteki mesafede elde edilmiştir. Simülatör ile havuz yüzeyi arasındaki mesafe 35 cm iken, havuz yüzeyine gelen ışıınım şiddeti simülatörün yanal ve dikey eksenleri boyunca ölçülmüş, havuz yüzey alanının dörtte birine gelen ışıınım şiddeti değerleri Şekil 5.7'de 5 cm aralıklarla verilmiştir.

5.3. Sıcaklık Ölçümü

Havuzun sıcaklık dağılımı, K tipi (Khromel-Alumel) termoelemanlarla direk olarak $^{\circ}\text{C}$ cinsinden sıcaklık ölçebilen Mastech MY-64 tipi dijital multimetre ile ölçülmüştür. Ölçüm aralığı -20 ile 1000°C olan multimetrenin, $0-400\text{ }^{\circ}\text{C}$ aralığında hassasiyeti $\pm\text{ }1\%$ olup, kararlılığı (rezolüsyonu) 1°C 'dir.



Şekil 5.8. Sıcaklık ölçümü sırasında deney havuzundan alınmış görüntüler

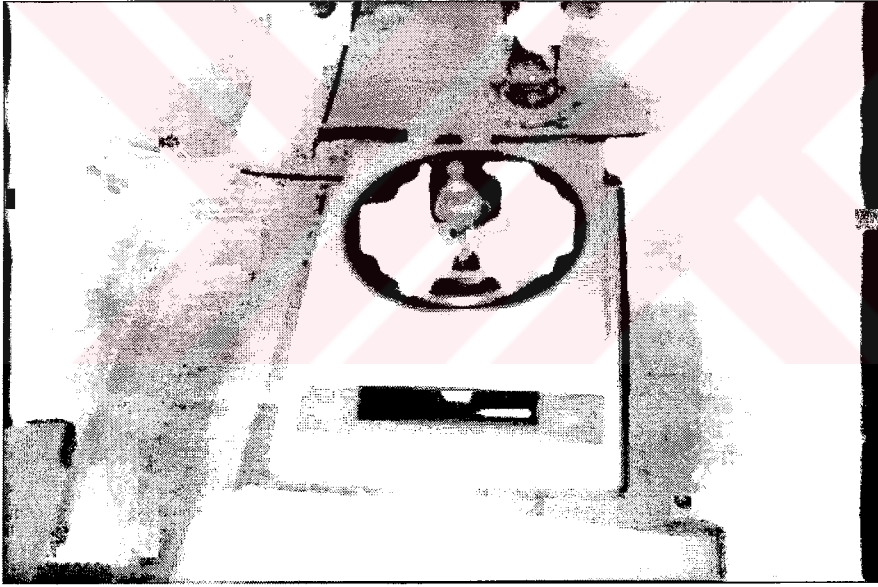
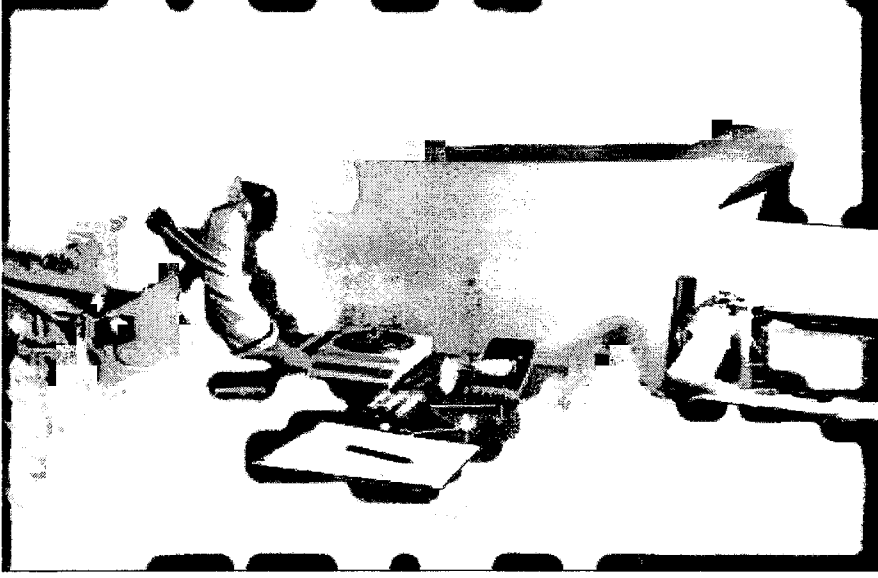
Havuz içerisindeki sıcaklık dağılımını ölçebilmek için, Şekil 5.1’de sıcaklık ölçme düzeneğinde görüldüğü gibi, havuzun yan taraflarından birine sabitlenen plastik bir boru üzerine 10 cm aralıklarla termoelemanlar yerleştirilmiştir. Boru üzerine termoeleman uçlarının çıkabileceği büyüklükte delikler açılmış, termoeleman uçları bu deliklerden 3 cm kadar dışarıya çıkarılarak havuz içerisindeki sıcaklık dağılımı ölçülmüştür. Boru içerisine

tuzlu su girip termoelemanlara zarar vermemesi için termoelemanların etrafı silikon ile doldurulmuştur. Termoelemanlar boru üzerine yerleştirilmeden önce, buz banyosu ortamında 0 °C’de tek tek doğruluğu kontrol edilmiştir. Havuz tabanına yerleştirilen bakır levhanın altında kalan çözelti sıcaklığını ölçebilmek için boru tabanından 5 cm yukarıya, havuz yüzeyi ile lamba paneli arasındaki ortam sıcaklığını ölçebilmek amacıyla borunun havuz yüzeyinden 10 cm yukarısına birer termoeleman yerleştirmek suretiyle boru üzerine toplam 8 adet termoeleman yerleştirilmiştir. Ayrıca deneyin yapıldığı oda sıcaklığı ve deney düzeneği etrafındaki ortam sıcaklığı ayrı bir termoeleman ile ölçülmüştür. Şekil 5.8’de, sıcaklık ölçümünün yapıldığı sırada deney havuzundan alınmış resimler görülmektedir.

5.4. Yoğunluk Ölçümü

Havuz içerisinde derinlikle artan yoğunluk ölçümü, hacmi bilinen bir kap ile kütlenin ölçülerek, hacmi ve kütlesi bilinen bir maddenin yoğunluğunun belirlenmesi prensibine göre yapılmıştır. Şekil 5.1’de görüldüğü gibi, havuzun bir kenarına sabitlenen numune alma düzeneğinde, boru üzerinde 10 cm aralıklarla açılmış olan deliklerden, boru içerisinden geçirilen elastik hortumların (serum lastiği) uçları 3 cm kadar dışarıya çıkarılmak suretiyle 20 ml’lik enjektörler ile havuz içerisinde belirli noktalardan 10 ml’lik numune çözelti alınmıştır. Alınan bu numune çözeltiler, hacmi 10 ml olan piknometreye doldurularak, 0-310 gr aralığında ölçüm yapabilen Sartorius marka BP 310 P model hassas dijital bir terazide ağırlığı ölçülmüştür. Piknometreye numuneler doldurulmadan önce, piknometrenin darası alınmış, daha sonra numuneler doldurularak ağırlığı ölçülmüştür. Hassas bir ölçüm yapabilmek için her ölçümden önce bu işlem tekrarlanmıştır. Piknometrenin hassasiyeti 10ml $\pm$ 0.2 ml, terazinin hassasiyeti ise 1 gr $\pm$ 0.03 mgr – 50 gr $\pm$ 0.1 mgr’dır. Şekil 5.9’da havuz yoğunluk dağılımının belirlenmesi sırasında deney tesisatından alınmış resimler görülmektedir.

Havuz doldurma esnasında, piknometre yardımıyla çözeltinin yoğunluk ölçümünün yapılması yanında, 0-30 % bölmeli Bome Hidrometresiyle çözeltinin tuzluluk oranıda ölçülmüştür. Hidrometrenin hassasiyeti, Karabük Demir Çelik Fabrikasının Kalite Kontrol Laboratuvarında kontrol edilmiş, $\pm$ 1 % hassasiyete sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 5.9. Havuz yoğunluk dağılımının ölçümü sırasında deney tesisatından alınmış görüntüler

5.5. Havuzun Doldurulması

Havuzda derinlikle artan tuz yoğunluk gradyeni, farklı konsantrasyonlardaki çözeltilerin bir biri üzerine yerleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Doldurma işlemine başlamadan önce, havuz tabanından yüzeyine doğru tuz difüzyonu nedeniyle ATB’de azalan tuz konsantrasyonunu

dengelemesi ve yoğunluk gradyeninin oluşumuna katkıda bulunması amacıyla havuz tabanına bir miktar tuz konulmuştur. Kararlı bir tuz yoğunluk gradyeni, havuz tabanından yüzeyine doğru olan tuz difüzyonu ile doğal olarak kendiliğinden oluşmaktadır. Gradyenin oluşabilme süresi, tuz difüzyonunun hızına bağlı olarak değişir. Bu nedenle, kararlı bir tuz yoğunluk gradyeni, havuzun büyüklüğüne ve tuz difüzyonunun hızına bağlı olarak havuz doldurulduktan belirli bir süre geçtikten sonra oluşmaya başlar. Bu çalışmada, yoğunluk gradyeninin oluşabilmesi için havuz doldurulduktan sonra, NaCl-su çözeltisi birinci deneyde 4 gün, diğer deneylerde 3 gün beklenildikten sonra deneylere başlanmıştır.

Deneylerde havuz, yemek tuzu olarak bilinen sodyum klorür (NaCl) ve çamaşır sodası olarak bilinen soda (sodyum karbonat- Na_2CO_3) tuzlarının su içinde eritilmesiyle elde edilen farklı konsantrasyonlardaki çözelti ile doldurulmuştur. NaCl ve Na_2CO_3 tuzlarının su içerisinde çözünmesi, çözeltinin tuz ile doymuş hale gelebilmesi ve su içerisinde çözünmeyip asılı kalan maddelerin dibe çökmesi için çözeltiler yaklaşık 3 gün çözelti hazırlama kaplarında bekletildikten sonra havuza doldurulmaya başlanmıştır.

Havuzun doldurulması işlemine ilk olarak, yüksek konsantrasyonlu çözelti içeren ATB bölgesinin doldurulmasıyla başlanmıştır. ATB bölgesi, belirlenen tabaka kalınlığı kadar yüksek konsantrasyonlu çözeltinin havuza dökülmesiyle doldurulduktan sonra, durgun hale gelebilmesi için belirli bir süre beklenilmiştir. Daha sonra her biri farklı konsantrasyonlarda çözelti içeren ince tabakalardan oluşan TZB bölgesi doldurulmaya başlanmıştır. Tuz yoğunluk gradyeninin oluşabilmesi için TZB'yi oluşturan bu tabakaların bir birine karışmadan çok dikkatli bir şekilde doldurulması gerekmektedir. Bu nedenle, farklı konsantrasyonlarda çözelti içeren tabakaların bir birine karışmasını önlemek için doldurma işlemi, çözelti yüzeyinde yüzebilen, tabanına küçük delikler açılmış, küçük plastik bir kap içine bir hortum aracılığıyla akıtılarak çok yavaş ve dikkatli bir şekilde yapılmıştır. TZB'nin doldurma işlemi bittikten sonra, ÜTB bölgesi benzer şekilde tatlı su ile doldurularak havuzun doldurma işlemi tamamlanmıştır.

5.6. Tuz Yoğunluk Gradyenini Koruma Düzeneği

TTGH'ların sahip olduğu en önemli problemlerden birisi, tuz yoğunluk gradyenin oluşturulması, gradyenin kararlılığının ve sürekliliğinin sağlanmasıdır. Sistemin etkili bir şekilde çalışabilmesi, taşınım ile ısı kaybını önleyebilecek kararlı bir tuz yoğunluk

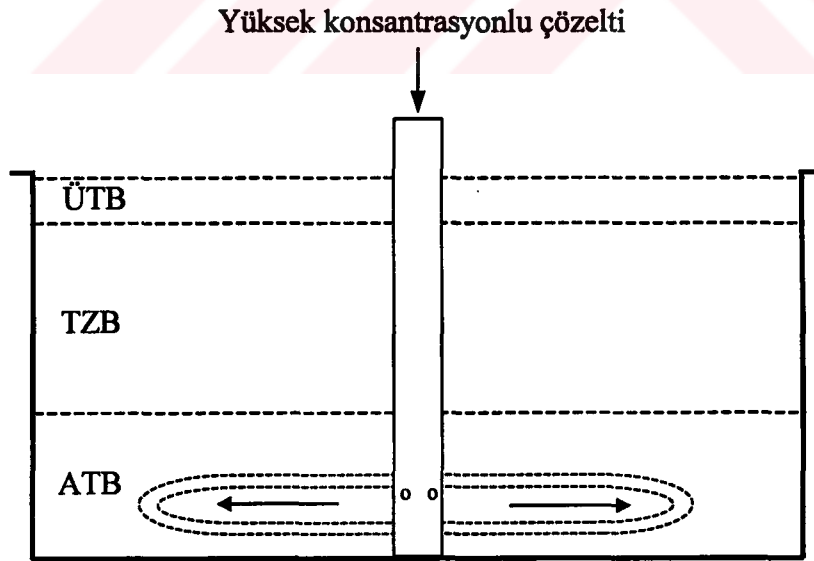
gradyeninin oluşturulmasına ve sürekliliğinin sağlanmasına bağlıdır. Gradyen oluşturulduktan sonra sürekliliği, başlangıçta havuz tabanı ile yüzeyi arasında oluşturulan tuz yoğunluk gradyeni değerinin korunmasıyla sağlanabilir. Havuz tabanından yüzeyine doğru olan tuz difüzyonu nedeniyle, havuz tabanında tuz konsantrasyonu zamanla azalacak, yüzeyinde ise artacaktır. Böylece, başlangıçta oluşturulan tuz yoğunluk gradyeni, zamanla azalarak bozulacaktır. Bu nedenle, tuz yoğunluk gradyeninin sürekliliğini sağlayabilmek için havuz tabanı ile yüzeyindeki tuzluluk oranlarının kontrol altında tutulması gerekir. Tuz yoğunluk gradyeni kontrol altında tutulmadığı takdirde, kısa sürede bozulacak ve havuz ısı depolama kabiliyetini kaybedecektir [12,38,76].

Tuz yoğunluk gradyeninin korunması ve sürekliliğinin sağlanabilmesi TTGH'ların en önemli problemlerinden birisi olması nedeniyle, bu konuda bir çok çalışma yapılmıştır. Bu konuda yapılan çalışmalar, Bölüm 3.4'te ayrı ayrı özetlenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, yoğunluk gradyeninin korunması için değişik yöntemler geliştirilmiştir. Bunlar arasında en basit ve ucuz olanı, havuz tabanı ile yüzeyindeki tuz konsantrasyonunu kontrol altında tutmak suretiyle gerçekleştirilen metottur. Yukarıda da bahsedildiği gibi, havuz tabanından yüzeyine doğru olan tuz difüzyonu nedeniyle, tabanda azalan ve yüzeyde artan tuz konsantrasyonu, havuz yüzeyine tatlı su, tabanına ise tuz veya yüksek konsantrasyonlu çözelti ekleyerek dengelenebilir. Böylece havuz tabanı ile yüzeyindeki tuzluluk oranları kontrol altında tutularak, başlangıçta oluşturulan yoğunluk gradyeni değeri korunmuş olur.

Bu fikirden yola çıkarak, Şekil 5.10'da görüldüğü gibi 5 cm çapında, 70 cm uzunluğunda plastik bir boru havuz ortasına sabitlenmiştir. Depolama bölgesi içinde olacak şekilde, borunun tabanından 10 cm yukarısına eşit aralıklarla 3 mm çapında 6 tane delik açılmıştır. Havuzun doldurulmasıyla birlikte, boru üzerine açılan bu deliklerden havuz içerisindeki çözelti seviyesine bağlı olarak, boru içerisi kendiliğinden çözelti ile dolmaktadır. Havuzun doldurma işlemi bittiğinde ise, boru içerisindeki çözelti seviyesi, havuz içerisindeki çözelti seviyesine eşit olacaktır. Havuz çalışmaya başladıktan sonra zamanla boru içerisine tuz veya yüksek konsantrasyonlu çözelti eklemek suretiyle, havuz tabanında başlangıçtaki tuz konsantrasyon değeri korunmaya çalışılır. Bu çalışmada, boru içerisine yüksek konsantrasyonlu çözelti eklenmiştir. Başlangıçta, havuz yüzey seviyesine eşit olan boru içerisindeki çözelti seviyesi, boru içerisine çözelti eklenmeye başladığı andan itibaren eklenen çözeltinin miktarına bağlı olarak yükselmeye başlar. Boru içerisindeki çözelti

seviyesi ile havuz yüzeyi seviyesi arasında oluşan yükseklik farkı nedeniyle, yüksek konsantrasyonlu çözelti ATB bölgesi içerisinde kalan deliklerden havuz tabanına yayılır. Çözeltinin deliklerden çıkış hızı, boru içerisindeki çözelti seviyesi ile havuz yüzey seviyesi arasındaki fark arttıkça artacak olan basınca bağlı olarak değişir. Bu nedenle, deliklerden havuz tabanına yayılan çözeltinin, havuz tabanında herhangi bir karışıklığa neden olacak şekilde hızlı çıkmaması için boru içerisine çözelti ekleme işlemi yavaş bir şekilde yapılmalıdır.

Boru içerisine yüksek konsantrasyonlu çözelti eklenirken, havuz yüzeyine de tatlı su eklenmek suretiyle, havuzun tabanı ile yüzeyi arasında meydana gelen tuz difüzyonuyla küçülen gradyen değeri dengelenmiş olur. Bu işlem, havuzun çalışması süresince, çalışma karakteristiğine bağlı olarak belirlenen zaman aralıklarında yapılmalıdır. Böylece, havuz tabanı ile yüzeyindeki tuz konsantrasyonu kontrol altında tutularak tuz yoğunluk gradyeni korunmuş olacaktır [3,11,42].



Şekil 5.10. Tuz yoğunluk gradyenini koruma düzeneğinin havuz içerisine yerleştirilmesi

5.7. Deneyler

5.7.1. Tatlı Su İle Yapılan Deney

Deneylere, tuz tabakalı güneş havuzunun fiziki yapısını incelemek ve yapay güneş havuzu fikrinin geçerliliğini gösterebilmek amacıyla, havuz tatlı su ile doldurularak doğal bir tatlı sulu gölde veya havuzda meydana gelen olaylar gözlemlenerek başlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, havuz şehir şebeke suyu ile doldurularak, havuzda meydana gelen fiziksel olaylar gözlemlenmiştir.

Daha sonra havuz, yemek tuzu olarak bilinen sodyum klorür (NaCl) ve çamaşır sodası olarak bilinen soda (Na_2CO_3 - sodyum karbonat) tuzunun su içerisinde eritilmesiyle elde edilen farklı konsantrasyonlardaki çözeltilerle doldurularak, TTGH'nin güneş ışınımını toplama ve ısı depolama karakteristiği incelenmiştir.

Bu çalışmanın yapılmasındaki amaç, literatür çalışması sonucunda bugüne kadar TTGH'larda tuz yoğunluk gradyeninin oluşturulmasında kullanılmamış olduğu görülen sodanın, bu amaç doğrultusunda kullanılarak TTGH'lar için uygun bir tuz olup olmadığını ve soda-su çözeltili bir ortamın ısı depolama karakteristiğini incelemektir. Soda tuzu için elde edilecek sonuçların geçerliliğini gösterebilmek için, TTGH'larda daha önce denenmiş ve geçerliliği ispat edilmiş bir tuz-su çözeltisi ile aynı ortamda ve aynı şartlarda yapılmış çalışmadan elde edilecek sonuçlara ihtiyaç vardır. Bu nedenle, soda-su çözeltili deneylerden elde edilecek sonuçları karşılaştırabilmek amacıyla, TTGH'larda kullanılan en genel tuzlardan birisi olan NaCl tuzu kullanılarak, NaCl -su çözeltili deneyler yapılmıştır. Böylece, soda-su çözeltili deneylerden elde edilecek sonuçların, NaCl -su çözeltili deney sonuçlarıyla karşılaştırılarak, soda tuzunun TTGH'lar için uygun bir tuz olup olmadığı tespit edilmiş olacaktır.

5.7.2. Sodyum Klorür (NaCl)-Su Çözeltili Deneyler

Tuz-su çözeltili deneylere başlamadan önce, deneylerde herhangi bir problemle karşılaşmamak amacıyla, tuz yoğunluk gradyeni NaCl -su çözeltisi ile oluşturulan deneme amaçlı bir deney yapılmıştır. Havuzu oluşturan farklı konsantrasyonlardaki çözeltinin havuza doldurulması, havuzdaki sıcaklık ve yoğunluk değişimleri, yoğunluk gradyenini

koruma düzeneğinin yoğunluk gradyenine etkisinin ne olduğunu görebilmek için havuzda gerçekleşen olaylar dört gün boyunca gözlemlenmiştir. Böylece, deneyler esnasında karşılaşılabilecek problemler önceden tespit edilmiş, elde edilen tecrübeler sayesinde daha sonraki deneyler başarıyla tamamlanmıştır.

Deneme amaçlı yapılan deneyde, havuza doldurulan çözeltinin tuzluluk oranları ve yoğunluk dağılımları Tablo 5.1’de verilmiştir. Tablodan da görülebileceği gibi, ATB tabaka kalınlığı 25 cm olup, $1193,9 \text{ kg/m}^3$ yoğunluğa ve % 23 tuz oranına sahip çözelti ile doldurulmuştur. Daha sonra tabaka kalınlığı 25 cm olan TZB, 5 cm kalınlığında, 5 farklı yoğunlukta çözelti ile, ÜTB ise, 10 cm tabaka kalınlığına sahip olup, tatlı su ile Bölüm 5.4’de anlatıldığı şekilde doldurulmuştur.

Deneme havuzundan belirli bir tecrübe elde edildikten sonra asıl deneylere geçilmiştir. NaCl-su çözeltili asıl deneylerde, havuz, deneme deneyi havuzunun tuzluluk ve yoğunluk değerlerine yakın değerlerde doldurulmuştur. Deneylerden elde edilecek sonuçların doğruluğunu gösterebilmek amacıyla, NaCl-su çözeltisiyle iki farklı deney yapılmıştır. Tablo 5.2 ve Tablo 5.3’de iki farklı deneyde, havuzu oluşturan bölgelere göre havuza doldurulan çözeltinin tuzluluk oranları ve yoğunluk dağılımları görülmektedir. Tablolardan da görüleceği gibi, ATB tabaka kalınlığı her iki deneyde de 25 cm seçilmiş, ÜTB tabaka kalınlığı birinci deneyde 5 cm alınırken, ikinci deneyde 10 cm olarak alınmıştır. Buna bağlı olarak, birinci deneyde TZB tabaka kalınlığı 30 cm alınırken, ikinci deneyde 25 cm olarak seçilmiştir. Havuz, birinci deneyde, havuz yüzeyi ile tabanı arasında % 23, ikinci deneyde ise % 21 tuzluluk oranına sahip bir tuz yoğunluk gradyeni içerecek şekilde doldurulmuştur.

5.7.3. Soda (Na_2CO_3)-Su Çözeltili Deneyler

Daha öncede belirtildiği gibi, literatürde soda-su çözeltisiyle oluşturulmuş tuz yoğunluk gradyenli bir havuzda yapılmış herhangi bir deneysel çalışmaya rastlanılamamıştır. Sadece, Lund ve Keinonen [32]’nin, küçük ölçekli bir laboratuvar havuzunda değişik tuzlarla birlikte soda-su çözeltisinin soğurma katsayısı ve ısıtım geçirgenliğini ölçmek amacıyla bir çalışma yaptıkları tespit edilmiştir. Ölçüm sonuçlarına göre, sodanın ısıtım geçirgenliği yönünden, TTGH’larda kullanılan KNO_3 ve MgCl_2 tuzlarıyla aynı özelliğe sahip olduğu, soğurma katsayısı açısından ise, MgCl_2 , NaNO_3 ve sodanın TTGH’lar için uygun, kabul edilebilir tuzlar olduğu görülmüştür.

Tablo 5.1. NaCl-su çözeltili deneme deneyinde havuza doldurulan çözeltinin bölgelere göre tuzluluk oranları ve yoğunluk dağılımları

Havuz Tabakaları	Tabaka Kalınlığı (cm)	Tuzluluk Oranı (%)	Yoğunluk (kg/m ³)
UTB	10	0	998
TZB	25	5	1028,7
		5	1052,4
		5	1080,6
		5	1093,5
		5	1151,7
ATB	25	23	1193,9

Tablo 5.2. NaCl-su çözeltili birinci deneyde havuza doldurulan çözeltinin bölgelere göre tuzluluk oranları ve yoğunluk dağılımları

Havuz Tabakaları	Tabaka Kalınlığı (cm)	Tuzluluk Oranı (%)	Yoğunluk (kg/m ³)
ÜTB	5	0	998
TZB	30	5	1032,8
		5	1055,8
		5	1085
		5	1092,8
		5	1132,3
		5	1158,1
ATB	25	23	1192,7

Tablo 5.3. NaCl-su çözeltili ikinci deneyde havuza doldurulan çözeltinin bölgelere göre tuzluluk oranları ve yoğunluk dağılımları

Havuz Tabakaları	Tabaka Kalınlığı (cm)	Tuzluluk Oranı (%)	Yoğunluk (kg/m ³)
ÜTB	10	0	998
TZB	25	5	1055,8
		5	1085
		5	1092,8
		5	1150,6
		5	1150,6
ATB	25	21	1183,2

Bu çalışmada, Lund ve Keinonen'nin [32]'nin soda için elde etmiş oldukları bu sonuçtan yola çıkarak, şimdiye kadar TTGH'larda tuz yoğunluk gradyeninin oluşturulmasında kullanılmamış olan sodanın TTGH'larda denenerek bu konudaki özelliklerinin ortaya çıkarılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, soda-su çözeltisi ile 4 farklı deney yapılmıştır. Her bir deneyde, havuz içerisinde farklı büyüklükte tuz yoğunluk gradyeni oluşturularak, ısı depolayabilmek için gerekli olan yoğunluk gradyeni büyüklüğü tespit edilmeye çalışılmıştır. Bütün deneylerde, ATB ve TZB tabaka kalınlıkları 25 cm, ÜTB tabaka kalınlığı ise 10 cm olarak seçilmiştir. ÜTB'nin bu kadar büyük seçilmesinin nedeni; yüzeyden buharlaşma ile doğal şartlara oranla oldukça fazla olan su kaybı nedeniyle, havuz yüzeyine tatlı su ekleme esnasında oluşacak küçük dalgalanmaların, yoğunluk gradyeninin kararlılığını bozabilecek büyük dalgalanmalara yol açabilecek olmasıdır. NaCl-su çözeltisi deneme deneyinde ÜTB 10 cm olarak alınmış, birinci deneyde ise 5 cm olarak alındığında bu durum fark edilmiş, daha sonraki bütün deneylerde 10 cm olarak alınmıştır.

Tablo 5.4, 5.5, 5.6 ve 5.7'de, her bir deneyde havuzu oluşturan bölgelere göre havuza doldurulan çözeltinin tuzluluk oranları ve yoğunluk dağılımları görülmektedir. Tablolardan da görülebileceği gibi, başlangıçta havuz tabanı ile yüzeyi arasında, birinci deneyde % 8, ikinci deneyde % 10, üçüncü deneyde % 12, dördüncü deneyde ise % 16 tuzluluk oranına sahip tuz yoğunluk gradyenleri oluşturulmuştur. Birinci deneyde kullanılan çözelti, ikinci ve üçüncü deneylerde havuzun doldurma planına göre yüksek konsantrasyonlu çözeltilerle karıştırılmak suretiyle tekrar kullanılmıştır.

Tablo 5.4. Soda-su çözeltisi birinci deneyde havuza doldurulan çözeltinin bölgelere göre tuzluluk oranları ve yoğunluk dağılımı

Havuz Tabakaları	Tabaka Kalınlığı (cm)	Tuzluluk Oranı (%)	Yoğunluk (kg/m ³)
ÜTB	10	0	998
TZB	25	5	1036,8
		5	1052,6
		5	1052,6
		5	1068,3
		5	1068,3
ATB	25	8	1081

Tablo 5.5. Soda-su çözeltili ikinci deneyde havuza doldurulan çözeltinin bölgelere göre tuzluluk oranları ve yoğunluk dağılımları

Havuz Tabakaları	Tabaka Kalınlığı (cm)	Tuzluluk Oranı (%)	Yoğunluk (kg/m ³)
ÜTB	10	0	998
TZB	25	5	1036,8
		5	1052,6
		5	1052,6
		5	1068,3
		5	1081
ATB	25	10	1108

Tablo 5.6. Soda-su çözeltili üçüncü deneyde havuza doldurulan çözeltinin bölgelere göre tuzluluk oranları ve yoğunluk dağılımları

Havuz Tabakaları	Tabaka Kalınlığı (cm)	Tuzluluk Oranı (%)	Yoğunluk (kg/m ³)
ÜTB	10	0	998
TZB	25	5	1042
		5	1063
		5	1063
		5	1079,5
		5	1079,5
ATB	25	12	1120

Tablo 5.7. Soda-su çözeltili dördüncü deneyde havuza doldurulan çözeltinin bölgelere göre tuzluluk oranları ve yoğunluk dağılımları

Havuz Tabakaları	Tabaka Kalınlığı (cm)	Tuzluluk Oranı (%)	Yoğunluk (kg/m ³)
ÜTB	10	0	998
TZB	25	5	1042
		5	1063
		5	1081
		5	1108
		5	1120
ATB	25	16	1157

5.7.4. Deneylerin Yapılışı

Deneylere, yapay TTGH ile tatlı sulu bir havuzda meydana gelen olayları incelemek ve TTGH'nın ısı depolama karakteristiğini gösterebilmek amacıyla tatlı su deneyi ile başlanmıştır. Havuz şehir şebeke suyu ile doldurularak, farklı periyotlarda ışınlama ve karanlığa maruz bırakılmak suretiyle havuz içerisinde meydana gelen olaylar beş gün boyunca gözlemlenmiştir. Birinci gün, 8 saat zaman zarfında 1 saat ışınlama 1 saat karanlığa maruz bırakılarak saatte bir sıcaklık ve yoğunluk ölçümü yapılmıştır. İkinci gün, 24 saat boyunca 2 saat ışınlama, yarım saat karanlığa, dördüncü ve beşinci gün ise 8 ve 12 saat ışınlama 14 saat karanlığa maruz bırakılmıştır. Aynı işlemler, NaCl-su çözeltisi deneme deneyinde de tekrarlanarak yapılacak asıl deneyler için uygun ışınlama ve karanlık periyotları tespit edilmeye çalışılmıştır. Literatürde yapılmış benzer deneysel çalışmalarda, Göktun [84], havuzu devamlı ışınlama ve 2 saat ışınlama 1 saat karanlığa, Keren ve arkadaşları [34] 24 saat ışınlama 12 saat karanlığa, Leshuk ve arkadaşları [18] ise, devamlı ışınlama maruz bırakarak havuzda meydana gelen olayları incelemişlerdir.

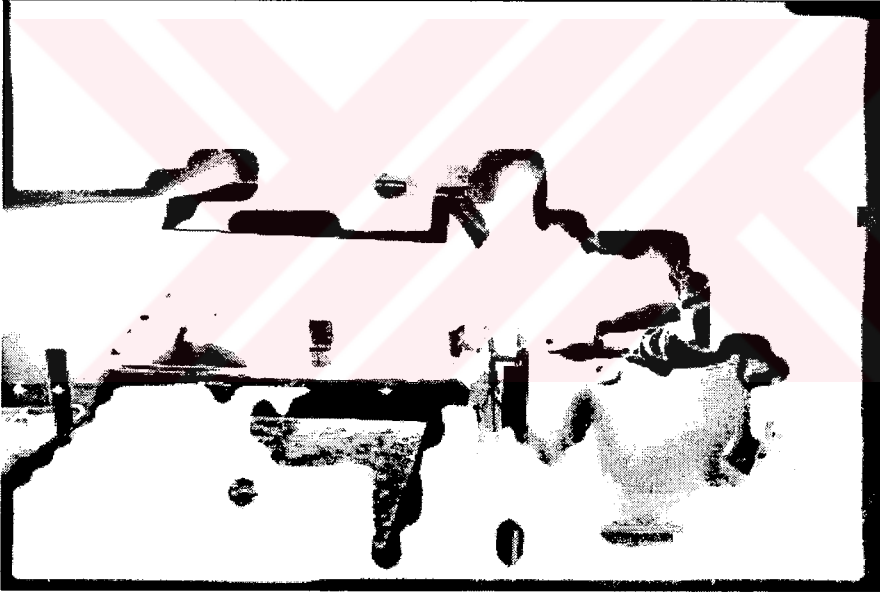
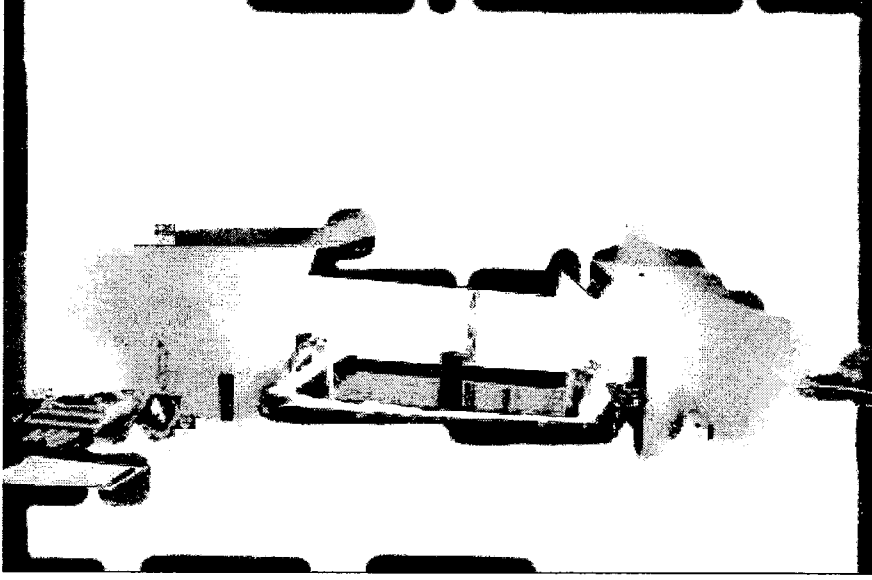
Bu çalışmada ise, deneysel çalışmanın doğal şartlara yakın olması açısından, havuzun, güneş ışınlamının yaz aylarında gün içinde etkili olduğu 10:00-16:00 saatleri arası 6 saat boyunca ışınlama maruz kaldığı düşünülmüş, yapılan ölçümler sonucunda havuzun alt bölgelerinde yaklaşık 2 saatte bir sıcaklık değişiminin olduğu tespit edildiğinden, bu 6 saatlik zaman aralığının 2 katı olan 12 saat ışınlama periyodu, 12 saat karanlık periyodu seçilmiştir. Bu ışınlama ve karanlık periyotları, deneme amaçlı yapılan deneyde, havuza uygulanarak yapılacak olan asıl deneylerde bu periyotların uygun olabileceği görülmüştür. Bu nedenle, asıl deneylerde, simülatör 12 saat çalıştırılıp, 12 saat söndürülerek havuz bir gün içinde 12 saat süreyle ışınlama, 12 saat süreyle karanlığa maruz bırakılmıştır. Havuz yüzeyine gelen ışınlama şiddetinin değeri, yapılan deney sonuçlarının gerçeğe yakın olabilmesi için yaz aylarında Karabük şartlarında saat 10:00-16:00 arası yatay düzleme gelen ortalama ışınlama şiddeti olan 750 W/m^2 seçilmiştir.

Deneylerde kullanılan NaCl ve Na_2CO_3 tuzlarının su içerisinde çözünmesi, çözeltinin tuz ile doymuş hale gelebilmesi ve su içerisinde çözünmeyip asılı kalan partiküllerin dibe çökerek, berrak bir çözelti elde edebilmek için çözeltiler yaklaşık üç gün çözelti hazırlama kaplarında bekletildikten sonra havuza doldurulmaya başlanmıştır. Çözeltiler havuza doldurulmadan önce, havuz içerisinde meydana gelecek tuz difüzyonunu dengelemesi

amacıyla havuz tabanına bir miktar tuz konmuştur. Havuz tabanına konan tuz, zamanla çözünecek, tabanda azalan tuz konsantrasyonunu dengeleyerek, yoğunluk gradyeninin korunmasına yardımcı olacaktır. Daha sonra, yüksek konsantrasyonlu çözelti içeren ATB bölgesinden başlanmak üzere havuz doldurulmaya başlanmıştır. TZB bölgesi, farklı konsantrasyonlarda ki çözeltilerin oluşturduğu ince tabakalardan meydana geldiğinden, doldurma işlemi, tabakaların bir birine karışmasını önlemek amacıyla, su yüzeyinde yüzebilen, tabanına küçük delikler açılmış küçük plastik bir kap içine bir hortum aracılığıyla akıtılarak çok dikkatli bir şekilde yapılmıştır. İnce bir tabaka kalınlığına sahip olan ÜTB ise, yine TZB' de olduğu gibi çok dikkatli bir şekilde tatlı su ile doldurularak havuz doldurma işlemi tamamlanmıştır. Deneylere, havuz tabanından yüzeyine doğru olan tuz difüzyonuyla oluşan yoğunluk gradyeninin lineer hale gelebilmesi için havuz doldurulduktan üç gün sonra başlanmıştır. Bu bekleme süresinde, havuz içerisindeki gradyenin lineer hale gelip gelmediğini kontrol etmek amacıyla çözeltinin yoğunluğu 24 saat arayla ölçülmüştür. Ölçüm sonuçlarından havuz içerisindeki yoğunluk gradyeninin üç gün içinde lineer bir şekil aldığı gözlemlenmiş ve üçüncü gün sonunda deneylere başlanmıştır.

Havuz ışıma maruz bırakılmadan önce, havuz içerisindeki ilk sıcaklık dağılımı, belirlenen noktalarda ölçülmüştür. Daha sonra havuz yüzeyine gelen ışıma şiddeti 750 W/m^2 olacak şekilde, simülatör ile havuz yüzeyi arasındaki mesafe 35 cm olarak ayarlandıktan sonra enerji kaynağı çalıştırılmaya başlanmıştır. Havuz ışıma maruz bırakıldığı andan itibaren, aynı zamanda 650 W gücünde ticari tip bir buzdolabı fanı ile yapay olarak oluşturulan ve havuz yüzeyindeki şiddeti 1.5-2 m/s arasında değişen rüzgara maruz bırakılmıştır. Havuz yüzeyindeki rüzgar hızı, hava hızı ve sıcaklığı ölçümü yapabilen TA2 Anemometer/ Thermometer tipi analog bir cihaz ile ölçülmüştür. Böylece açık ortamda var olan doğal ortam şartları sağlanmaya çalışılmış, aynı zamanda lambaların soğuması sağlanmıştır. Şekil 5.11'de, deneyler esnasında deney havuzundan alınmış resimler görülmektedir.

Havuzun yoğunluk dağılımını belirlemek için, her gün havuz ışıma maruz bırakılmadan önce ve 12 saat ışıma maruz kaldıktan sonra, 12 saat arayla günde iki defa ölçüm yapılmıştır. Havuz içerisinde, 10 cm arayla 6 ayrı noktaya yerleştirilmiş olan numune alma hortumuyla numune alınarak, 10 ml'lik piknometreye doldurulmuş ve hassas bir terazide kütlesi ölçüldükten sonra yoğunluğu belirlenmiştir. Her bir deney için elde edilen havuz yoğunluk değerleri, Ek.G'de verilmiştir.



Şekil.5.11. Deneylerin yapılışı sırasında deney havuzundan alınmış görüntüler

Sıcaklık dağılımı ise, deneme amaçlı yapılan deneyde sıcaklığın yaklaşık 2 saatte bir arttığı tespit edildiğinden, havuz ısınıma maruz bırakıldığı 12 saat boyunca, 2 saatte bir ölçülerek belirlenmiştir. Havuz yan duvarına sabitlenen sıcaklık ölçme düzeneği üzerine, 10 cm aralıklarla 6 termoeleman, havuz tabanından 5 cm yukarıda bulunan bakır levha altındaki

sıcaklığı ölçmek için tabandan 5 cm yukarıya yerleştirilen bir termoeleman olmak üzere havuz içerisinde yedi ayrı noktada sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Ayrıca sıcaklık ölçme düzeneği üzerine havuz yüzeyinden 10 cm yukarıya bir termoeleman daha yerleştirilerek, havuz yüzeyi ile lamba paneli arasındaki sıcaklık değeri ölçülmüştür. Sabit olmayan ayrı bir termoeleman kullanmak suretiyle, deneylerin yapıldığı oda içerisinde değişik noktalarda sıcaklık ölçümü yapılarak ortam sıcaklığı belirlenmiştir. Her bir deneyde ölçülen havuz sıcaklık değerleri Ek.H'da verilmiştir.

Havuz yüzeyinden buharlaşma ile olan su kaybını karşılamak ve tuz yoğunluk gradyenini korumak için, NaCl-su çözeltili deneylerde havuz yüzeyine bir günde yaklaşık 2 litre, soda-su çözeltili deneylerde ise 3 litre kadar tatlı su eklenmiştir. Havuz tabanındaki yoğunluğu kontrol altında tutmak için ise, yoğunluk gradyenini koruma düzeneğine bir günde 1 litre yüksek konsantrasyonlu çözelti eklenmiştir. Havuza tatlı su ve yüksek konsantrasyonlu çözelti ekleme işlemi, havuz 12 saat ışıma ve 12 saat karanlığa maruz kaldıktan sonra, ikinci günün başlangıcında sıcaklık ve yoğunluk ölçümü yapıp, ışıma maruz bırakılmadan önce yapılmıştır. Bu işlem, deneyler süresince her 24 saatte bir tekrarlanmıştır.

BÖLÜM 6. DENEY VE MODEL SONUÇLARI

6.1. Deney Sonuçları

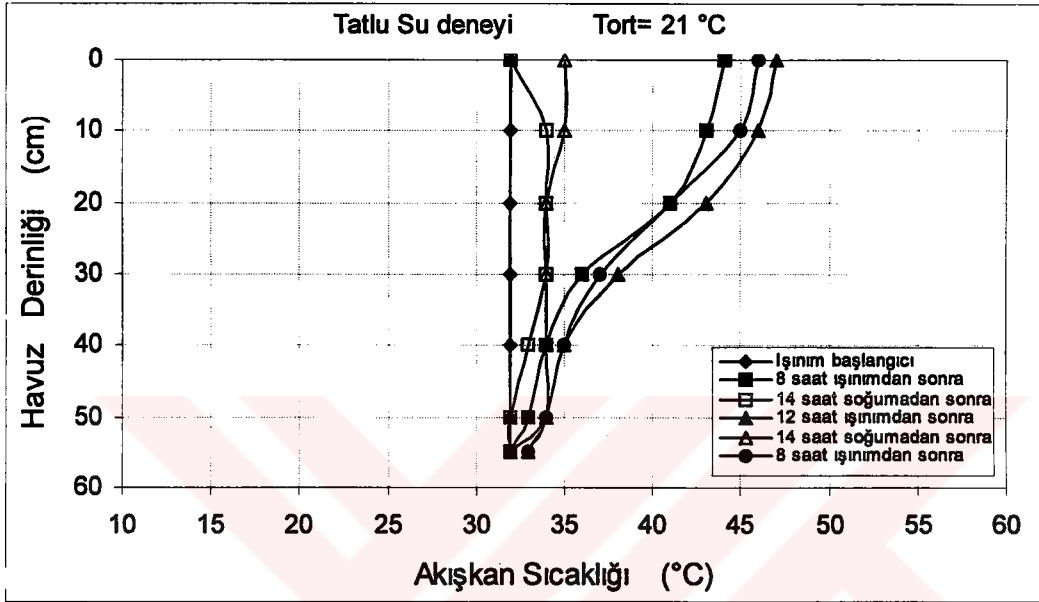
Yapılan bu çalışmada, 60x50 cm² yüzey alanına, 60 cm derinliğe sahip olan deney havuzunda tatlı su, iki farklı NaCl-su ve dört farklı soda-su çözeltisi olmak üzere yedi farklı deney yapılmıştır. Her bir deneyde, sıcaklık ve yoğunluk ölçümlerinden havuz derinliğinin bir fonksiyonu olarak elde edilen havuz sıcaklık ve yoğunluk dağılımları ayrı ayrı incelenmiştir.

6.1.1. Tatlı Su Deney Sonuçları

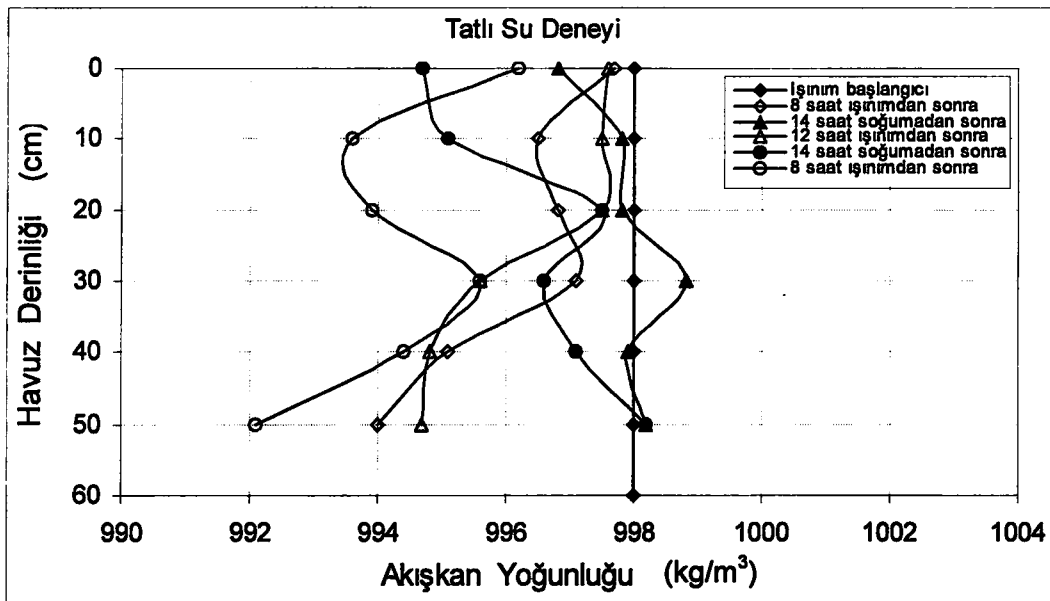
Tatlı su ile yapılan deneyin amacı, tatlı sulu bir ortamda gerçekleşen olayları inceleyerek, derinlikle artan bir yoğunluk gradyeni içeren TTGH'ların ısı depolama özelliğini belirgin bir şekilde gösterebilmektir. Bu amaç doğrultusunda, tatlı su ile yapılan deneyden elde edilen havuz sıcaklık dağılımı ile, tuz-su çözeltisi deneylerden elde edilen havuz sıcaklık dağılımları karşılaştırıldığında, TTGH'ların ısı depolama karakteristikleri açık bir şekilde görülebilmektedir.

Şekil 6.1 ve 6.2'de tatlı su ile yapılan deneyden elde edilen havuz sıcaklık ve yoğunluk dağılımları görülmektedir. Yüzeyinden ısıtım akısına maruz bırakılan su kütlelerinin ısınmaya başlaması ile birlikte, genişleyip yoğunluğu azaldığından dolayı, ısıtma periyodunda havuz tabanında yoğunluk daha küçük olurken, yüzeyinde daha büyük olmaktadır. Soğuma periyodunda ise tam tersi bir durum söz konusu olup, yoğunluk yüzeyde daha küçük olurken tabanda daha büyük olmaktadır. Su kütlelerinin orta bölgesinde ise karışık bir yapı mevcuttur. Bu karışıklığa, sıcak olduğundan dolayı yoğunluğu düşük olan su moleküllerinin yukarıya, daha soğuk dolayısıyla daha yoğun olan su moleküllerinin ise aşağıya doğru hareket etmek istemesi neden olmaktadır. Bir su molekülü kendisinden daha soğuk veya daha sıcak bir ortamla karşılaştığında aniden sıcaklığı ve yoğunluğu değiştiğinden, tabandan yüzeye doğru hareket eden sıcak su molekülüyle, yüzeyden tabana doğru hareket eden soğuk su molekülü su kütlelerinin orta kısmında karşılaştığından dolayı bir karışıklığa neden olmaktadır. Tabanda daha hafif su molekülleriyle, yüzeyde tabana göre daha ağır olan su moleküllerinin yer değiştirmek istemesi, yoğunluk değişiminin

neden olduğu kaldırma kuvvetinin, yerçekimi ve sürtünme kuvvetlerini yenmesi sonucu başlayan doğal taşınım kaynaklanmaktadır. Su kütlesinin orta kısmındaki karışıklık, ısıtma ve soğutma periyotlarında taban ile yüzey arasında ters bir sıcaklık gradyeninin oluşması nedeniyle başlayan taşınım hareketinin oluştuğunun bir delilidir.



Şekil 6.1. Tatlı su deneyi havuz sıcaklık dağılımı



Şekil 6.2. Tatlı su deneyi havuz yoğunluk dağılımı

Doğal taşınım sonucu, tabanda ısınan su kütlesi yüzeye doğru yükseldiğinden sürekli olarak atmosfere ısı kaybetmektedir. Su kütlesi içerisindeki bu ısı kaybını önleyecek bir mekanizma mevcut olmadığından, Şekil 6.1'de görüldüğü gibi, ısıtma periyodunda derinlikle azalan bir sıcaklık gradyeni oluşurken, soğuma periyodunda başlangıçtaki sıcaklık değerine yakın bir sıcaklık dağılımı oluşmuştur.

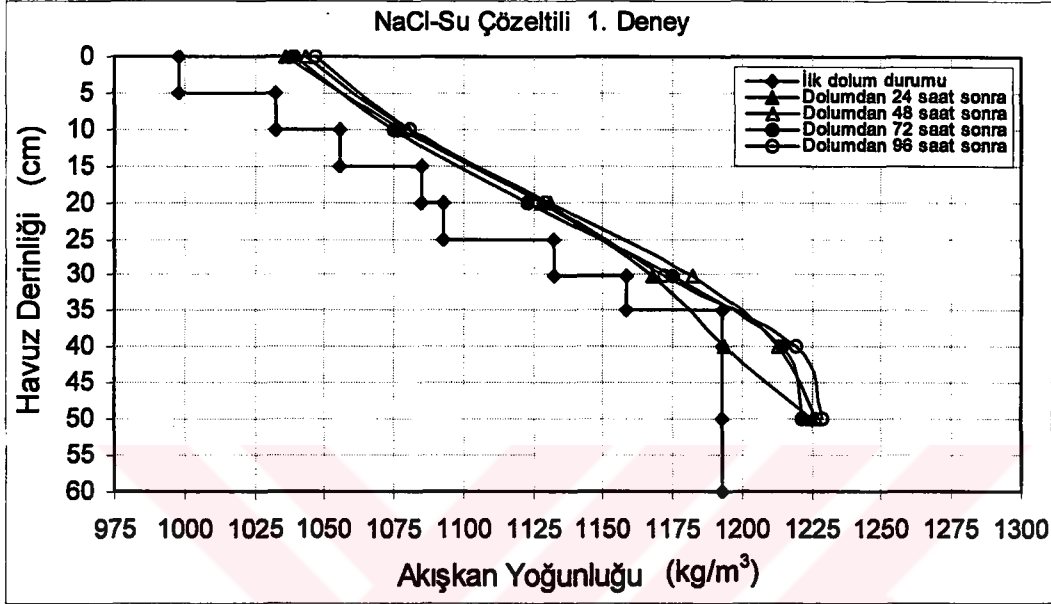
6.1.2. NaCl-Su Çözeltili Deney Sonuçları

Tuz-su çözeltili deneylere, TTGH'larda kullanılan en genel tuz çeşidi olan ve bugüne kadar yapılan bir çok deneysel çalışmada kullanılarak ısı depolama karakteristiği incelenmiş olan NaCl-su çözeltilisiyle başlanmıştır. NaCl-su çözeltili deneyin yapılmasındaki amaç, bugüne kadar denenmemiş olan soda tuzunun TTGH'larda kullanarak, uygun bir tuz olup olmadığını ve soda-su çözeltili bir ortamın ısı depolama karakteristiğini, bu konuda denenmiş ve ısı depolama özeliği ispatlanmış olan NaCl çözeltili TTGH'larla karşılaştırmaktır. Böylece, soda-su çözeltili TTGH'dan elde edilecek sonuçlar, NaCl çözeltili havuzdan elde edilen sonuçlara göre değerlendirilerek, geçerliliği gösterilebilecektir.

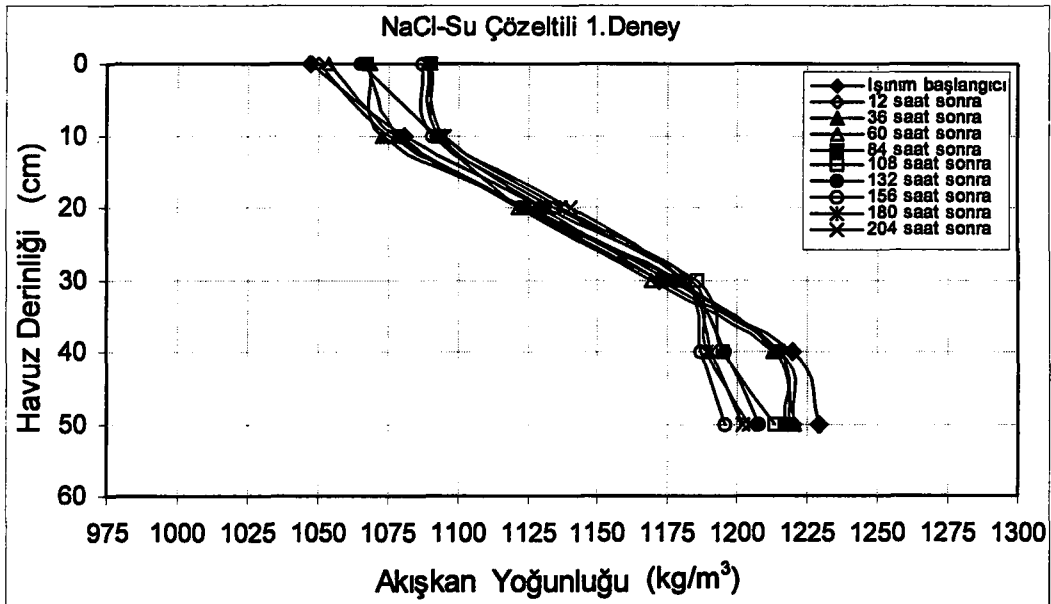
Literatürde NaCl tuzu kullanılarak oluşturulan tuz yoğunluk gradyenli TTGH'larda ısı depolanabilmesi için havuz tabanı ile yüzeyi arasında en az % 20 dolayında bir tuzluluk oranına sahip yoğunluk gradyeninin oluşturulması gerektiği dikkate alınmış, taban ile yüzey arasında birinci deneyde % 23, ikinci deneyde % 21 tuzluluk oranına sahip bir tuz yoğunluk farkı oluşturularak deneylere başlanmıştır. NaCl-su çözeltili birinci deney, sekiz gün boyunca 12 saat ısıtım (ısıtma periyodu), 12 saat karanlığa (soğuma periyodu) maruz bırakılarak sekizinci gün sonunda, taban ile yüzey arasında yaklaşık 11 °C'lik bir sıcaklık farkı ölçülmüştür.

Şekil 6.3'de, havuz ısıtımına maruz bırakılmadan önce, tuz yoğunluk gradyeninin lineer hale gelebilmesi için beklenen dört günlük süre içerisindeki havuz yoğunluk dağılımı görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, havuz doldurulmaya başlamadan önce havuz tabanına konan tuzun, yoğunluk gradyeninin oluşumuna ve korunmasına etkisi görülmektedir. Havuz doldurulduktan kısa bir süre sonra, ATB yoğunluğu ulaşabileceği en büyük değerine ulaşmıştır. Bu durum, havuz doldurulmaya başlamadan önce havuz

tabanına konan ve havuz doldurulduktan sonra çözelti içerisindeki tuz kristalizasyonu nedeniyle havuz tabanına biriken tuzun çözünerek, tabandaki çözeltiyi aşırı doymuş hale getirmesi sonucu oluşmuştur.



Şekil 6.3. NaCl-Su çözeltili birinci deneyde, havuz ısıtımına maruz kalmadan önceki havuz yoğunluk dağılımı



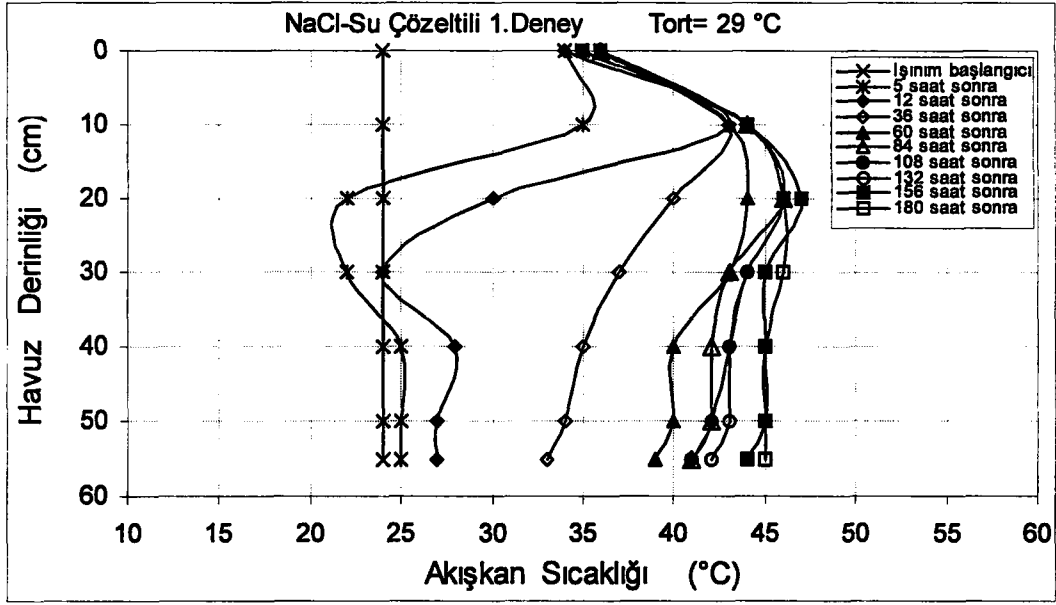
Şekil 6.4. NaCl-su çözeltili birinci deneyde, havuz ısıtımına maruz kaldıktan sonraki havuz yoğunluk dağılımı

Şekil 6.4.'de ise, havuz ışınlama maruz bırakıldıktan sonraki havuz yoğunluk dağılımı görülmektedir. Havuz tabanındaki tuz konsantrasyonu, yüzeye doğru olan tuz difüzyonu nedeniyle zamanla azalmakta, yüzeydeki tuz konsantrasyonu ise artmaktadır. Tuz difüzyonuna bağlı olarak, ATB ve ÜTB bölgeleri zamanla büyümüş, TZB bölgesi ise küçülmüştür. TZB'nin küçülmesiyle birlikte, başlangıçta oluşturulan yoğunluk gradyeni değeri de küçülmüştür. Yoğunluk gradyeni, deney süresince koruma düzeneği ile kontrol altında tutulması nedeniyle uzun süre kararlılığını muhafaza edebilmiştir.

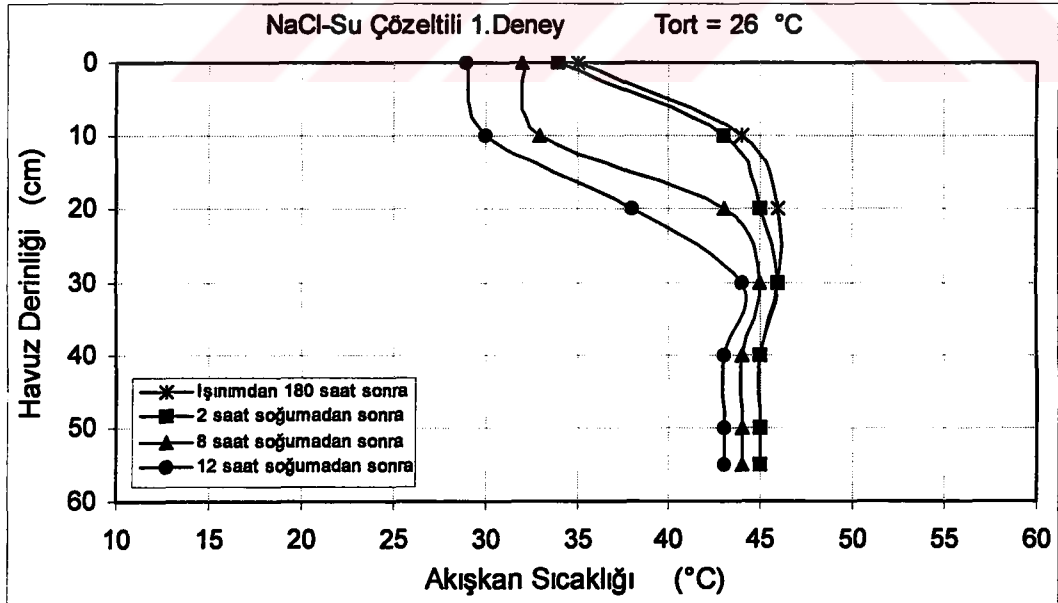
Şekil 6.5'de, havuz derinliğinin bir fonksiyonu olarak ölçülen havuz sıcaklık dağılımı görülmektedir. Sekiz gün boyunca gözlemlenen havuzdan, sekizinci gün sonunda taban ile yüzey arasında yaklaşık 11 °C sıcaklık farkı elde edilmiştir. Sekizinci gün sonunda ölçülen sıcaklık değerlerinin, yedinci gün ölçülen sıcaklık değerlerine çok yakın olduğu görülmüş ve sekizinci gün sonunda deneye son verilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi, başlangıçta hızlı bir şekilde artan depolama sıcaklığı, yedinci günden itibaren sabit kalmaya başlamıştır.

Havuzun yüzey sıcaklığı, depolama sıcaklığına göre hızlı bir şekilde yükselerek, yaklaşık 35 °C dolayında sabit kalmıştır. Bu durum, deneylerde enerji kaynağı olarak kullanılan lamba ışınlama spektrumunun, güneş ışınlama spektrumuna oranla daha çok kızılötesi ışınlama sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Su, kızılötesi ışınlama geçirilmeyen bir madde olması nedeniyle, lamba ışınlamının güneş ışınlamına oranla daha büyük bir bölümü, havuz yüzeyinde ince bir tabaka tarafından soğurulacağından, havuz tabanına kadar ulaşım soğurulacak olan ışınlama miktarı azalmaktadır. Böylece yüzey sıcaklığı, depolama sıcaklığına oranla daha hızlı artmakta, atmosfere taşınım, buharlaşma ve ışınlama ısı kaybettiğinden dolayı da belirli bir değerde sabit kalmaktadır.

Aynı ışınlama akısı değerlerinde, güneş ışınlamına maruz doğal havuzlar ile laboratuvar şartlarında simüle edilen havuzlar karşılaştırıldığında; yüzeyde soğurulacak kızılötesi ışınlama miktarı daha az ve güneş ışınlamının daha çok kısa dalga boylu ışınlama sahip olması nedeniyle havuz tabanına kadar ulaşım soğurulacak ışınlama miktarı ise daha fazla olacağından, doğal havuzlardan elde edilecek sıcaklık farkı daha büyük olacaktır.



Şekil 6.5. NaCl-Su çözeltili birinci deneyde, havuz ışınlıma maruz kaldıktan sonraki havuz sıcaklık dağılımı



Şekil 6.6. NaCl-Su çözeltili birinci deneyde, deney bittikten sonraki soğuma periyodu havuz sıcaklık dağılımı

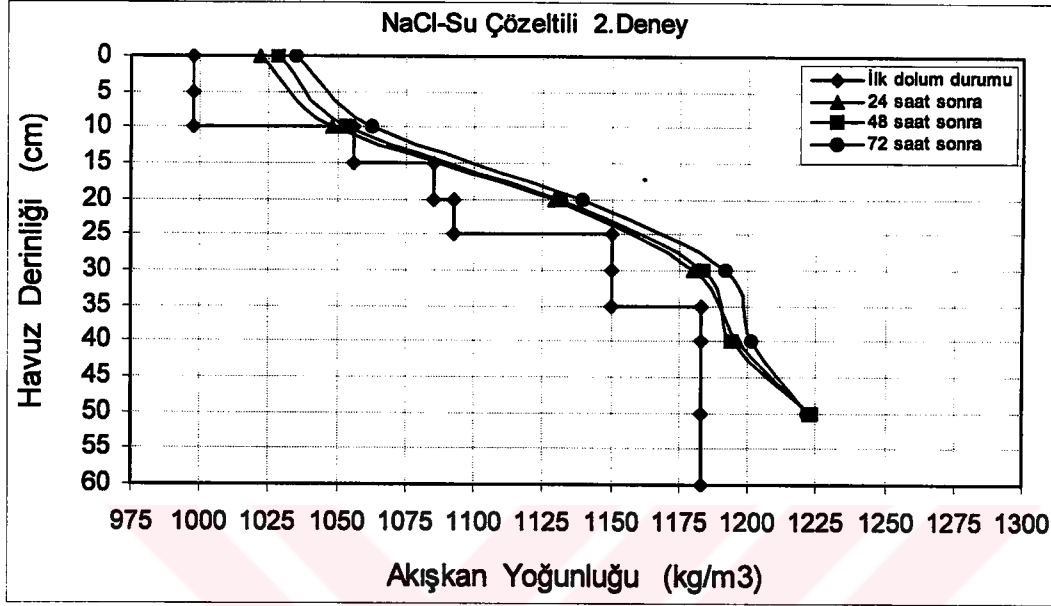
Şekil 6.6'da ise, sekizinci gün sonunda deney sona erdirildikten sonraki 12 saatlik soğuma periyodu sıcaklık dağılımı verilmiştir. Sekiz gün periyodik ısıtıma maruz kaldıktan sonraki 12 saatlik soğuma periyodunda 15 °C dolayında bir sıcaklık farkı ölçülmüştür. Soğuma periyodunda elde edilen sıcaklık farkı, ısıtma periyodunda elde edilen sıcaklık farkından daha büyük olmuştur. Bu durum, başlangıçta büyük bir tuz yoğunluk gradyeni oluşturulması sonucu havuz içerisinde taşınım hareketinin oluşamaması nedeniyle ATB'de depolanan ısıнын TZB boyunca sadece iletimle kaybolmasından kaynaklanmaktadır. İletimle kaybolan ısı, suyun ısı iletim kabiliyetinin iyi olmaması nedeniyle küçük olduğundan, depolama bölgesi sıcaklığındaki değişimde küçük olmaktadır. Yüzey sıcaklığı ise, ısı kayıpları nedeniyle belirli bir süre sonra ısıtma periyodundaki sıcaklık değerinden ortam sıcaklığına yaklaşmıştır. Şekil 6.6'dan görülebileceği gibi, soğuma periyodunda, nitelik ve nicelik bakımından doğal havuzlardan elde edilen sıcaklık gradyenine benzer bir sıcaklık gradyeni oluşmuştur.

NaCl-su çözeltili ikinci deneyde havuz dokuz günlük bir süre zarfında gözlem altında tutulmuş, ölçülen yoğunluk ve sıcaklık dağılımları Şekil 6.7-6.11'de verilmiştir. Şekil 6.7'de ısıtma periyodu öncesi, tuz yoğunluk gradyeninin lineer bir hale gelebilmesi için beklenen üç günlük süre içerisindeki yoğunluk dağılımı görülmektedir. Birinci deneyde, kararlı bir gradyenin oluşabilmesi için havuz doldurulduktan sonra tuz yoğunluk gradyeninin davranışı dört gün boyunca gözlemlenmiş, gradyenin kararlı hale gelebilmesi için üç günlük bir sürenin uygun olabileceği görülmüştür. Bu nedenle, bundan sonraki deneylerde bu süre üç gün olarak beklenilmiştir.

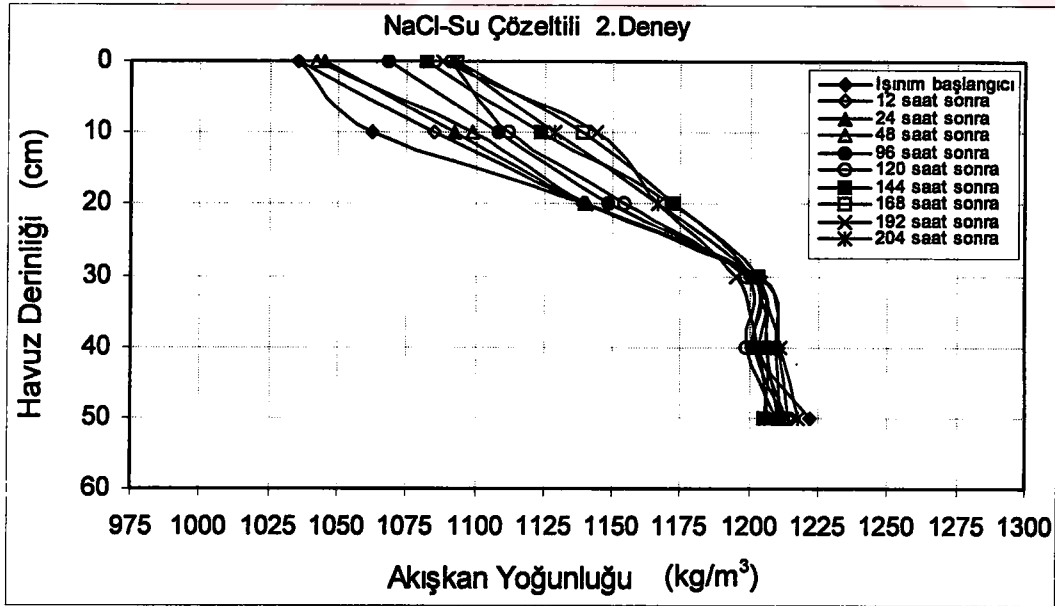
Şekil 6.8'de, ikinci deneyde ısıtma periyodu süresince ölçülen yoğunluk dağılımının birinci deneyde olduğu gibi, TZB bölgesi içinde bir birine yakın değerler olmadığı görülmektedir. Bunun nedeninin farklı konsantrasyonlarda ince tabakalardan oluşan TZB'nin havuzun doldurulması sırasında düzgün bir şekilde artan yoğunluk basamaklarından oluşturulmadığından kaynaklandığı anlaşılmıştır. Birinci deneyde, ikinci deneye oranla düzgün bir şekilde artan yoğunluk gradyenleri içeren TZB bölgesi oluşturulmuş, ikinci deneyde birinci deneydeki çözelti kullanıldığından bu durum gerçekleştirilememiştir.

Şekil 6.9'da ise, dokuz günlük deney süresinden sonra kendi haline bırakılan havuzun üç gün içerisindeki yoğunluk dağılımı görülmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi, tuz

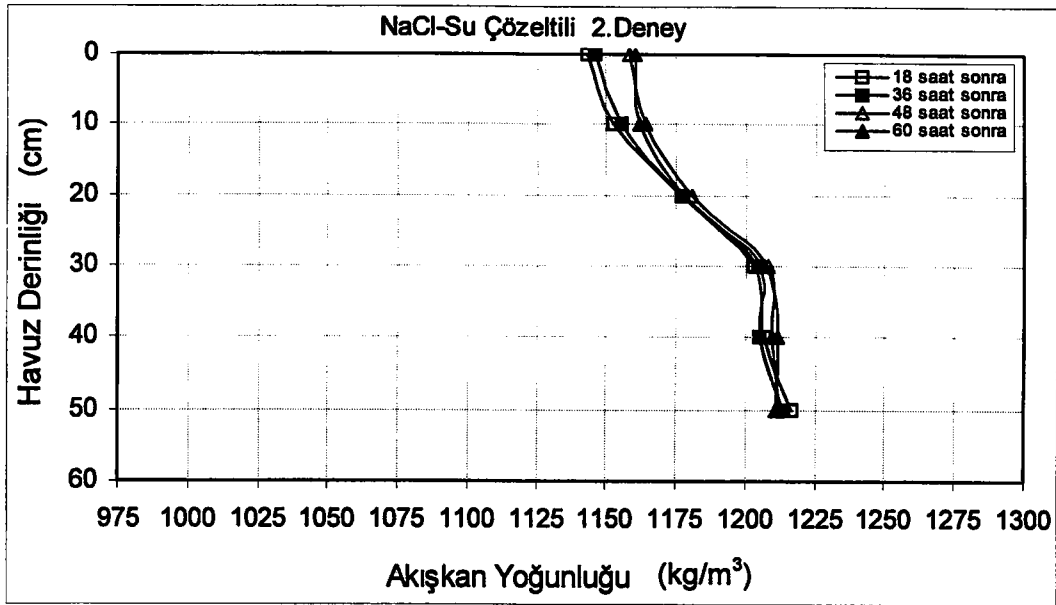
yoğunluk gradyeni korunmadığı takdirde, tuz difüzyonu nedeniyle tuz konsantrasyonunun tabanda azalması, yüzeyde ise artması nedeniyle zamanla bozulmaya doğru meyletmiştir.



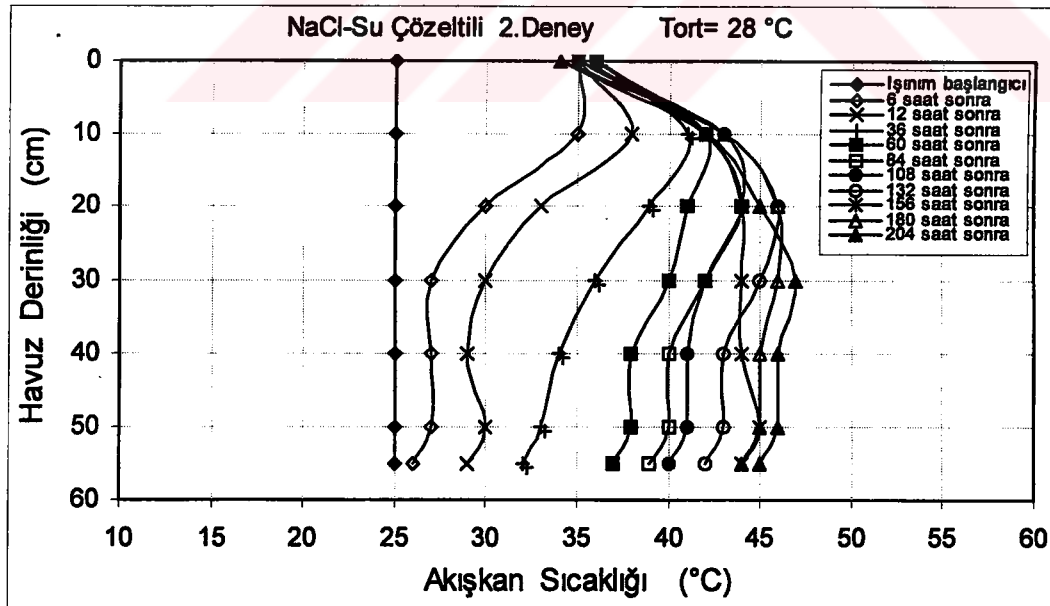
Şekil 6.7. NaCl-Su çözeltili ikinci deneyde havuz ısıtımına maruz kalmadan önceki havuz yoğunluk dağılımı



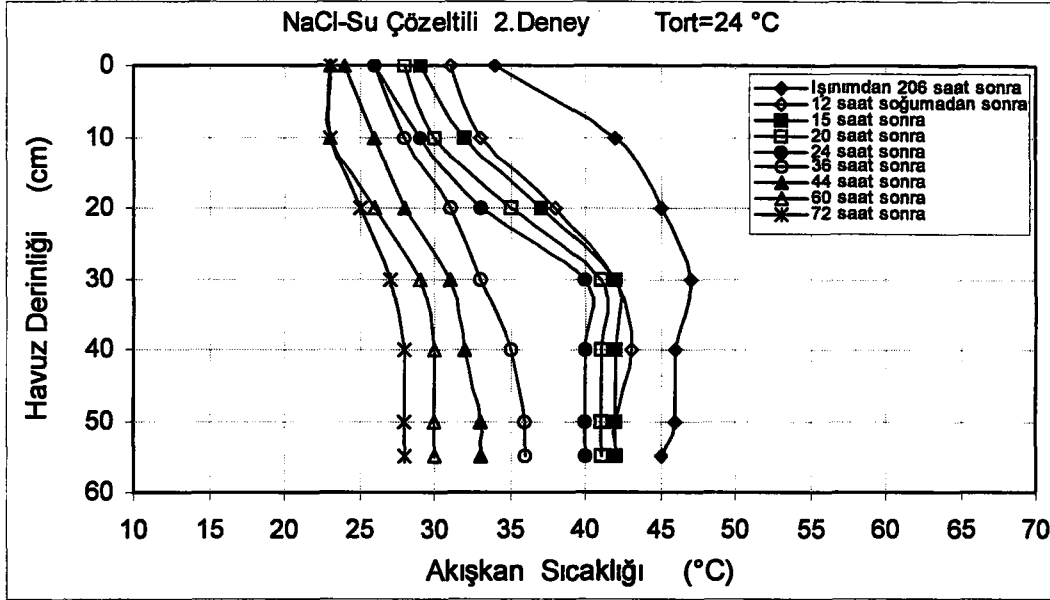
Şekil 6.8. NaCl-Su çözeltili ikinci deneyde, havuz ısıtımına maruz kaldıktan sonraki havuz yoğunluk dağılımı



Şekil 6.9. NaCl-Su çözeltili ikinci deneyde, deney bittikten sonraki soğuma periyodu havuz yoğunluk dağılımı



Şekil 6.10. NaCl-Su çözeltili ikinci deneyde, havuz ısıtımına maruz kaldıktan sonraki havuz sıcaklık dağılımı

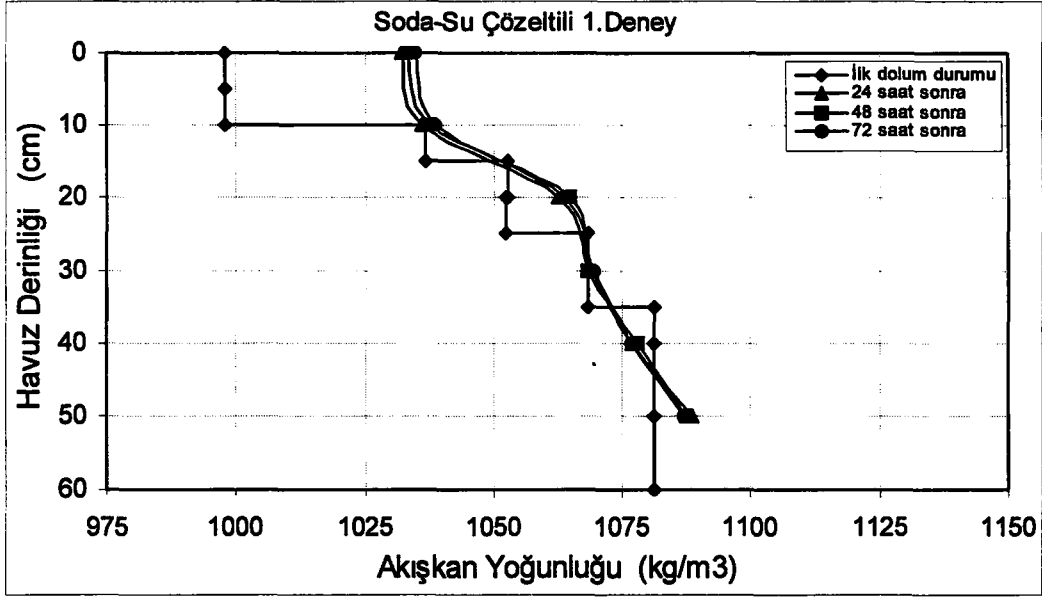


Şekil 6.11. NaCl-Su çözeltili ikinci deneyde, deney bittikten sonraki soğuma periyodu havuz sıcaklık dağılımı

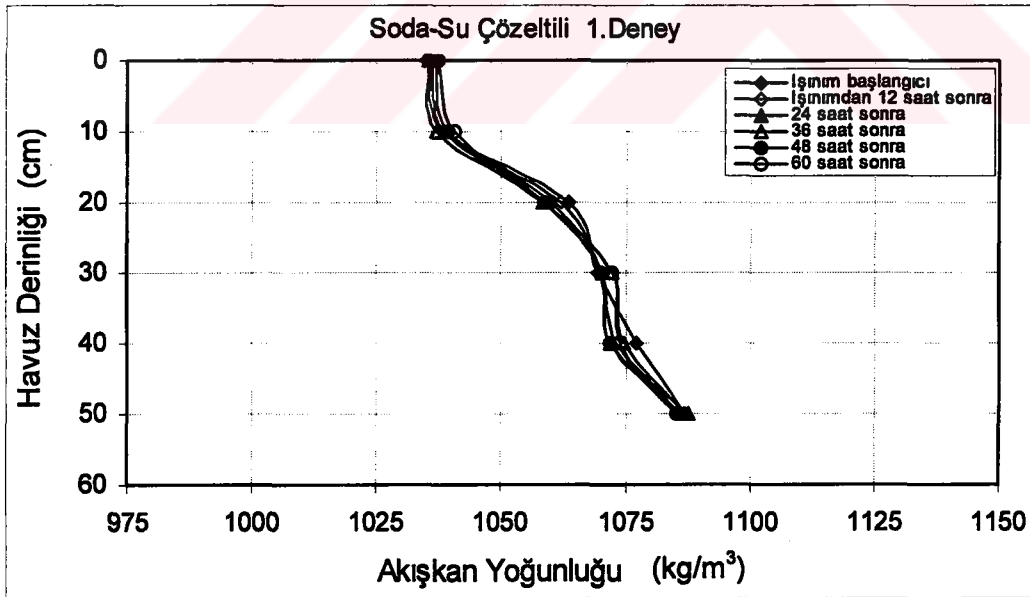
İkinci deneyde dokuz günlük deney süresince ölçülen havuz sıcaklık dağılımı, Şekil 6.10'da verilmiştir. Birinci deneyde olduğu gibi, yedinci günden itibaren depolama sıcaklığı bir birine yakın değerler olmuştur. Dokuz günlük periyodik ışınlıma maruz bırakılan havuzdan, taban ile yüzey arasında yaklaşık 13 °C'lik sıcaklık farkı ölçülmüştür.

Şekil 6.11'de ise, deney sona erdirildikten sonra, üç günlük soğuma periyodundaki havuz sıcaklık dağılımı görülmektedir. 72 saatlik soğuma periyodu sonunda yüzey sıcaklığı ortam sıcaklığına eşit olmuş, taban ile yüzey arasındaki sıcaklık farkı ise 5 °C olarak ölçülmüştür. Deney sona erdirildikten sonra tuz yoğunluk gradyeni kontrol altında tutulmaya devam edilmiş olsaydı ve birinci deneyde olduğu gibi daha kararlı bir gradyen oluşturulabilseydi bu sıcaklık farkı daha büyük olabilirdi.

NaCl-su çözeltili ikinci deney, bir nevi birinci deneyin sağlaması olmuştur. Havuz sıcaklık dağılımları yaklaşık aynı olurken, yoğunluk dağılımlarında, havuzun doldurulması sırasında TZB'yi oluşturan tabakaların içermiş oldukları yoğunluk basamağından kaynaklanan nedenlerden dolayı farklılıklar gözlemlenmiştir.



Şekil 6.12. Soda-su çözeltili birinci deneyde, havuz ısıtımına maruz kalmadan önceki havuz yoğunluk dağılımı



Şekil 6.13. Soda-su çözeltili birinci deneyde, havuz ısıtımına maruz kaldıktan sonraki havuz yoğunluk dağılımı

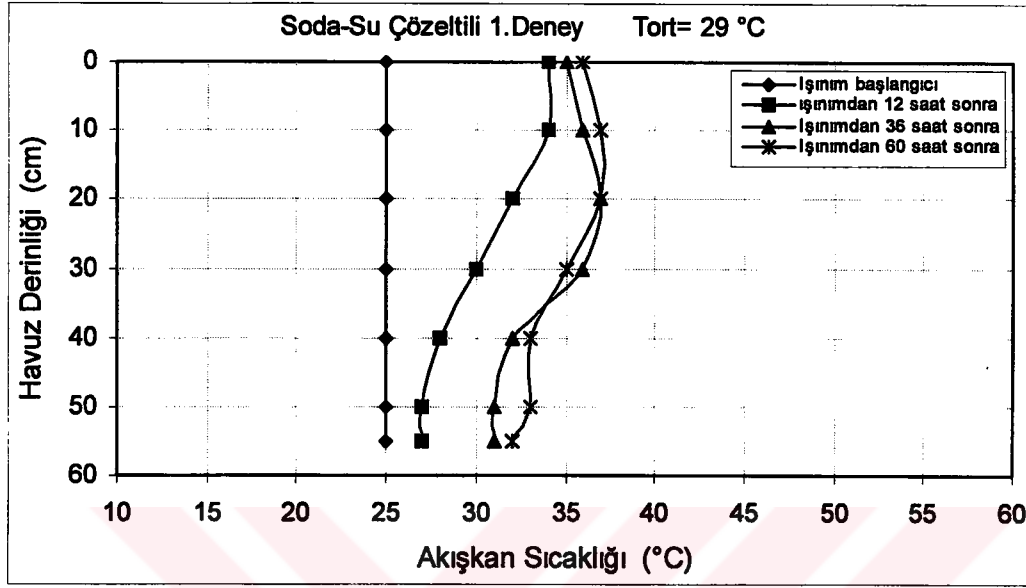
6.1.3. Soda-Su Çözeltili Deney Sonuçları

Tatlı su ve NaCl-su çözeltili deneylerden elde edilen sonuçlardan ve edinilen tecrübelerden sonra, TTGH'larda tuz yoğunluk gradyeninin oluşturulmasında ilk defa denenecek olan soda-su çözeltili deneylere başlanmıştır. İlk olarak, havuz tabanı ile yüzeyi arasında % 8 değerinde bir tuzluluk oranına sahip yoğunluk gradyeni oluşturulmuştur. NaCl-su çözeltili deneylerde olduğu gibi, havuz periyodik olarak 12 saat ışınlama 12 saat karanlığa maruz bırakılmak suretiyle havuzun ısı davranışı gözlemlenmiştir. Deneyde ölçülen havuz yoğunluk ve sıcaklık dağılımları, havuz derinliğinin bir fonksiyonu olarak Şekil 6.12-6.15'de verilmiştir.

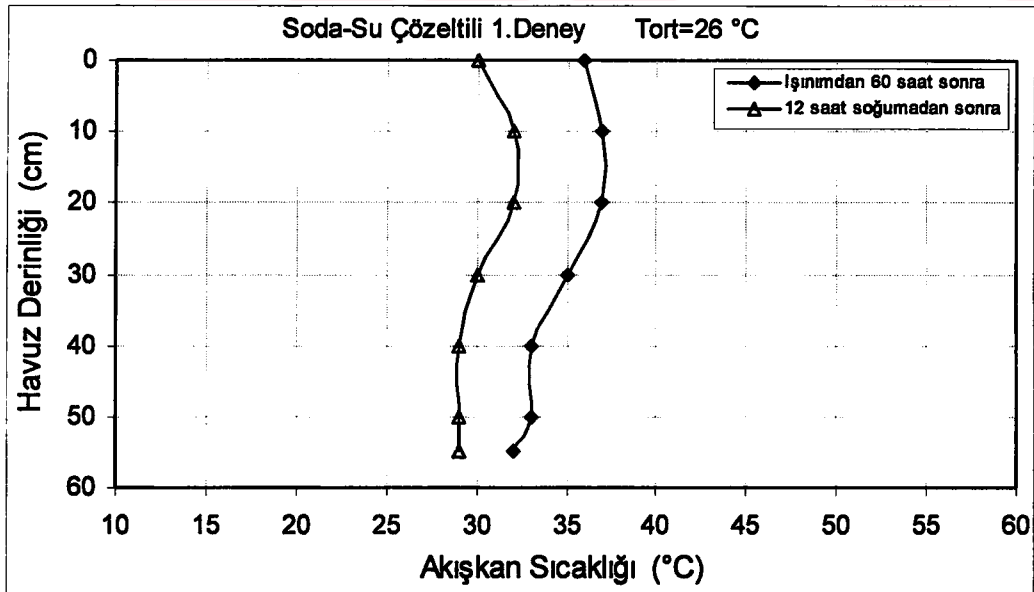
Şekil 6.12'de, havuzun ışınlama maruz bırakılmadan önceki üç günlük yoğunluk dağılımı görülmektedir. Merdiven basamağı şeklinde olan havuz ilk yoğunluk dağılımı, NaCl-su çözeltili deneylere oranla daha kısa zamanda lineer bir yapıya kavuşmuş olup, daha kararlı görülmektedir. Havuz doldurulduktan sonraki birinci ve üçüncü gün içinde ölçülen yoğunluk dağılımları, nitelik ve nicelik bakımından birbirine yakın değerler olmuştur. Aynı durum, Şekil 6.13'de deneye başlandıktan sonraki havuz yoğunluk dağılımında da görülmektedir. Soda-su çözeltili deneylerde ölçülen yoğunluk dağılımları, NaCl-su çözeltili deneylerden ölçülen yoğunluk dağılımlarına göre daha kararlı bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, NaCl çözeltili deneylerde olduğu gibi, havuz doldurulmadan önce havuz tabanına soda tuzu konmuş, sodanın su içerisinde kolay erimemesi ve havuz doldurulduktan sonra sodanın yapısı gereği havuz içerisinde tuz kristalizasyonu olmaması nedeniyle, ATB'nin tuz konsantrasyonu NaCl çözeltili havuzlara göre çok az artmıştır.

Şekil 6.14'de soda-su çözeltili birinci deneyden elde edilen havuz sıcaklık dağılımı görülmektedir. Deney süresince soğuma periyotlarında ölçülen sıcaklık değerleri dikkate alınarak, havuzda bu şartlarda ısı depolanamayacağı görülmüş ve üçüncü gün sonunda deneye son verilmiştir. Şekil 6.15'de görüldüğü gibi, deney sona erdirildiği andaki sıcaklık dağılımı referans olarak alındığında, deney sonrasındaki 12 saatlik soğuma periyodunda ölçülen havuz sıcaklık dağılımının, NaCl çözeltili deneylerdeki havuz sıcaklık dağılımına göre TTGH'nın ısı yapısına uygun olmadığı görülür. Üç günlük ısıtım periyodunda depolama sıcaklığı ile yüzey sıcaklığı arasında pek fazla değişiklik olmamış, aynı durumun soğuma periyodunda görülmesi sonucu % 8 büyüklüğünde tuzluluk oranına sahip olan

yoğunluk gradyeninin, havuz tabanında soğurulan ışıının neden olduğu ısı enerjisini depolayabilmesi için yeterli olmadığı kanaatine varılmıştır.

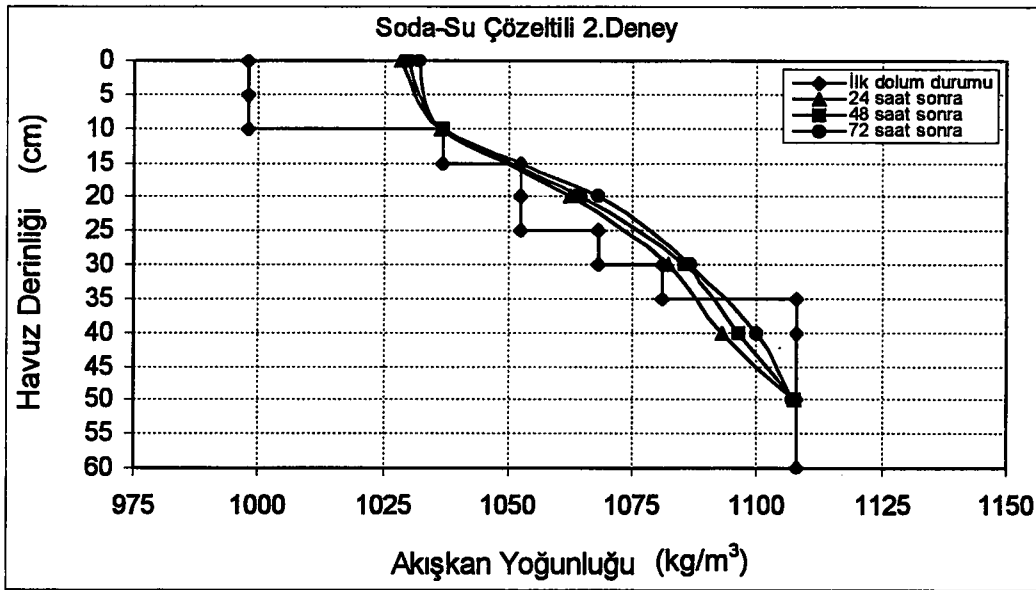


Şekil 6.14. Soda-su çözeltili birinci deneyde, havuz ışıına maruz kaldıktan sonraki havuz sıcaklık dağılımı

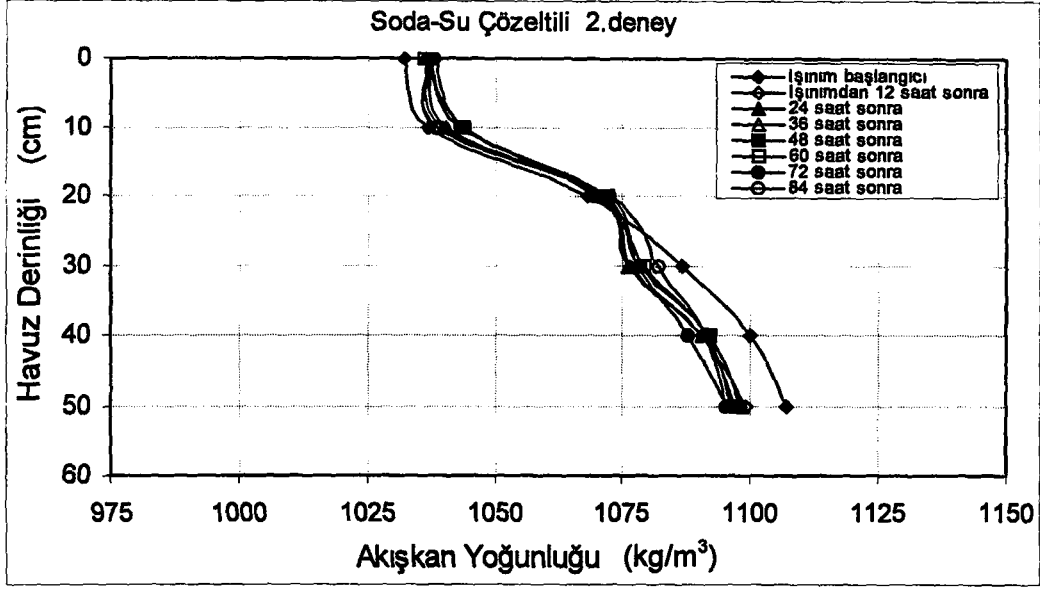


Şekil. 6.15. Soda-su çözeltili birinci deneyde, ışıının bittikten sonraki soğuma periyodu sıcaklık dağılımı

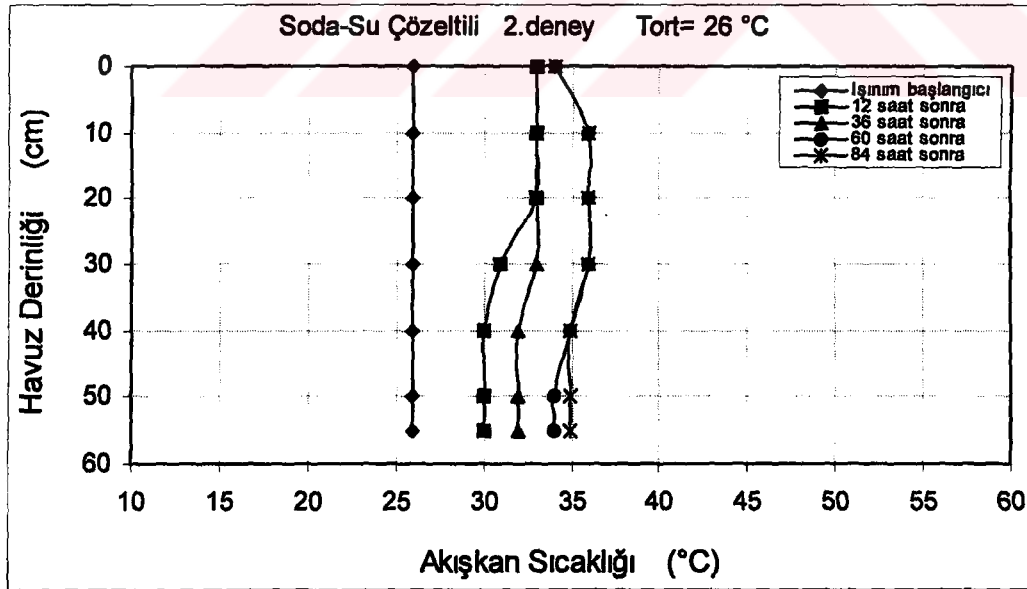
Soda-su çözeltili ikinci deney, taban ile yüzey arasında % 10 tuzluluk oranına sahip bir yoğunluk gradyeni oluşturularak gerçekleştirilmiştir. Deneyde ölçülen havuz yoğunluk ve sıcaklık dağılımları, yaklaşık soda-su çözeltili birinci deneyden elde edilen sonuçlara benzer değerler olmuştur. Şekil 6.16'da yoğunluk gradyeninin lineer hale gelebilmesi için, çözeltinin havuza doldurulduktan sonra beklenen üç günlük süre içerisindeki havuz yoğunluk dağılımı görülmektedir. Başlangıçta tabakalar halinde olan yoğunluk gradyeni, birinci deneyde olduğu gibi tuz difüzyonu nedeniyle kısa bir süre içerisinde lineer bir yapıya kavuşmuştur. Şekil 6.17'de görüldüğü gibi, havuzun ısınıma maruz bırakılmasından sonra, TZB bölgesinin alt kısımlarına oranla üst kısımlarında daha kararlı bir yoğunluk gradyeni oluşmuştur. Aynı durum, birinci deneyde elde edilen yoğunluk gradyeninde de gerçekleşmiştir. Bunun nedeni de havuzun doldurulması sırasında, TZB bölgesini oluşturan tabakaların içermiş olduğu tuz konsantrasyonunun düzgün bir şekilde azalmasından kaynaklanmaktadır. Hem birinci deneyde, hem de ikinci deneyde, TZB-ÜTB sınırındaki tabakalar arası konsantrasyon farkı, ATB-TZB sınırındaki tabakaların konsantrasyon farkından daha büyük olmuştur. Bu bölgede tabakalar arası kütle difüzyonun uzun zaman aralığında gerçekleşmesi, kararlı bir gradyenin oluşumuna öncülük etmiştir. Bu nedenle, havuz doldurulurken, TZB'yi oluşturan tabakaların içermiş olduğu tuz konsantrasyon değerleri, bu durum göz önüne alınarak daha dikkatli belirlenmelidir.



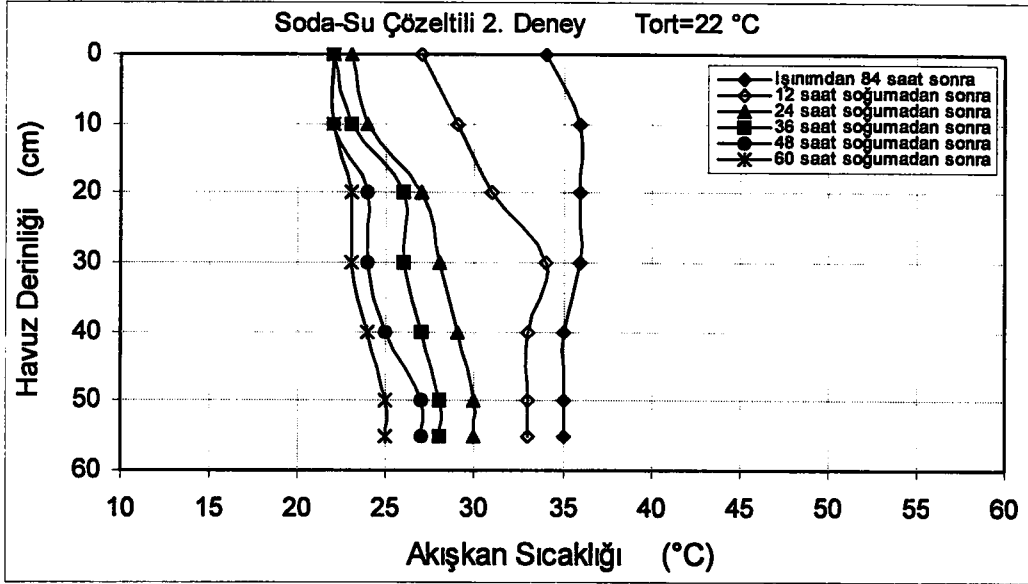
Şekil 6.16. Soda-su çözeltili ikinci deneyde, havuz ısınıma maruz kalmadan önceki havuz yoğunluk dağılımı



Şekil 6.17. Soda-su çözeltili ikinci deneyde, havuz ısıtımına maruz kaldıktan sonraki havuz yoğunluk dağılımı



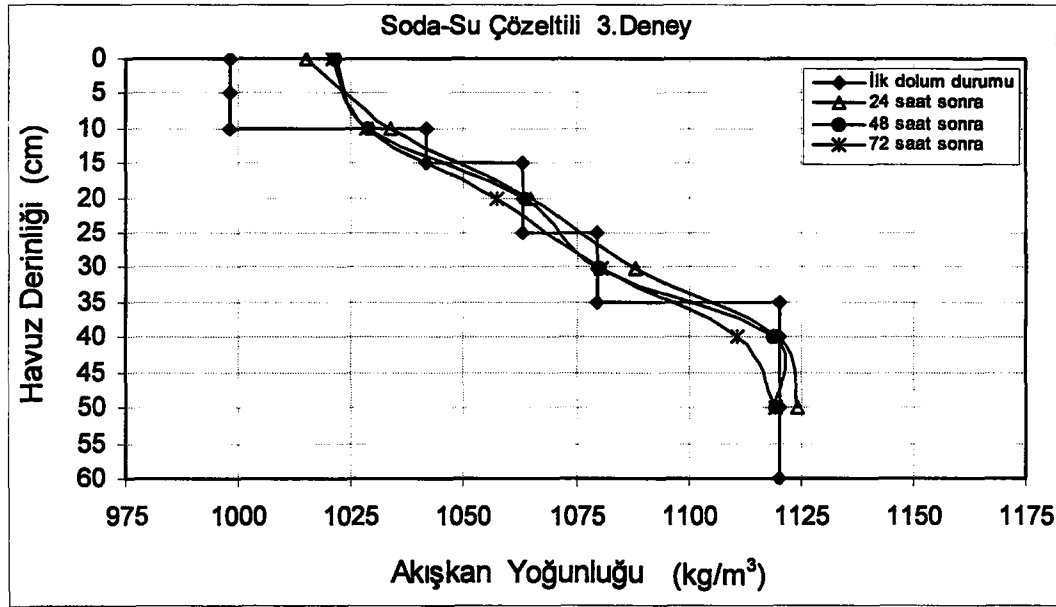
Şekil 6.18. Soda-su çözeltili ikinci deneyde, havuz ısıtımına maruz kaldıktan sonraki havuz sıcaklık dağılımı



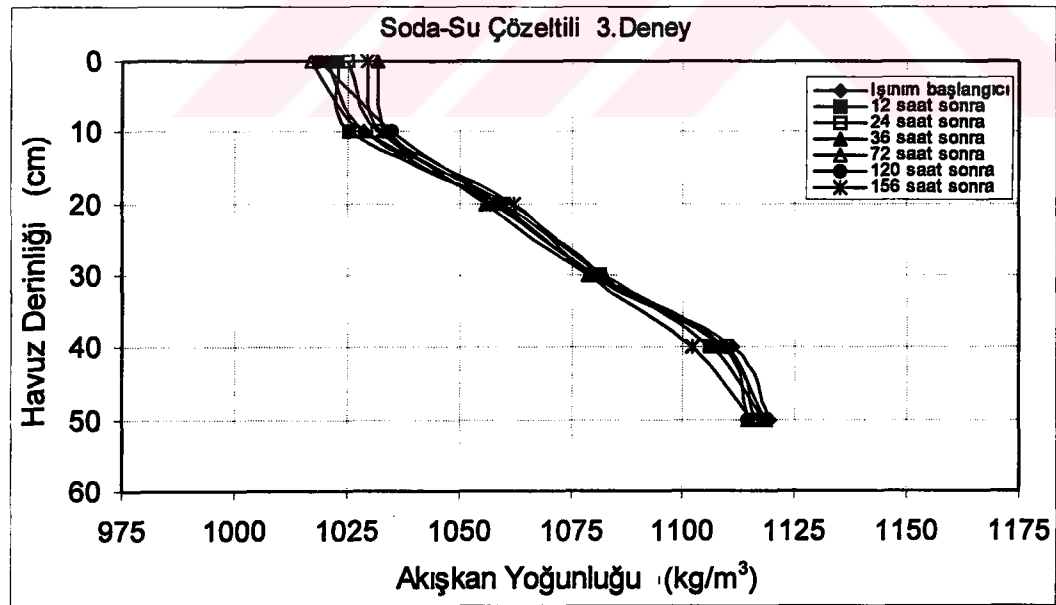
Şekil 6.19. Soda-su çözeltili ikinci deneyde ısıtım bittikten sonraki soğuma periyodu havuz sıcaklık dağılımı

Şekil 6.18’de ise, soda-su çözeltili ikinci deneyden elde edilen havuz sıcaklık dağılımı görülmektedir. Havuz dört gün boyunca gözlem altında tutulmuş, elde edilen ölçüm değerleri birinci deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, havuzun sıcaklık dağılımında TTGH’nın ısı yapısına benzer bir yapıya azda olsa bir geçiş evresinin başladığı gözlemlenmiştir. Bu durum, dördüncü gün deneye son verildikten sonraki soğuma periyodunda ölçülen havuz sıcaklık dağılımının verildiği Şekil 6.19’da daha açık bir şekilde görülmektedir. Havuzun ısıtımına maruz kaldığı dördüncü gün sonunda taban ile yüzey sıcaklıkları yaklaşık bir birine eşit olurken, deney sona erdirildikten sonraki 24 saatlik soğuma periyodunda taban ile yüzey arasında yaklaşık 7 °C’lik sıcaklık farkı ölçülmüş, bu sıcaklık farkı zamanla 2-3 °C’ye kadar düşmüştür. Elde edilen bu değerler dikkate alındığında, havuzun ısı yapısının yavaş yavaş ısı depolama özelliğine sahip olmaya başladığı, fakat bunun iyi bir depolama yapabilmek için yeterli olamayacağı görülür.

Soda-su çözeltili üçüncü deneyde, havuz tabanı ile yüzeyi arasında % 12 büyüklüğünde tuzluluk oranına sahip olan bir tuz yoğunluk gradyeni oluşturulmuş ve yapılan sıcaklık ölçümleri neticesinde havuz tabanında ısı depolanabileceği gözlemlendiğinden deney yedi gün süreyle devam ettirilmiştir. Deneyden elde edilen sıcaklık ve yoğunluk dağılımları Şekil 6.20-6.23’de verilmiştir.

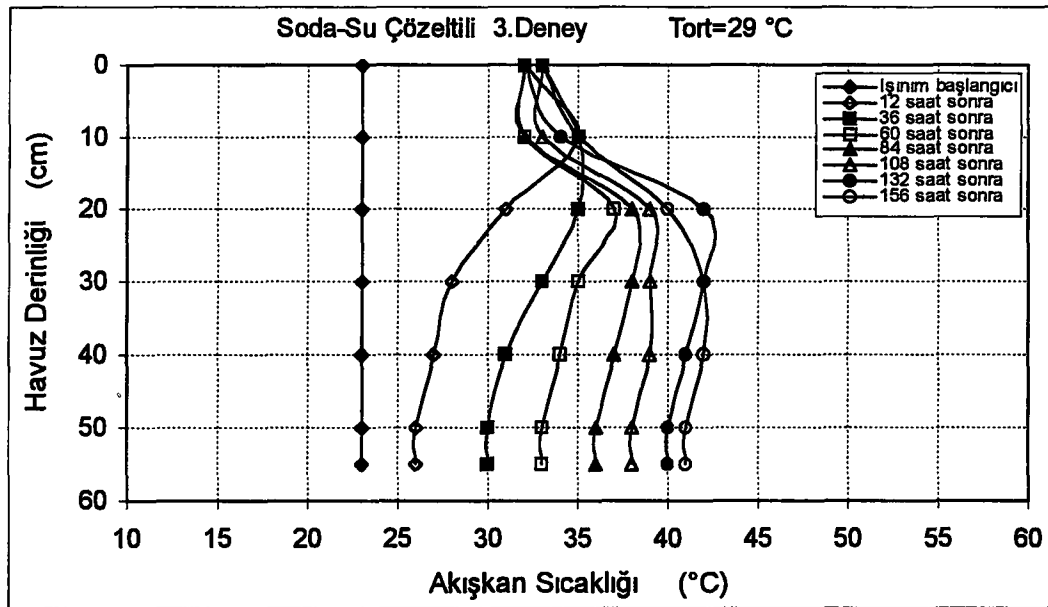


Şekil 6.20. Soda-su çözeltili üçüncü deneyde, havuz ısıtımına maruz kalmadan önceki havuz yoğunluk dağılımı

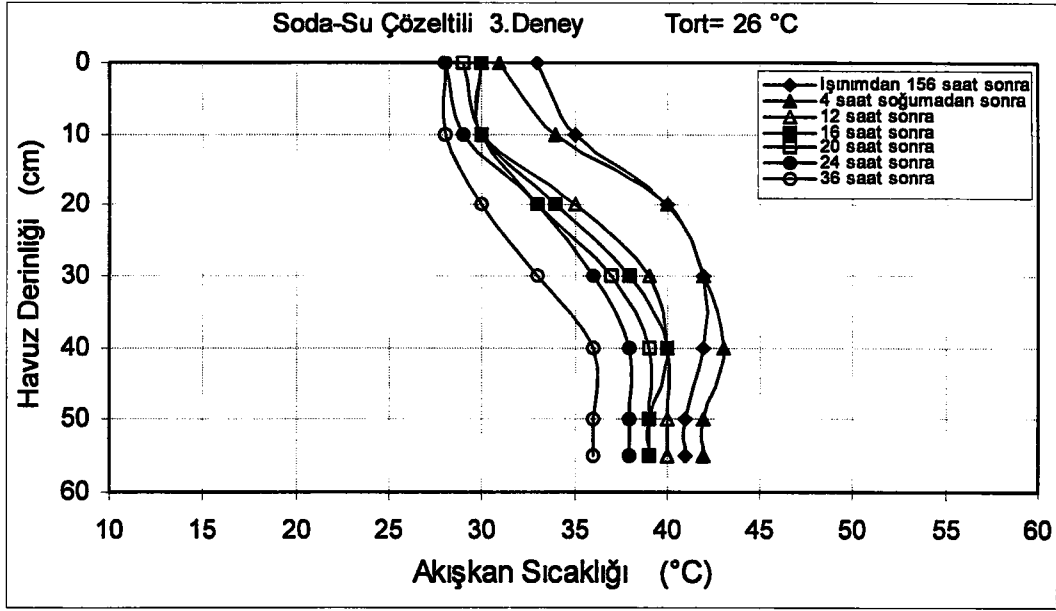


Şekil 6.21. Soda-su çözeltili üçüncü deneyde, havuz ısıtımına maruz kaldıktan sonraki havuz yoğunluk dağılımı

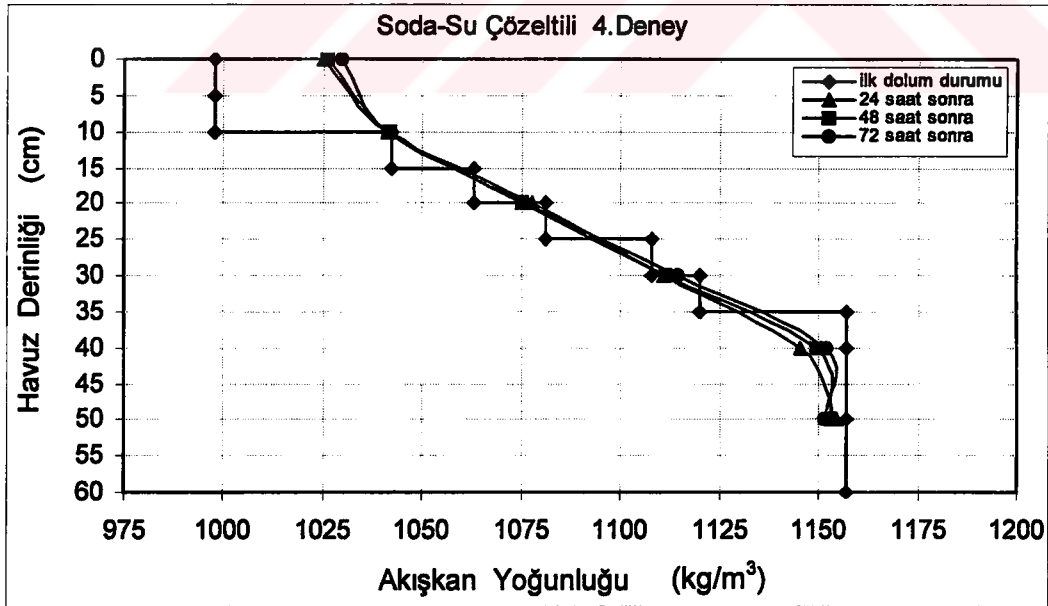
Birinci ve ikinci deneyde olduğu gibi, bu deneyde de deney süresince yapılan yoğunluk ölçümleri sonucunda kararlı bir yoğunluk gradyeni olduğu Şekil 6.20 ve 6.21’de görülmektedir. Soda-su çözeltili üçüncü deney havuz sıcaklık dağılımı ise, Şekil 6.22’de verilmiştir. Deneyde, yedi gün sonunda havuz tabanı ile yüzeyi arasında yaklaşık 10 °C sıcaklık farkı ölçülmüştür. Depolama sıcaklığı, altıncı günden itibaren sabit kalmaya başladığından yedinci gün sonunda deneye son verilmiştir. NaCl-su çözeltili deneylerde olduğu gibi, depolama sıcaklığı başlangıçta hızlı bir şekilde artmaya başlamış, belirli bir süre geçtikten sonra sabit kalmaya meyletmiştir. Deneye son verildikten sonra havuzun soğuma periyodunda ölçülen sıcaklık dağılımı, Şekil 6.23’de görülmektedir. Soğuma periyodunda, 36 saat sonra havuz tabanı ile yüzeyi arasında 8 °C’lik bir sıcaklık farkı ölçülmüştür. Bu fark, % 12 değerinde tuzluluk oranına sahip olan havuz yoğunluk gradyeninin ATB’de soğurulan ışıının aynı ortamda ısı enerjisi olarak depolanabileceğinin bir delili olmaktadır. Bu durumda, % 12 büyüklüğündeki yoğunluk gradyeninin, birinci ve ikinci deneylerdeki % 8 ve % 10 büyüklüğündeki yoğunluk gradyenlerine oranla, havuz tabanından yüzeyine doğru olan taşınım hareketini önleyebildiği ortaya çıkmaktadır. Sonuç olarak, soda-su çözeltili TTGH’da ısı depolanabilmesi için taban ile yüzey arasında oluşturulan yoğunluk gradyeninin en az % 12 büyüklüğünde bir tuzluluk oranına sahip olması gerektiği tespit edilmiştir.



Şekil 6.22. Soda-su çözeltili üçüncü deneyde, havuz ısıtımına maruz kaldıktan sonraki havuz sıcaklık dağılımı



Şekil 6.23. Soda-su çözeltili üçüncü deneyde, ısıtım bittikten sonraki soğuma periyodu havuz sıcaklık dağılımı



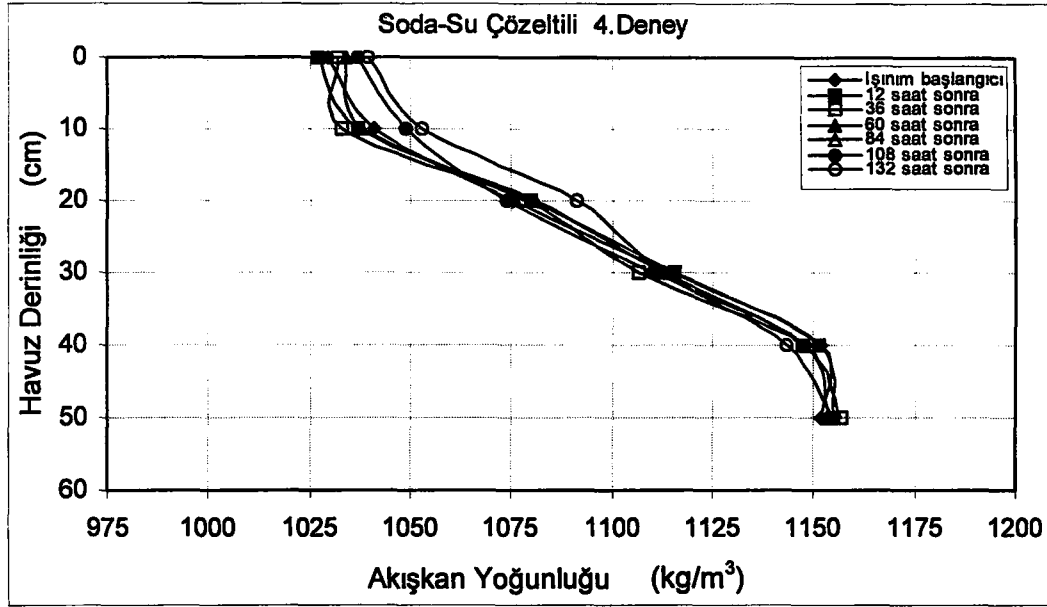
Şekil 6.24. Soda-su çözeltili dördüncü deneyde, havuz ısıtımına maruz kalmadan önceki havuz yoğunluk dağılımı

Soda su çözeltili son deney ise, havuz tabanı ile yüzeyi arasında % 16 büyüklüğünde tuzluluk oranına sahip bir yoğunluk gradyeninin oluşturulmasıyla gerçekleştirilmiştir. Daha büyük yoğunluk gradyeni içeren deneyler yapılmak istenmesine rağmen, sodanın su içerisinde yüksek konsantrasyonlarda eritilmesinin zor olması, eritildiği takdirde ise çözelti içerisinde ince tabakalar halinde katılaşmanın başlaması nedeniyle bu deneyler gerçekleştirilememiştir.

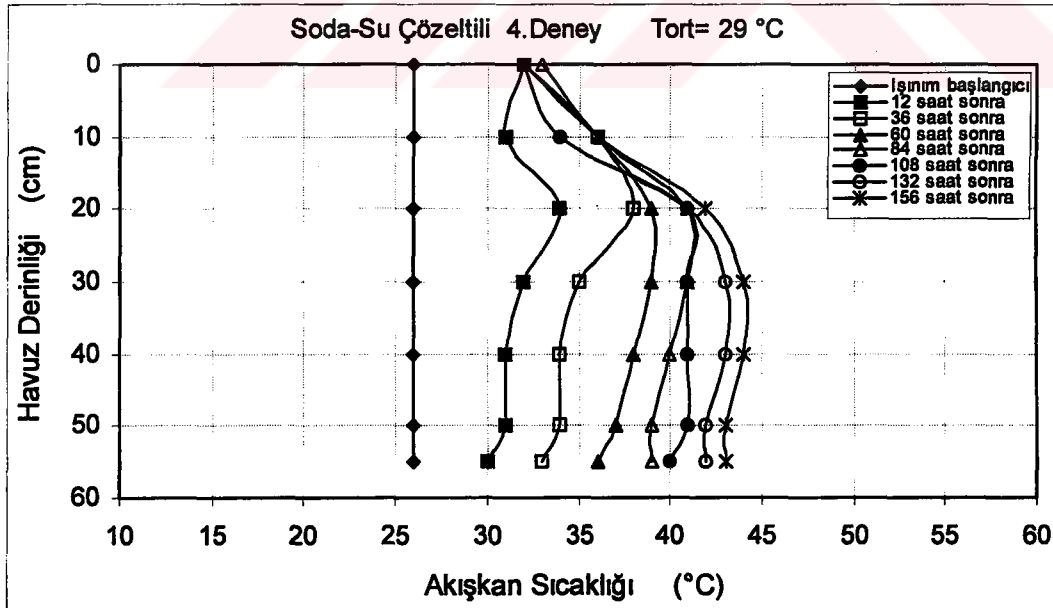
Soda-su çözeltili dördüncü deneyde ölçülen yoğunluk ve sıcaklık dağılımları, Şekil 6.24-6.27'de havuz derinliğinin fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Bundan önceki soda-su çözeltili deneylerde olduğu gibi, bu deneyde de yoğunluk gradyeninin kararlı bir yapıya sahip olduğu Şekil 6.24 ve 6.25'de açık bir şekilde görülmektedir. Bu durumun da, deneylerde kullanılan sodanın kristal halde bulunmasından ve sodanın su içerisinde eritildiğinde NaCl gibi askıda kalan partiküllerin olmamasından kaynaklandığı sanılmaktadır.

Deney süresince ve deney sona erdirildikten sonraki havuz sıcaklık dağılımları Şekil 6.26 ve 6.27'de verilmiştir. Bu deneyde de, üçüncü deneyde olduğu gibi, depolama sıcaklığı altıncı günden itibaren sabit kalmaya başlamış ve yedinci gün sonunda taban ile yüzey arasında yaklaşık 12 °C sıcaklık farkı ölçülmüştür. Yedinci gün sonunda deney sona erdirilmiş, soğuma periyodundaki sıcaklık dağılımı gözlemlenmeye devam edilmiştir. 36 saatlik soğuma periyodunda, havuz tabanı ile yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı üçüncü deneyde 8 °C olurken, bu deneyde 10 °C olmuştur. Sıcaklık farkındaki bu artış, havuz içerisinde başlangıçta oluşturulan yoğunluk gradyeninin büyüklüğünden kaynaklanmaktadır. Havuz içerisinde bölgesel olarak başlayan ve önlenemediği takdirde büyüyerek devam eden taşınım hareketlerinin engellenmesi, havuz içerisinde başlangıçta oluşturulan yoğunluk gradyeninin büyüklüğüne bağlıdır. Havuz içerisindeki gradyen ne kadar büyük olursa, taşınım hareketlerinin oluşabilmesi o kadar zor olacağından, havuz tabanında soğurulan ısı, ısı enerjisi olarak uzun dönem depolanabilecektir. Soda-su çözeltili üçüncü ve dördüncü deneylerden elde edilen sonuçlar bunun açık bir delili olmaktadır.

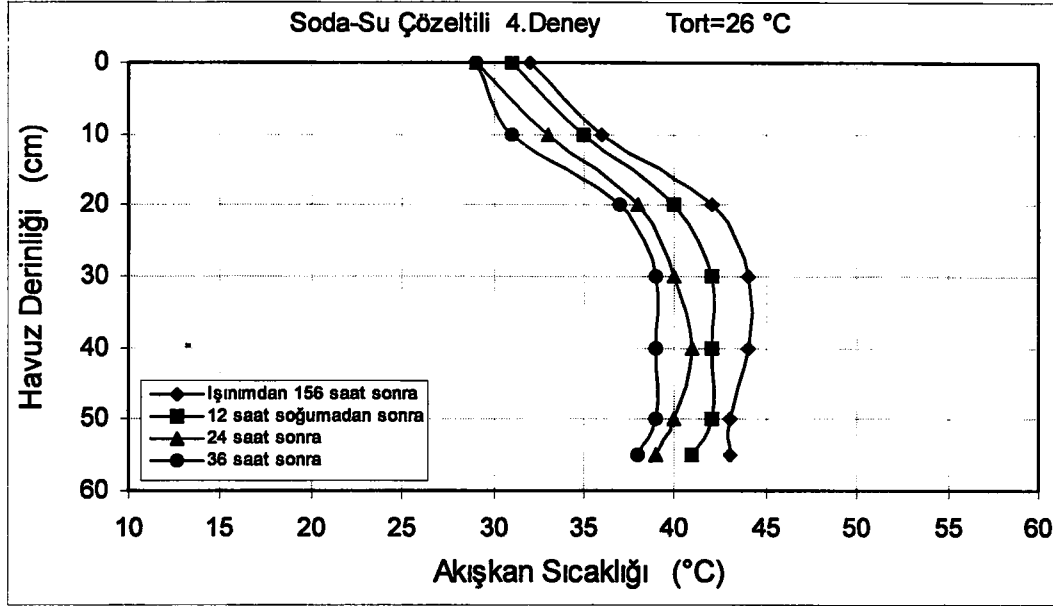
NaCl-su çözeltili deneylerde olduğu gibi, soda-su çözeltili deneylerde de, soğuma periyodundaki havuz sıcaklık dağılımları, TTGH'nın ısı yapısına daha uygun ve yakın değerler olmuştur.



Şekil 6.25. Soda-su çözeltili dördüncü deneyde, havuz ışıma maruz kaldıktan sonraki havuz yoğunluk dağılımı



Şekil 6.26. Soda-su çözeltili dördüncü deneyde, havuz ışıma maruz kaldıktan sonraki havuz sıcaklık dağılımı

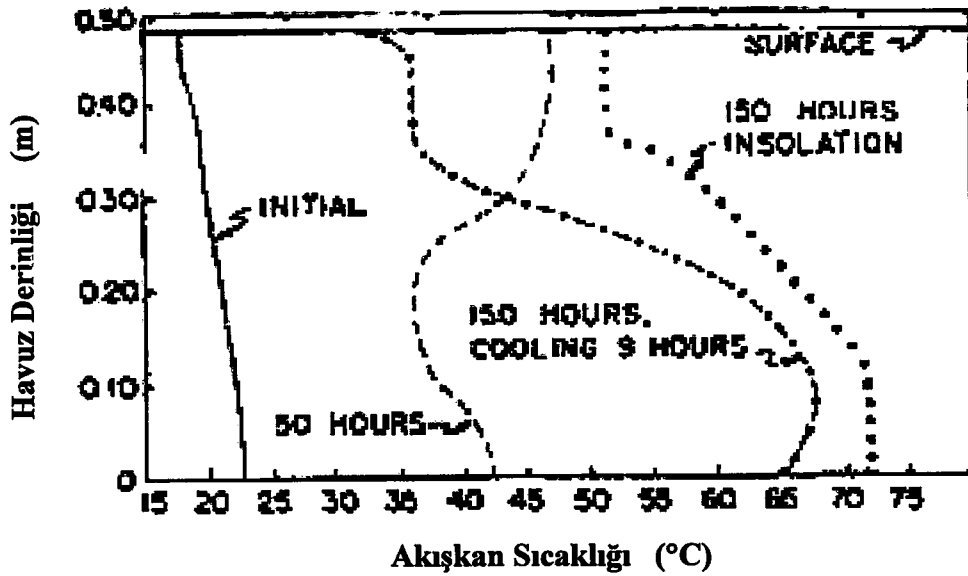


Şekil 6.27. Soda-su çözeltili dördüncü deneyde, ışınlam bittikten sonraki soğuma periyodu havuz sıcaklık dağılımı

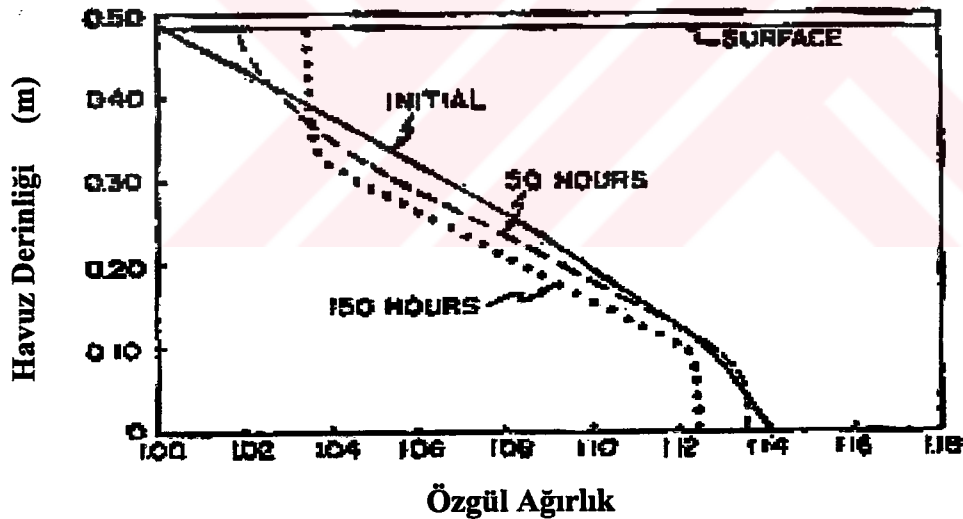
6.2. Deney Sonuçlarının Literatürdeki Çalışmalar İle Karşılaştırılması

Yapılan deneylerden elde edilen sonuçların, literatürde bu konuda yapılmış olan ve yapmış olduğumuz bu çalışmaya her yönüyle benzer çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılması, yapılan çalışmanın geçerliliğini gösterebilmek açısından faydalı olacaktır. Bu konuda, yapılan bu çalışmaya her yönüyle benzer bir çalışma bulunamamış, en yakın çalışmalarla karşılaştırma yapılabilmektedir. Deneylerde enerji kaynağı olarak simülatör kullanılması yönünden benzer en yakın çalışmalar Leshuk ve arkadaşları [18], ve Göktun [84] tarafından yapılan çalışmalar olmuştur. Özellikle Leshuk ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada kullandıkları havuz boyutları, yapılan bu çalışmada kullanılan havuz boyutlarına çok yakın olması, ikinci bir benzerlik olarak faydalı bir karşılaştırma olacaktır.

Leshuk ve arkadaşları [18], 61x50x48 cm boyutlarında plastik bir havuzda, tuz yoğunluk gradyenini potasyum nitrat (KNO_3) tuzu ile oluşturarak yapmış oldukları çalışmada, enerji kaynağı olarak 4x1000 W quartz lambadan oluşan simülatörü kullanmışlardır. Simülatör, havuz yüzeyine gelen ışınlam 1200 W/m^2 olacak şekilde ayarlanmış ve havuz devamlı ışınlamaya maruz bırakılarak deneyler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.28. Leshuk ve arkadaşlarının [18] yapmış oldukları deneysel çalışmadan elde etmiş oldukları havuz sıcaklık dağılımı



Şekil 6.29. Leshuk ve arkadaşlarının [18] yapmış oldukları deneysel çalışmadan elde etmiş oldukları havuz yoğunluk dağılımı

Leshuk ve arkadaşlarının [18] elde etmiş oldukları havuz sıcaklık profili Şekil 6.28’de görülmektedir. Havuzun 150 saatlik devamlı ışınlama maruz kalmasıyla, havuz tabanı ile yüzeyi arasında yaklaşık 20 °C sıcaklık farkı elde edilmiştir. Deney sona erdirildikten sonraki 9 saatlik soğuma periyodunda, bu sıcaklık farkı 33 °C olarak ölçülmüştür. Yapılan bu çalışmada da, Leshuk ve arkadaşları [18] gibi maksimum sıcaklık farkı soğuma

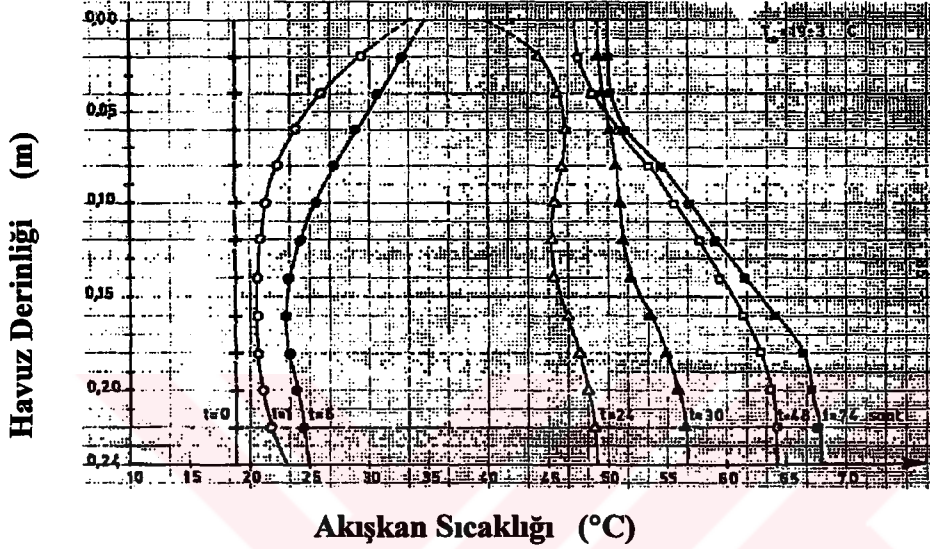
periyodunun başlarında elde edilmiştir. Bu çalışmada, havuz tabanı ile yüzeyi arasında yaklaşık 12-13 °C sıcaklık farkı elde edilirken, Leshuk ve arkadaşları [18], 20 °C sıcaklık farkı elde etmişlerdir. Sonuçlar arasındaki bu farkın, yapılan bu çalışmada havuz yüzeyine gelen ışınlam 750 W/m² olurken, Leshuk ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada bu değer 1200 W/m² olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca bu çalışmada, havuz periyodik olarak 12 saat ışınlama, 12 saat karanlığa maruz bırakılırken, Leshuk ve arkadaşları [18] devamlı olarak ışınlama maruz bırakmışlardır.

Şekil 6.29'da ise, Leshuk ve arkadaşlarının yapmış oldukları deneysel çalışmadan elde ettikleri havuz yoğunluk dağılımı görülmektedir. Havuz başlangıçta derinlikle lineer olarak artan bir yoğunluk gradyeni içerecek şekilde doldurulmuş, deneye başladıktan 50 saat sonra taşınımli bölgeler ile taşınımli ara bölgenin oluşmaya başladığı, 150 saat sonra ise, taşınımli bölgelerin zamanla büyüyerek gradyen bölgenin küçülmesine neden olduğu görülmektedir. Yüzeydeki tuzluluk oranı, tabandaki tuzluluk oranına göre daha hızlı artış göstermiştir. Leshuk ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada olduğu gibi, yapılan bu çalışmadan elde edilen havuz yoğunluk dağılımlarında da, 150-200 saat arasında değişen deney süresince, havuz yüzeyinin tuzluluk oranındaki artış, havuz tabanında azalan tuzluluk oranına göre daha hızlı ve daha büyük olmuştur. Ayrıca, taşınımli bölgeler zamanla büyüyerek, gradyen bölgenin küçülmesine neden olmuştur.

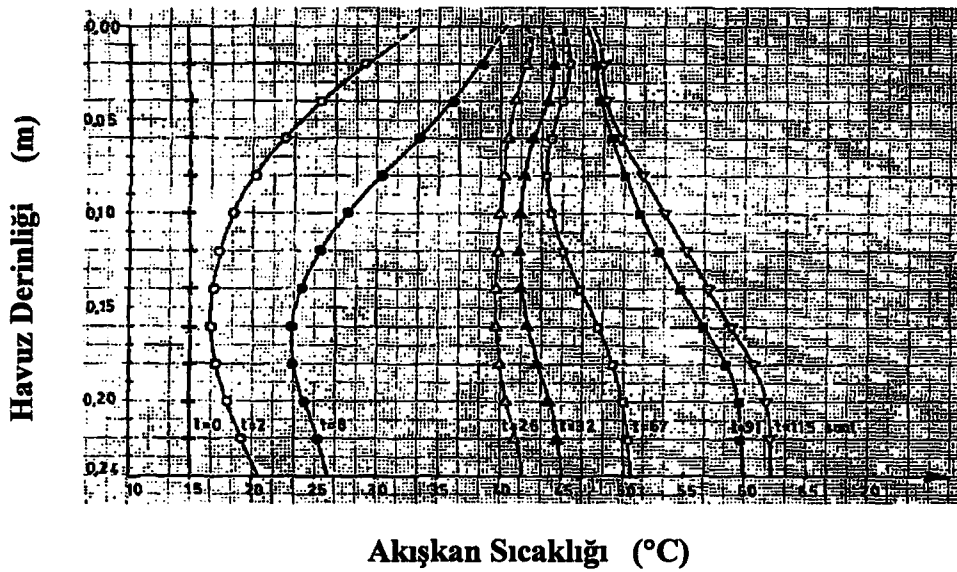
Göktun [84], laboratuvar şartlarında 29x19x24 cm boyutlarında pleksiglasstan imal edilmiş bir havuzda Leshuk ve arkadaşları [18] gibi KNO₃ tuzu kullanarak oluşturduğu tuz yoğunluk gradyenli güneş havuzunda deneysel bir çalışma yapmıştır. Enerji kaynağı olarak 1000 W'lık tungsten-halojen lambadan dizayn ettiği simülatörü kullanmış ve havuz yüzeyine gelen ışınlam şiddetini yine Leshuk ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada olduğu gibi 1200 W/m² seçmiştir. Deneyler, havuz devamlı olarak ve 2 saat ışınlama, 1 saat karanlığa maruz bırakılmak suretiyle gerçekleştirilmiştir.

Şekil 6.30'da havuz tabanı ile yüzeyi arasında 200 kg/m³'lük bir konsantrasyon farkı oluşturularak yapılan deneyden elde edilen havuz sıcaklık dağılımı görülmektedir. Havuz 74 saat süreyle devamlı ışınlama maruz kaldığında, taban ile yüzey arasında yaklaşık 17 °C'lik sıcaklık farkı elde edilmiştir. Şekil 6.31'de ise, havuzun periyodik olarak 115 saat boyunca 2 saat ışınlam ve 1 saat karanlığa maruz bırakılmasıyla elde edilen sıcaklık profili görülmektedir. Bu deneyde ise, 15 °C'lik bir sıcaklık farkı elde edilmiştir. Göktun'un [84]

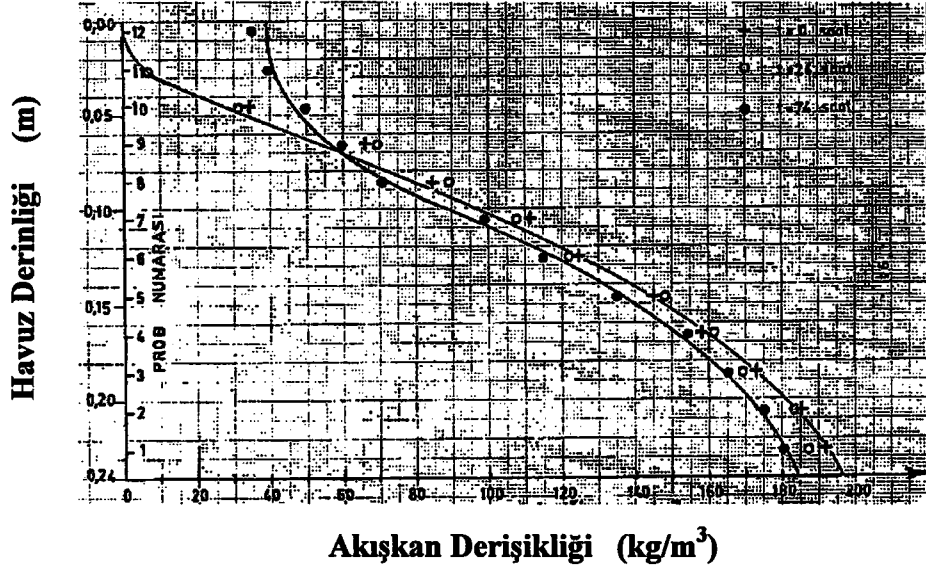
ikinci deneyden elde etmiş olduğu 15 °C'lik sıcaklık farkı, havuz boyutları ve seçilen ısıtım şiddeti değerleri çok farklı olmasına rağmen, yapmış olduğumuz deneysel çalışmadan elde ettiğimiz 12-13 °C'lik sıcaklık farkı değerlerine, Leshuk ve arkadaşlarının elde ettiği 20 °C sıcaklık farkına oranla daha yakın olmuştur.



Şekil 6.30. Gökün'un [84] yapmış olduğu deneysel çalışmadan elde etmiş olduğu havuz sıcaklık dağılımı (havuz devamlı ısıtımına maruz)



Şekil 6.31. Gökün'un [84] yapmış olduğu deneysel çalışmadan elde etmiş olduğu havuz sıcaklık dağılımı (havuz periyodik olarak ısıtımına maruz)



Şekil 6.32. Gökten'un [84] yapmış olduğu deneysel çalışmadan elde etmiş olduğu havuz yoğunluk dağılımı

Şekil 6.32'de ise, Gökten'un [84] taban ile yüzey arasında 200 kg/m^3 'lük konsantrasyon farkına sahip tuz yoğunluk gradyanlı deneyden elde etmiş olduğu havuz yoğunluk dağılımı görülmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi, deneye başladıktan 74 saat sonra tuz konsantrasyonu yüzeyde artmaya, tabanda ise azalmaya başlamıştır. Leshuk ve arkadaşlarının [18] yapmış oldukları çalışmada ve yapmış olduğumuz çalışmada olduğu gibi, havuz yüzeyinin tuz konsantrasyonundaki artış tabanındaki azalmadan daha büyük olmuş, zamanla taşınımlı bölgeler büyüyerek taşınımsız ara bölge küçülmüştür.

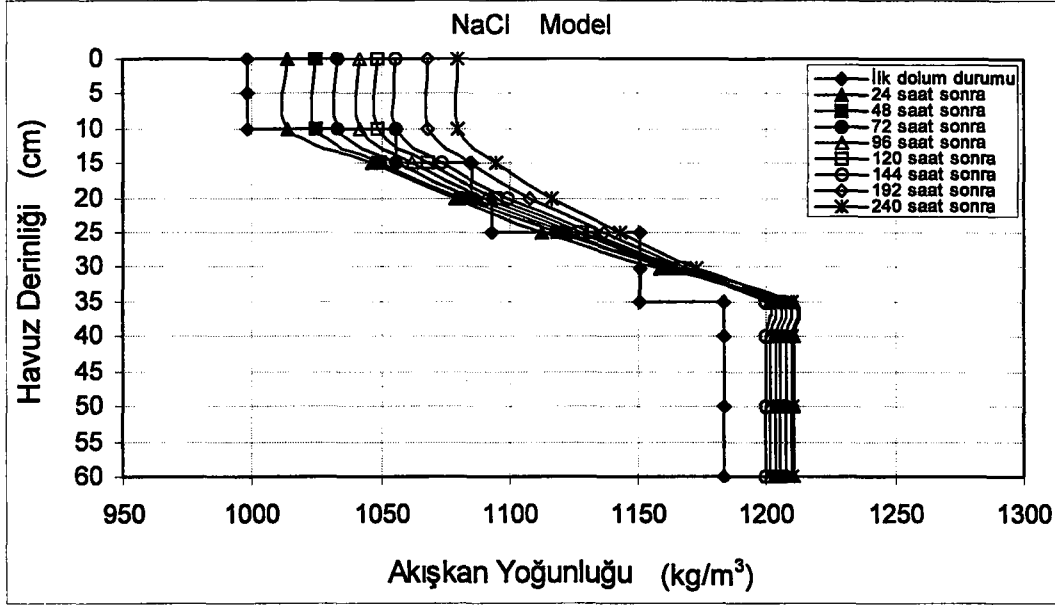
Yapılan çalışmadan elde edilen sonuçların, bu konuda yapılmış iki farklı çalışma ile karşılaştırılması sonucunda; Leshuk ve arkadaşlarının [18], ve Gökten'un [84] yapmış oldukları çalışmalardan elde ettikleri sonuçlarla nitelik bakımından uyumlu, nicelik bakımından ise deneylerde farklı ısıtım değerlerinin kullanılması ve havuzun farklı yöntemlerle ısıtımına maruz bırakılması nedeniyle küçük farklılıklar olduğu görülmüştür. Bu karşılaştırma, yapmış olduğumuz deneylerden elde edilen sonuçların geçerliliğinin bir delili olmaktadır.

6.3. Matematik Model Sonuçları

TTGH ısı ve kütle transferi matematik modelinden elde edilen denklemler, deneysel çalışmadan elde edilen havuz yoğunluk ve sıcaklık profilleriyle karşılaştırmak amacıyla sonlu farklar yaklaşımıyla nümerik olarak çözülmüştür. Modelin çözümü, NaCl-su çözelti ikinci deney ve soda-su çözelti üçüncü deney için yapılmış olup, elde edilen havuz yoğunluk ve sıcaklık dağılımları Şekil 6.33-6.36'da görülmektedir. Modelin çözümünde, başlangıç şartı olarak, deneysel çalışmada ölçülen havuz ilk sıcaklık ve yoğunluk değerleri kullanılmıştır. Havuzun ve çözeltinin fiziksel özellikleri ile ilgili parametreler Tablo 5.1'de verilmiştir. Çözeltinin ısı iletim katsayısı, ısı yayılım katsayısı, kütle yayılım katsayısı gibi fiziksel özellikleri ortalama sıcaklık değerlerinde hesaplanarak belirlenmiştir. Deneylerde NaCl çözeltisinin havuz tabanında doymuş hale geldiği, soda çözeltisinde ise aynı durumun

Tablo 6.1. Nümerik çözümde kullanılan fiziksel özellik değerleri

FİZİKSEL ÖZELİKLER	DEĞERLERİ
ÜTB tabaka kalınlığı; $X_{ÜTB}$	10 cm
TZB tabaka kalınlığı; X_{TZB}	25 cm
ATB tabaka kalınlığı; X_{ATB}	25 cm
Işınım şiddeti; I	750 W/m ²
Çözeltinin ısı iletim katsayısı; k [12]	0,569 W/m°C
Yüzeyde soğurulan kızılötesi ısı miktarı; β [50,56]	0,45
Soğurma katsayısı; μ [52,56]	0,5 m ⁻¹
Rüzgar hızı; V_r	1,5 m/s
Bağıl nem; R_h	% 70
Atmosfer basıncı; P_{atm}	101325 Pa
Havanın özgül ısısı; C_a [98]	1005 J/kg°C
Çözeltinin buharlaşma gizli ısısı; h_e [98]	2418x10 ³ J/kg
Çözeltinin ışıınımı neşretme katsayısı; ϵ_w [98]	0,95
Stefan-Boltzman sabiti; σ [98]	5,68x10 ⁻⁸ W/m ² K ⁴
Çözeltinin ısı yayılım katsayısı; α [12]	1,471x10 ⁻⁷ m ² /s
Çözeltinin kütle yayılım katsayısı; D [96,97]	1,8x10 ⁻⁹ m ² /s
Zaman aralığı; Δt	1 saat
Konum aralığı; Δx	5 cm
Nümerik çözüm kararlılık kriteri; r_α	0,21168
Nümerik çözüm kararlılık kriteri; r_D	0,002592



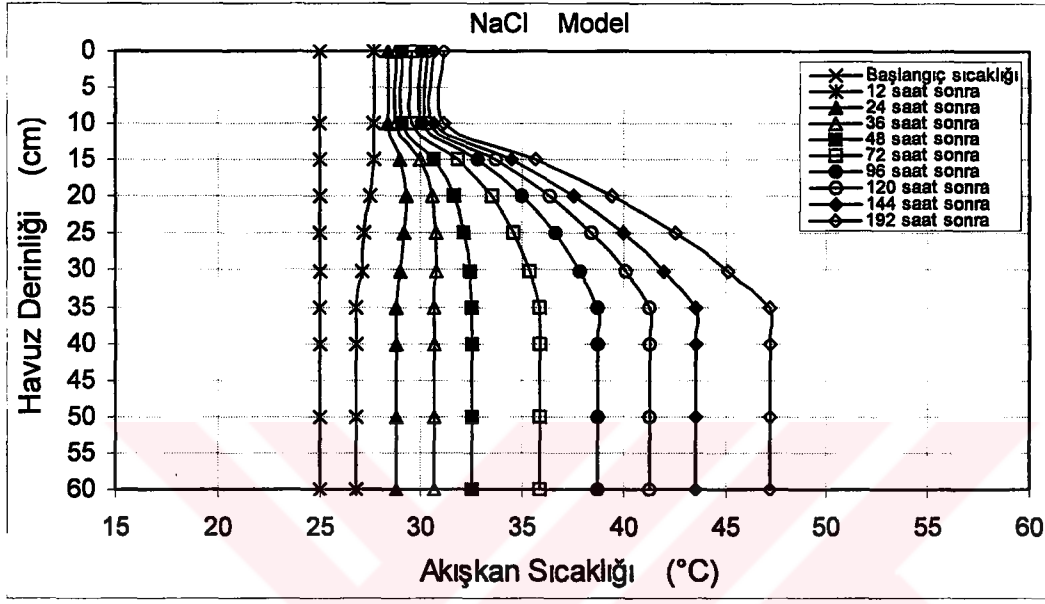
Şekil 6.33. NaCl çözeltili ikinci deneye göre yapılmış model havuz yoğunluk dağılımı

gerçekleşmediği Şekil 6.33 ve Şekil 6.35'de verilen model yoğunluk dağılımlarında açık bir şekilde görülmektedir. Sıcaklık dağılımlarında ise, havuzun ışıma maruz kaldığı birinci gün, derinlikle azalan bir sıcaklık gradyeni oluşurken, derinlikle artan sıcaklık gradyeni 2. günden itibaren oluşmaya başlamıştır. Şekil 6.34 ve 6.36'da, NaCl ve soda çözeltili model sıcaklık dağılımlarının birbirine benzer temayül içinde zamanla arttığı görülmektedir.

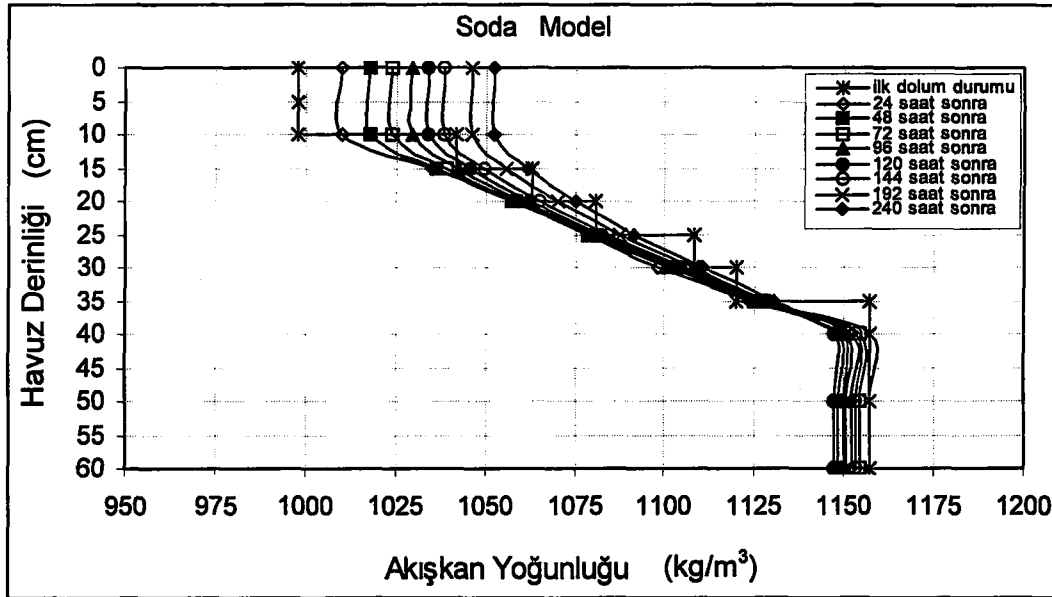
Modelden elde edilen sonuçların, literatürdeki çalışmalarla uyum içinde olup olmadığını gösterebilmek için benzer çalışmalarla karşılaştırılması gerekmektedir. Literatürde, model havuzun özelliklerine her yönüyle benzer bir çalışma bulunamamış olması nedeniyle, farklı boyutlarda ve şartlarda yapılmış olan model sonuçlarıyla karşılaştırma yapılmıştır. Yapılan modelden elde edilen sıcaklık ve yoğunluk profillerinin, Al-Jamal ve Khashan'ın [50] 2.6 m, Wang ve Yagoobi'nin [88] 3.15 m derinliğindeki NaCl çözeltili bir havuzdan, El-Refae ve Al-Marafie'nin [55] 3.1 m derinliğindeki bir havuzdan elde ettikleri sıcaklık profili ile, Subhaker ve Murthy'nin [35] $MgCl_2$ çözeltili 1.5 m, Alagao'nun [54] 2.5 m derinliğindeki bir havuzdan elde ettikleri sıcaklık ve yoğunluk profilleriyle nitelik bakımından uyum içinde olduğu görülmüştür.

Modellerin çok farklı olması nedeniyle nicelik olarak yapılacak karşılaştırmanın yanlış olacağı düşünülerek, karşılaştırmalar sadece nitelik bakımından yapılmıştır. Havuz

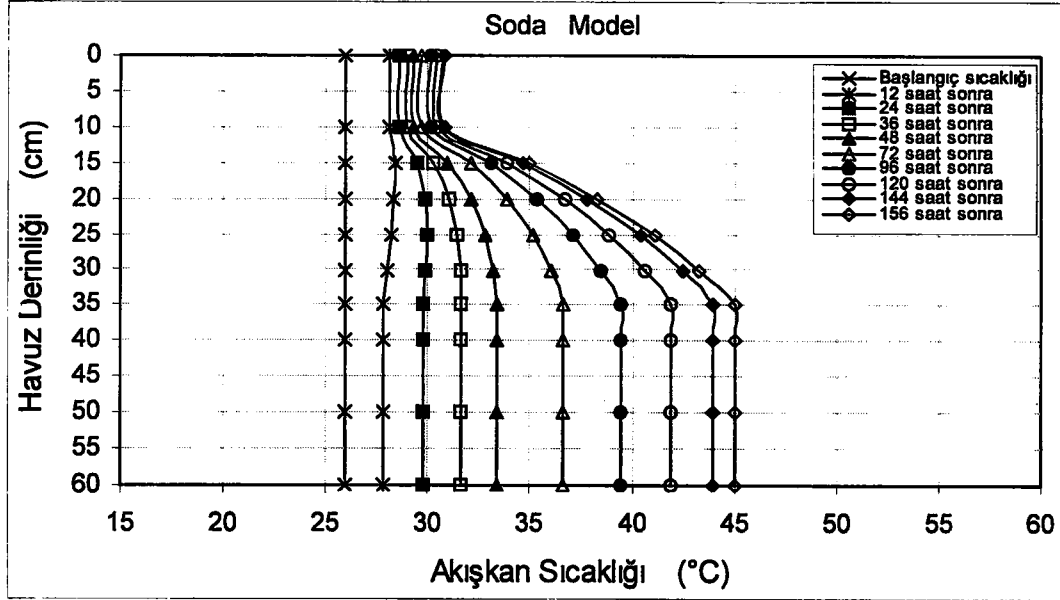
boyutlarının ve yapılan modellerin birbirlerinden farklı olmasına rağmen, elde edilen sonuçların TTGH sıcaklık ve yoğunluk profiliyle nitelik bakımından uyum içinde olması, yapılan modelin geçerliliğinin bir göstergesi olmaktadır.



Şekil 6.34. NaCl çözeltili ikinci deneye göre yapılmış model havuz sıcaklık dağılımı



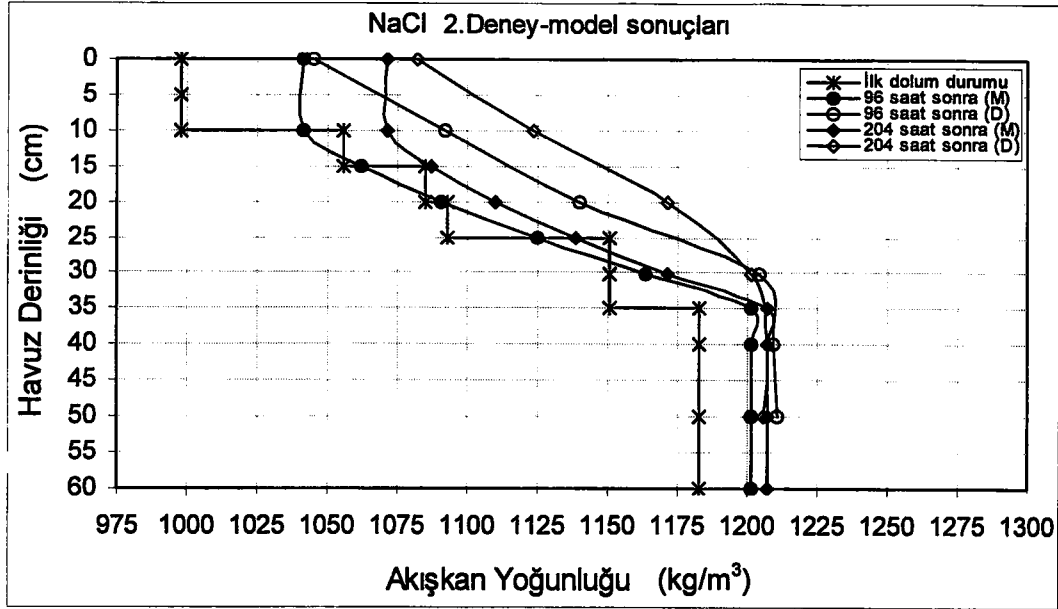
Şekil 6.35. Soda çözeltili dördüncü deneye göre yapılmış model havuz yoğunluk dağılımı



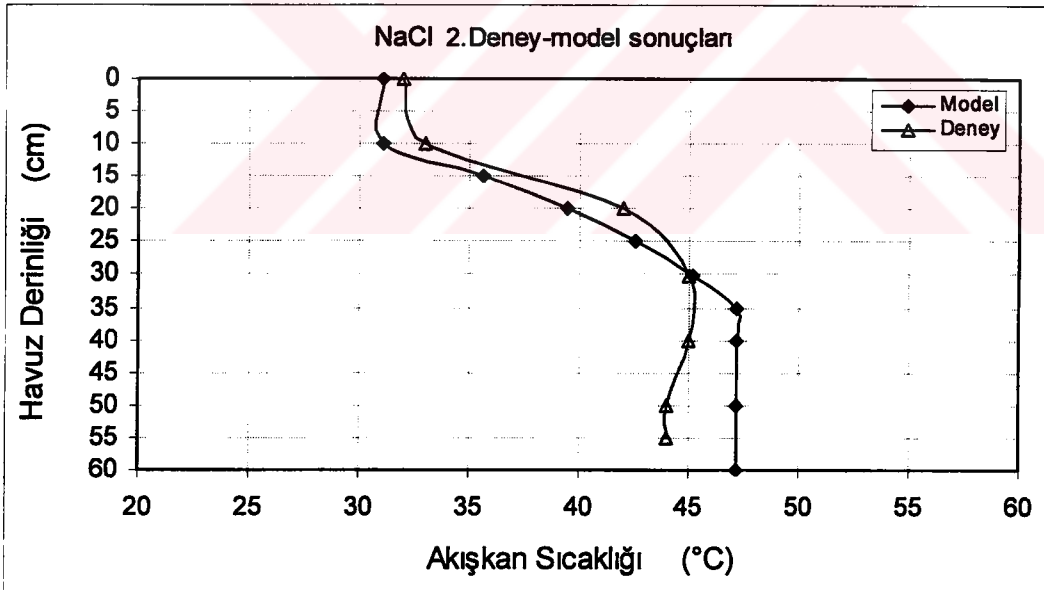
Şekil.6.36. Soda çözeltili dördüncü deneye göre yapılmış model havuz sıcaklık dağılımı

6.4. Deney-Model Sonuçlarının Karşılaştırılması

Deneylerde ölçülen havuz sıcaklık ve yoğunluk dağılımlarının, deneysel çalışmaya dayalı olarak çözümü yapılan model sonuçlarıyla karşılaştırılarak elde edilen sonuçların uyumlu olup olmadıkları incelenmiştir. Şekil 6.37 ve Şekil 6.38’de, NaCl çözeltili ikinci deney-model sonuçlarının karşılaştırması görülmektedir. Havuzun ilk dolun durumu göz önüne alındığında, model sonuçlarının deney sonuçlarına göre daha uyumlu olduğu görülür. Deney sonuçlarıyla model sonuçları deneyin ilk safhalarında birbirine daha yakın değerler olurken, deneyin sonlarına doğru aradaki fark ilk safhalardaki değere oranla artmıştır. Model sonuçlarında tabaka kalınlıkları sabit kalırken, deney sonuçlarında taşınımlı bölge’lerin TZB’ye doğru büyümüş olduğu, dolayısıyla TZB bölgesinin küçülmüş olduğu görülmektedir. NaCl çözeltili deney-model sonuçları arasındaki nicelik uyumsuzluğa, havuz doldurulmaya başlamadan önce havuz tabanına konan tuzun ve havuz doldurulduktan sonra çözelti içerisinde meydana gelen tuz kristalizasyonu nedeniyle havuz tabanında biriken tuzun neden olduğu sanılmaktadır. Modelin çözümünde, yoğunluk gradyeni üzerinde etkili olan bu tuz miktarları dikkate alınmamıştır.

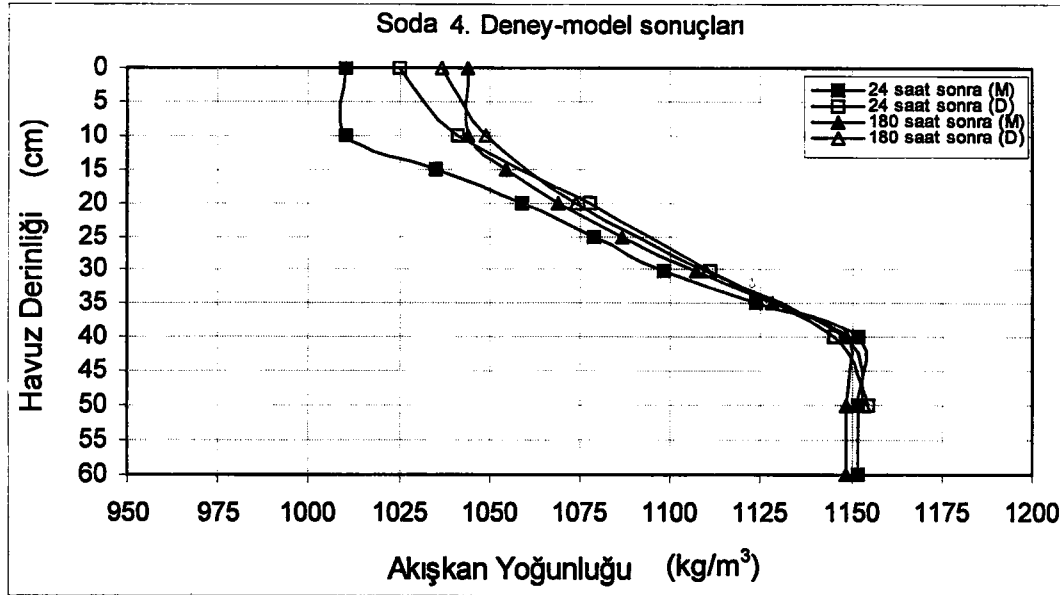


Şekil 6.37. NaCl çözeltili ikinci deney-model havuz yoğunluk dağılım sonuçlarının karşılaştırılması



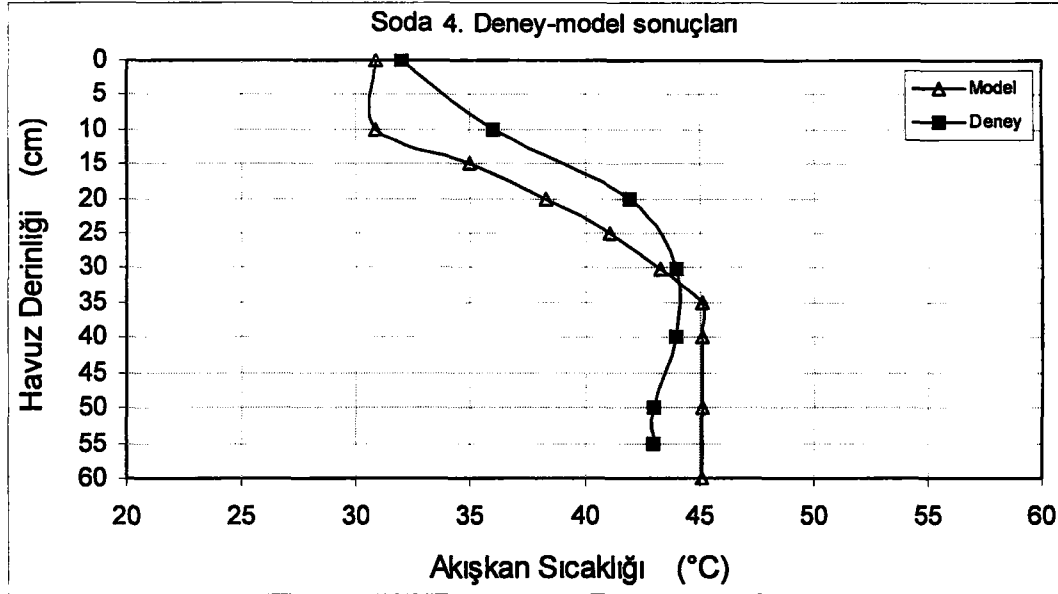
Şekil 6.38. NaCl çözeltili ikinci deney-model havuz sıcaklık dağılım sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 6.39'da, soda çözeltili dördüncü deney-model yoğunluk profilleri görülmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi, soda çözeltili deney-model yoğunluk profilleri, NaCl çözeltili deney-model yoğunluk profilleriyle karşılaştırıldığında, nitelik bakımından



Şekil 6.39. Soda çözeltili dördüncü deney-model havuz yoğunluk dağılım sonuçlarının karşılaştırılması

birbirleriyle daha uyumlu olduğu gibi nicelik bakımından da oldukça uyumlu gözükmemektedirler. Soda çözeltili deney-model yoğunluk değerleri arasında, deneyin başlarında küçük bir fark olmasına rağmen, deneyin sonlarına doğru bu fark önemsenmeyecek kadar küçük bir değer olmaktadır. Soda çözeltili deney-model yoğunluk profillerine göre NaCl çözeltili deney-model yoğunluk profillerinin birbirleriyle uyumsuz olması, yukarıda da bahsedildiği gibi NaCl çözeltili deneylerde havuz tabanına konan ve havuz içerisinde meydana gelen tuz kristalizasyonu nedeniyle tabanda biriken tuzun eriyerek tuz yoğunluk gradyenine ek bir katkı sağlamasından kaynaklanmaktadır. Havuz tabanındaki tuz zamanla eriyerek, ATB bölgesi içerisindeki çözeltinin doymuş hale gelmesini sağlar. Doymuş çözeltiden, doymamış çözeltiye doğru meydana gelen tuz difüzyonu nedeniyle, yoğunluk gradyeninin TZB'nin alt tabakalarındaki kısmında hesap edilemeyen genişleme olmaktadır. Havuz tabanına konan ve tuz kristalizasyonu nedeniyle tabanda biriken tuz miktarı dikkate alınsa bile, yoğunluk gradyenine katkısını belirlemek zor olacağından modelin çözümünde dikkate alınması mümkün gözükmemektedir. Bu değerler dikkate alındığında ise, gradyene katkısı tahmini olarak belirlenebilecek, net bir sonuç elde edilemeyecektir. Sadece, deney-model sonuçlar arasındaki fark azalarak, profillerin biraz daha uyumlu hale gelmesini sağlar.



Şekil 6.40. Soda çözeltili dördüncü deney-model havuz sıcaklık dağılım sonuçlarının karşılaştırılması

NaCl çözeltili havuzda gerçekleşen bu olay, soda çözeltili havuzda gerçekleşmemesi nedeniyle soda çözeltili deney-model yoğunluk profilleri birbirleriyle daha uyumlu olmaktadır. Sodanın yüksek konsantrasyonlarda su içerisinde zor erimesi, havuz tabanına konan sodanın eriyerek havuz tabanındaki çözeltiyi doymuş hale getirmesini engellemektedir. Ayrıca soda çözeltisi içerisinde, sodanın kimyasal yapısı gereği tuz kristalizasyonu olmaması, deney-model yoğunluk profillerinin birbirleriyle uyumlu olmasını sağlamaktadır.

NaCl çözeltili ikinci deney-model sıcaklık profilleri için yapılan karşılaştırma, Şekil 6.38'de verilmiştir. Modelden elde edilen depolama sıcaklığı, deneyde ölçülen depolama sıcaklığından daha büyük olurken, TZB ve ÜTB bölgelerinde ölçülen sıcaklık değerleri modelden elde edilen sıcaklık değerlerinden daha büyük olmuştur. Bu durum, daha öncede bahsedildiği gibi, deneylerde enerji kaynağı olarak kullanılan lamba ışınımı spektrumundan kaynaklanmaktadır. Lamba ışınımı, güneş ışınımına göre daha çok uzun dalga boylu (kızılötesi) ve daha az kısa dalga boylu ışınımına sahiptir. Kızılötesi ışınım yüzeye yakın tabakalarda soğurulduğundan, yüzeye yakın tabakaların sıcaklığı artmaktadır. Havuz tabanına kadar ulaşip soğurulacak olan kısa dalga boylu ışınımın az olması, depolama sıcaklığının daha düşük olmasına neden olmaktadır. Lamba ışınımının bu özeliğinden

dolayı deney ile model sonuçları arasında bir farklılık olmuştur. Havuz sıcaklık dağılımının belirlenmesinde, havuz yüzeyine gelen ışıının spektrum dağılımının bilinmesi önemli bir parametre olmaktadır. Deney-model sıcaklık dağılımları arasındaki bu fark, modelde kullanılan lamba spektrumu dağılımının literatüre göre seçilmiş tahmini değerler olmasından kaynaklanmıştır.

Aynı durum, soda çözelti dördüncü deney-model sıcaklık profillerinin karşılaştırıldığı Şekil 6.40'da görülmektedir. Soda çözelti deney-model sıcaklık profillerinin arasındaki fark, yüzeye yakın tabakalarda NaCl çözelti deney-model sıcaklık profilleri arasındaki farktan biraz daha büyük olmuş, depolama bölgesinde ise, NaCl çözelti deney-model sıcaklık profillerine göre daha küçük olmuştur.

Lamba ışıınınına göre, güneş ışıını daha çok kısa dalga boylu ışıına sahip olduğundan daha derinlere ilerleyebilecek, doğal havuzlarda aynı ışıın akısında yüzeyde daha az tabanda ise daha çok ışıın soğurulacaktır. Dolayısıyla doğal havuzlardan elde edilecek depolama sıcaklığı ve taban ile yüzey arasındaki sıcaklık farkı daha büyük olacaktır.

6.5. Deneyisel Sonuçların Hata Analizi

6.5.1. Deneyisel Hata Tipleri ve Nedenleri

Deneyisel bir çalışmadan elde edilen sonuçların geçerliliğinin gösterilmesi, yapılan deneylerden elde edilen sonuçların güvenilirliğini artırır. Bu nedenle, deneylerden elde edilen sonuçların belirli bir şekilde analiz edilmesi gerekir. Bu analizler bazen çok kolay olmasına rağmen, bazen de sonuçların temel fizik kurallarına uymasını sağlayabilmek için çok karmaşık olabilmektedir. Deneylerde yapılan ölçümlerin hassasiyeti incelenerek, ölçümlerde yapılan ve yapılabilecek hatalar analiz edilebilir.

Deneylerde, ölçümler tecrübeli bir kişi tarafından titiz ve dikkatli bir şekilde yapılmasına rağmen, çoğu zaman deney sonuçlarında bazı hatalar görülebilmektedir. Bu hataların bazıları rasgele karakterde olurken, bazıları da deneyi yapan kişinin dikkatsizliği nedeni ile ortaya çıkan ve çoğunlukla normal dağılımdan aşırı farklılıklar gösteren karakterde olabilir [109].

Genel olarak deneysel hatalar üç grupta toplanabilir. Bunlardan en önemlisi dikkatsizlik ve tecrübesizlikten kaynaklanan hatalardır. İkinci grup hatalar, sabit veya sistematik olarak adlandırılan hatalar olup, genel olarak tekrar edilen okumalarda görülen ve nedenleri çoğunlukla bilinmeyen hatalardır. Üçüncü grup hatalar ise, rasgele hatalar olup, deneyi yapan kişinin değişmesinden, dikkatlerinin zamanla azalmasından, elektrik geriliminin değişmesinden, cihazların ısınmasıyla ortaya çıkan elektronik ölçme aletlerindeki salınımlardan veya ölçme aletlerindeki histerizis olaylarından kaynaklanan hatalardır [109].

Pratikte özellikle sistematik hataların tespiti için bazı teorik modeller geliştirilmiştir. Belirli sayıda deney yapıldıktan sonra bu deneye ait hata oranları, geliştirilen hata analiz modelleriyle tespit edilebilir. Bunlardan en çok kullanılan bir tanesi akılcı yaklaşım (commensense basis), diğeri ise belirsizlik analizi (uncertainty analysis) yöntemleridir. Akılcı yaklaşım yönteminde, ölçme sisteminde bulunan bütün aletlerin aynı anda maksimum hatayı yaptığı kabul edilir. Belirsizlik analizinde ise, sistemde ölçülmesi gereken büyüklük ve bu büyüklüğe etki eden bağımsız değişkenlerin neden olduğu hatalar ayrı ayrı belirlenmek suretiyle hata analizi yapılmaktadır. Bu analizin en belirgin özeliği, en büyük hataya neden olan değişkenin hemen tespit edilebilmesidir. En büyük hataya neden olan değişken yanında diğeri değişkenler ihmal edilerek, inceleme bu hatayı yapan cihaz üzerine yoğunlaştırılmak suretiyle hata oranı azaltılabilir [109].

6.5.2. Sıcaklık Ölçümü Hata Analizi

Deneylerde havuzun sıcaklık dağılımı, K tipi (Khromel-Alumel) termoelemanlar kullanılarak ölçülmüştür. Sıcaklık değerleri, direkt olarak °C cinsinden ölçüm yapabilen dijital multimetreye okunmuştur. Multimetre, -20 ile 1000 °C aralığında ölçüm aralığına sahip olup, 0-400 °C aralığındaki hassasiyeti ± 1 °C'dir. Ölçüme başlamadan önce termoelemanlar, 0 °C buz banyosunda kalibre edilerek doğru ölçüm yapıp yapmadıkları tek tek kontrol edilmiştir.

Sıcaklık ölçümlerinde yapılan hataların analizinde, akılcı yaklaşım yöntemi kullanılmıştır. Deneylerde, 20 ile 50 °C arasında değişen sıcaklık değerleri ölçülmüş olup, 20 ± 1 °C ve 50 ± 1 °C değerlerindeki maksimum ve minimum hatalar bulunmuştur. Buna göre, 20 °C'de yapılan hata ± 0.2 °C, multimetreden hatalı olarak okunabilecek maksimum sıcaklık

değeri 20.2 °C, minimum sıcaklık değeri ise 19.8 °C olacaktır. Yine aynı şekilde, 50 °C'de yapılan hata ise ± 0.5 °C, multimetreden hatalı olarak okunabilecek maksimum sıcaklık değeri 50.5 °C, minimum sıcaklık değeri 49.5 °C olacaktır. Akılcı yaklaşım yönteminin kullanılmasıyla sıcaklık ölçümlerinde yapılan hata oranı % 1 olarak bulunmuştur.

Havuzun sıcaklık dağılımında, sıcaklık ölçümlerinde yapılan hatalar yanında havuzdan meydana gelen ısı kayıpları ve enerji kaynağı olarak kullanılan lambaların ışınım spektrumunun tam olarak bilinmemesi daha etkili olmaktadır. Havuz yanlarından ve zemininden iyi bir şekilde yalıtıldığından dolayı yanlardan ve zeminden olan ısı kayıpları ihmal edilmiştir. Gerçekte azda olsa bir ısı kaybı vardır. Aynı şekilde lamba spektrumunun bilinmesi havuz sıcaklık dağılımının belirlenmesinde önemli bir parametredir. Havuz yüzeyine gelen ışınımın kızılötesi kısmı havuzun yüzeyinde ince bir tabaka tarafından, kalan ışınım ise havuz derinliklerine doğru ilerleyerek geçtiği yol boyunca soğurulacaktır. Yüzeyde ve tabana kadar ulaşarak soğurulacak olan ışınım miktarları bilindiği takdirde, deneylerden elde edilen sıcaklık dağılımı ile teorik olarak elde edilen sıcaklık dağılımları birbirlerine nitelik ve nicelik bakımından benzer olacaktır. Yapılan deneylerde bu parametreler dikkate alınmadığından dolayı, teorik ve deneysel sıcaklık dağılımları arasında farklılıklar olmuştur.

6.5.3. Yoğunluk Ölçümü Hata Analizi

Havuz içerisinde derinlikle artan yoğunluk, hacmi bilinen bir kap ile kütlenin ölçülmesiyle, hacmi ve kütlesi bilinen bir maddenin yoğunluğunun hesaplanması prensibine göre yapılmıştır. Hacmi bilinen kap olarak 10 ± 0.2 ml'lik piknometre, kütlenin ölçülmesinde ise, 0-310 gr arasında ölçüm yapabilen $1 \text{ gr} \pm 0.03 \text{ mgr}$ – $50 \text{ gr} \pm 0.1 \text{ mgr}$ hassasiyete sahip hassas dijital bir terazi kullanılmıştır. Yoğunluk ölçümünde yapılan hatalar belirsizlik analizi kullanılarak belirlenmiştir. Yoğunluk,

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (6.1)$$

eşitliğinden hesaplanmış olduğundan, belirsizlik analizine göre sistemde ölçülmesi gereken büyüklük yoğunluk, bu büyüklüğe etki eden değişkenler ise kütle ve hacim parametreleri

olmaktadır. Bu nedenle, yoğunluğun belirlenmesinde yapılan hatalar kütlenin ve hacmin ölçülmesinde yapılan hatalardan kaynaklanmaktadır. Buna göre hata oranı,

$$\frac{w_p}{\rho} = \left[\left(\frac{w_m}{m} \right)^2 + \left(\frac{w_v}{V} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6.2)$$

eşitliğiyle yazılarak, 50 gr $\pm$ 0.1 mgr hassasiyete sahip terazide 10 $\pm$ 0.2 ml'lik piknometre ile 50 gr'lık kütlenin ölçülmesinde yapılabilecek hata oranı,

$$\frac{w_p}{\rho} = \left[\left(\frac{0,0001}{50} \right)^2 + \left(\frac{0,2}{10} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6.3)$$

$$\frac{w_p}{\rho} = \% 2 \quad (6.4)$$

şeklinde % 2 olarak bulunmuştur. Yoğunluk ölçümündeki hata analizi, akılcı yaklaşım yöntemiyle de yapılmış, yaklaşık aynı hata oranı bulunmuştur. Hata analizinde, (6.4) eşitliğinden de görülebileceği gibi, yoğunluğun hesaplanmasında en büyük hataya, piknometre ile ölçülen hacim neden olmaktadır. Havuz içerisindeki yoğunluk dağılımı % 2 hata ile belirlenirken, yoğunluğa etki eden çözeltinin sıcaklığı ve tuz konsantrasyonu dikkate alınmamıştır. Bu nedenle, havuz içerisindeki yoğunluk dağılımının belirlenmesindeki gerçek hata oranı, ölçüm hatasına ilave olarak, yoğunluğun sıcaklık ve tuz konsantrasyonuna bağlı olarak değişiminden kaynaklanan farkın da dikkate alınmasıyla ortaya çıkacaktır.

6.5.4. Işınım Ölçümü Hata Analizi

Havuz yüzeyine gelen ışınlam şiddeti, dijital bir elektronik cihaza bağlı, 0-1500 $\pm$ % 1.5 W/m² aralığında ölçüm yapabilen bir pironometre ile ölçülmüştür. Sıcaklık ölçümünde olduğu gibi, ışınlam ölçümünde de yapılan hataların analizi akılcı yaklaşım yöntemiyle yapılmıştır. Simülatör, havuz yüzeyine gelen ışınlam şiddeti 750 W/m² olacak şekilde ayarlandığından, hata analizi 750 W/m² ışınlam değerinde yapılarak, ölçümlerde

yapılabilecek maksimum ve minimum hata oranları bulunmuştur. Buna göre, $750 \pm \%1.5$ W/m^2 ısıtım değerinde yapılabilecek hata değeri $\pm 11.25 W/m^2$ olup, cihazdan okunabilecek minimum ısıtım değeri $738.75 W/m^2$, maksimum ısıtım değeri $761.25 W/m^2$ olacaktır. Yapılan analiz sonucunda, ısıtım ölçümlerinde, cihazın neden olduğu hata oranı $\% 1.5$ olarak bulunmuştur.

6.6. NaCl ve Soda Tuzlarının Maliyet Analizi

TTGH uygulamasının en temel gereksinimlerinden birisi olan tuz, havuz maliyetini arttıran bir gereksinim olup, havuzun ilk yatırım maliyetinin $\% 15-20$ dolayındaki miktarını oluşturmaktadır. Havuzun çalışması esnasında sisteme periyodik olarak belirli miktarda tuz ilave edilmesi nedeniyle, tuz sistem için bir nevi yakıt olarak düşünülebilir [2,7]. TTGH'ların fiziki yapısına uygun olmak koşuluyla; kolay elde edilebilir, maliyeti düşük tuzlar kullanılması, TTGH'ların ekonomikliğini arttırmaktadır. Tuz, sistemin ekonomikliğı açısından önemli bir parametre olması nedeniyle, uygulamada dikkat edilmesi gereken en önemli faktörlerden birisi de tuz seçimi olmaktadır. Bu nedenle, TTGH'lar genellikle tuz kaynaklarına yakın bölgelere kurulduklarında, elde edilen kullanılabilir enerji miktarına göre oldukça düşük maliyetli bir sistem olmaktadır.

TTGH'larda tuz yoğunluk gradyeninin oluşturulmasında ilk defa kullanılan sodanın ekonomik yönden uygun bir tuz olup olmadığını belirleyebilmek için aynı şartlarda yapılan deneylerde kullanılan NaCl tuzu ile bir karşılaştırma yapılmıştır. Böylece, sodanın TTGH'larda kullanılan en genel tuz olan NaCl tuzu ile karşılaştırılarak, ekonomik açıdan NaCl'ye göre sistemin maliyetine etkisi belirlenmiş olacaktır. Bu amaç doğrultusunda, deney sonuçlarının değerlendirmesinde olduğu gibi maliyet analizinde de, NaCl ile yapılan ikinci ve soda ile yapılan dördüncü deneyler göz önüne alınmıştır.

NaCl çözeltili ikinci deneyde, başlangıçta taban ile yüzey arasında $\% 21$ büyüklüğünde tuzluluk oranına sahip bir tuz yoğunluk gradyeni oluşturulmuştur. Havuz, dokuz gün periyodik ısıtıma maruz bırakılması sonucunda, taban ile yüzey arasında $13 ^\circ C$ 'lik sıcaklık farkı elde edilmiştir. Soda çözeltili dördüncü deneyde ise, başlangıçta $\% 16$ büyüklüğünde bir tuzluluk gradyeni oluşturulmuş, yedi günlük periyodik ısıtımdan sonra havuzdan $12 ^\circ C$ 'lik sıcaklık farkı elde edilmiştir. Yoğunluk gradyenlerinin büyüklükleri farklı olmasına rağmen, taban ile yüzey arasında elde edilen sıcaklık farkı yaklaşık aynı olmuştur.

NaCl çözeltisi ikinci deneyde, her bir tabakayı oluşturan çözeltinin tuzluluk oranları ve yoğunlukları belirlenmiş olduğundan, her bir tabakanın tuz konsantrasyonları hesaplanarak, havuza doldurulan çözeltinin oluşturulmasında kullanılan toplam tuz miktarı bulunmuştur. Tablo 6.2’de hesaplamalardan elde edilen değerler görülmektedir. Soda çözeltisi dördüncü deneyde kullanılan toplam soda miktarı yine aynı şekilde hesaplanmış, elde edilen değerler Tablo 6.3’de verilmiştir. Havuza doldurulan çözelti için gerekli olan tuz miktarının yanında, sistemin işleyişi sırasında, havuz tabanına eklenen çözelti için gerekli olan tuz miktarının da hesaplanması gerekir. NaCl çözeltisi deneyde, havuz tabanına dokuz günlük deney süresinde her gün 1 litre olmak üzere % 23 oranında tuzluluğa sahip yüksek konsantrasyonlu çözelti eklenmiştir. Soda çözeltisi deneyde ise, yine aynı şekilde yedi gün boyunca 1 litre olmak üzere % 16 oranında tuzluluğa sahip çözelti eklenmiştir. Tabloların en alt satırında, yapılan hesaplamalar sonucunda havuza eklenen çözelti için gerekli olan tuz miktarları görülmektedir.

Aynı şartlarda NaCl ve soda tuzlarıyla yapılan deneylerde, taban ile yüzey arasında yaklaşık aynı sıcaklık farkı elde edilmiş olmasına rağmen, tuz yoğunluk gradyenini oluşturmak için NaCl çözeltisi havuzda yaklaşık 32 kg tuz kullanılırken, soda çözeltisi havuzda 20 kg soda kullanılmıştır. Yaklaşık aynı sıcaklık değerlerinin elde edildiği havuzlarda, gradyenin oluşturulmasında NaCl tuzu miktarının üçte birine kadar daha az soda tuzu gerekli olurken, sodanın birim fiyatının NaCl tuzuna göre 2.5 kat daha fazla olması nedeniyle, sodanın havuzun maliyetine etkisi NaCl tuzuna göre 1.5 kat daha fazla olmaktadır. Her iki tuz için yapılan maliyet hesabı, Tablo 6.4’de verilmiştir.

Sodanın NaCl tuzuna göre, havuz maliyetine etkisinin 1.5 kat daha fazla olması dezavantajı yanında, deney sonuçlarına göre havuzda kararlı bir tuz yoğunluk gradyeninin oluşturulmasında ve korunmasında, sodanın NaCl tuzuna göre daha kararlı olmuştur. Bunun yanında, kimyasal yapısı gereği NaCl çözeltisi havuzda yoğunluk gradyeninin kararlılığını ve havuzun performansını negatif yönde etkileyen tuz kristalizasyonu meydana gelirken, sodanın kimyasal yapısı gereği soda çözeltisi havuzda tuz kristalizasyonu gerçekleşmemektedir. Soda çözeltisi havuzun, NaCl çözeltisi havuza göre daha berrak bir yapıya sahip olması nedeniyle NaCl çözeltisi havuzdan dokuz gün sonunda elde edilen sıcaklık farkı, soda çözeltisi havuzdan yedinci gün sonunda elde edilmiştir. Aradaki bu zaman farkı, çözeltinin ışıınımı geçirme özelliğinden ve dolayısıyla çözeltinin berraklığından kaynaklanmaktadır.

Tablo 6.2. NaCl-su çözeltili dördüncü deneyde her bir tabaka için kullanılan tuz miktarı

	Tabaka Sayısı	Tabaka Kalınlığı (cm)	Tabaka Hacmi (m ³)	Tuzluluk Oranı (%)	Yoğunluğu (kg/m ³)	Tuz Konsantrasyonu (kg/m ³)	Tuz Miktarı (kg)
TZB	I.	5	0,015	8	1055,8	84,464	1,267
	II.	5	0,015	11	1085	119,35	1,79
	III.	5	0,015	14	1092,8	152,99	2,295
	IV.	5	0,015	18	1150,6	207,108	3,1066
	V.	5	0,015	18	1150,6	207,108	3,1066
ATB		25	0,075	21	1183,2	248,43	18,632
Havuzda eklenen çözelti			0,009	23	1192,7	274,321	2,47
Toplam NaCl Miktarı							32,197

Tablo 6.3. Soda-su çözeltili dördüncü deneyde her bir tabaka için kullanılan soda miktarı

	Tabaka Sayısı	Tabaka Kalınlığı (cm)	Tabaka Hacmi (m ³)	Tuzluluk Oranı (%)	Yoğunluğu (kg/m ³)	Tuz Konsantrasyonu (kg/m ³)	Tuz Miktarı (kg)
TZB	I.	5	0,015	3	1042	31,26	0,469
	II.	5	0,015	5	1063	53,15	0,797
	III.	5	0,015	8	1081	86,48	1,297
	IV.	5	0,015	10	1108	110,8	1,66
	V.	5	0,015	12	1120	134,4	2,02
ATB		25	0,075	16	1157	185,12	13,88
Havuzda eklenen çözelti			0,007	16	1157	185,12	1,3
Toplam Soda Miktarı							20,123

Tablo 6.4. NaCl ve Soda tuzlarının maliyet hesapları

Tuz Çeşidi	Tuz Miktarı (kg)	Birim Fiyatı (TL)	Toplam Maliyeti (TL)
NaCl	32,197	250.000	8.049.250
Soda	20,123	650.000	13.079.950

Sodanın NaCl'ye göre bir diğer dezavantajı, sodanın kimyasal yapısı gereği kireç çözücü bir özelliğe sahip olmasıdır. Bu nedenle, havuzun çalışması esnasında yüzeyden buharlaşma ile olan su kaybını karşılamak için havuza eklenen suyun filtre edilmiş olması gerekir. Aksi takdirde, havuz içerisindeki soda, su içerisindeki kireci çözerek, havuzun berraklığını bozan bir bulanıklığa neden olacaktır.

Sonuç olarak, NaCl tuzuna göre havuzun maliyetine etkisi 1.5 kat daha fazla olan sodanın TTGH’larda kullanılmasının dezavantajları yanında avantajları daha çok gözükmemektedir. NaCl tuzuna göre, sodanın maliyetten başka önemli bir dezavantajı yoktur. Bu nedenle, soda TTGH’larda tuz yoğunluk gradyeninin oluşturulmasında kullanılabilecek yeni bir tuz çeşidi olabilir. Soda çözeltili TTGH’ın soda kaynaklarına yakın bölgelerde kurulması halinde, havuz performansı açısından NaCl çözeltili havuza göre daha iyi bir performansa sahip olacak durumda gözükmemektedir.

6.7. Deneylerde Oluşturulan Tuz Yoğunluk Gradyenlerinin Kararlılık Analizi

TTGH’ların etkili bir şekilde çalışabilmesi, yalıtıcı görevi yapan TZB içerisinde molekülse düşey bir harekete mani olunmasına, dolayısıyla bölgenin kararlılığına bağlıdır. Kararlı bir ortamın sıcaklık, yoğunluk gibi fiziksel özelliklerinde meydana gelen sonsuz küçüklükteki ani değişiklikler ortamın kararlılığını bozabileceği gibi, tuzlu ortamlarda tuz ve ısı yayılım katsayıları arasındaki farkın büyük olması ortamda salınımlı bir kararsızlığa neden olabilmektedir [14,30,84].

Havuz tabanına kadar ulaşır soğurulan ısıtım, depolama bölgesi içerisindeki çözeltiyi ısıtmaya başlayacak, havuz tabanı yüzeyine göre daha sıcak olacaktır. Taban ile yüzey arasındaki bu sıcaklık farkı, havuz içerisinde derinlikle azalan bir yoğunluk gradyeninin oluşmasına neden olur. Böylece havuz içerisindeki çözelti, tabanda daha düşük yoğunluğa sahip olurken, yüzeyde tabana göre daha yoğun olacaktır. Sıcaklığın neden olduğu derinlikle azalan bu yoğunluk gradyeni, TTGH’larda yapay olarak oluşturulan ve derinlikle artan yoğunluk gradyeniyle dengelenir. Böylece, havuz tabanı ile yüzeyi arasındaki sıcaklık farkının belirli bir değerine kadar havuzun kararlılığı sağlanmış olacaktır. Havuz içerisinde, sıcaklık farkı değerine göre oluşan ve büyüklüğü bu farka göre değişen kaldırma kuvveti, yerçekimi ve sürtünme kuvvetlerini yendiği anda havuz içerisinde tabandan yüzeye doğru doğal bir sirkülasyon başlayacak ve havuzun kararlılığı bozulacaktır. Kararlılığın bozulmasına neden olan bu sıcaklık farkı, kritik kararlılık şartını oluşturan değerdir. Oluşan kararsız durum, havuz içerisinde statik kararlılık şartının sağlanmasını gerektirir.

Gradyen kararsızlığı, TTGH’ların sahip olduğu en önemli problemlerden birisi olması nedeniyle, bu konuda bir çok çalışma yapılmış, gradyenin kararlılık kriterleri belirlenmiştir.

Giestas ve arkadaşları[10], Sherman ve Imberger [14], Zangrando [30], Göktun [84], Narasuwa ve Suzukawa [110] bu konuda çalışma yapan araştırmacılardan bir kaçıdır.

TTGH'ların gradyen kararsızlığı aşağıda verilen ısı Rayleigh sayısı (Ra_T), tuzluluk Rayleigh sayısı (Ra_s), Prandtl sayısı (Pr) ve Lewis sayısının tersi (τ_s) olan dört boyutsuz parametre ile karakterize edilebilir [10,14,30,84].

$$Ra_T = \frac{g \beta_T \Delta T x^3}{\nu \alpha} \quad (6.5)$$

$$Ra_s = \frac{g \beta_s \Delta S x^3}{\nu \alpha} \quad (6.6)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (6.7)$$

$$\tau_s = (Le)^{-1} = \frac{D}{\alpha} \quad (6.8)$$

Denklemlerde, Ra_T ; ısı Rayleigh sayısını, Ra_s ; tuzluluk Rayleigh sayısını, Pr ; Prandtl sayısını, τ_s ; Lewis sayısının tersini, g ; yerçekimi ivmesini (m/s^2), β_T ; çözeltinin ısı genleşme katsayısını ($^{\circ}C^{-1}$), β_s ; çözeltinin kütle genleşme katsayısını ($\%^{-1}$), ΔT ; tabakalar arası sıcaklık farkını ($^{\circ}C$), ΔS ; tabakalar arası tuzluluk farkını (%), x ; tabaka kalınlığını (m), ν ; çözeltinin kinematik viskozitesini (m^2/s), α ; çözeltinin ısı yayılım katsayısını (m^2/s), D ; çözeltinin kütle yayılım katsayısını (m^2/s) göstermektedir.

Havuzun tabanı ile yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı sonucu oluşan doğal taşınım, havuzun statik olarak kararlı olmasına bağlıdır. Havuz içerisinde yoğunluğun derinlikle artması, havuzun statik olarak kararlı olduğunu göstermez. Kararlılığın sağlanabilmesi için derinlikle artan yoğunluğun büyüklüğü önemlidir. Statik kararlılık şartı, genellikle Rayleigh sayılarının oranıyla gösterilmekte olup,

$$R_p = \frac{Ra_s}{Ra_T} = \frac{\beta_s \Delta S}{\beta_T \Delta T} \geq 1 \quad (6.9)$$

eşitliğiyle ifade edilmektedir [10,14,30,84]. Eşitlikte R_p kararlılık sayısı olarak alınmıştır. Havuzun statik olarak kararlı olabilmesi için, yukarıdaki eşitliğin sağlanması gerekir. Tuz yoğunluk gradyeni kaldırma kuvvetine karşı direnç gösterirken, sıcaklık tuz yoğunluk gradyeninin direncini zayıflatır. Bu nedenle, kararsızlığın kaynağı olan sıcaklık dağılımına göre azalan yoğunluğun değerini karşılamak için, tuzluluk dağılımının sıcaklık dağılımına eşit veya büyük olması gerekir. Kararlılık sayısı olan R_p 'nın birden çok büyük olması durumunda, tuz yoğunluk gradyeni, sıcaklıkla oluşan ve kararsızlığa neden olan yoğunluk gradyenine göre bağlı olarak daha dirençli ve daha kuvvetli olacaktır. Böylece, havuz içerisinde kararsızlığa neden olan faktörlerin etkisi azalır [14,30].

Tuz yoğunluk gradyeni, statik kararlılık şartının sağlanmasıyla statik olarak kararlı hale gelmesine rağmen, havuz içerisinde küçük hareketlenmeler şeklinde başlayan ve zamanla büyüyerek devam eden bölgesel salınımlı hareketlere karşı bu kararlılık şartının sağlanması yeterli olmayabilir. Tabakalar arasındaki ısı kararsızlık sonucu oluşan salınımlı hareketler önlenemediği takdirde, zamanla büyüyerek TZB içerisinde hidrodinamik kararsızlıkların başlamasına ve bunun sonucunda tuz yoğunluk gradyeninin bozulmasına neden olan taşınım hareketlerinin oluşmasına öncülük edebilir. Bu nedenle, statik kararlılık şartı sıradan bir taşınım hareketini önlemek için yeterli olabilirken, zamanla artan salınımlı hareketleri önlemek için havuzun dinamik analizinin yapılması gerekmektedir [10,12,50,64].

Giestas ve arkadaşları[10], Sherman ve Imberger [14], Zangrando [30] ve Göktun [84]'nın lineer kararlılık teorisini kullanarak yapmış oldukları çalışma sonucunda, sıcaklık ve yoğunluk gradyenlerinin birlikte bulunduğu ortamlarda, bölgesel salınımlı hareketlerin neden olduğu kararsızlığa karşı gradyenin dinamik kararlılık şartını,

$$Ra_s \geq \frac{Pr+1}{Pr+\tau_s} Ra_T \quad (6.10)$$

$$R_p = \frac{Ra_s}{Ra_T} \geq \frac{Pr+1}{Pr+\tau_s} \quad (6.11)$$

eşitlikleriyle ifade etmişlerdir. TTGH'larda kullanılan çözeltiler için $Pr=7$, $\tau_s=0.01$ mertebesinde olup, bu değerler yukarıdaki eşitlikte yerine konulduğunda kararlılık kriteri,

$$Ra_s \geq 1,14 Ra_T \quad (6.12)$$

$$R_p \geq 1,14 \quad (6.13)$$

şeklinde olur [14,30]. Kararlılık sayısı R_p 'nın değeri, statik kararlılık şartında en az bire eşit veya birden büyük olması gerekirken, dinamik kararlılık şartına göre bu değer 1.14 olmaktadır. Dinamik kararlılık şartına göre, gradyen bölgenin kararlılığını sürdürebilmesi için tuz yoğunluk gradyeninin sıcaklık gradyeninden en az % 14 daha büyük olması gerekir. Buna göre, havuz içerisinde kararsızlığın başlayabilmesi için kritik kararlılık sayısı,

$$(R_p)_{kritik} = 1,14 \quad (6.14)$$

değerine eşit olmaktadır. Tuz yoğunluk gradyeninin dinamik olarak kararlı olabilmesi için,

$$R_p > (R_p)_{kritik} \quad (6.15)$$

şartının sağlanması gerekir. Eşitliğe göre, elde edilen kararlılık sayısının kritik kararlılık sayısından büyük olması durumunda kararlılık sağlanmış olacaktır. Bu şart sağlandığı takdirde, havuz içerisinde taşınım hareketi olmayacak, depolama bölgesinde toplanan ısıtım enerjisi, uzun dönem depolanabilecektir.

Dinamik kararlılık analizinde, kararlılık sayısı üçten küçük olduğu durumlarda dinamik kararlılık şartını sağlamasına rağmen, tuz yoğunluk gradyeninin kararlı olduğu kesin olarak söylenemez. Bu durumda, gradyen bazen kararlı olabilirken, bazen havuz içerisinde istenmeyen hareketlenmeler neticesinde kararsızlıklar görülebilmektedir. Kararlılık sayısının değeri üç ve üzerinde bir değer olduğu zaman, tuz yoğunluk gradyeninin kararlı olduğunu kesin olarak söylemek mümkün olabilmektedir. Havuzun verimli bir şekilde çalışabilmesi için dinamik kararlılık sayısının beş civarında olması istenir [14,30].

Bu çalışmada, taban ile yüzey arasında sıcaklık farkı elde edilen NaCl çözeltili birinci ve ikinci, soda çözeltili üçüncü ve dördüncü deneylerde, havuz içerisinde oluşturulan tuz yoğunluk gradyeninin kararlılık analizi yapılmıştır. Deneyler süresince havuzda oluşan yoğunluk gradyenlerine göre belirlenen ortalama tuzluluk farkları ve deney sonunda ölçülen sıcaklık farklarına göre yapılan kararlılık analizi ile ilgili hesaplama sonuçları Tablo 6.5'de verilmiştir. Hesaplamalarda, çözeltinin kinematik vizkositesinin, ısı yayılım katsayısının, ısı ve kütle genleşme katsayılarının ($\nu \cong 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $\alpha \cong 1.471 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, $\beta_T \cong 2 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, $\beta_S \cong 7 \times 10^{-3} \text{ \%}^{-1}$) ortalama değerleri kullanılmıştır.

Tablo 6.5. Deneylerde oluşturulan tuz yoğunluk gradyenlerinin kararlılık analiz değerleri

Deneyler	Sıcaklık Farkı ΔT ($^\circ\text{C}$)	Tuzluluk Farkı ΔS (%)	Ra_T	Ra_S	Statik Kararlılık $R_p = \frac{\beta_S \Delta S}{\beta_T \Delta T} \geq$	Dinamik Kararlılık $R_p > 1,14$
NaCl 1. Deney	11	13	$3,16 \times 10^{10}$	$1,63 \times 10^{11}$	41,36	5,18
NaCl 2. Deney	13	13	$3,73 \times 10^{10}$	$1,63 \times 10^{11}$	35	4,36
Soda 3. Deney	10	10	$2,88 \times 10^{10}$	$1,26 \times 10^{11}$	35	4,38
Soda 4. Deney	12	13	$3,45 \times 10^{10}$	$1,63 \times 10^{11}$	38	4,72

Tablodan da görülebileceği gibi, deneylerde oluşturulan tuz yoğunluk gradyenlerinin statik kararlılık analizinde, kararlılık sayısının birden çok büyük olduğu görülmektedir. Kararlılık sayısının birden çok büyük olması, oluşturulan tuz yoğunluk gradyenlerinin kararsızlığa neden olan faktörlere karşı çok daha dirençli olduğunu göstermektedir. Dinamik kararlılık sayısı ise, bütün deneylerde beş civarında olmuştur. Bu değer havuzun verimli bir şekilde çalışabilmesi için istenen değer olup, deneylerde oluşturulan tuz yoğunluk gradyenlerinin dinamik kararlılık şartını sağladıklarını göstermektedir.

Yukarıda yapılan kararlılık analizi, gradyen bölge içerisinde gerçekleşen kararsızlıklar için geçerli olup, gradyen bölgeyi oluşturan tabakaların ara yüzeylerinde meydana gelen ani sıcaklık ve tuzluluk farklarının neden olduğu kararsızlıklar için ayrı bir kararlılık analizinin yapılması gerekir. Farklı yoğunlukta tabakalardan oluşan TZB'nin alt ve üst yüzeyinde ani sıcaklık ve yoğunluk değişimi nedeniyle, çok ince tabakalar şeklinde başlayan salınımlı hareketler, TZB'nin alt ve üst yüzeyinden zamanla küçülmesine neden olan taşınımlı

hareketlerin başlamasına öncülük etmektedirler. Taşınımlı hareketlerin başlamasıyla birlikte havuz ısı depolama özeliğini kaybetmektedir. Bu nedenle, TZB'nin alt ve üst ara yüzeyleri için gerekli olan kararlılık analizi yapılarak, gradyenin kararlılığını sağlayacak kriterin çıkarılması gerekmektedir.

Isı ve kütle yayılımının birlikte olduğu sistemlerde meydana gelen taşınım, çift yayımlı taşınım (double-diffusive convection) olarak adlandırılır. Havuz içerisindeki çözeltinin ısı ve kütle yayılım katsayılarının çok küçük olması nedeniyle ısı ve kütle yayılımı çok küçük tabakalar içerisinde olmaktadır. Isı ve kütlenin yayılım hızı, tabakaların alt ve üst yüzeyi arasındaki sıcaklık ve tuzluluk oranlarına bağlı olarak değişmesi nedeniyle sıcaklık ve tuzluluk farkının çok büyük olduğu durumlarda tabaka içerisinde hücresel taşınım (cellular convection) şeklinde olur. Bu hücreler, heksagonal bir yapıya sahip olup, ilk defa Benard tarafından bulunması nedeniyle Benard hücreleri olarak bilinirler. Hücresel taşınımın olduğu hücrelerin tabaka kalınlığı 3-6 mm arasında değişen çok küçük hücrelerdir [110]. Tabaka sınırları arasındaki sıcaklık farkının artmasıyla, bu hücreler bozulur ve türbülanslı taşınıma geçiş başlar.

Tuz yoğunluk gradyeninin ara yüzeyleri için geçerli olan kararlılık kriteri, Zangrando [30] ve Turner [111] tarafından kritik Rayleigh sayısı ile karakterize edilmiştir. Buna göre, TTGH'ı oluşturan bölgeler Benard problemine benzetilerek, içerisinde derinlikle artan sıcaklık ve yoğunluk gradyenleri bulunan, iki yüzeyi de serbest cidar olan yatay bir akışkan tabakasında deneysel ve teorik olarak tespit edilmiş olan kritik Rayleigh sayısı,

$$Ra_k = \frac{27\pi^4}{4} \cong 657 \quad (6.16)$$

değerine eşit olmaktadır [30,111]. Hesaplanan Rayleigh sayısı, verilen kritik Rayleigh sayısından küçük olduğu durumda, ara yüzeyleri oluşturan sınırlarda taşınım olmayacak, tabakalar arası sadece iletim ile ısı geçişi olacaktır. Buna göre, TZB ara yüzeylerinin kararlı olabilmesi için

$$Ra_k > Ra \quad (6.17)$$

eşitliğinin sağlanması gerekir.

Tablo 6.6. TZB ara yüzey kararlılık analiz değerleri

Deneyler	Sıcaklık Farkı $\partial T/\partial x$ ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$)	Ra_T
NaCl 1. Deney	18,34	317
NaCl 2. Deney	21,67	374
Soda 3. Deney	16,67	288
Soda 4. Deney	20	345

Yapılan bu çalışmada, deneylerde oluşturulan tuz yoğunluk gradyenlerinin ara yüzey kararlılık analizi, sıcaklık farkının elde edildiği NaCl çözeltili birinci ve ikinci, soda çözeltili üçüncü ve dördüncü deneyler için yapılmış, elde edilen değerler Tablo 6.6'da verilmiştir. Hücre tabaka kalınlığı literatürde belirtilen maksimum değer olan 6 mm olarak alınmış, bu kalınlıktaki bir tabakada ΔT değerlerinin hesaplanması mümkün olmadığından, ΔT yerine bölgesel sıcaklık gradyeni olan $\partial T/\partial x$ değeri kullanılmıştır.

Hesaplama sonuçlarından da görülebileceği gibi, TZB ara yüzey kararlılık analizine göre hesaplanan Rayleigh sayısı, ara yüzey kararlılık şartı olarak verilen kritik Rayleigh sayısı değeri olan 657'den küçük olmuştur. Bu sonuca göre, yapılan çalışmada TZB ara yüzeyi hücresel taşınımına karşı kararlı olmaktadır. Deneylerde, havuz tabanı ile yüzeyi arasında elde edilen sıcaklık farkı, havuz içerisinde kararsızlıklara karşı dirençli bir tuz yoğunluk gradyeni oluşturulduğunun bir göstergesi olmaktadır

BÖLÜM 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, TTGH'ların tuz yoğunluk gradyenlerinin oluşturulmasında bu güne kadar kullanılmamış olan soda (sodyum karbonat- Na_2CO_3) tuzunun TTGH'larda denenerek, yoğunluk gradyeninin oluşturulması için uygun bir tuz olup olmadığı ve soda çözeltisi havuzun ısı depolama karakteristiği deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. TTGH'ların fizliğini incelemek ve ısı depolama karakteristiklerini gösterebilmek amacıyla, deneylere ilk olarak tatlı su dolu havuzun sıcaklık ve yoğunluk dağılımlarının gözlemlenmesiyle başlanmıştır. Daha sonra, ilk defa soda tuzu kullanılarak oluşturulan tuz yoğunluk gradyenli havuzun ısı ve kütle davranışını karşılaştırabilmek için TTGH'larda kullanılan en genel tuz çeşidi olan NaCl çözeltisiyle iki farklı deney yapılmıştır. Havuz tabanı ile yüzeyi arasında birinci deneyde başlangıçta % 23, ikinci deneyde ise % 21 büyüklüğünde tuzluluk oranına sahip yoğunluk gradyeni oluşturulmuş, birinci deneyde havuz tabanı ile yüzeyi arasında yaklaşık 11 °C sıcaklık farkı elde edilirken, ikinci deneyden 13 °C sıcaklık farkı elde edilmiştir. NaCl çözeltisi deneylerden elde edilen sıcaklık ve yoğunluk profilleri, tatlı su bir ortamın sıcaklık ve yoğunluk profilleriyle karşılaştırıldığında, TTGH'ların ısı depolama karakteristikleri açık bir şekilde görülmektedir.

Tatlı su ve NaCl çözeltisi deneylerden sonra, bu çalışmanın asıl amacı olan soda çözeltisi deneylere geçilmiştir. Soda çözeltisiyle havuz içerisinde başlangıçta % 8, %10, %12 ve %16 büyüklüğünde tuzluluk oranına sahip dört farklı yoğunluk gradyeni oluşturularak, havuzda ısı depolanabilmesi için gerekli olan yoğunluk gradyeni büyüklüğü belirlenmeye çalışılmıştır. Birinci deneyde, havuz içerisinde TTGH'nın sıcaklık gradyenine benzer bir sıcaklık gradyeni elde edilemezken, ikinci deneyde yavaş da olsa TTGH'nın sıcaklık gradyenine benzer bir sıcaklık gradyenine geçiş başlamıştır. Üçüncü deneyde, havuz tabanı ile yüzeyi arasında 10 °C sıcaklık farkı elde edilirken, dördüncü deneyde bu fark 12 °C olmuştur. TTGH'larda ilk defa soda çözeltisi kullanılarak yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara göre, soda çözeltisi bir TTGH'da ısı depolanabilmesi için başlangıçta havuz tabanı ile yüzeyi arasında % 12 büyüklüğünde tuzluluk oranına sahip bir yoğunluk gradyeninin oluşturulması gerektiği tespit edilmiştir.

NaCl tuzu ile oluşturulmuş % 21 büyüklüğünde tuzluluk oranına sahip tuz yoğunluk gradyenli havuzda dokuz gün sonunda maksimum 13 °C'lik sıcaklık farkı elde edilirken,

soda tuzu ile oluşturulmuş % 16 büyüklüğünde tuzluluk oranına sahip tuz yoğunluk gradyenli havuzda ise yedi gün sonunda maksimum 12 °C sıcaklık farkı elde edilmiştir. Bu değerler karşılaştırıldığında, soda çözeltili havuzda oluşturulan yoğunluk gradyeni büyüklüğü, NaCl çözeltili havuzun yoğunluk gradyeni büyüklüğüne göre daha küçük olmasına rağmen, soda çözeltili havuzda, daha kısa zamanda yaklaşık aynı sıcaklık farkının elde edildiği görülür. Elde edilen bu sonuç, soda tuzunun TTGH'lar için NaCl tuzuna göre daha uygun bir tuz olduğunu göstermektedir.

Deneyler süresince, NaCl'nin kimyasal yapısı gereği NaCl çözeltisi içerisinde tuz kristalizasyonu olması, soda çözeltisi içerisinde aynı durumun gerçekleşmemesi nedeniyle soda ile oluşturulan tuz yoğunluk gradyeninin, NaCl ile oluşturulan yoğunluk gradyenine göre daha kararlı olduğu görülmüştür.

Sodanın kireç çözücü bir özeliğe sahip olması, sodanın TTGH'larda kullanılmasında karşılaşılan en önemli problem olmuştur. Havuz içerisindeki soda çözeltisi, tuz yoğunluk gradyenini korumak için havuz yüzeyine periyodik olarak eklenen tatlı suyun kirecini çözerek, havuzdaki çözeltinin berraklığının bozulmasına neden olmaktadır. Havuz içerisindeki çözeltinin berraklığının azalması, bulanıklığının artması havuz tabanına kadar ulaşarak, soğurulacak olan ısı miktarını azalttığından, sodanın bu özeliği havuzun ısı performansını negatif yönde etkilemektedir. Bu durum, soda çözeltili deneylerin başlangıcında tespit edilmiş, havuz yüzeyine eklenen su, filtre edildikten sonra havuza eklenerek bu problemin üstesinden gelinmeye çalışılmıştır.

Deneylerden elde edilen sonuçlar, değişik araştırmacılar tarafından yapılan benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında, soda çözeltili havuzun sıcaklık ve yoğunluk profillerinin, NaCl, MgCl₂, KNO₃ çözeltili havuzun sıcaklık ve yoğunluk profilleriyle nitelik olarak uyum içinde oldukları görülmüştür. Elde edilen bu sonuç, sodanın TTGH'larda tuz yoğunluk gradyeninin oluşturulmasında kullanılabilir bir tuz olduğunu göstermektedir.

Deney sonuçlarının geçerliliğini gösterebilmek amacıyla, enerjinin ve kütlenin korunumu prensibine göre TTGH'nın bir boyutlu zamana bağlı ısı ve kütle transferi matematik modeli oluşturulmuştur. Modeli oluşturan diferansiyel denklemler, sonlu farklar metodu kullanılarak nümerik olarak çözülmüş, elde edilen sonuçlar deney sonuçlarıyla

karşılaştırılarak, deney ve model sıcaklık ve yoğunluk dağılımlarının benzer temayüller içinde değişim gösterdiği görülmüştür. Sonuçlar birbirleriyle nitelik olarak uyum içinde olurken, havuz tabanı ile yüzeyi arasındaki model sıcaklık farkı, deneysel sıcaklık farkına oranla daha büyük olmuştur. Deney-model sıcaklık profillerinde görülen bu farkın, deneylerde enerji kaynağı olarak kullanılan lambaların güneş ışınlamına göre daha çok uzun dalga boylu ışınlamaya (kızılötesi) sahip olmasından kaynaklandığı, literatürde yapılmış benzer çalışmalarla karşılaştırılarak ortaya konmuştur. Deney ve model çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre, TTGH içerisinde başlangıçta yeterli büyüklükte bir yoğunluk gradyeni oluşturulup, bu yoğunluk gradyeni korunarak sürekliliği sağlandığı takdirde, havuzda uzun zaman aralığında ısı depolanabilmesi mümkün olabilecektir.

Deney sonuçlarının güvenilirliği açısından önemli bir faktör olan, sıcaklık, yoğunluk ve ışınlam ölçümlerinin hata analizi yapılmış, sıcaklık ölçümünde % 1, yoğunluk ölçümünde % 2, ışınlam ölçümünde ise % 1.5 hata ile ölçüm yapılmıştır. Ayrıca, her bir deney için havuz içerisinde oluşturulan tuz yoğunluk gradyeninin kararlılık analizi yapılmış, havuz tabanı ile yüzeyi arasında sıcaklık farkı elde edilen deneylerde oluşturulan tuz yoğunluk gradyenlerinin kararlı olduğu görülmüştür.

Tuz yoğunluk gradyeninin oluşturulmasında ilk defa kullanılan sodanın, NaCl tuzuna göre havuz maliyetine etkisi, havuz için gerekli olan tuz miktarları dikkate alınarak yapılan maliyet analizi ile incelenmiştir. Aynı şartlarda NaCl ve soda tuzlarıyla yapılan deneylerde, taban ile yüzey arasında yaklaşık aynı sıcaklık farkı elde edilmiş olmasına rağmen, tuz yoğunluk gradyenini oluşturmak için NaCl çözeltili havuzda yaklaşık 32 kg tuz kullanılırken, soda çözeltili havuzda 20 kg soda kullanılmıştır. Yaklaşık aynı sıcaklık değerlerinin elde edildiği havuzlarda, gradyenin oluşturulmasında NaCl tuzu miktarının üçte biri kadar daha az soda tuzu gerekli olurken, sodanın birim fiyatının NaCl tuzuna göre 2.5 kat daha fazla olması nedeniyle, havuz maliyetine etkisi NaCl tuzuna göre 1.5 kat daha fazla olmuştur.

Bu çalışmadan elde edilen en önemli sonuç, ilk defa soda tuzu kullanılarak oluşturulan tuz yoğunluk gradyenli TTGH'da, gradyenin yeterli büyüklükte olması ve kararlılığının sağlanması halinde, havuzda ısı depolanabilmesinin mümkün olabileceğidir. Yapılan deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar, literatüre ilk defa soda tuzu ile oluşturulan tuz

yoğunluk gradyenli TTGH'ların ısı depolama karakteristiği ile ilgili önemli katkılar sağlamaktadır. Böylece, yapılan bu çalışma ile TTGH'larda ilk defa yeni bir tuz çeşidi kullanılarak yapılmış deneylerden elde edilen sonuçlar literatüre yenilik olarak kazandırılmıştır.

laboratuar şartlarında kontrollü olarak yapılan bu tür deneylerden elde edilen sonuçlardan ve birikimlerden yararlanılarak, ticari amaçlı büyük ölçekli TTGH'lar inşa edilmeli ve elde edilecek enerjiden değişik alanlarda faydalanma olanakları araştırılmalıdır. İsrail'de elektrik üretiminde, Amerika'da ise düşük sıcaklık gerektiren uygulamalarda halihazırda uygulaması mevcut olan TTGH'lardan elde edilecek enerjinin küçümsenmemesi gerekir. Düşük maliyetli basit bir sistem olması, uygulamasında gelişmiş bir teknolojiye ihtiyaç duyulmaması, toplama ve depolama işlemlerinin her ikisinin de aynı ortamda yapılması nedeniyle TTGH'lar alternatif güneş enerjisi sistemleri arasında dikkat çeken bir sistem olmuştur.

Değişik ülkelerde, farklı uygulamalarda kullanılan TTGH'lar, ülkemizde de düşük sıcaklık gerektiren özellikle sera, balık yetiştirme havuzları, yüzme havuzları, tavuk çiftlikleri vb. uygulamalarda ısıtma amaçlı kullanılabilir. Güneşlenme oranının yüksek olduğu Akdeniz Bölgesinde, denizden elde edilecek çözelti ile oluşturulan TTGH'lardan elde edilecek ısının sera ısıtmasında kullanılmasının yolları araştırılmalı, bu konuda uygulamaya geçebilmek için fizibilite çalışmaları yapılmalıdır. Seracılığın yaygın olarak yapıldığı Akdeniz Bölgesinin TTGH için gerekli olan güneş, tuz ve tatlı su kaynakları açısından oldukça zengin olduğu gerçeği dikkate alındığında, özellikle doğal enerji kaynaklarının günden güne azaldığı, enerji darboğazının baş gösterdiği bugünlerde böyle bir çalışmaya başlanması büyük faydalar sağlayacaktır.

Doğal güneş göllerinde gözlemlenen ortak özellik, gölü oluşturan çözelti yüzeyinin tatlı su ile yıkanmasını sağlayan bir akarsuyun varlığı ve göl zeminin tuz kaynağı olması nedeniyle tabanda artan tuz konsantrasyonudur. Bu tür göllerin bir çok göle sahip olan ülkemizde de bulunması muhtemel olup, henüz bu konuda böyle bir çalışma yapıldığına rastlanılamamıştır. Özellikle bu konuda akla ilk gelecek olan NaCl çözeltisi içeren Tuz Gölü ve soda çözeltisi içeren Van Gölüdür. İsrail'de yapılan Ölü Deniz (Dead Sea) projesinde olduğu gibi, bir proje kapsamında, bu göllerimizde TTGH özelliği olup olmadığı

incelenerek ortaya çıkarılmalıdır. Bu konuda yapılacak araştırmalara, ilk olarak göllerin farklı bölgelerinde ve farklı derinliklerinde sistematik olarak sıcaklık ve yoğunluk ölçümlerinin yapılmasıyla başlanılabilir. Ayrıca, göllerin bulunduğu bölgenin güneşlenme oranı, yağmur miktarı, nem oranı, rüzgar hızı gibi meteorolojik parametrelerin belirlenmesi için gerekli ölçümler yapılarak, bu parametrelerin göle olan etkisi incelenmelidir. Bunun yanında, göl çevresinde TTGH uygulamasının yapılabileceği, temiz ve tatlı su kaynaklarına yakın, sızdırmaz bir zemine sahip bölgelerin araştırılarak, yapay TTGH'ların uygulamasına başlanılabilir. Şayet, bu bölgelerin TTGH özelliğine sahip oldukları tespit edilirse, yine İsrail'de olduğu gibi elektrik enerjisi üretilmesi için gerekli fizibilite çalışmalarının yapılması gerekir.

TTGH teknolojisinin, ülkemizde de diğer ülkelerde olduğu gibi gelişip uygulamaya geçilebilmesi için farklı amaçlar doğrultusunda pratik ve teorik çalışmaların yapılması gerekir. Diğer ülkelerde yapılan çalışmalara oranla, ülkemizde yapılan çalışmalar oldukça az ve yetersizdir. TTGH uygulamasının yapılabilmesi için ülkemiz şartları dikkate alınarak bu konuda detaylı çalışmaların yapılması gerekmektedir. İsrail'de bu konuda yapılan Ölü Deniz projesi örnek alınarak, ülkemizde de Tuz Gölü, Van Gölü gibi büyük göllerimizin TTGH özelliği açısından incelenmesi verimli bir çalışma programı olarak, ülkemizde TTGH uygulamasına geçişte bir başlangıç olabilir.

Yapılan bu çalışma ile sodyum klorür tuzu içeren Tuz Gölü ve sodyum karbonat tuzu içeren Van Gölünden faydalanarak, yapay TTGH teknolojisinin gelişimine katkı da bulunmak amaçlanmış, elde edilen sonuçlar literatüre yenilik olarak kazandırılmıştır. Güneş enerjisi potansiyeli ve tuz kaynakları bakımından oldukça zengin olan ülkemizde yapay ve doğal TTGH sistemlerinden özellikle düşük sıcaklık gerektiren uygulamalarda yararlanma konusunda çalışmalar yapılmalıdır. Dünyada yaygın bir şekilde kullanılmakta olan TTGH uygulamasının, ülkemizde de gelişip uygulamasının yapılamaması için herhangi ciddi bir neden gözükmemektedir. Bu konuda uygulamaya yönelik yapılacak çalışmaların, son günlerde sıkça duymakta olduğumuz enerji sıkıntısına bir nebze de olsa katkı sağlayacağı ümidindeyiz.

KAYNAKLAR

- [1] Taşdemiroğlu, E., "Hidden Power of Water in Türkiye", *Energy*, Vol.18, No.1, pp.25-29, 1993.
- [2] Taşdemiroğlu, E., "Salt Availability in Turkey and Its Potential Use in Solar Ponds", *Resources and Conservation*, Vol.15, pp.215-228, 1987.
- [3] Tabor, H., "Solar Ponds", *Solar Energy*, Vol.27, No.3, pp.181-194, 1981.
- [4] Lodhi, M.A.K., "Solar Ponds in Alkaline Lake and Oil Well Regions", *Energy Conservation and Management*, Vol.37, No.12, pp.1677-1694, 1996.
- [5] Kurt, H., "Tuz Tabakalı Güneş Havuzlarının Matematik Modellemesi", Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 1997.
- [6] Kurt, H., Binark, A.K., "Güneş Havuzu Sıcaklık ve Derişiklik Profillerinin Deneysel ve Teorik Olarak İncelenmesi", MAMKON'97, İ.T.Ü. Makina Fakültesi 1. Makina Mühendisliği Kongresi, ss.129-136, Gümüşsuyu-İstanbul, 1997.
- [7] Kurt, H., Halıcı, F., Binark, A.K., "Solar Pond Conception-Experimental and Theoretical Studies", *Energy Conversion and Management*, Vol.41, pp.939-951, 2000.
- [8] Rubin, H., Benedict, B.A., "Modeling the Performance of a Solar Pond as a Source of Thermal Energy", *Solar Energy*, Vol.32, No.6, pp.771-778, 1984.
- [9] Jubran, B.A., Iwwedia, J.A., Haimour, N.M., "Experimental Investigation of Convective Cells Generated by Side Walls in Solar Ponds Using Various Salts", *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol.119, pp.292-297, 1997.
- [10] Giestas, M., Pina, H., Joyce, A., "The Influence of Radiation Absorption on Solar Pond Stability", *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol.39, No.18, pp.3873-3885, 1996.
- [11] Project Report, "Feasibility Study of Solar Ponds for Wisconsin Industrial Process Heat Applications", Marquette University College of Engineering, Wisconsin Energy Bureau, Madison, USA, 1995.
- [12] Weinberger, H., "The Physics of the Solar Pond", *Solar Energy*, Vol.8, No.2, 1964.
- [13] Shah, S.A., Short, T.H., Fynn, R.P., "Modeling and Testing a Salt Gradient Solar Pond in Northeast Ohio", *Solar Energy*, Vol.27, No.5, pp.393-401, 1981.
- [14] Sherman, B.S., Imberger, J., "Control of a Solar Pond", *Solar Energy*, Vol.46, No.2, pp.71-81, 1991.
- [15] Wang, Y.F., Akbarzadeh, A., "A Parametric Study on Solar Ponds", *Solar Energy*, Vol.30, No.6, pp.555-562, 1983.
- [16] Fagbenle, R.L., "Salt Gradient Solar Ponds for the Tropics: Technical and Economic Appraisal for Nigeria", *International Journal of Ambient Energy*, Vol.14, No.1, 1993.
- [17] Kamal, W.A., "A Parametric Study the Small-Scale Solar Pond", *Energy Conversion and Management*, Vol.26, No.3-4, pp.337-345, 1986.
- [18] Leshuk, J.P., Zaworski, R.J., Styris, D.L., Harling, O.K., "Solar Pond Stability Experiment", *Solar Energy*, Vol.21, pp.237-244, 1978.

- [19] Kanayama, K., Inaba, H., Baba, H., Fukuda, T., "Experiment and Analysis of Practical-Scale Solar Pond Stabilized with Salt Gradient", *Solar Energy*, Vol.46, No.6, pp.353-359, 1993.
- [20] Srinivasan, J., Guha, A., "The Effect of Bottom Reflectivity on the Performance of a Solar Pond", *Solar Energy*, Vol.39, No.4, pp.361-367, 1987.
- [21] Taga, M., Fujimoto, K., Ochi, T., "Field Testing on Nonsalt Solar Ponds", *Solar Energy*, Vol.56, No.3, pp.267-277, 1996.
- [22] Banat, E.A., El-Sayed, S.E., El-Temtamy, S.A., "Carnalite Salt Gradient Solar Ponds: An Experimental Study", *Renewable Energy*, Vol.4.No.2, pp.265-269, 1994.
- [23] Kozanoğlu, B., Genceli, O.F., "Üstten Isıtılan Akışkan Tabakasında Isıl Kararsızlık", *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, Cilt.5, Sayı.3, s.29-33, Şubat-1984.
- [24] Beniwal, R.S., Singh, R.V., Chaudhary, D.R., "Heat Losses from a Salt Gradient Solar Pond", *Applied Energy*, Vol.19, pp.273-285, 1985.
- [25] Hull, J.R., "Computer Simulation of Solar Pond Thermal Behavior", *Solar Energy*, Vol.25, pp.33-40, 1980.
- [26] Hawlader, M.N.A., "The Influence of The Extinction Coefficient on The Effectiveness of Solar Ponds", *Solar Energy*, Vol.25, pp.461-464, 1980.
- [27] Batty, J.C., Riley, J.P., Bhise, N.K., "Optimum Thickness of the Nonconvective Zone in Salt Gradient Solar Ponds", *Solar Energy*, Vol.36, No.1, pp.15-20, 1986.
- [28] Peinan, M., Hongfei, Z., "Optimum Thickness of the Gradient Layer and Maximum Energy Gains of a Solar Pond", *Energy*, Vol.19, No.8, pp.901-904, 1994.
- [29] Subhakar, D., Murthy, S.S., "Saturated Solar Ponds:2. Parametric Studies", *Solar Energy*, Vol.50, No.4, pp.307-319, 1993.
- [30] Zangrando, F., "On the Hydrodynamics of Salt-Gradient Solar Ponds", *Solar Energy*, Vol.46, No.6, pp.323-341, 1991.
- [31] Atkinson, J.F., "Effect of Surface Ice on Solar Pond Performance", *Solar Energy*, Vol.45, No.4, pp.207-214, 1990.
- [32] Lund, P.D., Keinonen, R.S. "Radiation Transmission Measurements For Solar Ponds", *Solar Energy*, Vol.33, No.3/4, pp.237-240, 1984.
- [33] Tsilingiris, P.T., "Effect of Salinity-Concentration Gradient on Radiation Transmission in Salt Gradient Ponds", *Applied Energy*, Vol.35, pp.125-133, 1990.
- [34] Munoz, F., Almanza, R., "A Survey of Solar Pond Developments", *Energy*, Vol.17, No.10, pp.927-938, 1992.
- [35] Subhakar, D., Murthy, S.S., "Saturated Solar Ponds: 1. Simulation Procedure", *Solar Energy*, Vol.50, No.3, pp.275-282, 1993.
- [36] Gonzalez, J., Perez, L.R., Benitez, J., "Modeling the Thermal Process in a Shallow Solar Pond Water Heater", *Solar Energy*, Vol.48, No.4, pp.261-265, 1992.
- [37] Wilkins, E.S., Lee, T.K., "Development of the Gel Pond Technology", *Solar Energy*, Vol. 39, No.1, pp. 33-51, 1987.
- [38] Wilkins, E.S., "Operation of a Commercial Solar Gel Pond", *Solar Energy*, Vol.46, No.6, pp.383-388, 1991.

- [39] Schaefer, R., Lowrey, P., "The Optimum Design of Honeycomb Solar Ponds and a Comparison with Salt Gradient Ponds", *Solar Energy*, Vol.48, No.2, pp.69-78, 1992.
- [40] Wu, C., Blank, D.A., "Power Output of a Solar Pond Heat Engine", *International Journal of Ambient Energy*, Vol.13, No.4, 1992.
- [41] Çengel, Y.A., Özişik, M.N., "Solar Radiation Absorption in Solar Ponds", *Solar Energy*, Vol.33, No.6, pp.581-591, 1984.
- [42] Srinivasan, J., "Performance of a Small Solar Pond in the Tropics", *Solar Energy*, Vol.45, No.4, pp.21-230, 1990.
- [43] Viskanta, R., Toor, J.S., "Absorption of Solar Radiation in Ponds", *Solar Energy*, Vol.21, pp.17-25, 1978.
- [44] Newell, T.A., Cowie, R.G., Upper, J.M., Smith, M.K., Cler, G.L., "Construction and Operation Activities at the University of Illinois Salt Gradient Solar Pond", *Solar Energy*, Vol.45, No.4, pp.231-239, 1990.
- [45] <http://www.solarpond.utep.edu/>
- [46] Assaf, G., "The Dead Sea: A Scheme for A Solar Lake", *Solar Energy*, Vol.18, pp.293-299, 1976.
- [47] Tabor, H.Z., Doron, B., "The Beit Ha'arava 5 MW(e) Solar Pond Power Plant (SPPP)-Progress Report", *Solar Energy*, Vol.45, No.4, pp.147-153, 1990.
- [48] Akbarzadeh, A., Ahmadi, G., "Computer Simulation of the Performance of a Solar Pond in the Southern Part of Iran", *Solar Energy*, Vol. 24, pp.143-151, 1980.
- [49] Kamiuto, K., "Optimum Pond Temperature for Maximizing Power Production of a Non-Convecting Solar Pond Heat Conversion System", *Applied Energy*, Vol.30, pp.305-316, 1988.
- [50] Al-Jamal, K., Khashan, S., "Parametric Study of a Solar Pond for Northern Jordan", *Energy*, Vol.21, No.10, pp.939-946, 1996.
- [51] Khalil, R.A.H., Jubran, B.A., Faqir, N.M., "Optimization of Solar Pond Electrical Power Generation System", *Energy Conversion and Management*, Vol.38, No.8, pp.787-798, 1997.
- [52] Lund, P.D., Routti, J.T., "Feasibility of Solar Pond Heating for Northern Cold Climates", *Solar Energy*, Vol.33, No.2, pp.209-215, 1984.
- [53] Kooi, C.F., "The Steady State Salt Gradient Solar Pond", *Solar Energy*, Vol.23, pp.37-45, 1979.
- [54] Alagao, F.B., "Simulation of the Transient Behavior of A Closed-Cycle Salt-Gradient Solar Pond", *Solar Energy*, Vol.56, No.3, pp.245-260, 1996.
- [55] El-Refae, M.M., Al-Marafie, A.M., "Numerical Simulation of the Performance of the Kuwait Experimental Salt-Gradient Solar Pond", *Energy Sources*, Vol.15, pp.145-148, 1993.
- [56] Hawlader, M.N.A., Brinkworth, B.J., "An Analysis of the Non-Convecting Solar Pond", *Solar Energy*, Vol.27, pp.195-204, 1981.
- [57] Joshi, V., Kishore, V.V.N., "Applicability of Steady State Equations for Solar Pond Thermal Performance Predictions", *Energy*, Vol.11, No.8, pp.821-827, 1986.

- [58] Tsilingiris, P.T., "Steady-State Modeling Limitations in Solar Pond Design", *Solar Energy*, Vol.53, No.1, pp.73-79, 1994.
- [59] Antonopoulos, K.A., Rogdakis, E.D., "Correlations for the Yearly or Seasonally Optimum Salt-Gradient Solar Pond in Greece" *Solar Energy*, Vol.50, No.5, pp.417-424, 1993.
- [60] Styris, D.L., Harling, O.K., Zaworski, R.J., Leshuk, J., "The Nonconvecting Solar Pond Applied to Building and Process Heating", *Solar Energy*, Vol.18, pp.245-251, 1976.
- [61] Valov, M.I., "Calculation of Optimum Parameters of a Solar Pond", *Geliotekhnika*, Vol.27, No.4, pp.3-9, 1991.
- [62] Hassab, M.A., El-Masry, O.A., "Effects of Edges on Solar Energy Collection in Small Solar Ponds", *Applied Energy*, Vol.38, pp.81-94, 1991.
- [63] Meyer, K.A., "A Numerical Model to Describe the Layer Behavior in Salt-Gradient Solar Ponds", *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol.105, pp.341-347, 1983.
- [64] Kooi, C.F., "Salt Gradient Solar Pond With Reflective Bottom: Application to the Saturated Pond", *Solar Energy*, Vol.26, pp.113-120, 1981.
- [65] Hull, J.R., "Calculation of Solar Pond Thermal Efficiency with a Diffusely Reflecting Bottom", Vol.29, No.5, pp.385-389, 1982.
- [66] Newel, T.A., "Simulation of a Solar Pond With a Stratified Storage Zone", *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol.105, pp.363-368, 1983.
- [67] Zhang, Z.M., Wang, Y.F., "A Study on the Thermal Storage of The Ground Beneath Solar Ponds By Computer Simulation", *Solar Energy*, Vol.44, No.5, pp.245-248, 1990.
- [68] Chang, C.H., Bannerot, R.B., "Transient Thermal Performance of a Solar Pond with Salinity and Temperature Dependent Properties", *Joint Solar Engineering Conference, ASME*, pp.283-290, 1993.
- [69] Prasad, R., Rao, D.P., "Feasibility Studies on the Enhancement of Energy Storage in the Ground Beneath Solar Ponds", *Solar Energy*, Vol.50, No.2, pp.135-144, 1993.
- [70] Al-Nimr, M.A., "Solar Pond Transient Behavior-Analytical Modeling", *International Journal of Solar Energy*, Vol.19, pp.275-290, 1998.
- [71] Folchitto, S., "Seawater as Salt and Water Source for Solar Ponds", *Solar Energy*, Vol.46, No.6, pp.343-351, 1991.
- [72] Akbarzadeh, A., Golding, P., "The Importance of Wall angle for Stability in Solar Ponds", *Solar Energy*, Vol.49, No.2, pp.123-126, 1992.
- [73] Vitner, A., Sarig, S., Reisfeld, R., "The Self-Generation Mechanism of a Laboratory Scale Saturated Solar Pond", *Solar Energy*, Vol.41, No.2, pp.133-140, 1988.
- [74] Pawar, S.H., Chapgaon, A, N., "Fertilizer Solar Ponds as a Clean Source of Energy: Some Observations From Small Scale Experiments", *Solar Energy*, Vol.55, No.6, pp.537-542, 1995.
- [75] Mehta, A.S., Pathak, N., Shah, B.M., Gomkale, S.D. "Performance Analysis of a Bittern-Based Solar Pond", *Solar Energy*, Vol.40, No.5, pp.469-475, 1988.

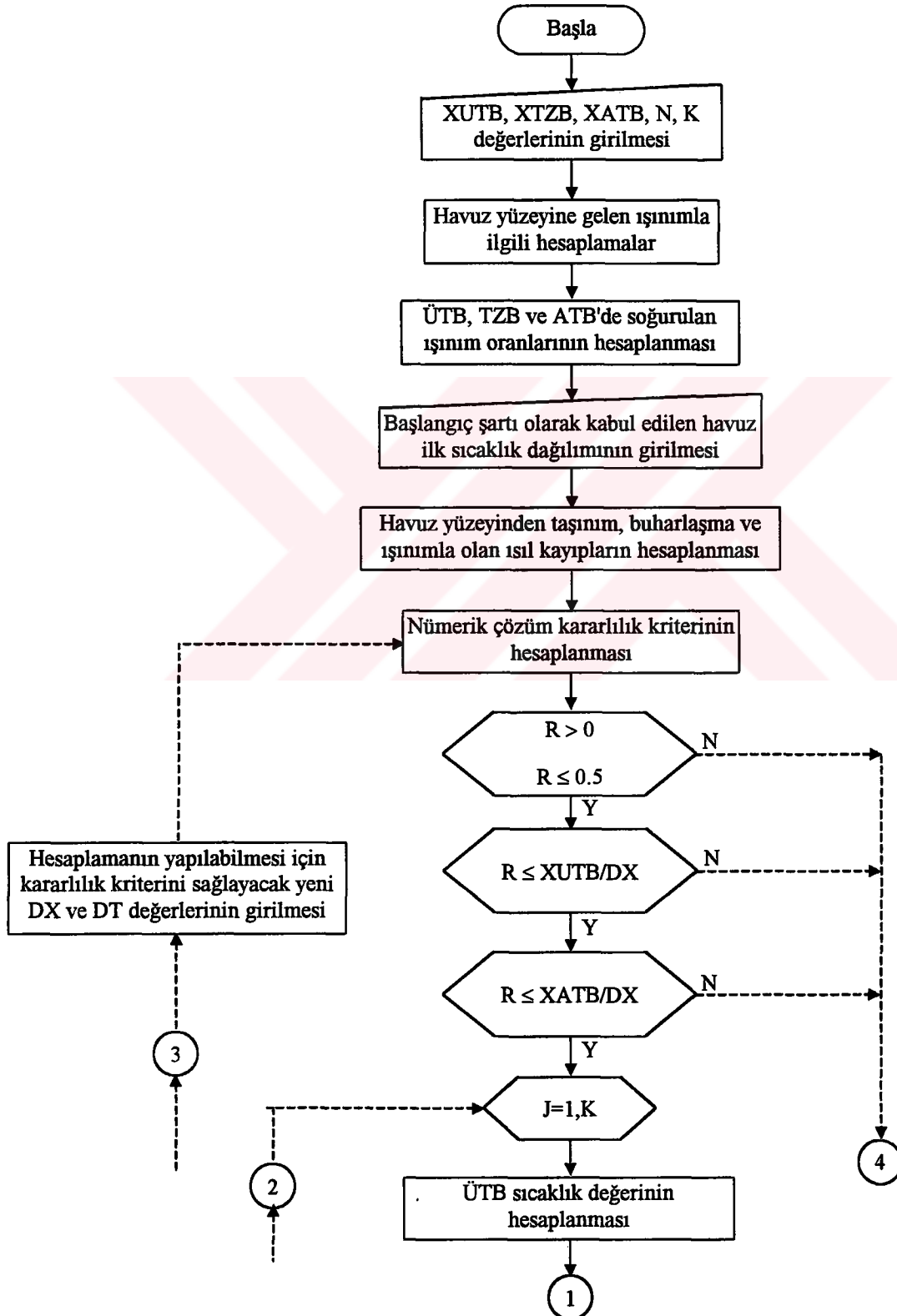
- [76] Subhaker, D., Murthy, S.S., "Saturated Solar Ponds:3. Experimental Verification", Solar Energy, Vol.53, No.6, pp.469-472, 1994.
- [77] Subhaker, D., Murthy, S.S., "Experiments on a Magnesium Chloride Saturated Solar Pond", Renewable Energy, Vol.1, No.5/6, pp.655-660,1991.
- [78] Akoshile, C.O., "Mini Solar Pond", Renewable Energy, Vol.1, No.3/4, pp.463-467, 1991.
- [79] Alagao, F.B., Akbarzadeh, A., Johnson, P.W., "The Design, Construction, and Initial Operation of a Closed-Cycle, Salt-Gradient Solar Pond", Solar Energy, Vol.53, No.4, pp.343-351, 1994.
- [80] Zhang, R., Nielsen, C.E., "Study of Surface Convective Zone Behavior of Solar Pond in Laboratory", Renewable Energy, Vol.4, No.1, pp.47-51, 1994.
- [81] Keren, Y., Rubin, H., Atkinson, J., Priven, M., Bemporad, G.A., "Theoretical and Experimental Comparison of Conventional and Advanced Solar Pond Performance", Solar Energy, Vol.51, No.4, pp.255-270,1993.
- [82] Bozdemir, S., Kayalı, R., "Güneş Havuzlarının Matematik Modeli ve Deneysel Verilerle Karşılaştırılması", Doğa Bilim Dergisi, Cilt.A7, Sayı.3, ss.387-397, 1987.
- [83] Ünal, G.G., Kıymaç, K., Bozdemir, S., Kayalı, R., Kurt, Z., "Çukurova Bölgesinde Uygulama Boyutlarında Bir Güneş havuzunun Performansının Deneysel ve Kuramsal Olarak Saptanması", Tübitak Mühendislik Araştırma Grubu, Proje No: MAG-644/A, 1988, Adana.
- [84] Göktun, S., "Güneş Enerjisinin Depolanması", Doktora Tezi, Makina Fakültesi, İ.T.Ü., 1983, İstanbul.
- [85] Sharma, M.S., Kaushika, N.D., "Design and Performance Characteristics of Honeycomb Solar Pond", Energy Conversion and Management", Vol.27, No.1, pp.111-116, 1987.
- [86] Wang, J., Yagoobi, J.S., "Effects of Water Turbidity and Salt Concentration Levels on Penetration of Solar Radiation Under Water", Solar Energy, Vol.52, No.5, pp.429-438, 1994.
- [87] Kanayama, K., Baba, H., "Transmittance of Distilled Water and Sodium Chloride-Water Solutions", Journal of Solar Energy Engineering, Vol.110, pp.113-119,1988.
- [88] Wang, J., Yagoobi, J.S., "Effect of Water Turbidity on Thermal Performance of a Salt Gradient Solar Pond", Solar Energy, Vol.54, pp.301-308, 1995.
- [89] Tsilingiris, P.T., "Radiation Transmission Through a Composite Pure Water Layer of Uniform and Depth-Dependent Extinction Characteristics", International Journal of Energy Research, Vol.15, pp.723-730, 1991.
- [90] Dake, J.M.K., Harleman, D.R.F., "Thermal Stratification in Lakes: Analytical and Laboratory Studies", Water Resources Research, Vol.5, No.2, 1969.
- [91] Kumar, A., Kishore, V.V.N., "Construction and Operation Experience pf a 6000 m² Solar Pond At Kutch, India", Solar Energy, Vol.65, No.4,pp.237-249,1999.
- [92] Zangrando, F., "A Simple Method to Establish Salt Gradient Solar Ponds", Solar Energy, Vol.25, pp.467-470, 1980.
- [93] Sreenivas, K.R., Arakeri, J.H., Srinivasan, J., "Modeling the Dynamics of the Mixed Layer in Solar Ponds", Solar Energy, Vol.54, No.3, pp.193-202, 1995.

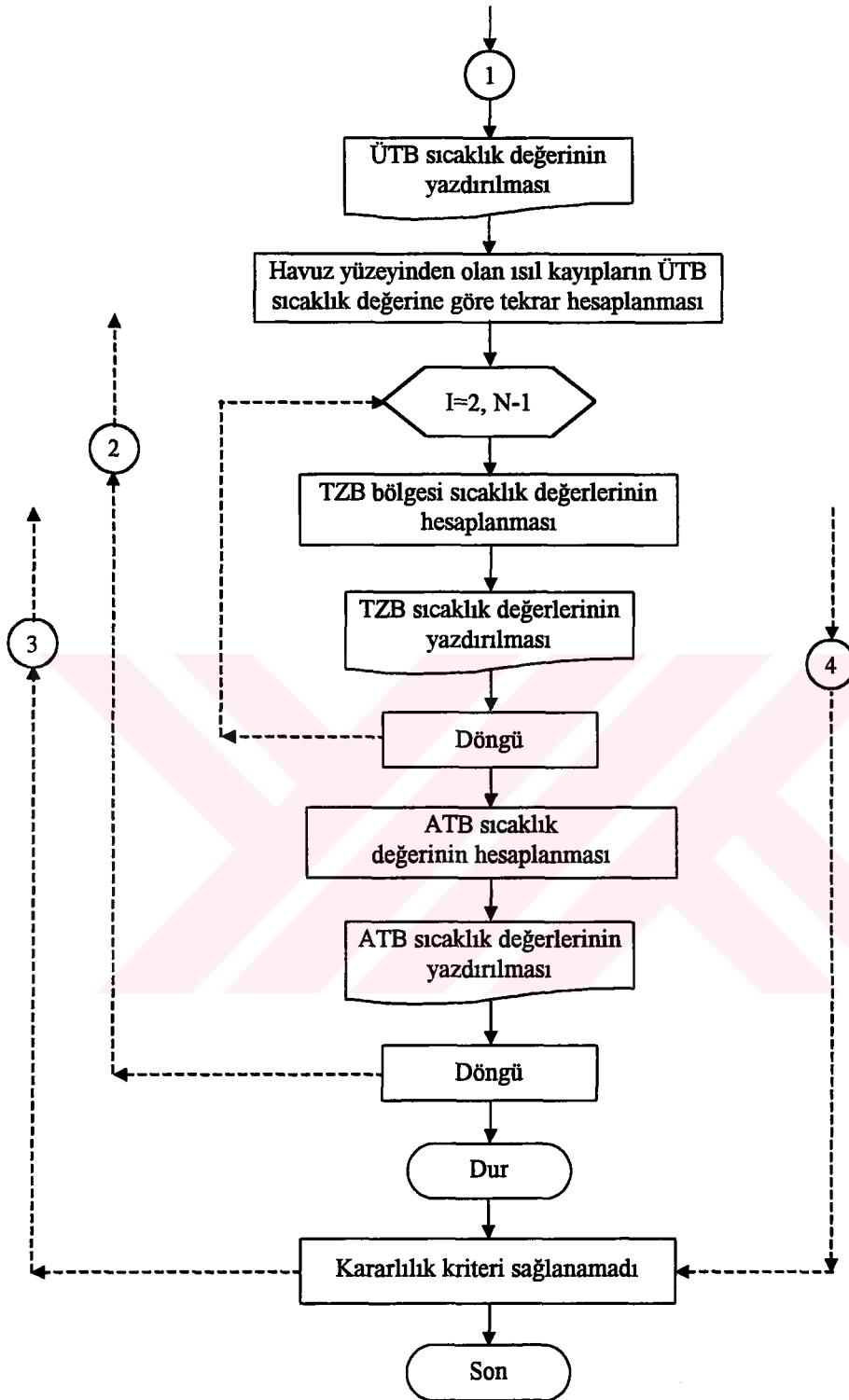
- [94] Anati, D.A., "Salinity Profiles in Steady-State Solar Ponds", *Solar Energy*, Vol.38, No.3, pp159-163, 1987.
- [95] Wang, Y.F., Akbarzadeh, A., "A Further Study on the Theory of Falling Ponds", *Solar Energy*, Vol.29, No.6, pp.557-563, 1982.
- [96] Joshi, V., Kishore, V.V.N., "Computer Simulation of the Performance of Solar Pond", *Reg. J. Energy Heat Mass Transfer*, Vol.7, No.2, pp.97-106, 1985.
- [97] Joshi, V., Kishore, V.V.N., Rao, K.S., "A Digital Simulation of the Non-Convecting Solar Pond for Indian Conditions", *Renewable Energy Sources: International Progress, Part A*, Elsevier Science Publication, pp.207-220, 1984.
- [98] Özışık, M.N., "Heat Transfer : A Basic Approach", McGraw-Hill International Editions, 1985.
- [99] Kho, T.H., Hawlader, M.N.A., Ho, J.C., Wijesundera, N.E., "Design and Performance Evaluation of a Solar Pond for Industrial Process Heating", *International Journal of Solar Energy*, Vol.10, pp.83-101, 1991.
- [100] McMillan, J.A., Peterson, E.M., "Solar Simulation with Tungsten-Halogen Quartz Lamps and Optical Filters", *Solar Energy*, Vol.22, pp.467-469, 1979.
- [101] Kiatsiriroat, T., Thalang, K.N., "Parameters of Solar Collectors Tested with a KMITT Solar Simulator", *Renewable Energy*, Vol.3, No.6/7, pp.795-799, 1993.
- [102] Kıran, E., İnan, D., "Güneş Pillerinin Sıcaklığa Bağımlı I-V Ölçümleri İçin Yapay Güneş Düzeneği", *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, Vol.21, pp.425-429, 1997.
- [103] El-Shobokshy, M.S., Hussein, F.M., "Effect of Dust with Different Physical Properties on the Performance of Photovoltaic Cells", *Solar Energy*, Vol.51, No.6, pp.505-511, 1993.
- [104] Alekseeva, N.G., Golenchenko, V.A., "Test Bench with Solar Radiation Simulator for Testing of Solar Collectors", *Geliotekhnika (Applied Solar Energy)*, Vol.29, No.1, pp.30-33, 1993.
- [105] Govaer, D., "Indoor Collector testing with an Incandescent Simulator", *Solar Energy*, Vol.40, No.4, pp.363-368, 1988.
- [106] Kenny, S.P., Davidson, J.H., "Design of a Multiple-Lamp Large-Scale Solar Simulator", *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol.116, pp.200-205, 1994.
- [107] Indrajit, Bansal, N.K., Garg, H.P., "An Experimental Study on a Finned Type and Non-Porous Type Solar Air Heater with a Solar Simulator", *Energy Conversion and Management*, Vol.25, No.2, pp.135-138, 1985.
- [108] Garg, H.P., Shukla, A.R., Indrajit, Madhuri, Agnihotri, R.C., Chakraverty S., "Development of a Simple Low-Cost Solar Simulator for Indoor Collector Testing", *Applied Energy*, Vol.21, pp.43-54, 1985.
- [109] Genceli, O.F., "Ölçme Tekniği", ss.21-27, Birsen Yayınevi, İstanbul, 1995.
- [110] Narusawa, U., Suzukawa, Y., "Experimental Study of Double Diffusive Cellular Convection Due to a Uniform Lateral Heat Flux", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 113, pp.387-405, 1981.
- [111] Turner, J.S., "Buoyancy Effects in Fluids", Cambridge University Press, 1979.

EKLER

EK-A

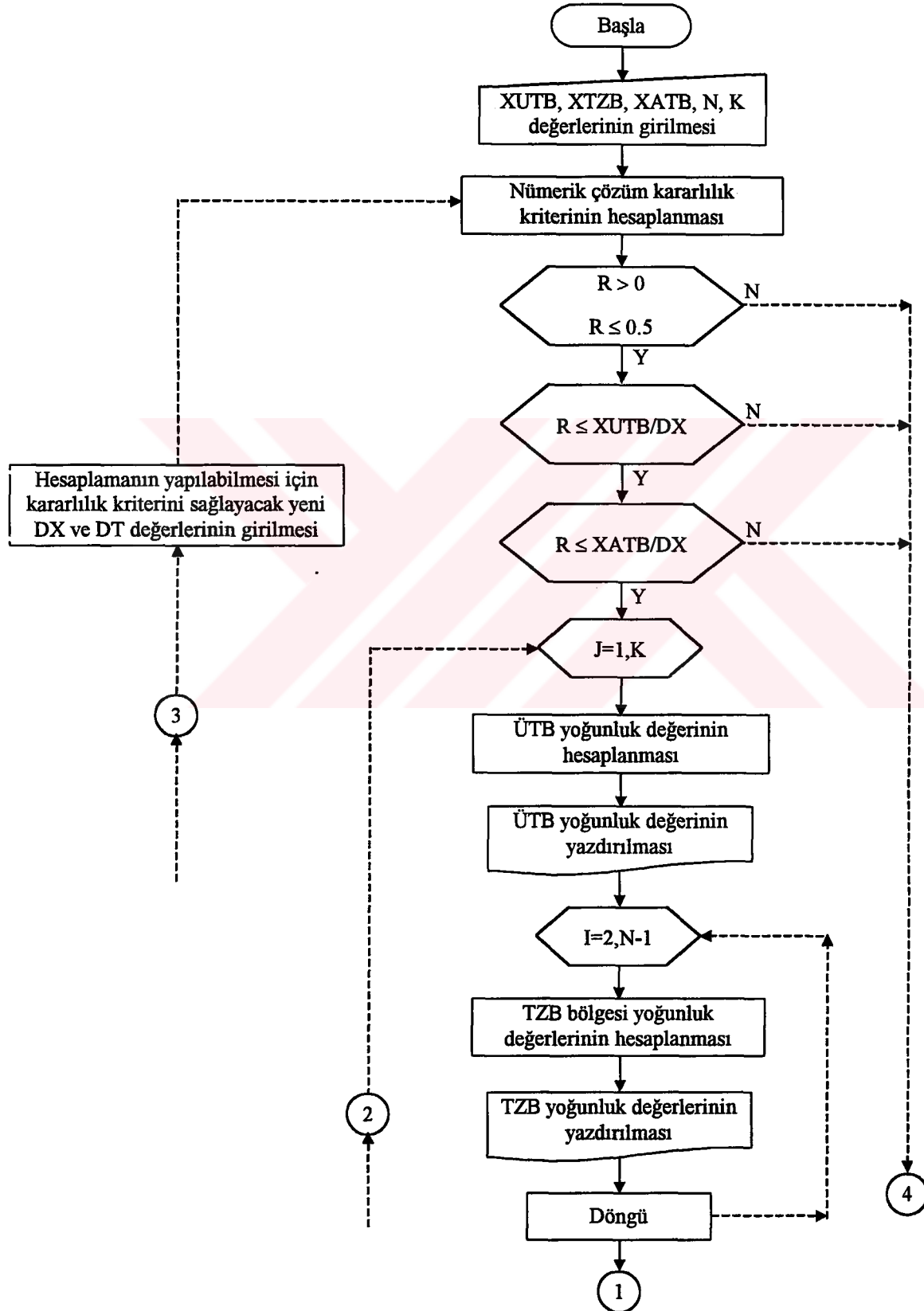
TTGH Sıcaklık Dağılımını Hesaplayan Bilgisayar Programının Akış Şeması

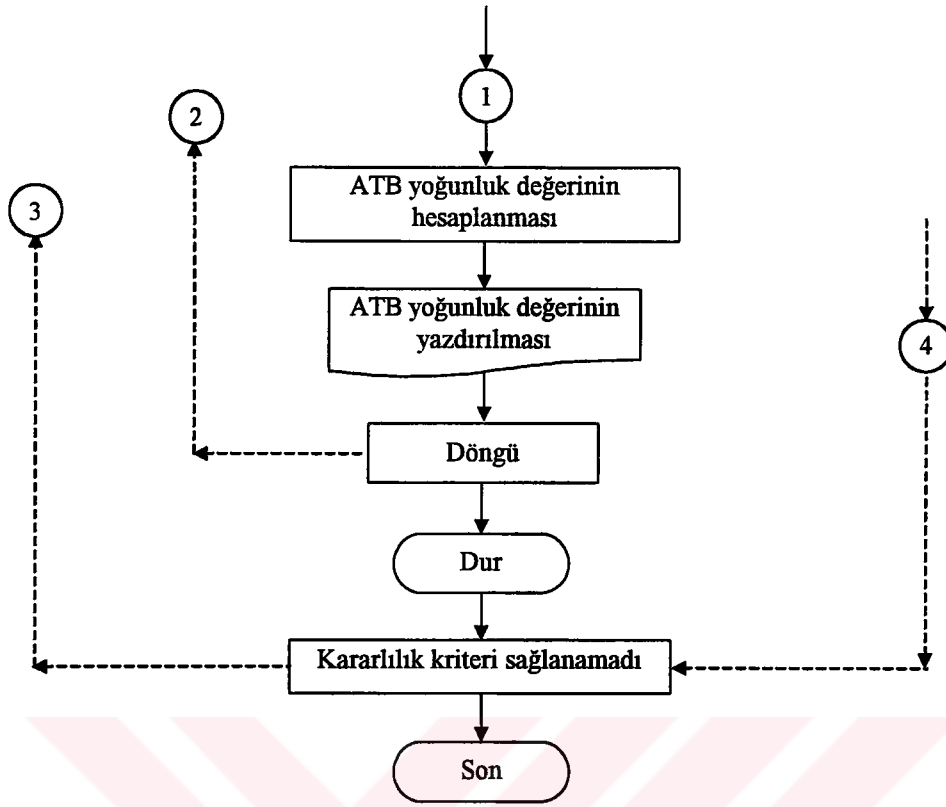




EK-B

TTGH Yoğunluk Dağılımını Hesaplayan Bilgisayar Programının Akış Şeması





EK-C

Bilgisayar Programında Kullanılan Değişkenler

<u>Değişkenler</u>	<u>Açıklama</u>
A	: Havuz yüzeyinden yansıyan ışınlım oranı (%)
A1, A2, A3, A4	: Havuza giren ışınlım oranını bulmak için kullanılan sabitler
AKD	: Havuz yüzeyinde ışınlımın kırılma açısı (radyan)
ALFA	: Çözeltinin ısıl yayılım katsayısı (m^2/s)
CA	: Havanın özgül ısı kapasitesi ($J/kg^{\circ}C$)
COSGA	: Havuz yüzeyine gelen ışınlımın geliş açısı ($^{\circ}$)
D	: Çözeltinin kütle yayılım katsayısı (m^2/s)
DA	: Deklinasyon açısı ($^{\circ}$)
DEKA	: Deklinasyon açısı (radyan)
DT	: Hesaplamanın yapıldığı zaman aralığı (saniye)
DX	: TZB'yi oluşturan tabakaların kalınlığı (m)
EA	: Enlem açısı ($^{\circ}$)
ENA	: Enlem açısı (radyan)
EW	: Su yüzeyinin ışınlımı neşretme katsayısı
F	: ÜTB'de soğurulan kızılötesi ışınlım oranı (%)
GAD	: Havuz yüzeyine gelen ışınlımın geliş açısı (radyan)
GUNS	: Hesaplamaya başlanılan gün sayısı
HATB	: ATB bölgesi içerisinde soğurulan ışınlım şiddeti (W/m^2)
HC	: Isı taşınım katsayısı ($W/m^2^{\circ}C$)
HE	: Çözeltinin buharlaşma gizli ısı (J/kg)
HGI	: Havuza giren ışınlım oranı (%)
HL	: Havuz tabanına kadar ulaşip soğurulan ışınlım şiddeti (W/m^2)
HN	: ATB-TZB ara yüzeyinde soğurulan ışınlım şiddeti (W/m^2)
HO, HXO	: Havuz yüzeyinden havuza giren ışınlım şiddeti (W/m^2)
HS	: Havuz yüzeyine gelen ışınlım şiddeti (W/m^2)
HTZB	: TZB bölgesinde ışınlımın soğurulmasıyla oluşan ısı üretimi (W/m^3)
HTZB(), H()	: TZB tabakalarının her birinde soğurulan ışınlım şiddeti (W/m^2)
HX1	: ÜTB-TZB ara yüzeyinde soğurulan ışınlım şiddeti (W/m^2)
HXUTB	: ÜTB'de soğurulan toplam ışınlım şiddeti (W/m^2)
HVI	: Havuz yüzeyinden yansıyan ışınlım oranı
K	: Hesaplamanın yapıldığı toplam zaman aralığı (saat)
KW	: Çözeltinin ısı iletim katsayısı ($W/m^{\circ}C$)

N	: TZB bölgesinin tabaka sayısı
OPT()	: TZB'yi oluşturan tabakalarda ışıının ilerlediği optik yol (m)
PTYOL1	: Işıının ÜTB bölgesi içerisinde ilerlediği optik yol (m)
PTYOL3	: Işıının TZB-ATB ara yüzeyine kadar ilerlediği optik yol (m)
PTYOL4	: Işıının ATB bölgesi içerisinde ilerlediği optik yol (m)
PATM	: Atmosfer basıncı (Pa)
PORTAM	: Tortam sıcaklığındaki çözeltinin buhar basıncı (Pa)
PS	: Ts sıcaklığındaki çözeltinin kısmi basıncı (Pa)
QC	: Taşınım ile olan ısı kaybı (W/m^2)
QE	: Buharlaşma ile olan ısı kaybı (W/m^2)
QR	: Işınım ile olan ısı kaybı (W/m^2)
QT	: Havuz yüzeyinden olan toplam ısı kaybı (W/m^2)
R	: Nümerik çözüm kararlılık kriteri
RH	: Ortamın bağıl nemi (%)
S1,S2,S3,S4,R1,R2	: Nümerik çözüm kararlılık kriteri sabitleri
SA	: Saat açısı ($^{\circ}$)
SBOLTS	: Stefan-Boltzman sabiti (W/m^2K^4)
SINKA	: Havuz yüzeyinde ışıının kırılma açısı ($^{\circ}$)
SK	: Işıının su içerisinde soğurulma katsayısı (m^{-1})
T(,)	: Havuz sıcaklık dağılımı ($^{\circ}C$)
TB(,)	: Nümerik çözüm başlangıç şartı olan sıcaklık değerleri ($^{\circ}C$)
TILK(,)	: Havuz ilk sıcaklık dağılımı ($^{\circ}C$)
TORTAM	: Ortam sıcaklığı ($^{\circ}C$)
TS	: Havuz yüzey sıcaklığı ($^{\circ}C$)
TSKY	: Gökyüzü sıcaklığı ($^{\circ}C$)
TUTB	: ÜTB sıcaklığı ($^{\circ}C$)
VR	: Rüzgar hızı (m/s)
X()	: TZB bölgesinin bölündüğü her bir tabakanın kalınlığı (m)
XATB, XA	: ATB bölgesinin tabaka kalınlığı (m)
XTZB, XT	: TZB bölgesinin tabaka kalınlığı (m)
XUTB, XU	: ÜTB bölgesinin tabaka kalınlığı (m)
YG(,), Y(,)	: Havuz yoğunluk dağılımı (kg/m^3)
YGATB	: ATB yoğunluk dağılımı (kg/m^3)
YILK(,)	: Havuz ilk yoğunluk dağılımı (kg/m^3)

EK-D

TTGH Sıcaklık Dağılımını Hesaplamak İçin Yazılan Fortran Bilgisayar Programı

```

C      *****
C      *      TTGH ISI TRANSFERİ MATEMATİK MODELİNDEN ELDE EDİLEN      *
C      *      DENKLEMLERİN SONLU FARKLAR YAKLAŞIMIYLA NÜMERİK OLARAK      *
C      *      ÇÖZÜMÜNÜ YAPAN BİLGİSAYAR PROGRAMI      *
C      *****
C
C      DIMENSION T(250,250),TILK(10,10),H(20),X(20),OPTY(20)
C      DIMENSION HTZB(20),TB(10,10)
C      REAL KW
C
C      OPEN (UNIT=10,FILE='STEZ.DAT',STATUS='NEW')
C      WRITE(*,*) 'UTB BÖLGESİNİN TABAKA KALINLIĞINI METRE OLARAK GİRİNİZ'
C      READ(*,*)XUTB
C      WRITE(*,*) 'TZB BÖLGESİNİN TABAKA KALINLIĞINI METRE OLARAK GİRİNİZ'
C      READ(*,*)XTZB
C      WRITE(*,*) 'ATB BÖLGESİNİN TABAKA KALINLIĞINI METRE OLARAK GİRİNİZ'
C      READ(*,*)XATB
C
C      WRITE(10,25)XUTB,XTZB,XATB
25  FORMAT(5X,'XUTB=',F6.3,3X,'XTZB=',F6.3,3X,'XATB=',F6.3)
C
C      XU=XUTB
C      XT=XTZB
C      XA=XATB
C      XTOP=XU+XT+XA
C
C      WRITE(*,*) 'TZB NOKTA SAYISI OLAN N DEĞERİNİ GİRİNİZ'
C      WRITE(10,*) 'TZB NOKTA SAYISI OLAN N DEĞERİNİ GİRİNİZ'
C      READ(*,*)N
C      WRITE(10,*) 'N=',N
C
C      WRITE(*,*) 'KAÇ SAATLİK HESAPLAMA YAPILCAKSA ZAMAN ARALIĞINI
*SAAT OLARAK GİRİNİZ'
C      WRITE(10,*) 'KAÇ SAATLİK HESAPLAMA YAPILCAKSA ZAMAN ARALIĞINI
*SAAT OLARAK GİRİNİZ'
C      READ(*,*)K
C      WRITE(10,*) 'K=',K
C
C      *****
C      *
C      *      HAVUZ YÜZEYİNE GELEN IŞINIMLA İLGİLİ HESAPLAMALAR      *
C      *
C      *****
C
C      HS=750.0
C      GUNS=180
C      RAD=3.1416/180.0
C      DA=23.45*SIN(RAD*(360*(284+GUNS)/365))
C
C      DEKA=RAD*DA

```

```
EA=41
ENA=RAD*EA
SA=0
```

```
C
C HAVUZ YÜZEYİNE GELEN IŞINIMIN GELİŞ AÇISININ HESAPLANMASI
C
```

```
COSGA=COS(DEKA)*COS(ENA)*COS(SA)+SIN(DEKA)*SIN(ENA)
GAD=(1/RAD)*ACOS(COSGA)
```

```
C
C SİNÜS KANUNUNDAN KIRILMA AÇISININ HESAPLANMASI
C
```

```
SINKA=SIN(RAD*GAD)/1.333
AKD=(1/RAD)*ASIN(SINKA)
```

```
C
C FRESHNEL EŞİTLİĞİ İLE HAVUZA GİREN IŞINIM ORANININ HESAPLANMASI
C
```

```
A1=(SIN(RAD*(AKD-GAD)))**2
A2=(SIN(RAD*(AKD+GAD)))**2
A3=(TAN(RAD*(AKD-GAD)))**2
A4=(TAN(RAD*(AKD+GAD)))**2
```

```
C
HYI=0.5*((A1/A2)+(A3/A4))
A=HYI*100
HGI=(1-HYI)*100
```

```
C
WRITE(10,*)'HAVUZ YÜZEYİNDEN IŞINIMIN YANSIMA ORANI:', 'A= %',A
WRITE(10,*)'HAVUZA GİREN IŞINIM ORANI:', 'HGI= %', HGI
```

```
C HAVUZ İÇİNDE IŞINIMIN İLERLEMESİ VE SOĞURULMASI İLE İLGİLİ
C HESAPLAMALAR
C F:UTB'DE SOĞURULAN KIZİLÖTESİ IŞINIM MİKTARI
C SK:IŞINIMIN SOĞURULMA KATSAYISI
C
```

```
F=0.45
SK=0.5
```

```
C
C ÜTB'DE SOĞURULAN IŞINIM MİKTARININ HESAPLAMASI
C
```

```
HO=(1-HYI)*HS
HXO=HO
OPTYOL1=XUTB/COS(RAD*AKD)
HX1=(1-F)*HO*EXP(-SK*OPTYOL1)
HXUTB=HXO-HX1
WRITE(10,*)'HXUTB=',HXUTB
```

```
C
C TZB'DE SOĞURULAN IŞINIM MİKTARININ HESAPLAMASI
C
```

```
X(0)=0.0
DO 50 I=1,N
X(I)=0.05+X(I-1)
OPTY(I)=X(I)/COS(RAD*AKD)
H(I)=SK*(1-F)*HO*EXP(-SK*OPTY(I))
50 CONTINUE
```

```
C
DO 75 I=2,N-1
HTZB(I)=H(I)
WRITE(10,*)'HTZB(I)=',HTZB(I)
75 CONTINUE
```

```

C   ATB'DE SOĞURULAN İŞİNİM MİKTARININ HESAPLAMASI
C
OPTYOL3=(XUTB+XTZB)/COS(RAD*AKD)
OPTYOL4=(XTOP)/COS(RAD*AKD)
HN=(1-F)*HO*EXP(-SK*OPTYOL3)
HL=(1-F)*HO*EXP(-SK*OPTYOL4)
HATB=HN-HL
WRITE(10,*) 'HATB=',HATB
C
C   BAŞLANGIÇ ŞARTI OLARAK HAVUZ İLK SICAKLIK DAĞILIMI DEĞERİ
C
WRITE(*,*) 'HAVUZ İLK SICAKLIK DEĞERİNİ GİRİNİZ'
WRITE(10,*) 'HAVUZ İLK SICAKLIK DEĞERİNİ GİRİNİZ'
READ(*,*) TBAS
WRITE(10,*) 'BAŞLANGIÇ SICAKLIĞI=',TBAS
C
DO 100 I=1,N
J=0
TB(I,J)=TBAS
TILK(I,J)=TB(I,J)
T(I,J)=TILK(I,J)
WRITE(10,125) I,J,TILK(I,J)
100 CONTINUE
125 FORMAT('TILK(',I3,',',I3,',')=', F7.3)
C
C   *****
C   *
C   * HAVUZ YÜZEYİNDEN MEYDANA GELEN ISI KAYIPLARIN HESAPLANMASI *
C   *
C   *****
C
TAŞINIMLA OLAN ISI KAYBININ HESAPLANMASI
C   VR=RÜZGAR HIZI (m/s)
C   TORTAM=ORTAM SICAKLIĞI (C)
C   TS=HAVUZ İÇİNDEKİ ÇÖZELTİNİN YÜZEY SICAKLIĞI (C)
C
VR=1.5
TORTAM=26.0
TS=26.0
HC=5.7+3.8*VR
QC=HC*(TS-TORTAM)
WRITE(10,*) 'QC=',QC
C
C   BUHARLAŞMA İLE OLAN ISI KAYBININ HESAPLANMASI
C
CA=HAVANIN ÖZGÜL ISISI (J/kgC)
PATM=ATMOSFER BASINCI (Pa)
HE=ÇÖZELTİNİN BUHARLAŞMA GİZLİ ISISI (J/kg)
RH=ORTAMIN BAĞIL NEMİ
C
RH=0.70
PATM=101325
CA=1005.0
HE=2418.6E+3
PS=133.3*EXP(18.403-(3885.0/(TS+230)))
PORTAM=133.3*RH*EXP(18.403-(3885.0/(TORTAM+230)))
QE=(HC*HE*(PS-PORTAM))/(1.6*CA*PATM)
WRITE(10,*) 'QE=',QE

```

```

C      IŞINIMLA OLAN ISI KAYBININ HESAPLANMASI
C
      EW=0.95
      SBOL TSA=5.68E-8
      TSKY=TORTAM+(0.55+(0.704*SQRT(PORTAM)))*0.25
      QR=EW*SBOL TSA*((TS+273.15)**4-(TSKY+273.15)**4)
      WRITE(10,*)'QR=',QR
C
      QT=QC+QE+QR
      WRITE(10,*)'QT=',QT
C
C      NÜMERİK ÇÖZÜM KARARLILIK KRİTERİNİN HESAPLANMASI
C
      ALFA:ÇÖZELTİNİN ISIL YAYILIM KATSAYISI
      DT:HESAPLAMANIN YAPILDIĞI ZAMAN ARALIĞI
      DX:TZB'NİN BÖLÜNDÜĞÜ TABAKA KALINLIĞI (m)
      KW:ÇÖZELTİNİN ISI İLETİM KATSAYISI (W/mC)
C
      ALFA=1.471E-7
      DT=3600.0
      DX=0.05
      KW=0.569
      R=ALFA*DT/(DX**2)
      WRITE(10,*)'NÜMERİK ÇÖZÜM KARARLILIK KRİTERİ'
      WRITE(10,*)'R=',R
C
      XUTB=0.1
      XATB=0.25
      S1=DX/XUTB
      S2=DX/XATB
      S3=DX/KW
      S4=DT*ALFA/KW
C
      R1=1/S1
      R2=1/S2
      IF(R.LE.0) GOTO 250
      IF(R.GT.R1) GOTO 250
      IF(R.GT.R2) GOTO 250
      IF(R.GT.0.5) GOTO 250
C
C      ÜTB BÖLGESİ SICAKLIK DEĞERİNİN HESAPLANMASI
C
      DO 150 J=0,K
      M=J+1
      WRITE(10,*)'** M=', M ,'SAAT SONRAKI HAVUZ SICAKLIK DAGILIMI **'
      WRITE(10,*)' ÜTB SICAKLIK DEĞERİ '
C
      T(1,J+1)=R*(S1*T(2,J)+S1*S3*(HXUTB-QT))+(1-(R*S1))*T(1,J)
      TUTB=T(1,J+1)
      TS=TUTB
      WRITE(10,200)1,J+1,T(1,J+1)
C
C      HAVUZ YÜZEYİNDEN OLAN ISIL KAYIPLARIN ÜTB SICAKLIĞINA GÖRE
      TEKRAR HESAPLANMASI
C
      VR=1.5
      HC=5.7+3.8*VR
      TORTAM=TS-4.0

```

```

QC=HC*(TS-TORTAM)
WRITE(10,*)'QC=',QC

C
RH=0.70
PATM=101325
CA=1005.0
HE=2418.6E+3
PS=133.3*EXP(18.403-(3885.0/(TS+230)))
PORTAM=133.3*RH*EXP(18.403-(3885.0/(TORTAM+230)))
QE=(HC*HE*(PS-PORTAM))/(1.6*CA*PATM)
WRITE(10,*)'QE=',QE

C
EW=0.95
SBOLTSA=5.68E-8
TSKY=TORTAM+(0.55+(0.704*SQRT(PORTAM)))*0.25
QR=EW*SBOLTSA*((TS+273.15)**4-(TSKY+273.15)**4)
WRITE(10,*)'QR=',QR
QT=QC+QE+QR
WRITE(10,*)'QT=',QT

C
C
C
TZB BÖLGESİ SICAKLIK DEĞERLERİNİN HESAPLANMASI

WRITE(10,*)'TZB SICAKLIK DEGERLERI'
DO 175 I=2,N-1
T(I,J+1)=R*(T(I+1,J)+T(I-1,J))+(1-2*R)*T(I,J)+S4*(HTZB(I))
WRITE(10,200)I,J+1,T(I,J+1)
175 CONTINUE

C
C
C
ATB BÖLGESİ SICAKLIK DEĞERİNİN HESAPLANMASI

WRITE(10,*)'ATB SICAKLIK DEGERI'
T(N,J+1)=R*(S2*T(N-1,J)+S2*S3*HATB)+(1-(R*S2))*T(N,J)
WRITE(10,200)N,J+1,T(N,J+1)
150 CONTINUE

C
200 FORMAT('T(',I3,',',I3,')=',F12.7)

C
STOP
250 WRITE(*,*)'R : KARARLILIK ŞARTI SAGLANAMADI'
END

```

EK-E

TTGH Yoğunluk Dağılımını Hesaplamak İçin Yazılan Fortran Bilgisayar Programı

```

C      *****
C      *      TTGH KÜTLE TRANSFERİ MATEMATİK MODELİNDEN ELDE EDİLEN      *
C      *      DENKLEMLERİN SONLU FARKLAR YAKLAŞIMIYLA NÜMERİK OLARAK      *
C      *      ÇÖZÜMÜNÜ YAPAN BİLGİSAYAR PROGRAMI                        *
C      *****
C
C      DIMENSION YG(200,200),Y(20,20),YILK(20)
C      OPEN (UNIT=10,FILE='YTEZ.DAT',STATUS='OLD')
C
C      WRITE(*,*) 'TZB TABAKA SAYISI OLAN N DEĞERİNİ GİRİNİZ'
C      WRITE(10,*) 'TZB TABAKA SAYISI OLAN N DEĞERİNİ GİRİNİZ'
C      READ(*,*) N
C      WRITE(10,*) 'N=',N
C
C      WRITE(*,*) 'KAÇ SAATLİK HESAPLAMA YAPILCAKSA ZAMAN ARALIĞINI
C      *SAAT OLARAK GİRİNİZ'
C      WRITE(10,*) 'KAÇ SAATLİK HESAPLAMA YAPILCAKSA ZAMAN ARALIĞINI
C      *SAAT OLARAK GİRİNİZ'
C      READ(*,*) K
C      WRITE(10,*) 'K=',K
C
C      WRITE(*,*) 'UTB BÖLGESİNİN TABAKA KALINLIĞINI METRE OLARAK GİRİNİZ'
C      READ(*,*) XUTB
C      WRITE(*,*) 'TZB BÖLGESİNİN TABAKA KALINLIĞINI METRE OLARAK GİRİNİZ'
C      READ(*,*) XTZB
C      WRITE(*,*) 'ATB BÖLGESİNİN TABAKA KALINLIĞINI METRE OLARAK GİRİNİZ'
C      READ(*,*) XATB
C
C      WRITE(10,25) XUTB,XTZB,XATB
25  FORMAT(5X,'XUTB=',F6.3,3X,'XTZB=',F6.3,3X,'XATB=',F6.3)
C
C      XTOP=XUTB+XTZB+XATB
C
C      HAVUZ İLK YOĞUNLUK DAĞILIMININ DATA OLARAK GİRİLMESİ
C
C      DATA(YILK(I),I=1,7)/998,1042,1063,1081,1088.7,1120,1157/
C
C      WRITE(10,*) 'HAVUZ İLK YOGUNLUK DAGILIMI'
C      DO 50 I=1,N
C      WRITE(10,75) I,YILK(I)
C      J=0
C      Y(I,J)=YILK(I)
C      YG(I,J)=Y(I,J)
50  CONTINUE
75  FORMAT('YILK(',I2,')=',F9.3)
C
C      NÜMERİK ÇÖZÜM KARARLILIK KRİTERİNİN HESAPLANMASI
C      D:ÇÖZELTİNİN KÜTLE YAYILIM KATSAYISI (m2/s)
C      DT:HESAPLAMANIN YAPILDIĞI ZAMAN ARALIĞI (saniye)
C      DX:TZB'NİN BÖLÜNDÜĞÜ TABAKA KALINLIĞI (m)

```

```

D=1.8E-9
DT=3600.0*12
DX=0.05
R=D*DT/(DX**2)
R1=DX/XUTB
R2=DX/XATB
C
IF(R.LE.0) GOTO 150
IF(R.GT.0.5) GOTO 150
IF(R.GT.R1) GOTO 150
IF(R.GT.R2) GOTO 150
C
C   ÜTB BÖLGESİ YOĞUNLUK DEĞERİNİN HESAPLANMASI
C
DO 100 J=0,K
M=J+1
WRITE(10,*) '** M=', M, 'SAAT SONRAKI HAVUZ YOĞUNLUK DAGILIMI **'
YG(1,J+1)=R*R1*YG(2,J)+(1-R1*R)*YG(1,J)
WRITE(10,*) 'UTB YOGUNLUK DAGILIMI'
WRITE(10,200) 1,J+1,YG(1,J+1)
C
C   TZB BÖLGESİ YOĞUNLUK DEĞERLERİNİN HESAPLANMASI
C
WRITE(10,*) 'TZB YOGUNLUK DAGILIMI'
DO 125 I=2,N-1
YG(I,J+1)=R*(YG(I+1,J)+YG(I-1,J))+(1-2*R)*YG(I,J)
WRITE(10,200) I,J+1,YG(I,J+1)
125 CONTINUE
C
C   ATB BÖLGESİ YOĞUNLUK DEĞERİNİN HESAPLANMASI
C
WRITE(10,*) 'ATB YOGUNLUK DAGILIMI'
YG(N,J+1)=R*R2*YG(N-1,J)+(1-R*R2)*YG(N,J)
YGATB=YG(N,J+1)
IF(YGATB.LT.1147.0) YG(N,J+1)=1157.0
WRITE(10,200) N,J+1,YG(N,J+1)
100 CONTINUE
C
200 FORMAT('YG(',I3,',',I3,')=',F8.3)
C
STOP
150 WRITE(*,*) 'R: KARARLILIK ŞARTI SAGLANAMADI'
END

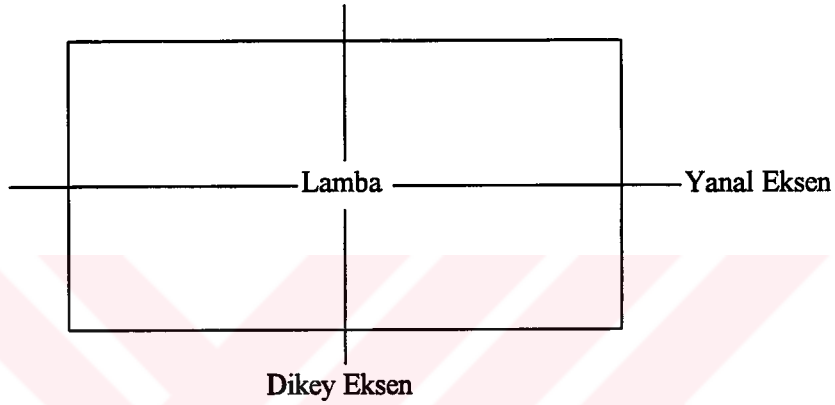
```

EK-F

IŞINIM ÖLÇÜM DEĞERLERİ

Tek Lamba İçin Yapılan Işınım Ölçüm Değerleri (W/m^2)

(Ölçümler havuz yüzey alanının 1/4 'ü için yapılmıştır)



H: Lamba düzlemi ile havuz yüzeyi arasındaki mesafe

H=75 cm	Lamba merkezi	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm	35 cm
Yanal Eksen	83	81	81	82	86	94	93	88
Düşey Eksen	83	82	82	79	77	71	66	61

H=50 cm	Lamba merkezi	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm	35 cm
Yanal Eksen	175	176	180	190	185	182	158	138
Düşey Eksen	175	177	173	163	148	131	113	95

H=40 cm	Lamba merkezi	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm	35 cm
Yanal Eksen	273	263	260	282	268	234	200	166
Düşey Eksen	273	274	269	240	208	175	142	116

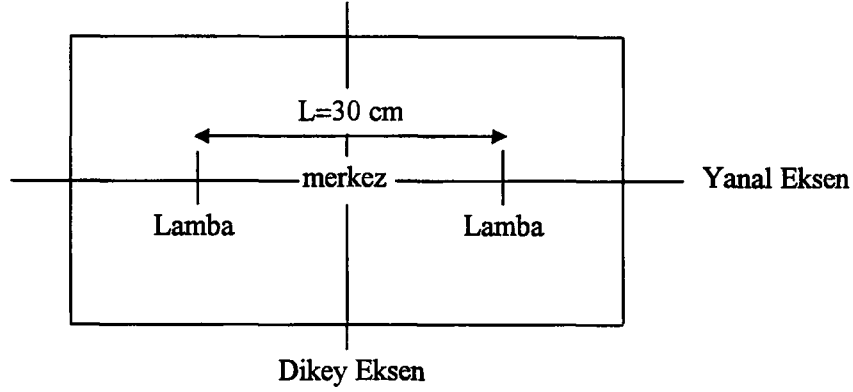
H=35 cm	Lamba merkezi	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm	35 cm
Yanal Eksen	390	380	392	396	348	285	240	198
Düşey Eksen	390	390	370	335	280	222	175	133

H=30 cm	Lamba merkezi	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm	35 cm
Yanal Eksen	440	440	466	435	372	330	252	202
Düşey Eksen	440	440	407	350	279	210	160	116

H=25 cm	Lamba merkezi	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm	35 cm
Yanal Eksen	620	630	685	580	460	368	295	225
Düşey Eksen	620	610	545	457	340	235	115	87

İki Lamba Arasındaki Mesafenin 30 cm Olduğu Durumdaki Işınım Ölçüm Değerleri (W/m^2)

(Ölçümler havuz yüzey alanının 1/4 'ü için yapılmıştır)



H: Lamba düzlemi ile havuz yüzeyi arasındaki mesafe

H=75 cm	merkez	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm	35 cm
Yanal Eksen	164	152	154	150	146	136	135	134
Düşey Eksen	164	162	160	160	158	148		

H=50 cm	merkez	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm	35 cm
Yanal Eksen	350	345	333	318	300	288	282	257
Düşey Eksen	350	332	328	316	294	264		

H=40 cm	merkez	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm	35 cm
Yanal Eksen	490	480	450	415	390	355	335	305
Düşey Eksen	490	485	470	440	395	330		

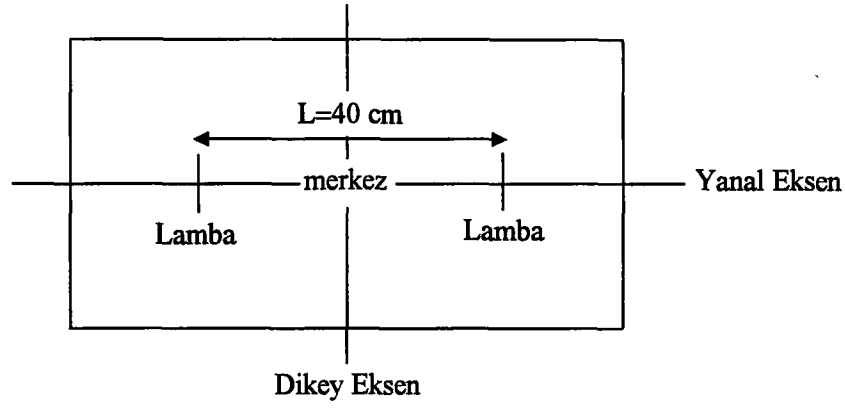
H=35 cm	merkez	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm	35 cm
Yanal Eksen	666	635	595	566	518	475	448	374
Düşey Eksen	666	666	640	582	495	410		

H=30 cm	merkez	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm	35 cm
Yanal Eksen	775	700	660	605	550	520	455	370
Düşey Eksen	775	775	720	640	525	420		

H=25 cm	merkez	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm	35 cm
Yanal Eksen	1020	975	925	887	827	788	637	486
Düşey Eksen	1020	1030	970	822	645	480		

İki Lamba Arasındaki Mesafenin 40 cm Olduğu Durumdaki Işınım Ölçüm Değerleri (W/m^2)

Ölçümler havuz yüzey alanının 1/4 'ü için yapılmıştır.



H: Lamba düzlemi ile havuz yüzeyi arasındaki mesafe

H=75 cm	merkez	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm	35 cm
Yanal Eksen	202	202	198	192	190	190	180	175
Düşey Eksen	202	204	201	199	192	184		

H=70 cm	merkez	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm	35 cm
Yanal Eksen	255	253	248	240	233	224	215	205
Düşey Eksen	255	248	244	239	228	214		

H=65 cm	merkez	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm	35 cm
Yanal Eksen	275	272	268	260	253	250	240	225
Düşey Eksen	275	273	268	258	242	225		

H=60 cm	merkez	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm	35 cm
Yanal Eksen	320	319	316	303	292	268	252	234
Düşey Eksen	320	318	313	298	278	258		

H=55 cm	merkez	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm	35 cm
Yanal Eksen	370	370	367	353	340	330	313	291
Düşey Eksen	370	369	361	341	315	292		

H=50 cm	merkez	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm	35 cm
Yanal Eksen	452	448	442	425	410	393	370	335
Düşey Eksen	452	450	437	405	375	339		

H=45 cm	merkez	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm	35 cm
Yanal Eksen	535	532	522	498	480	435	393	343
Düşey Eksen								

H=40 cm	merkez	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm	35 cm
Yanal Eksen	632	631	624	606	584	564	522	464
Düsey Eksen	632	631	604	453	485	432		

H=35 cm	merkez	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm	35 cm
Yanal Eksen	751	755	753	742	721	698	642	544
Düsey Eksen	751	750	712	643	550	470		

H=30 cm	merkez	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm	35 cm
Yanal Eksen	864	882	911	910	885	860	771	635
Düsey Eksen	864	860	800	710	592	502		



EK-G**Deneylerde Ölçülen Yoğunluk Değerleri**

ÖLÇÜM NOKTALARI	HAVUZ DERİNLİĞİ
6. Nokta	Yüzey
5. Nokta	10 cm
4. Nokta	20 cm
3. Nokta	30 cm
2. Nokta	40 cm
1. Nokta	50 cm

Tatlı Su Yoğunluk Ölçüm Değerleri

İlk Durum	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	998
	2. Nokta	998
	3. Nokta	998
	4. Nokta	998
	5. Nokta	998
	6. Nokta (yüzey)	998
8 Saat Işınımına Maruz Kaldıktan Sonra 31.05.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	997,7
	2. Nokta	996,5
	3. Nokta	996,8
	4. Nokta	997,1
	5. Nokta	995,1
	6. Nokta (yüzey)	994
Soğumaya Bırakıldıktan 14 Saat Sonra 01.06.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	996,8
	2. Nokta	997,8
	3. Nokta	997,8
	4. Nokta	998,8
	5. Nokta	997,9
	6. Nokta (yüzey)	998,2
5 Saat Işınımına Maruz Kaldıktan sonra 01.06.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	995,8
	2. Nokta	997,3
	3. Nokta	998,2
	4. Nokta	995,2
	5. Nokta	994
	6. Nokta (yüzey)	996

8 Saat Işınımına Maruz Kaldıktan Sonra 01.06.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	996
	2. Nokta	994,5
	3. Nokta	996,4
	4. Nokta	995,3
	5. Nokta	994,5
	6. Nokta (yüzey)	995
12 Saat Işınımına Maruz Kaldıktan Sonra 02.06.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	997,6
	2. Nokta	997,5
	3. Nokta	997,5
	4. Nokta	995,6
	5. Nokta	994,8
	6. Nokta (yüzey)	994,7
Soğumaya Bırakıldıktan 14 Saat Sonra 02.06.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	994,7
	2. Nokta	995,1
	3. Nokta	997,5
	4. Nokta	996,6
	5. Nokta	997,1
	6. Nokta (yüzey)	998,2
8 Saat Işınımına Maruz Kaldıktan Sonra 03.06.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	996,2
	2. Nokta	993,6
	3. Nokta	993,9
	4. Nokta	995,6
	5. Nokta	994,4
	6. Nokta (yüzey)	992,1

NaCl-Su Çözeltili Birinci Deney
Yoğunluk Ölçüm Değerleri

Havuz Dolum Tarihi : 27.06.2000

Dolumdan 24 saat sonra 28.06.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1224,9
	2. Nokta	1193,5
	3. Nokta	1167,6
	4. Nokta	1128,3
	5. Nokta	1077,9
	6. Nokta (yüzey)	1036,1
Dolumdan 48 saat sonra 29.06.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1226,9
	2. Nokta	1213,3
	3. Nokta	1181,8
	4. Nokta	1131,6
	5. Nokta	1080,1
	6. Nokta (yüzey)	1043,1

Dolumdan 72 saat sonra 30.06.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1221,3
	2. Nokta	1214,4
	3. Nokta	1174,7
	4. Nokta	1122,8
	5. Nokta	1074,6
	6. Nokta (yüzey)	1039
Dolumdan 92 saat sonra ve Işınım başlangıcı 01.07.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1228,9
	2. Nokta	1219,6
	3. Nokta	1172
	4. Nokta	1129,6
	5. Nokta	1080,9
	6. Nokta (yüzey)	1047
1. Gün Işınımdan 12 saat sonra	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1220,6
	2. Nokta	1215,6
	3. Nokta	1171,7
	4. Nokta	1123,1
	5. Nokta	1075,9
	6. Nokta (yüzey)	1050,5
2. Gün Işınım Başlangıcı 02.07.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	
	2. Nokta	
	3. Nokta	
	4. Nokta	
	5. Nokta	
	6. Nokta (yüzey)	
2. Gün Işınımdan 12 saat sonra	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1220,3
	2. Nokta	1213,1
	3. Nokta	1178,3
	4. Nokta	1125,1
	5. Nokta	1072,9
	6. Nokta (yüzey)	1068,7
3. Gün Işınım Başlangıcı 03.07.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1221,4
	2. Nokta	1204,8
	3. Nokta	1177,8
	4. Nokta	1114,8
	5. Nokta	1082,2
	6. Nokta (yüzey)	1079,1
3. Gün Işınımdan 12 saat sonra	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1219,4
	2. Nokta	1212,5
	3. Nokta	1168,7
	4. Nokta	1121,8
	5. Nokta	1077,8
	6. Nokta (yüzey)	1053,7

4. Gün Işınım Başlangıcı 04.07.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1217,7
	2. Nokta	1214,5
	3. Nokta	1175,2
	4. Nokta	1127,4
	5. Nokta	1078,6
	6. Nokta (yüzey)	1055,4
4. Gün Işınımdan 12 saat sonra	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1217,9
	2. Nokta	1208,8
	3. Nokta	1172,5
	4. Nokta	1126
	5. Nokta	1083,3
	6. Nokta (yüzey)	1082,4
5. Gün Işınım Başlangıcı 05.07.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1213,3
	2. Nokta	1194,7
	3. Nokta	1185,2
	4. Nokta	1130,7
	5. Nokta	1093,9
	6. Nokta (yüzey)	1089,9
5. Gün Işınımdan 12 saat sonra	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1207,8
	2. Nokta	1195,8
	3. Nokta	1179,3
	4. Nokta	1123,2
	5. Nokta	1092,5
	6. Nokta (yüzey)	1065,3
6. Gün Işınım Başlangıcı 06.07.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1204,4
	2. Nokta	1197,5
	3. Nokta	1182,2
	4. Nokta	1130,4
	5. Nokta	1090,8
	6. Nokta (yüzey)	1070
6. Gün Işınımdan 12 saat sonra	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1195,3
	2. Nokta	1186,7
	3. Nokta	1180,5
	4. Nokta	1134,5
	5. Nokta	1090,7
	6. Nokta (yüzey)	1087,2
7. Gün Işınım Başlangıcı 07.07.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1203,6
	2. Nokta	1189,5
	3. Nokta	1179,7
	4. Nokta	1138,3
	5. Nokta	1098,6
	6. Nokta (yüzey)	1091,3

7. Gün Işınımdan 12 saat sonra	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1204
	2. Nokta	1189
	3. Nokta	1183,1
	4. Nokta	1137,1
	5. Nokta	1095
	6. Nokta (yüzey)	1090
8. Gün Işınım Başlangıcı 08.07.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1204,2
	2. Nokta	1188,8
	3. Nokta	1182
	4. Nokta	1141,9
	5. Nokta	1102,4
	6. Nokta (yüzey)	1097,2
8. Gün Işınımdan 12 saat sonra	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1201,8
	2. Nokta	1190,2
	3. Nokta	1181,3
	4. Nokta	1140,6
	5. Nokta	1094,7
	6. Nokta (yüzey)	1089

**NaCl-Su Çözeltili İkinci Deney
Yoğunluk Ölçüm Değerleri**

Havuz Dolum Tarihi : 12.07.2000

Dolumdan 24 saat sonra 13.07.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1222,6
	2. Nokta	1196,2
	3. Nokta	1180,3
	4. Nokta	1129,4
	5. Nokta	1047,8
	6. Nokta (yüzey)	1021,7
Dolumdan 48 saat sonra 14.07.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1223,5
	2. Nokta	1194,3
	3. Nokta	1183,7
	4. Nokta	1131,6
	5. Nokta	1053,1
	6. Nokta (yüzey)	1028,3
Dolumdan 72 saat sonra ve Işınım Başlangıcı 15.07.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1222
	2. Nokta	1201,7
	3. Nokta	1200,1
	4. Nokta	1139,6
	5. Nokta	1062,5
	6. Nokta (yüzey)	1035,2

1. Gün Işınım 12 saat sonra	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1213,9
	2. Nokta	1210,6
	3. Nokta	1203,6
	4. Nokta	1138,6
	5. Nokta	1085,1
	6. Nokta (yüzey)	1035,5
2. Gün Işınım Başlangıcı 16.07.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1211
	2. Nokta	1209,3
	3. Nokta	1204
	4. Nokta	1139,7
	5. Nokta	1092,3
	6. Nokta (yüzey)	1045
2. Gün Işınım 12 saat sonra	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1211,6
	2. Nokta	1206,2
	3. Nokta	1202,2
	4. Nokta	1140,8
	5. Nokta	1097
	6. Nokta (yüzey)	1052,8
3. Gün Işınım Başlangıcı 17.07.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1210,5
	2. Nokta	1206,2
	3. Nokta	1200,9
	4. Nokta	1140,7
	5. Nokta	1098,6
	6. Nokta (yüzey)	1042
3. Gün Işınım 12 saat sonra	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1208,1
	2. Nokta	1206,3
	3. Nokta	1200,3
	4. Nokta	1139,9
	5. Nokta	1106,9
	6. Nokta (yüzey)	1065,1
4. Gün Işınım Başlangıcı 18.07.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1203,8
	2. Nokta	1202,9
	3. Nokta	1197,3
	4. Nokta	1142,8
	5. Nokta	1101,7
	6. Nokta (yüzey)	1069,7
4. Gün Işınım 12 saat sonra	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1208,7
	2. Nokta	1204,5
	3. Nokta	1199,2
	4. Nokta	1151,5
	5. Nokta	1109,2
	6. Nokta (yüzey)	1078,7

5. Gün Işınım Başlangıcı 19.07.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1206,8
	2. Nokta	1203,7
	3. Nokta	1201,6
	4. Nokta	1148,3
	5. Nokta	1108,3
	6. Nokta (yüzey)	1068,2
5. Gün Işınımdan 12 saat sonra	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1201,7
	2. Nokta	1200,1
	3. Nokta	1191,1
	4. Nokta	1154,4
	5. Nokta	1112,8
	6. Nokta (yüzey)	1075,1
6. Gün Işınım Başlangıcı 20.07.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1209,3
	2. Nokta	1198,8
	3. Nokta	1198,9
	4. Nokta	1154
	5. Nokta	1112,1
	6. Nokta (yüzey)	1091,1
6. Gün Işınımdan 12 saat sonra	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	
	2. Nokta	ÖLÇÜLEMEDİ
	3. Nokta	
	4. Nokta	
	5. Nokta	
	6. Nokta (yüzey)	
7. Gün Işınım Başlangıcı 21.07.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1205,4
	2. Nokta	1206,9
	3. Nokta	1201,1
	4. Nokta	1171,6
	5. Nokta	1123,3
	6. Nokta (yüzey)	1082,1
7. Gün Işınımdan 12 saat sonra	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1206,6
	2. Nokta	1200
	3. Nokta	1199,3
	4. Nokta	1170,1
	5. Nokta	1142
	6. Nokta (yüzey)	1136,8
8. Gün Işınım Başlangıcı 22.07.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1212,5
	2. Nokta	1201,5
	3. Nokta	1202,9
	4. Nokta	1172,8
	5. Nokta	1139,2
	6. Nokta (yüzey)	1093

8. Gün Işınım 12 saat sonra	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1211,8
	2. Nokta	1202
	3. Nokta	1194,8
	4. Nokta	1171
	5. Nokta	1123
	6. Nokta (yüzey)	1116
9. Gün Işınım Başlangıcı 23.07.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1213,5
	2. Nokta	1203,4
	3. Nokta	1195,2
	4. Nokta	1166,3
	5. Nokta	1144,4
	6. Nokta (yüzey)	1115,6
9. Gün Işınım 12 saat sonra	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1217,5
	2. Nokta	1210,8
	3. Nokta	1201
	4. Nokta	1167
	5. Nokta	1128,4
	6. Nokta (yüzey)	1092,5

Soda-Su Çözeltili Birinci Deney
Yoğunluk Ölçüm Değerleri

Havuz Dolum Tarihi :27.07.2000

Dolumdan 24 saat sonra 28.07.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta (taban)	1088,5
	2. Nokta	1076,7
	3. Nokta	1069
	4. Nokta	1062,5
	5. Nokta	1036
	6. Nokta (yüzey)	1032
Dolumdan 48 saat sonra 29.07.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta (taban)	1087,3
	2. Nokta	1078,2
	3. Nokta	1068,5
	4. Nokta	1064,7
	5. Nokta	1037,8
	6. Nokta (yüzey)	1033,5
Dolumdan 72 saat sonra ve 1.gün Işınım Başlangıcı 30.07.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta (taban)	1086,9
	2. Nokta	1077
	3. Nokta	1069,5
	4. Nokta	1063,5
	5. Nokta	1038,7
	6. Nokta (yüzey)	1034,8

Işınımdan 12 saat sonra	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta (taban)	1086,2
	2. Nokta	1073
	3. Nokta	1070
	4. Nokta	1062
	5. Nokta	1038
	6. Nokta (yüzey)	1035,5
2. gün Işınım Başlangıcı 31.07.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta (taban)	1087,5
	2. Nokta	1071,8
	3. Nokta	1070,3
	4. Nokta	1058,5
	5. Nokta	1038,6
	6. Nokta (yüzey)	1036,2
Işınımdan 12 saat sonra	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta (taban)	1086,7
	2. Nokta	1074,6
	3. Nokta	1072,2
	4. Nokta	1058,3
	5. Nokta	1037
	6. Nokta (yüzey)	1035,3
3. gün Işınım Başlangıcı 01.08.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta (taban)	1085,2
	2. Nokta	1071,8
	3. Nokta	1070,5
	4. Nokta	1059,7
	5. Nokta	1039,3
	6. Nokta (yüzey)	1036,8
Işınımdan 12 saat sonra	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta (taban)	1085,5
	2. Nokta	1073,8
	3. Nokta	1072,5
	4. Nokta	1058,8
	5. Nokta	1040,5
	6. Nokta (yüzey)	1037,2

Soda-Su Çözeltili İkinci Deney
Yoğunluk Ölçüm Değerleri

Havuz Dolum Tarihi : 25.08.2000

Dolumdan 24 saat sonra 26.08.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1107,6
	2. Nokta	1093
	3. Nokta	1082,3
	4. Nokta	1062,5
	5. Nokta	1036,6
	6. Nokta (yüzey)	1028,5
Dolumdan 48 saat sonra 27.08.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1107,5
	2. Nokta	1096,2
	3. Nokta	1085,3
	4. Nokta	1064,7
	5. Nokta	1037
	6. Nokta (yüzey)	1029,6
Dolumdan 72 saat sonra ve 1.gün Işınım Başlangıcı 28.08.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1107
	2. Nokta	1100
	3. Nokta	1086,4
	4. Nokta	1068,2
	5. Nokta	1036,8
	6. Nokta (yüzey)	1032
Işınımdan 12 saat sonra	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1099,3
	2. Nokta	1090,4
	3. Nokta	1076,3
	4. Nokta	1070,8
	5. Nokta	1038,9
	6. Nokta (yüzey)	1036,5
2. gün Işınım Başlangıcı 29.08.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1098,2
	2. Nokta	1091,9
	3. Nokta	1078,2
	4. Nokta	1071,5
	5. Nokta	1040,5
	6. Nokta (yüzey)	1037
Işınımdan 12 saat sonra	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1097,1
	2. Nokta	1090,3
	3. Nokta	1076,2
	4. Nokta	1070,7
	5. Nokta	1039,6
	6. Nokta (yüzey)	1036,1

3. gün Işınım Başlangıcı 30.08.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1097,8
	2. Nokta	1092
	3. Nokta	1078,5
	4. Nokta	1072
	5. Nokta	1043
	6. Nokta (yüzey)	1037
Işınım 12 saat sonra	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1096,2
	2. Nokta	1091,6
	3. Nokta	1079,2
	4. Nokta	1070
	5. Nokta	1044
	6. Nokta (yüzey)	1036
4. gün Işınım Başlangıcı 31.08.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1095,4
	2. Nokta	1087,8
	3. Nokta	1078
	4. Nokta	1071,5
	5. Nokta	1044
	6. Nokta (yüzey)	1038
Işınım 12 saat sonra	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta	1095
	2. Nokta	1091,2
	3. Nokta	1081,7
	4. Nokta	1072,4
	5. Nokta	1038,5
	6. Nokta (yüzey)	1037,2

Soda-Su Çözeltili Üçüncü Deney
Yoğunluk Ölçüm Değerleri

Havuz Dolum Tarihi : 02.08.2000

Dolumdan 24 saat sonra 03.08.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta (taban)	1124,2
	2. Nokta	1119,9
	3. Nokta	1088
	4. Nokta	1065,1
	5. Nokta	1034
	6. Nokta (yüzey)	1015
Dolumdan 48 saat sonra 04.08.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta (taban)	1119,5
	2. Nokta	1119
	3. Nokta	1080,2
	4. Nokta	1063,7
	5. Nokta	1029
	6. Nokta (yüzey)	1021,5

Dolumdan 72 saat sonra ve 1.gün Işınım Başlangıcı 05.08.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta (taban)	1119,4
	2. Nokta	1110,9
	3. Nokta	1080,4
	4. Nokta	1057,6
	5. Nokta	1028,6
	6. Nokta (yüzey)	1020,8
Işınımdan 12 saat sonra	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta (taban)	1118
	2. Nokta	1106
	3. Nokta	1081,5
	4. Nokta	1059,4
	5. Nokta	1025,4
	6. Nokta (yüzey)	1022,8
2. gün Işınım Başlangıcı 06.08.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta (taban)	1116,2
	2. Nokta	1109,8
	3. Nokta	1079,6
	4. Nokta	1059,3
	5. Nokta	1032
	6. Nokta (yüzey)	1025
Işınımdan 12 saat sonra	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta (taban)	1114,8
	2. Nokta	1108,7
	3. Nokta	1079
	4. Nokta	1056,2
	5. Nokta	1034
	6. Nokta (yüzey)	1032
3. gün Işınım başlangıcı 07.08.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta (taban)	
	2. Nokta	
	3. Nokta	
	4. Nokta	
	5. Nokta	
	6. Nokta (yüzey)	
Işınımdan 12 saat sonra	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta (taban)	
	2. Nokta	
	3. Nokta	
	4. Nokta	
	5. Nokta	
	6. Nokta (yüzey)	
4. Gün Işınım Başlangıcı 08.08.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta (taban)	1118,8
	2. Nokta	1108,9
	3. Nokta	1082,4
	4. Nokta	1061,5
	5. Nokta	1028,8
	6. Nokta (yüzey)	1017

Işınımdan 12 saat sonra	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta (taban)	1112
	2. Nokta	1101,2
	3. Nokta	1079,8
	4. Nokta	1061,2
	5. Nokta	1031
	6. Nokta (yüzey)	1028
5. Gün Işınım Başlangıcı 09.08.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta (taban)	1115,7
	2. Nokta	1103,4
	3. Nokta	1079,8
	4. Nokta	1057,5
	5. Nokta	1035,2
	6. Nokta (yüzey)	1018
Işınımdan 12 saat sonra	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta (taban)	
	2. Nokta	
	3. Nokta	
	4. Nokta	
	5. Nokta	
	6. Nokta (yüzey)	
6. Gün Işınım Başlangıcı 10.08.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta (taban)	1114,8
	2. Nokta	1108,7
	3. Nokta	1079,8
	4. Nokta	1059
	5. Nokta	1035
	6. Nokta (yüzey)	1018,7
Işınımdan 12 saat sonra	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta (taban)	1112,7
	2. Nokta	1107,5
	3. Nokta	1084,8
	4. Nokta	1061,1
	5. Nokta	1034
	6. Nokta (yüzey)	1028
7. Gün Işınım Başlangıcı 11.08.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta (taban)	1117,3
	2. Nokta	1107
	3. Nokta	1078,5
	4. Nokta	1061,5
	5. Nokta	1036
	6. Nokta (yüzey)	1023
Işınımdan 12 saat sonra	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta (taban)	1115,4
	2. Nokta	1102,2
	3. Nokta	1078,8
	4. Nokta	1062,1
	5. Nokta	1032,5
	6. Nokta (yüzey)	1029,7

Soda-Su Çözeltili Dördüncü Deney
Yoğunluk Ölçüm Değerleri

Havuz dolum tarihi : 14.08.2000

Dolumdan 24 saat sonra 15.08.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta (taban)	1154,7
	2. Nokta	1145,3
	3. Nokta	1110,8
	4. Nokta	1077,5
	5. Nokta	1041
	6. Nokta (yüzey)	1025,2
Dolumdan 48 saat sonra 16.08.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta (taban)	1153
	2. Nokta	1149,5
	3. Nokta	1111,5
	4. Nokta	1075
	5. Nokta	1041,5
	6. Nokta (yüzey)	1026
Dolumdan 72 saat sonra 1. gün Işınım başlangıcı 17.08.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta (taban)	1151,7
	2. Nokta	1152
	3. Nokta	1114,8
	4. Nokta	1075,4
	5. Nokta	1041,2
	6. Nokta (yüzey)	1029,7
Işınımdan 12 saat sonra	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta (taban)	1155
	2. Nokta	1151,2
	3. Nokta	1115,4
	4. Nokta	1080
	5. Nokta	1037,3
	6. Nokta (yüzey)	1027
2. gün Işınım Başlangıcı 18.08.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta (taban)	1152,8
	2. Nokta	1148,7
	3. Nokta	1113,6
	4. Nokta	1078,6
	5. Nokta	1041,1
	6. Nokta (yüzey)	1022
Işınımdan 12 saat sonra	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta (taban)	1157
	2. Nokta	1147,2
	3. Nokta	1106,4
	4. Nokta	1078,4
	5. Nokta	1033
	6. Nokta (yüzey)	1032
3. gün Işınım Başlangıcı 19.08.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta (taban)	1154,1
	2. Nokta	1152,6
	3. Nokta	1116,8
	4. Nokta	1076
	5. Nokta	1040,3
	6. Nokta (yüzey)	1029,2

Işınımdan 12 saat sonra	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta (taban)	1153,8
	2. Nokta	1148
	3. Nokta	1112,5
	4. Nokta	1081
	5. Nokta	1038
	6. Nokta (yüzey)	1034
4. Gün Işınım Başlangıcı 20.08.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta (taban)	1152,7
	2. Nokta	1149,5
	3. Nokta	1113,4
	4. Nokta	1079
	5. Nokta	1042,8
	6. Nokta (yüzey)	1035
Işınımdan 12 saat sonra	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta (taban)	1149,5
	2. Nokta	1146,5
	3. Nokta	1108,5
	4. Nokta	1079
	5. Nokta	1040,5
	6. Nokta (yüzey)	1038,5
5. Gün Işınım Başlangıcı 21.08.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta (taban)	1154,5
	2. Nokta	1148,6
	3. Nokta	1112,8
	4. Nokta	1080
	5. Nokta	1038,7
	6. Nokta (yüzey)	1034
Işınımdan 12 saat sonra	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta (taban)	1153,6
	2. Nokta	1147,8
	3. Nokta	1110
	4. Nokta	1074
	5. Nokta	1049
	6. Nokta (yüzey)	1037
6. Gün Işınım Başlangıcı 22.08.2000	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta (taban)	1157,6
	2. Nokta	1145,2
	3. Nokta	1116,2
	4. Nokta	1082,3
	5. Nokta	1049,6
	6. Nokta (yüzey)	1035,2
Işınımdan 12 saat sonra	ÖLÇÜM NOKTALARI	YOĞUNLUK (kg/m ³)
	1. Nokta (taban)	1154,7
	2. Nokta	1143,3
	3. Nokta	1112,8
	4. Nokta	1091,2
	5. Nokta	1052,8
	6. Nokta (yüzey)	1039,5

NaCl-Su Çözeltili Birinci Deney
Sıcaklık Ölçüm Değerleri (°C)

1. Gün Işınım Başlangıcı 01.07.2000	Ölçüm Zamanı	T1 (taban)	T2	T3	T4	T5	T6	T7 (yüzey)	T8	Tortam
	Başlangıç Sıcaklığı	24	24	24	24	24	24	24	26	26
	Işınımdan 2 saat sonra	23	23	23	24	20	24	32	31	27
	Işınımdan 4 saat sonra	24	24	24	19	21	33	33	32	27
	Işınımdan 6 saat sonra	24	25	25	25	27	38	34	32	26
	Işınımdan 8 saat sonra	25	26	26	25	28	40	34	32	25
	Işınımdan 10 saat sonra	26	26	27	25	30	43	35	32	25
	Işınımdan 12 saat sonra	27	27	28	24	30	43	34	32	27
2. Gün Işınım Başlangıcı 02.07.2000	Ölçüm Zamanı	T1 (taban)	T2	T3	T4	T5	T6	T7 (yüzey)	T8	Tortam
	Başlangıç Sıcaklığı	29	29	30	32	34	31	28	26	26
	Işınımdan 2 saat sonra	29	29	30	26	27	36	32	30	27
	Işınımdan 4 saat sonra	29	29	31	29	30	39	34	32	27
	Işınımdan 6 saat sonra	30	31	32	33	35	40	35	32	28
	Işınımdan 8 saat sonra	31	32	32	33	36	41	35	33	28
	Işınımdan 10 saat sonra	32	33	34	36	39	42	36	33	29
	Işınımdan 12 saat sonra	33	34	35	37	40	43	36	33	29
3. Gün Işınım Başlangıcı 03.07.2000	Ölçüm Zamanı	T1 (taban)	T2	T3	T4	T5	T6	T7 (yüzey)	T8	Tortam
	Başlangıç Sıcaklığı	35	35	37	38	37	31	30	28	27
	Işınımdan 2 saat sonra	34	35	36	36	34	37	34	30	28
	Işınımdan 4 saat sonra	35	36	37	39	37	40	35	31	29
	Işınımdan 6 saat sonra	36	37	37	39	41	41	35	31	29
	Işınımdan 8 saat sonra	39	39	40	42	46	43	35	32	29
	Işınımdan 10 saat sonra	38	39	39	42	45	42	36	31	29
	Işınımdan 12 saat sonra	39	40	40	43	44	43	36	32	29
4. Gün Işınım Başlangıcı 04.07.2000	Ölçüm Zamanı	T1 (taban)	T2	T3	T4	T5	T6	T7 (yüzey)	T8	Tortam
	Başlangıç Sıcaklığı	38	38	39	39	38	32	29	27	26
	Işınımdan 2 saat sonra	37	38	38	39	35	37	33	31	28
	Işınımdan 4 saat sonra	38	39	39	39	40	40	35	31	29
	Işınımdan 6 saat sonra	39	40	40	41	43	42	35	32	29
	Işınımdan 8 saat sonra	39	40	40	42	44	43	35	32	29
	Işınımdan 10 saat sonra	40	41	41	43	45	43	35	31	28
	Işınımdan 12 saat sonra	41	42	42	43	46	44	36	32	28
Işınımsız Durum	Işınımsız 4 saat sonra	42	43	43	44	44	36	34	29	27
	Işınımsız 7 saat sonra	41	41	41	42	40	32	30	28	26
5. Gün Işınım Başlangıcı 05.07.2000	Ölçüm Zamanı	T1 (taban)	T2	T3	T4	T5	T6	T7 (yüzey)	T8	Tortam
	Başlangıç Sıcaklığı	41	41	41	41	39	32	28	27	26
	Işınımdan 2 saat sonra	39	40	40	40	38	38	34	31	27
	Işınımdan 4 saat sonra	39	40	40	40	39	40	35	32	28
	Işınımdan 6 saat sonra	41	41	41	42	42	42	34	32	29
	Işınımdan 8 saat sonra	41	41	41	42	43	43	35	32	29
	Işınımdan 10 saat sonra	41	42	42	43	45	44	35	32	29
	Işınımdan 12 saat sonra	41	42	43	44	46	44	35	32	29
Işınımsız Durum	Işınımsız 1 saat sonra	44	45	45	46	48	46	33	32	28
	Işınımsız 2 saat sonra	43	44	44	45	46	44	32	30	27

6. Gün Işınım Başlangıcı 06.07.2000	Ölçüm Zamanı	T1 (taban)	T2	T3	T4	T5	T6	T7 (yüzey)	T8	Tortam
	Başlangıç Sıcaklığı	41	41	41	41	40	34	29	28	26
	Işınımdan 2 saat sonra	41	42	42	43	42	40	33	31	29
	Işınımdan 4 saat sonra	41	41	41	42	42	40	34	33	29
	Işınımdan 6 saat sonra	41	41	41	42	45	42	35	32	29
	Işınımdan 8 saat sonra	41	42	42	43	44	43	36	33	29
	Işınımdan 10 saat sonra	42	42	42	44	45	43	36	33	29
	Işınımdan 12 saat sonra	42	43	43	44	46	44	35	33	29
Işınımsız Durum	Işınımsız 7 saat sonra	43	44	44	44	41	33	29	29	27
7. Gün Işınım Başlangıcı 07.07.2000	Ölçüm Zamanı	T1 (taban)	T2	T3	T4	T5	T6	T7 (yüzey)	T8	Tortam
	Başlangıç Sıcaklığı	42	43	43	44	40	32	28	28	27
	Işınımdan 2 saat sonra	43	43	43	43	41	39	33	32	28
	Işınımdan 4 saat sonra	42	42	42	42	41	41	34	33	28
	Işınımdan 6 saat sonra	42	43	42	42	42	42	34	32	28
	Işınımdan 8 saat sonra	43	44	43	43	44	43	35	32	28
	Işınımdan 10 saat sonra	43	44	43	44	45	43	35	33	28
	Işınımdan 12 saat sonra	44	45	45	45	47	44	36	33	28
Işınımsız Durum	Işınımsız 6 saat sonra	44	44	44	44	43	34	28	28	27
8. Gün Işınım Başlangıcı 08.07.2000	Ölçüm Zamanı	T1 (taban)	T2	T3	T4	T5	T6	T7 (yüzey)	T8	Tortam
	Başlangıç Sıcaklığı	43	43	43	43	41	31	27	27	26
	Işınımdan 1 saat sonra	41	42	42	42	39	36	30	30	27
	Işınımdan 2 saat sonra	42	42	42	42	40	39	32	32	27
	Işınımdan 4 saat sonra	42	43	43	43	41	40	33	33	28
	Işınımdan 6 saat sonra	43	44	43	44	43	41	33	33	28
	Işınımdan 8 saat sonra	43	44	43	44	45	42	34	33	28
	Işınımdan 10 saat sonra	44	44	44	45	45	43	35	33	28
	Işınımdan 12 saat sonra	45	45	45	46	46	44	35	32	28
Işınımsız Durum 09.07.2000	Işınımsız 2 saat sonra	45	45	45	46	45	43	34	31	27
	Işınımsız 8 saat sonra	44	44	44	45	43	33	32	28	26
	Işınımsız 12 saat sonra	43	43	43	44	38	30	29	27	26

NaCl-Su Çözeltili İkinci Deney
Sıcaklık Ölçüm Değerleri (°C)

1. Gün Işınım Başlangıcı 15.07.2000	Ölçüm Zamanı	T1 (taban)	T2	T3	T4	T5	T6	T7 (yüzey)	T8	Tortam
	İlk Sıcaklık	25	25	25	25	25	25	25	25	25
	Işınımdan 2 saat sonra	25	25	25	25	25	29	34	30	27
	Işınımdan 4 saat sonra	26	26	26	26	28	33	35	31	27
	Işınımdan 6 saat sonra	26	27	27	27	30	35	35	30	27
	Işınımdan 8 saat sonra	27	28	28	29	32	36	35	30	27
	Işınımdan 10 saat sonra	28	29	28	29	32	37	35	30	27
	Işınımdan 12 saat sonra	29	30	29	30	33	38	35	30	27
2. Gün Işınım Başlangıcı 16.07.2000	Ölçüm Zamanı	T1 (taban)	T2	T3	T4	T5	T6	T7 (yüzey)	T8	Tortam
	Başlangıç Sıcaklığı	29	29	30	31	33	32	28	26	25
	Işınımdan 2 saat sonra	27	28	29	30	32	34	34	30	27
	Işınımdan 4 saat sonra	29	29	30	31	33	39	35	30	28
	Işınımdan 6 saat sonra	30	31	31	32	35	37	35	29	28
	Işınımdan 8 saat sonra	31	32	32	33	37	40	36	31	28
	Işınımdan 10 saat sonra	31	32	33	35	38	41	36	31	28
	Işınımdan 12 saat sonra	32	33	34	36	39	41	36	31	28
3. Gün Işınım Başlangıcı 17.07.2000	Ölçüm Zamanı	T1 (taban)	T2	T3	T4	T5	T6	T7 (yüzey)	T8	Tortam
	Başlangıç Sıcaklığı	34	34	35	35	34	32	28	27	26
	Işınımdan 2 saat sonra	34	34	35	36	37	39	35	30	29
	Işınımdan 4 saat sonra	35	35	36	37	38	41	36	30	29
	Işınımdan 6 saat sonra	35	36	36	38	39	42	35	31	29
	Işınımdan 8 saat sonra	36	37	37	39	41	42	36	31	29
	Işınımdan 10 saat sonra	36	37	38	39	41	43	36	30	29
	Işınımdan 12 saat sonra	37	38	38	40	41	42	36	30	29
4. Gün Işınım Başlangıcı 18.07.2000	Ölçüm Zamanı	T1 (taban)	T2	T3	T4	T5	T6	T7 (yüzey)	T8	Tortam
	Başlangıç Sıcaklığı	37	37	38	39	38	34	29	28	27
	Işınımdan 2 saat sonra	35	36	36	38	37	36	35	31	28
	Işınımdan 4 saat sonra	36	37	37	37	37	39	36	31	29
	Işınımdan 6 saat sonra	36	37	37	38	39	38	36	31	29
	Işınımdan 8 saat sonra	37	38	38	39	41	40	36	31	29
	Işınımdan 10 saat sonra	38	39	39	40	42	42	35	31	30
	Işınımdan 12 saat sonra	39	40	40	42	44	42	36	31	29
5. Gün Işınım Başlangıcı 19.07.2000	Ölçüm Zamanı	T1 (taban)	T2	T3	T4	T5	T6	T7 (yüzey)	T8	Tortam
	Başlangıç Sıcaklığı	39	39	39	40	39	34	30	28	27
	Işınımdan 2 saat sonra	37	38	38	40	40	43	35	30	28
	Işınımdan 4 saat sonra	38	39	39	40	40	42	36	32	28
	Işınımdan 6 saat sonra	39	39	39	40	42	44	36	31	29
	Işınımdan 8 saat sonra	39	40	40	41	43	43	36	31	29
	Işınımdan 10 saat sonra	40	40	40	42	43	43	36	30	28
	Işınımdan 12 saat sonra	40	41	41	42	44	43	35	30	28
6. Gün Işınım Başlangıcı 20.07.2000	Ölçüm Zamanı	T1 (taban)	T2	T3	T4	T5	T6	T7 (yüzey)	T8	Tortam
	Başlangıç Sıcaklığı	40	40	41	41	41	36	30	28	27
	Işınımdan 2 saat sonra	38	38	38	39	38	38	35	30	28
	Işınımdan 4 saat sonra	40	40	40	41	41	42	36	31	29
	Işınımdan 6 saat sonra	41	42	41	42	43	44	36	30	28
	Işınımdan 8 saat sonra	41	42	41	42	43	43	35	30	28
	Işınımdan 10 saat sonra	42	42	42	43	44	43	35	30	29
	Işınımdan 12 saat sonra	42	43	43	45	46	43	35	31	29

7. Gün Işınım Başlangıcı 21.07.2000	Ölçüm Zamanı	T1 (taban)	T2	T3	T4	T5	T6	T7 (yüzey)	T8	Tortam
	Başlangıç Sıcaklığı	43	43	43	43	40	33	30	28	27
	Işınımdan 2 saat sonra	41	41	41	42	40	38	34	30	29
	Işınımdan 4 saat sonra	41	41	41	42	41	41	34	31	29
	Işınımdan 6 saat sonra	41	42	42	42	42	42	35	32	29
	Işınımdan 8 saat sonra	42	43	43	43	44	41	36	31	29
	Işınımdan 10 saat sonra	42	43	43	43	44	41	35	30	29
	Işınımdan 12 saat sonra	44	45	44	44	44	42	35	30	29
8. Gün Işınım Başlangıcı 22.07.2000	Ölçüm Zamanı	T1 (taban)	T2	T3	T4	T5	T6	T7 (yüzey)	T8	Tortam
	Başlangıç Sıcaklığı	44	44	44	44	42	36	31	29	28
	Işınımdan 2 saat sonra	42	43	43	43	42	40	35	32	29
	Işınımdan 4 saat sonra	43	43	43	43	42	41	35	32	29
	Işınımdan 6 saat sonra	43	43	43	43	43	44	34	31	30
	Işınımdan 8 saat sonra	44	44	44	44	45	43	34	31	29
	Işınımdan 10 saat sonra	44	45	44	45	45	42	34	31	29
	Işınımdan 12 saat sonra	44	45	45	46	46	43	34	31	29
9. Gün Işınım Başlangıcı 23.07.2000	Ölçüm Zamanı	T1 (taban)	T2	T3	T4	T5	T6	T7 (yüzey)	T8	Tortam
	Başlangıç Sıcaklığı	44	44	45	45	42	33	32	28	27
	Işınımdan 2 saat sonra	43	44	43	44	43	39	34	31	28
	Işınımdan 4 saat sonra	43	44	43	43	43	42	35	31	28
	Işınımdan 6 saat sonra	44	45	45	46	44	43	35	31	28
	Işınımdan 8 saat sonra	44	45	45	46	44	43	35	31	28
	Işınımdan 10 saat sonra	44	45	46	47	45	42	34	30	27
	Işınımdan 12 saat sonra	45	46	46	47	45	42	34	30	27

Deney Bittikten Sonra Soğuma Periyodundaki Sıcaklık Değerleri

10. Gün Işınımsız Durum 24.07.2000	Ölçüm Zamanı	T1 (taban)	T2	T3	T4	T5	T6	T7 (yüzey)	T8	Tortam
	12 saat sonra	42	42	43	42	38	33	31	26	25
	15 saat sonra	42	42	42	42	37	32	29	26	25
	20 saat sonra	41	41	41	41	35	30	28	27	25
	24 saat sonra	40	40	40	40	33	29	26	26	25
	30 saat sonra	38	38	37	37	32	28	26	25	24
	36 saat sonra	36	36	35	33	31	28	26	24	24
	44 saat sonra	33	33	32	31	28	26	24	24	24
	48 saat sonra	32	32	31	30	28	26	24	23	23
	60 saat sonra	30	30	30	29	26	23	23	23	23
	72 saat sonra	28	28	28	27	25	23	23	23	23

Soda-Su Çözeltili Birinci Deney
Sıcaklık Ölçüm Değerleri (°C)

1. Gün Işınım Başlangıcı 30.07.2000	Ölçüm Zamanı	T1 (taban)	T2	T3	T4	T5	T6	T7 (yüzey)	T8	Tortam
	İlk Sıcaklık	25	25	25	25	25	25	25	25	25
	Işınımdan 2 saat sonra	25	25	25	25	26	29	32	30	28
	Işınımdan 4 saat sonra	25	25	25	26	27	30	32	30	28
	Işınımdan 6 saat sonra	25	25	25	26	28	32	33	31	29
	Işınımdan 8 saat sonra	26	26	26	28	30	33	33	31	29
	Işınımdan 10 saat sonra	27	27	27	29	31	34	34	31	29
	Işınımdan 12 saat sonra	27	27	28	30	32	34	34	30	29
2. Gün Işınım Başlangıcı 31.07.2000	Ölçüm Zamanı	T1 (taban)	T2	T3	T4	T5	T6	T7 (yüzey)	T8	Tortam
	Başlangıç Sıcaklığı	26	27	27	29	30	32	29	28	27
	Işınımdan 2 saat sonra	28	28	30	31	32	34	33	29	28
	Işınımdan 4 saat sonra	29	29	30	32	34	35	35	30	29
	Işınımdan 6 saat sonra	30	30	30	33	35	35	35	30	29
	Işınımdan 8 saat sonra	30	30	31	33	35	35	35	31	30
	Işınımdan 10 saat sonra	31	31	31	35	36	36	35	31	30
	Işınımdan 12 saat sonra	31	31	32	36	37	36	35	32	30
3. Gün Işınım Başlangıcı 01.08.2000	Ölçüm Zamanı	T1 (taban)	T2	T3	T4	T5	T6	T7 (yüzey)	T8	Tortam
	Başlangıç Sıcaklığı	28	28	29	30	31	31	29	28	27
	Işınımdan 2 saat sonra	29	30	30	32	34	34	33	30	28
	Işınımdan 4 saat sonra	30	31	31	33	35	35	35	30	29
	Işınımdan 6 saat sonra	31	31	32	34	35	36	35	31	29
	Işınımdan 8 saat sonra	31	32	32	34	36	37	36	32	30
	Işınımdan 10 saat sonra	32	32	33	35	37	37	36	32	30
	Işınımdan 12 saat sonra	32	33	33	35	37	37	36	32	30

Deney Bittikten Sonra Soğuma Periyodundaki Sıcaklık Değerleri

Işınımsız Durum	Ölçüm Zamanı	T1 (taban)	T2	T3	T4	T5	T6	T7 (yüzey)	T8	Tortam
	12 saat sonra	29	29	29	30	32	32	30	29	27

Soda-Su Çözeltili İkinci Deney
Sıcaklık Ölçüm Değerleri (°C)

1. Gün Işınım Başlangıcı 28.08.2000	Ölçüm Zamanı	T1 (taban)	T2	T3	T4	T5	T6	T7 (yüzey)	T8	Tortam
	İlk Sıcaklık	26	26	26	26	26	26	26	24	24
	Işınımdan 2 saat sonra	26	26	26	26	26	30	32	27	26
	Işınımdan 4 saat sonra	27	27	27	27	28	32	32	27	26
	Işınımdan 6 saat sonra	27	27	28	28	30	32	32	27	26
	Işınımdan 8 saat sonra	28	28	29	29	31	32	33	27	26
	Işınımdan 10 saat sonra	29	29	30	30	32	33	33	26	25
	Işınımdan 12 saat sonra	30	30	30	31	33	33	33	26	25
2. Gün Işınım Başlangıcı 29.08.2000	Ölçüm Zamanı	T1 (taban)	T2	T3	T4	T5	T6	T7 (yüzey)	T8	Tortam
	Başlangıç Sıcaklığı	30	30	30	30	30	27	26	24	23
	Işınımdan 2 saat sonra	29	29	30	30	30	32	32	28	25
	Işınımdan 4 saat sonra	29	29	30	30	31	33	33	28	25
	Işınımdan 6 saat sonra	30	30	30	31	32	33	33	29	25
	Işınımdan 8 saat sonra	31	31	31	32	33	33	33	29	26
	Işınımdan 10 saat sonra	31	31	31	33	33	33	33	29	26
	Işınımdan 12 saat sonra	32	32	32	33	33	33	33	29	26
3. Gün Işınım Başlangıcı 30.08.2000	Ölçüm Zamanı	T1 (taban)	T2	T3	T4	T5	T6	T7 (yüzey)	T8	Tortam
	Başlangıç Sıcaklığı	31	31	31	30	29	25	25	24	23
	Işınımdan 2 saat sonra	31	31	31	31	32	32	32	28	25
	Işınımdan 4 saat sonra	31	31	31	32	33	33	32	28	25
	Işınımdan 6 saat sonra	32	32	32	33	33	33	32	29	26
	Işınımdan 8 saat sonra	32	32	33	34	34	34	33	29	27
	Işınımdan 10 saat sonra	33	33	34	35	35	35	33	31	28
	Işınımdan 12 saat sonra	34	34	35	36	36	36	34	32	28
4. Gün Işınım Başlangıcı 31.08.2000	Ölçüm Zamanı	T1 (taban)	T2	T3	T4	T5	T6	T7 (yüzey)	T8	Tortam
	Başlangıç Sıcaklığı	32	32	32	31	30	29	28	27	25
	Işınımdan 2 saat sonra	32	32	32	32	33	33	32	28	25
	Işınımdan 4 saat sonra	33	33	33	34	34	34	33	29	26
	Işınımdan 6 saat sonra	33	33	33	34	35	35	33	29	26
	Işınımdan 8 saat sonra	34	34	34	35	35	35	33	29	27
	Işınımdan 10 saat sonra	34	34	35	36	36	36	34	30	27
	Işınımdan 12 saat sonra	35	35	35	36	36	36	34	30	27

Deney Bittikten Sonra Soğuma Periyodundaki Sıcaklık Değerleri

5. Gün Işınımsız Durum 01.09.2000	Ölçüm Zamanı	T1 (taban)	T2	T3	T4	T5	T6	T7 (yüzey)	T8	Tortam
	12 saat sonra	33	33	33	34	31	29	27	25	22
	24 saat sonra	30	30	29	28	27	24	23	22	22
	36 saat sonra	28	28	27	26	26	23	22	22	22
	48 saat sonra	27	27	25	24	24	22	22	22	22
	60 saat sonra	25	25	24	23	23	22	22	22	22

Soda-Su Çözeltili Üçüncü Deney
Sıcaklık Ölçüm Değerleri (°C)

1. Gün Işınım Başlangıcı 05.08.2000	Ölçüm Zamanı	T1 (taban)	T2	T3	T4	T5	T6	T7 (yüzey)	T8	Tortam
	İlk Sıcaklık	23	23	23	23	23	23	23	26	26
	Işınımdan 2 saat sonra	22	22	22	22	23	26	32	30	27
	Işınımdan 4 saat sonra	22	22	22	23	24	29	30	31	28
	Işınımdan 6 saat sonra	23	24	23	24	27	32	30	31	28
	Işınımdan 8 saat sonra	24	25	24	25	28	33	31	31	28
	Işınımdan 10 saat sonra	25	25	26	27	29	34	32	31	28
	Işınımdan 12 saat sonra	26	26	27	28	31	35	32	31	28
2. Gün Işınım Başlangıcı 06.08.2000	Ölçüm Zamanı	T1 (taban)	T2	T3	T4	T5	T6	T7 (yüzey)	T8	Tortam
	Başlangıç Sıcaklığı	27	27	28	29	30	28	27	27	27
	Işınımdan 2 saat sonra	26	26	27	28	29	31	32	31	28
	Işınımdan 4 saat sonra	27	28	28	30	32	35	33	32	29
	Işınımdan 6 saat sonra	27	28	28	30	32	35	33	32	29
	Işınımdan 8 saat sonra	28	29	29	31	34	33	33	32	29
	Işınımdan 10 saat sonra	29	29	30	32	35	36	33	32	29
	Işınımdan 12 saat sonra	30	30	31	33	35	35	33	29	29
3. Gün Işınım Başlangıcı 07.08.2000	Ölçüm Zamanı	T1 (taban)	T2	T3	T4	T5	T6	T7 (yüzey)	T8	Tortam
	Başlangıç Sıcaklığı	31	31	32	36	34	33	29	27	27
	Işınımdan 2 saat sonra	31	31	32	34	36	35	31	32	29
	Işınımdan 4 saat sonra	31	32	33	35	36	35	31	32	29
	Işınımdan 6 saat sonra	31	32	33	35	36	36	32	31	29
	Işınımdan 8 saat sonra	32	32	33	34	36	32	32	29	29
	Işınımdan 10 saat sonra	32	33	33	35	37	32	33	30	29
	Işınımdan 12 saat sonra	33	33	34	35	37	32	32	30	29
4. Gün Işınım Başlangıcı 08.08.2000	Ölçüm Zamanı	T1 (taban)	T2	T3	T4	T5	T6	T7 (yüzey)	T8	Tortam
	Başlangıç Sıcaklığı	34	34	35	36	35	30	30	28	27
	Işınımdan 2 saat sonra	32	33	34	35	34	31	32	31	29
	Işınımdan 4 saat sonra	34	34	34	35	36	34	32	31	29
	Işınımdan 6 saat sonra	34	35	35	37	38	36	32	31	29
	Işınımdan 8 saat sonra	35	35	36	37	38	36	32	30	30
	Işınımdan 10 saat sonra	35	36	36	37	38	35	32	31	29
	Işınımdan 12 saat sonra	36	36	37	38	38	32	32	30	30
5. Gün Işınım Başlangıcı 09.08.2000	Ölçüm Zamanı	T1 (taban)	T2	T3	T4	T5	T6	T7 (yüzey)	T8	Tortam
	Başlangıç Sıcaklığı	37	38	38	39	37	30	29	28	27
	Işınımdan 2 saat sonra	36	37	37	38	38	34	33	30	29
	Işınımdan 4 saat sonra	36	37	37	39	39	34	33	29	29
	Işınımdan 6 saat sonra	37	37	38	39	38	34	33	30	29
	Işınımdan 8 saat sonra	37	38	38	39	35	34	33	30	29
	Işınımdan 10 saat sonra	38	38	38	39	36	34	33	31	30
	Işınımdan 12 saat sonra	38	38	39	39	39	33	33	31	30
6. Gün Işınım Başlangıcı 10.08.2000	Ölçüm Zamanı	T1 (taban)	T2	T3	T4	T5	T6	T7 (yüzey)	T8	Tortam
	Başlangıç Sıcaklığı	39	40	40	38	35	31	29	28	27
	Işınımdan 2 saat sonra	38	39	39	40	40	33	32	30	29
	Işınımdan 4 saat sonra	39	39	40	40	40	34	33	31	30
	Işınımdan 6 saat sonra	39	40	40	41	41	34	33	31	30
	Işınımdan 8 saat sonra	39	40	40	41	41	33	32	31	30
	Işınımdan 10 saat sonra	40	40	41	42	41	34	32	31	30
	Işınımdan 12 saat sonra	40	40	41	42	42	34	32	31	30

7. Gün Işınım Başlangıcı 11.08.2000	Ölçüm Zamanı	T1 (taban)	T2	T3	T4	T5	T6	T7 (yüzey)	T8	Tortam
	Başlangıç Sıcaklığı	40	40	41	41	37	31	30	29	28
	Işınımdan 2 saat sonra	38	39	39	39	37	33	32	31	29
	Işınımdan 4 saat sonra	39	39	40	40	38	35	33	32	30
	Işınımdan 6 saat sonra	39	40	40	40	40	35	33	32	30
	Işınımdan 8 saat sonra	40	40	41	41	40	35	33	32	30
	Işınımdan 10 saat sonra	40	40	41	41	40	35	33	32	30
	Işınımdan 12 saat sonra	41	41	42	42	40	35	33	32	30

Deney Bittikten Sonra Soğuma Periyodundaki Sıcaklık Değerleri

8. Gün Işınımsız Durum 12.08.2000	Ölçüm Zamanı	T1 (taban)	T2	T3	T4	T5	T6	T7 (yüzey)	T8	Tortam
	4 saat sonra	42	42	43	42	40	34	31	30	29
	12 saat sonra	40	40	40	39	35	30	30	29	28
	16 saat sonra	39	39	40	38	34	30	30	29	28
	20 saat sonra	39	39	39	37	33	30	29	29	27
	24 saat sonra	38	38	38	36	33	29	28	28	27
	36 saat sonra	36	36	36	33	30	28	28	27	26

Soda-Su Çözeltili Dördüncü Deney Sıcaklık Ölçüm Değerleri (°C)

1. Gün Işınım Başlangıcı 17.08.2000	Ölçüm Zamanı	T1 (taban)	T2	T3	T4	T5	T6	T7 (yüzey)	T8	Tortam
	İlk Sıcaklık	26	26	26	26	26	26	26	26	26
	Işınımdan 2 saat sonra	27	27	27	27	27	29	32	31	29
	Işınımdan 4 saat sonra	27	27	28	28	28	29	31	30	29
	Işınımdan 6 saat sonra	28	28	28	29	29	29	31	31	29
	Işınımdan 8 saat sonra	28	29	29	30	31	30	31	30	28
	Işınımdan 10 saat sonra	29	30	30	30	32	30	31	29	28
	Işınımdan 12 saat sonra	30	31	31	32	34	31	32	30	29
2. Gün Işınım Başlangıcı 18.08.2000	Ölçüm Zamanı	T1 (taban)	T2	T3	T4	T5	T6	T7 (yüzey)	T8	Tortam
	Başlangıç Sıcaklığı	31	32	32	33	34	29	27	27	26
	Işınımdan 2 saat sonra	29	30	31	31	32	31	31	30	29
	Işınımdan 4 saat sonra	30	31	31	32	34	35	32	30	29
	Işınımdan 6 saat sonra	30	31	31	32	34	35	32	30	29
	Işınımdan 8 saat sonra	31	32	32	33	35	34	32	31	29
	Işınımdan 10 saat sonra	32	33	33	34	36	35	31	30	29
	Işınımdan 12 saat sonra	33	34	34	35	38	36	32	31	29
3. Gün Işınım Başlangıcı 19.08.2000	Ölçüm Zamanı	T1 (taban)	T2	T3	T4	T5	T6	T7 (yüzey)	T8	Tortam
	Başlangıç Sıcaklığı	34	34	34	36	36	33	30	28	27
	Işınımdan 2 saat sonra	34	35	35	36	38	36	32	31	29
	Işınımdan 4 saat sonra	34	35	36	37	38	35	32	31	29
	Işınımdan 6 saat sonra	35	35	36	37	38	35	32	31	29
	Işınımdan 8 saat sonra	35	36	36	37	38	36	33	31	29
	Işınımdan 10 saat sonra	35	36	37	38	38	36	32	31	30
	Işınımdan 12 saat sonra	36	37	38	39	39	36	32	31	30

4. Gün Işınım Başlangıcı 20.08.2000	Ölçüm Zamanı	T1 (taban)	T2	T3	T4	T5	T6	T7 (yüzey)	T8	Tortam
	Başlangıç Sıcaklığı	36	36	37	36	36	31	29	27	27
	Işınım 2 saat sonra	36	37	37	37	38	34	31	30	29
	Işınım 4 saat sonra	37	38	38	39	40	36	32	31	30
	Işınım 6 saat sonra	37	38	38	39	40	36	32	31	30
	Işınım 8 saat sonra	38	39	39	40	41	36	33	32	30
	Işınım 10 saat sonra	38	39	40	40	41	36	33	32	30
	Işınım 12 saat sonra	39	39	40	41	41	36	33	32	30
5. Gün Işınım Başlangıcı 21.08.2000	Ölçüm Zamanı	T1 (taban)	T2	T3	T4	T5	T6	T7 (yüzey)	T8	Tortam
	Başlangıç Sıcaklığı	39	39	40	40	39	31	29	28	27
	Işınım 2 saat sonra	37	38	38	39	37	34	31	30	29
	Işınım 4 saat sonra	37	38	39	39	38	35	31	30	29
	Işınım 6 saat sonra	38	39	39	40	39	35	32	30	29
	Işınım 8 saat sonra	38	39	40	40	40	35	32	31	29
	Işınım 10 saat sonra	39	40	41	41	41	34	32	31	30
	Işınım 12 saat sonra	40	41	41	41	41	34	32	31	30
6. Gün Işınım Başlangıcı 22.08.2000	Ölçüm Zamanı	T1 (taban)	T2	T3	T4	T5	T6	T7 (yüzey)	T8	Tortam
	Başlangıç Sıcaklığı	40	40	41	41	39	32	29	28	27
	Işınım 2 saat sonra	39	39	40	40	38	36	31	30	29
	Işınım 4 saat sonra	39	39	40	40	39	36	33	31	29
	Işınım 6 saat sonra	40	40	41	41	41	37	33	32	30
	Işınım 8 saat sonra	40	41	41	41	40	35	32	31	29
	Işınım 10 saat sonra	41	41	42	42	41	34	33	31	29
	Işınım 12 saat sonra	42	42	43	43	41	34	32	31	29
7. Gün Işınım Başlangıcı 23.08.2000	Ölçüm Zamanı	T1 (taban)	T2	T3	T4	T5	T6	T7 (yüzey)	T8	Tortam
	Başlangıç Sıcaklığı	41	41	41	41	39	30	28	27	27
	Işınım 2 saat sonra	40	40	40	40	38	35	32	29	28
	Işınım 4 saat sonra	40	40	41	41	40	36	32	30	29
	Işınım 6 saat sonra	41	41	41	41	40	36	32	30	29
	Işınım 8 saat sonra	42	42	42	43	40	36	32	31	30
	Işınım 10 saat sonra	42	43	43	43	41	36	32	31	30
	Işınım 12 saat sonra	43	43	44	44	42	36	32	31	30

Deney Bittikten Sonra Soğuma Periyodundaki Sıcaklık Değerleri

8. Gün Işınımsız Durum 24.08.2000	Ölçüm Zamanı	T1 (taban)	T2	T3	T4	T5	T6	T7 (yüzey)	T8	Tortam
	12 saat sonra	41	42	42	42	40	35	31	29	27
	24 saat sonra	39	40	41	40	38	33	29	28	26
	36 saat sonra	38	39	39	39	37	31	29	27	26

ÖZGEÇMİŞ

Hüseyin KURT, 1971 yılında Mersin'in Silifke İlçesi Esenbel Köyü'nde doğdu. İlk ve ortaöğrenimini doğum yeri olan köyünde tamamladıktan sonra, Silifke Endüstri Meslek Lisesi Elektrik Bölümüne devam etti. 1988 yılında aynı okuldan elektrik teknisyeni olarak mezun oldu. Aynı yıl üniversite sınavlarında Gaziantep Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümünü kazandı. Bir yıl İngilizce hazırlık okuduktan sonra, Haziran-1994'de makina mühendisi olarak mezun oldu ve Şubat-1995'de Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisansa başladı. Bu arada Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Karabük Teknik Eğitim Fakültesinde açılan araştırma görevlisi sınavını kazanarak, Makina Eğitimi Bölümü Enerji Eğitimi Anabilim Dalında araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. Şubat-1997'de yüksek lisansını bitirerek, makina yüksek mühendisi unvanını aldı. Yine aynı üniversitede, yüksek lisansını müteakiben aynı anabilim dalında doktora başladı. Doktora derslerini aldıktan sonra, Eylül-1998'de Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüne yatay geçiş yaparak doktora tezine burada devam etti. Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Karabük Teknik Eğitim Fakültesi Makina Eğitimi Bölümünde araştırma görevlisi olarak çalışmakta iken, 2547 sayılı Yüksek Öğretim Kurulu kanununun 35. maddesine göre, araştırma görevlisi olarak Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsüne kadrosuna naklen atandı. Halen Marmara Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi Makina Eğitimi Bölümünde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.