

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TUZ TABAKALI GÜNEŞ HAVUZLARININ
MATEMATİK MODELLEMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Hüseyin KURT

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜH.

Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ

Bu tez 14/ 01/ 1997 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

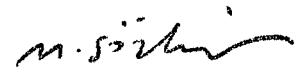

Yrd.Doç.Dr. Fethi HALICI

Jüri Başkanı



Doç.Dr. A.Korhan BİNARK

Jüri Üyesi



Yrd.Doç.Dr. Nedim SÖZBİR

Jüri Üyesi

ÖNSÖZ

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında, alternatiflerine göre bir çok avantaja sahip olan güneş enerjisi gün geçtikçe popüler hale gelmektedir. Fakat bu konuda en önemli sorun, güneş ışınımının iki temel karakteristiği olan düzensizlik ve düşük enerji yoğunluğu nedeniyle toplanması yanında, uzun süre depolama zorunluluğu olmasıdır. Depolama şekline en uygun sistem, şu an güneş havuzları görülmektedir. Bu konu üzerinde, bir çok ülkede değişik amaçlı araştırmalar yapılmış ve halen de yapılmaktadır. Yapmış olduğumuz literatür araştırmasında, ülkemizde bu konuda yeterince çalışma ve araştırma yapılmadığını gördük. Başlangıçta deneysel bir çalışma yapmayı arzulamamıza rağmen, bu konuda yapılacak deneysel çalışmanın uzun bir zaman aralığı ve külfetli bir maddi kaynak gerektirmesi, çalışmanın teorik yöne kaymasına neden olmuştur. Ümit ederim ki, yapılan bu çalışma, bundan sonra bu konuda yapılacak olan çalışmalara faydalı olur.

Yapmış olduğum çalışma esnasında, yüksek lisans tez danışmanlığı kabul ederek bu konuda beni anlayışla karşıladığı için Sayın Yrd. Doç. Dr. Fethi HALICI'ya, yoğun çalışma temposu içerisinde olmasına rağmen tez çalışmamda yardımlarını esirgemeyen I.T.Ü. Makina Fakültesi Öğretim Üyesi Sayın Doç. Dr. A. Korhan BİNARK'a, yapmış olduğu çalışmasından faydalandığım Çukurova Üniversitesi Öğretim Üyesi Sayın Dr. Mehmet KARAKILÇIK'a, yüksek lisans çalışmam süresince gerekli izne müsaade eden ZKÜ. Karabük Teknik Eğitim Fakültesi Dekanı Sayın Prof. Dr. Hasan VURDU'ya, tez yazımı süresince bilgisayar konusunda büyük yardımlarını gördüğüm aynı fakültenin Öğretim Üyesi Sayın Doç. Dr. İbrahim KADI'ya ve ayrıca bu çalışma esnasında görmüş olduğum yardımlarından dolayı burada isimlerini tek tek sayamayacağım Karabük Teknik Eğitim Fakültesi akademik ve idari personeline ayrı ayrı teşekkür ederim. Yine bu günlere gelmeme vesile olan aileme ve hocalarıma maddi ve manevi katkılarından dolayı teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

SİMGELER VE KISALTMALAR	V
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLolar LİSTESİ	VIII
ÖZET	IX
SUMMARY	X
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
1.1.Araştırma Konusunun Tanıtılması	2
1.2.Güneş Havuzları	5
1.2.1.Taşınimsız güneş havuzları	6
1.2.1.1.Tuz tabakalı güneş havuzlarının fiziki yapısı	6
1.2.2.Taşınımlı Güneş Havuzları	11
BÖLÜM 2.	
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	13
2.1.Doğal Güneş Havuzları	13
2.2.Güneş Havuzu Konusunda Ülkemizde Yapılan Çalışmalar	15
2.2.1.Çukurova Üniversitesi'nde yapılan çalışmalar	15
2.2.2.İ.T.Ü.'de yapılan çalışmalar	17
2.2.3.Bu konuda yapılan diğer çalışmalar	18
2.3.Taşınimsız Yapay Güneş Havuzları (İsrail Tipi)	18
2.3.1.İsrail'de yapılan çalışmalar	18
2.3.2.A.B.D.'de yapılan çalışmalar	23
2.3.3.Hindistan'da yapılan çalışmalar	27
2.3.4.Avustralya'da yapılan çalışmalar	30
2.3.5.Japonya'da yapılan çalışmalar	31
2.3.6.Diğer ülkelerde yapılan çalışmalar	32
2.4.Güneş Havuzunun Performansını Arttırmak İçin Yapılan Çalışmalar	35
BÖLÜM 3.	
GÜNEŞ HAVUZLARININ FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ	41
3.1.Güneş Işınımının Güneş Havuzu İçinde Soğurulması	41
3.2.Havuz Yüzeyine Gelen Işınım İlgili Formülasyon	46
3.3.Güneş Havuzunun Isıl Kararsızlığı	47
3.4.Tuz Yoğunluğu Gradyeninin Kararlılık Koşulları	48
3.5.Tuz Yoğunluğu Gradyeninin Korunması	50

3.6.Güneş Havuzu Isı Transferi Analizi	50
3.6.1.İletim yoluyla olan ısı akısı	51
3.6.2.Taşınım yoluyla olan ısı akısı	51
3.6.3.Işınım yoluyla olan ısı akısı	52
3.6.Güneş Havuzunda Meydana Gelen Isı Kayıpları	52
BÖLÜM 4.	
MATERYAL VE METOD	55
4.1.Güneş Havuzu Matematik Modeli	55
4.2.Güneş Havuzu Isı Transferi Matematik Modeli	55
4.3.Analitik Çözüm İçin Değişkenlerin Ayırımı Yöntemi	57
4.4.Geçici Rejimde Isı İletim Denkleminin Analitik Çözümü	60
4.5.Isı İletim Denkleminin Nümerik Çözümü	64
4.5.1.Nümerik çözüm için sonlu farklar metodu	64
4.5.2.Güneş havuzu sıcaklık dağılımının bilgisayar yardımıyla nümerik olarak hesaplanması	68
4.5.3.Sonlu farklar metoduna göre nümerik çözüm işlem basamakları	69
4.6.Güneş Havuzu Kütle Transferi Matematik Modeli	71
4.7.Kütle-Difüzyon Denkleminin Analitik Çözümü	73
4.7.1.Sonlu kalınlıkta havuz modeli için çözüm	74
4.7.2.Yarı sonsuz havuz modeli için çözüm	76
4.8.Kütle Difüzyon Denkleminin Nümerik Çözümü	79
4.9.Referans Alınan Deneysel Çalışma	79
4.9.1.Enerji kaynağı	79
4.9.2.Sıcaklık ölçme düzeni	80
4.9.3.Deneyin yapılışı	80
BÖLÜM 5.	
SONUÇ VE ÖNERİLER	82
KAYNAKLAR	93
EKLER	97
ÖZGEÇMİŞ	104

SİMGELER VE KISALTMALAR

A	Havuz yüzey alanı (m^2), integral sabiti
ATB	Alt taşınımlı bölge
a	Suyun ışınımı yansıtma oranı (%)
B	İntegral sabiti
C	Konsantrasyon ($kg.mol/m^3$)
C(x,t)	Havuz konsantrasyon dağılımı ($kg.mol/m^3$)
C _p	Özgül ısı ($kJ/kg^{\circ}C$)
C _n	İntegral sabiti
D	Çözeltilinin kütle yayılım katsayısı (m^2/s)
h _c	Isı taşınım katsayısı ($W/m^2.^{\circ}C$)
h _e	Buharlaşma gizli ısı (kJ/kg)
I	İşınım şiddeti (W/m^2)
I _o	Havuz yüzeyine gelen ışınım şiddeti (W/m^2)
I _s	Havuz yüzeyinden havuza giren ışınım şiddeti (W/m^2)
I _x	x derinliğine ulaşan ışınım şiddeti (W/m^2)
I(x)	Soğurma fonksiyonu (%)
I(λ,0)	λ dalga boyunda havuz yüzeyine gelen ışınım miktarı (W/m^2)
I(λ,x)	λ dalga boyundaki ışınımın x derinliğine ulaşan miktarı (W/m^2)
J _A	A alanına sahip tabakanın molekül difüzyon akısı ($kg.m^2/s$)
k	Isı iletim katsayısı ($W/m^{\circ}C$)
k _t	Eddy iletim katsayısı ($W/m^{\circ}C$)
L	Tabaka kalınlığı (m)
M	Toplam tabaka sayısı
m	Tabaka sayısı
N	Boyutsuz katsayı
n _d	Gün sayısı
P _{atm}	Atmosfer basıncı (kPa)
P _y	T _y sıcaklığında suyun buhar basıncı (kPa)
P _∞	T _∞ sıcaklığında su buharının kısmi basıncı (kPa)
Q _c	Taşınımla olan ısı kaybı (W/m^2)
Q _e	Buharlaşmayla olan ısı kaybı (W/m^2)
Q _r	İşınım ile olan ısı kaybı (W/m^2)
Q _t	Toplam ısı kaybı (W/m^2)
q	Isı akısı (kJ)
R _h	Bağıl nem oranı (%)
r	Boyutsuz kararlılık kriteri
T	Sıcaklık ($^{\circ}C$)
T(x,t)	Havuz sıcaklık dağılımı ($^{\circ}C$)
T _{sky}	Gökyüzü sıcaklığı ($^{\circ}C$)

T_y	Yüzey sıcaklığı (°C)
T_∞	Ortam sıcaklığı (°C)
TZB	Taşınımatsız ara bölge
TTGH	Tuz tabakalı güneş havuzu
ÜTB	Üst taşınımlı bölge
$V_{rüzgar}$	Rüzgar hızı (m/s)
x_A	Alt taşınımlı bölgenin tabaka kalınlığı (m)
x_T	Taşınımatsız ara bölgenin tabaka kalınlığı (m)
x_U	Üst taşınımlı bölgenin tabaka kalınlığı (m)
x	Havuz derinliği (m)
x'	İşınımın izlediği gerçek uzunluk (m)
W	Güneş saat açısı
w	Taşınım hareketinin düşey doğrultudaki ortalama hızı (m/s)
α	Isıl yayılım katsayısı (m^2/s)
β	Havuz yüzeyinde soğurulan ışınım oranı (%)
δ	Deklinasyon açısı
ϵ_w	Suyun neşretme katsayısı
$\phi(x)$	Boyutsuz fonksiyon
η	Boyutsuz katsayı
λ	Güneş ışınımının dalga boyu (μm), sabit katsayı
μ	Soğurma katsayısı (1/m)
ν	Kinematik viskozite (m^2/s)
ρ	Çözeltinin yoğunluğu (kg/m^3)
σ	Stefan-Boltzman Sabiti (W/m^2K^4)
τ	Havuz giren ışınım miktarı (%)
θ_g	İşınımın geliş açısı
θ_k	İşınımın havuz yüzeyinde kırılma açısı
$\theta(x,t)$	Boyutsuz fonksiyon
$\psi(x)$	Boyutsuz fonksiyon
$\Phi(x,t)$	Boyutsuz fonksiyon
$\Gamma(x)$	Boyutsuz fonksiyon
Δt	Zaman aralığı (s)
Δx	Tabaka Kalınlığı (m)

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1	Tipik bir tuz tabakalı güneş havuzu ve enerji dengesi	4
Şekil 1.2	Tuz tabakalı güneş havuzu yoğunluk ve sıcaklık gradyanları	8
Şekil 1.3	Tuz tabakalı güneş havuzu ve fiziki yapısı	9
Şekil 1.4	Taşınımli güneş havuzlarının fiziki yapısı	11
Şekil 2.1	Jel güneş havuzunun şematik olarak fiziki yapısı	37
Şekil 2.1a	Bal peteği (honeycomb) örtüsünün şematik görünümü	38
Şekil 2.1b	Doğal bir göl üzerine bal peteği örtüsü yerleştirilerek elde edilen bal peteği güneş havuzu (honeycomb solar pond)	38
Şekil 2.3	Tabanı trapezoid şeklinde tepeli güneş havuzunun şematik gösterimi	39
Şekil 3.1	Bir akışkan tabakası içinde güneş ışınımının soğurulması	42
Şekil 3.2	Su içerisinde güneş ışınımının soğurulması için geliştirilen soğurma fonksiyonlarının karşılaştırması	45
Şekil 4.1	Matematik modeli yapılan güneş havuzunun fiziki yapısı	55
Şekil 4.2	Matematik modeli yapılan tuz tabakalı güneş havuzunun tabaka sınırları	58
Şekil 4.3	Isı iletim denkleminin analitik çözümü için oluşturulan sınır şartları	62
Şekil 4.4	Bir boyutlu, zamana bağlı ısı iletim denkleminin sonlu farklar metodu formunda gösterilmesi için konum-zaman kafesi	66
Şekil 4.5	Yoğun bir ortamdaki akışkan tabakasında meydana gelen kütle difüzyonu	72
Şekil 4.6	Matematik modeli yapılan tuz tabakalı güneş havuzunun ilk konsantrasyon dağılımı	74
Şekil 5.1	Analitik çözümden elde edilen bir günlük havuz bölge sıcaklıkları	83
Şekil 5.2	Nümerik çözümden elde edilen bir günlük havuz bölge sıcaklıkları	84
Şekil 5.3	Deneysel çalışmadan elde edilen bir günlük havuz bölge sıcaklıkları	85
Şekil 5.4	Analitik, nümerik ve deneysel sonuçlardan elde edilen bir günlük ÜTB sıcaklığı	86
Şekil 5.5	Analitik, nümerik ve deneysel sonuçlardan elde edilen bir günlük TZB sıcaklığı	87
Şekil 5.6	Analitik, nümerik ve deneysel sonuçlardan elde edilen bir günlük ATB sıcaklığı	88
Şekil 5.7	Analitik, nümerik ve deneysel sonuçlara göre bir günlük havuz sıcaklık dağılımı	89
Şekil 5.8	Analitik ve nümerik çözümden elde edilen havuz konsantrasyon dağılımı	90

TABLolar LİSTESİ

Tablo 4.1	Isı iletim denkleminin analitik çözümlünden elde edilen model güneş havuzu bölge sıcaklıkları	65
Tablo 4.2	Isı iletim denkleminin nümerik çözümlünden elde edilen model güneş havuzu bölge sıcaklıkları	71
Tablo 4.3	Deneyisel çalışmada yapılan ölçümlerden elde edilen havuz sıcaklık değerleri	80



ÖZET

Anahtar Kelimeler : Tuz tabakalı güneş havuzu, matematik model, analitik ve nümerik çözüm

Güneş enerjisi; teknolojinin hızla gelişmesi, çok çeşitli uygulama alanlarının bulunması ve günlük yaşantımıza konut ısıtılmasından elektrik üretimine kadar değişik alanlarda girmesiyle yeni enerji kaynakları arasında popüler hale gelmiştir. Şu anki en önemli sorun, sürekli ve yoğun bir enerji türü olmaması nedeniyle uzun süre depolamayı gerektirmesidir. Bu nedenle, maliyeti düşük ve verimi yüksek toplayıcı ve depolayıcı teknolojinin geliştirilmesine gerek duyulmaktadır.

Günümüzde güneş enerjisinin toplanması ve depolanması bakımından geliştirilmiş sistemler arasında en uygun olanı, yüzeyine gelen güneş enerjisinin % 20-30'unu depolayabilen tuz tabakalı güneş havuzlarıdır. Bu havuzlar, güneş ışınımını toplayan ve topladığı bu ışınımı ısı enerjisi olarak aynı ortamda uzun zaman aralığında depolayabilen bir güneş enerjisi sistemi olması nedeniyle, alternatiflerine göre daha az maliyetli ve daha basit bir sistemdir.

Bu çalışmayı yapmaktaki asıl amaç; İ.T.Ü. Makina Fakültesi çatısında kurulu bulunan 290x190x240 mm. boyutlarındaki güneş havuzunun matematik modelini oluşturmak, elde edilen ısı ve kütle transferi denklemlerinin nümerik ve analitik çözümünü yaparak havuzun sıcaklık ve konsantrasyon profillerini bulmak ve bulunan bu değerleri aynı havuzda daha önceden yapılmış olan deney sonuçlarıyla karşılaştırmaktır.

Matematik modelde, havuzun bir boyutlu, zamana bağlı ısı ve kütle analizi yapılarak, havuzu oluşturan her bölge için ayrı ayrı enerji ve kütle denge denklemleri, oluşturulan başlangıç ve sınır şartlarında analitik ve nümerik olarak çözülmüştür. Analitik çözümde değişkenlerin ayırımı yöntemi, nümerik çözümde ise sonlu farklar metodu kullanılmıştır. Çözümde elde edilen sonuçlar, aynı havuzda daha önceden yapılmış olan deney sonuçlarıyla karşılaştırılarak havuzun sıcaklık ve konsantrasyon profilleri irdelenmiştir. Karşılaştırma sonucunda; sıcaklık profili için çözüm sonuçlarının deney sonuçlarıyla nitelik bakımından uyum içinde olduğu, nicelik bakımından ise farklılıkların olduğu gözlemlendi. Bu farklılıklara, modelin oluşturulmasında ve modelden elde edilen denklemlerin çözümünde yapılan kabullerin neden olduğu sanılmaktadır. Konsantrasyon gradyanı, havuz çözeltisi ile doldurulduktan bir hafta gibi bir süre geçtikten sonra lineer hale gelerek, kararlı taşınım bir ara bölge oluşmaktadır. Havuzda ısı depolayabilmek için, ÜTB ile ATB arasında olması gereken yoğunluk farkının, kütle-difüzyon denkleminin analitik ve nümerik çözümünden NaCl çözeltisi için 230 kg/m^3 civarında olduğu tesbit edilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre, güneş enerjisinin depolanabilmesi için kullanılan güneş havuzları doğru olarak tasarımı olduğu takdirde uzun süreli depolama yapmak mümkün olmaktadır.

Mathematical Modeling of Salt Gradient Solar Pond

SUMMARY

Keywords : Salt gradient solar pond, mathematical model, analytical and numerical solutions.

Storage is one of the most critical problems of almost all solar energy applications due to its intermittent nature. Low storage devices usually amount to a considerable fraction of the total cost of the solar energy transduction systems into some usable form of energy. A realistic solution to the storage problem for low temperature applications is provided by solar ponds. Solar ponds both collect and provide storage of solar radiation in the form of heat. In a solar pond, no distinction exists between the collecting and storage devices. The same bulk of water serves both purposes simultaneously. Among the solar pond type, salt gradient solar pond is the most studied and most common type. In an actual salt gradient solar pond, there are three distinct layers; upper convective zone (UCZ), non-convective zone (NCZ) and lower convective zone (LCZ). The UCZ is the topmost layer of solar pond. It is relatively thin, uniform and consists almost wholly of fresh water. The NCZ is just below the UCZ and has a step salinity gradient which suppresses the existing convective motions in the LCZ. Thus solar ponds both collect and provide storage of solar radiation in the form of heat. The LCZ acts as a seasonal solar storage and it has high uniform salt concentration.

In order to understand how a pond works, mathematical modeling is required. In this study, salt gradient solar pond was constructed for making of an experimental study at the Istanbul Technical University in 1994 and a one-dimensional transient mathematical model for predicting the thermal performance of the pond developed and presented. In the model, the solar pond structure explained as well as heat and mass transfer phenomena. The mathematical model based on one-dimensional unsteady state heat conduction model with an internal heat generation, energy and mass balance equations for the UCZ, NCZ and LCZ, all of which are forming the solar pond, are written in terms of differential equations. These equations are solved analytically and numerically. The temperature profiles of the model pond were obtained for the same dates as the experimental study. The results obtained from that solutions are compared with the experimental results which were performed in that solar pond before-hand. The comparison of the experimental and theoretical temperature profiles shows that they are qualitatively in good agreement. The concentration profile of the model pond was obtained after the one week from the filling up time of the pond and it is quantitatively and qualitatively in good agreement in according to physics of solar pond concentration gradient.

According to obtained results from this study, it is concluded that if the solar pond is constructed in actual and right situation, the solar pond can be an alternative and economic energy storage device in applications.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Dünyada enerji tüketimi, son yıllarda dünya nüfusunun hızlı bir şekilde artmasıyla, hızlı sanayileşme, artan yatırımlar ve teknolojik gelişmelerle birlikte hızla artmaktadır. Enerji ihtiyacının hızla artmasından ve mevcut doğal enerji kaynaklarının sınırlı olmasından dolayı, yakın bir gelecekte bütün dünya ülkelerinde enerji ihtiyacı sorunu insanlığı zor durumda bırakacaktır.

1973'de, dünyada baş gösteren petrol krizinden sonra alışılmış enerji kaynaklarının sağlanmasında çeşitli sorunlarla karşılaşmıştır. Bu nedenle, alışılmamış enerji kaynaklarının araştırılması ve ekonomik olarak kullanılabilir hale getirilmesi konusunda yoğun çalışmalara başlanmıştır. Yeni enerji kaynakları veya alternatif enerji kaynakları veyahut da yenilenebilir enerji kaynakları olarak adlandırılan bu kaynakların başlıcaları; güneş enerjisi, jeotermal enerji, rüzgar enerjisi, biyogaz enerjisi ve tropik bölgelerde okyanuslarda görülen sıcaklık gradyan enerjisidir. Bu enerji kaynaklarının hemen hemen hepsinin ana kaynağı güneştir.

Günümüzde dünya insanının karşılaştığı ve birbiriyle çok sıkı bağımlı olan üç büyük sorun vardır. Bunlar; dünyada mevcut olan kullanılabilir enerji kaynaklarının sınırlı olması ve tükenebilir enerji kaynaklarından özellikle fosil kökenli kaynakların (kömür, petrol, doğal gaz, v.b.) hızla azalması, çevrenin kirlenmesi ve nüfusun artışı olarak sıralanabilir. Bu sorunların temelinde, mevcut enerji kaynaklarının sınırlı ve kısıtlı oluşu önemli bir yer teşkil eder. Enerji kaynaklarının kısıtlı ve sınırlı olması, dünya devletleri arasında zaman zaman ekonomik ve politik spekülasyonlara neden olmuş ve hala da olmaktadır. Kuveyt-İrak savaşında, tüm dünya devletleri ile birlikte Irak'a karşı askeri müdahalede bulunan A.B.D., 21. yüzyıla girerken Avrupa'nın ortasında tarihin yüzkarası ve korkunç katliamının yaşandığı Bosna'ya bu kadar duyarsız kalabilmesi son dönemde yaşanmış bu spekülasyonlardan sadece birisidir. Bugün hala kendilerini dünyanın süper devletleri olarak adlandıran devletler kendi enerji

kaynaklarını saklı tutup, kendilerince 3. dünya devletleri olarak ilan ettikleri ülkelerin enerji kaynaklarını çeşitli yollarla elde edip kullanmaktadırlar.

Ekonomik ve politik etkenler bir tarafa, dünyada her ülke elverdiğince bol ve ucuz alternatif enerji kaynakları konusunda araştırma ve geliştirme çalışmalarını son hızla devam ettirmektedirler. Bu çalışmaların amacı, enerji konusundaki sorunlara çözüm getirmek ve, yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarından faydalanabilme olanaklarını ortaya koymaktır. Kuşkusuz yenilenebilir, ucuz, çevre kirliletmeyen ve kolayca faydalanılabilen enerji kaynağı denilince son yıllarda akla gelen tür, güneş enerjisi olmaktadır. Son zamanlarda özellikle petrol fiyatlarında görülen büyük artışlar ve bu artışların doğal sonucu olarak kendini gösteren enerji darboğazı ve ekonomik bunalım güneş enerjisini güncel bir konu haline getirmiştir. Çünkü hidroelektrik enerjisinin artan talebi karşılayamayacağı, fosil yakıtların yakın bir zamanda tükenebileceği, nükleer enerji kaynağının ise çevre ve güvenlik açısından büyük tehlikelere yol açacağı dikkate alınır, bu tür enerji kaynaklarının güneş enerjisi kadar temiz ve ucuz enerji kaynağı olmadıkları görülür. Güneş enerjisi, güvenilir bir kaynak olup, yaygın olarak kullanımında yüksek ve özel bir teknoloji gerektirmediği gibi kullanılması esnasında hiç bir önemli çevre kirliliğine de sebebiyet vermez. Bu nedenle, dünyada yaşanan enerji darboğazı, bütün enerji kaynaklarının kaynağı olan güneş enerjisini cazip ve popüler hale getirmiştir. İnsanoğluna yüzyıllar boyunca ilk ve tek enerji kaynağı olarak hizmet veren güneş, ucuz ve kolay bulunabilen organik yakıtların yaşama girmesi sonucu enerji kaynağı olarak önemini yitirmişti. Ancak, yukarıda da bahsedildiği gibi son yıllarda petrol fiyatlarındaki anormal artışlar ve alışlagelmiş enerji kaynaklarının hızla tükenmeye yüz tutması ve temiz bir çevreye duyulan bilinçli gereksinme sonucu, güneş enerjisi yeniden önem kazanarak yaşamımıza girmeye başlamıştır.

1.1. Araştırma Konusunun Tanıtılması

Güneş, hidrojen ve helyum gazlarından oluşan orta büyüklükte sıcaklığı merkeze doğru artan bir yıldızdır. Bu sıcaklık değeri merkezde 20.000.000 °C'ye kadar ulaşabilirken, yüzeyde 6.000 °C dolayındadır. Güneşteki bu yüksek sıcaklık nedeni ile elektronlar atom çekirdeklerinden ayrılarak, serbest elektronlar ve atom çekirdekleri

haline geçerler. Bu karışıma plazma adı verilir. Yüksek sıcaklıklarda, hafif elementlerin atom çekirdekleri bir araya gelerek daha ağır elementlerin çekirdeklerini oluşturduklarından dolayı, güneş içindedeki dört hidrojen çekirdeği birleşerek bir helyum çekirdeğini oluşturur. Füzyon (çekirdek kaynaşması) adı verilen bu olay, yüksek sıcaklıkta ve atom çekirdeği yardımıyla olduğundan termonükleer reaksiyon adını alır. Bu yüzden güneşin içi, yakıtı hidrojen ve ürünü helyum olan çok büyük bir fırın olarak düşünülebilir. Güneşte oluşan helyum miktarı, harcanan hidrojen miktarından daha azdır. Dolayısıyla aradaki fark güneşten ışın olarak çıkan enerjiyi verir. Bu enerji de çeşitli dalga boylarında ışınlar halinde dünyaya ulaşmaktadır.

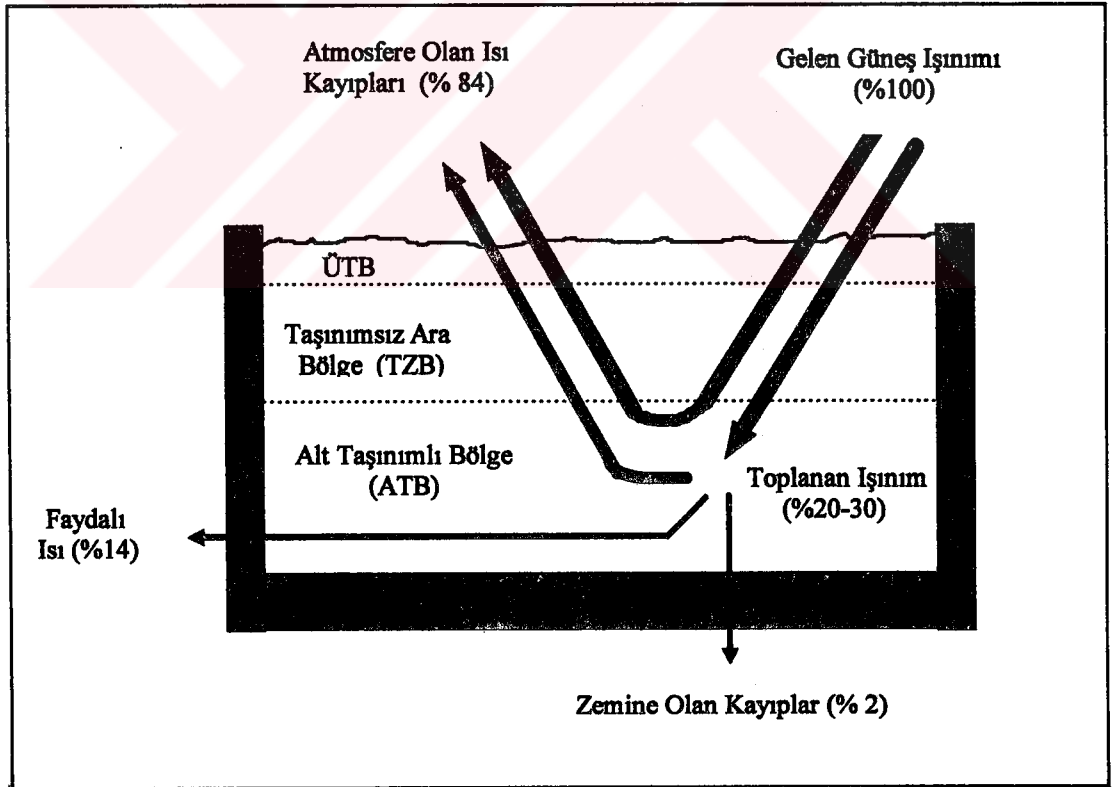
Güneşin bir saniyede ürettiği enerji miktarı, dünyada şimdiye kadar kullanılan enerji miktarından daha fazladır. Dünya güneşten gelen enerjinin sadece milyonda birini almaktadır. Bu enerji miktarı 15 dakika depo edilebilse, toplam dünya nüfusunun yıllık enerji ihtiyacını karşılayabilecek eşdeğerdedir. Gelen bu toplam gücün atmosferin üstünde ve fotonlara dik bir yüzeyde ortalama 1353 W/m^2 olduğu deneylerle saptanmış olup, bu miktar güneş sabiti olarak kabul edilmiştir [1].

Türkiye’de birim alana gelen güneş enerjisi miktarı, yılda ortalama olarak 1500 kW-saat/m^2 alınabilir. Güney sahillerimizde ise bu değer yılda 2000 kW-saat/m^2 ’ye kadar ulaşabilmektedir. Böylece ülkemize yıllık gelen tüm güneş enerjisi miktarı, yani teorik güneş kaynaklı enerji potansiyeli yılda $1 \times 10^{12} \text{ kW-saat}$ dolaylarındadır. Son yıllardaki enerji gereksinimimizin $3.4 \times 10^{11} \text{ kW-saat/yıl}$ olduğu göz önüne alındığı takdirde bu potansiyelin ne kadar önemli olduğu anlaşılabilir [1].

Bununla beraber atmosfere ulaşan fotonların büyük bir kısmı yer yüzeyine ulaşmadan atmosferde yutulmaktadır. Böylece atmosferin, dolayısıyla dünyamızın ısınması ve canlılara zararlı olan fotonların tutulması yararlı ise de, atmosferin dışında zaten geniş bir alana yayılmış olan enerji potansiyelinin çok az bir kısmı yeryüzüne ulaşabilmektedir. Güneş-dünya uzaklığının değişmesi ve güneşin enerji yayımındaki değişiklikler hesaba katılmasa bile, fotonların atmosfer içinde soğurulması, su buharı, karbondioksit gibi gazların ve bulutların soğurulmayı arttırması, böylece enlem-boylam ve deniz seviyesinden yükseklik bakımından yerel değişimler ve dünyanın ekseni

etrafında dönmesiyle meydana gelen gece-gündüz farkı, güneş enerjisinden faydalanmayı sınırlayan önemli etkenlerdir. Gelen enerjinin geniş bir yüzeye yayılmış olması, sürekli olmaması, enerji ihtiyacının fazla olduğu kış aylarında az olması ve geceleri ise hiç olmaması güneş enerjisinden faydalanılmada başlıca ana sorunları oluşturmaktadır [1,2].

Dünya yüzeyine gelen ışıınım miktarı, güneşli bir yaz gününde ortalama olarak maksimum 1000 W/m^2 'yi bulmaktaysa da yukarıda sayılan etkenler nedeniyle bu değer çok büyük değişimler göstermektedir. İşte dünya tarafından alınan güneş enerjisi, başka bir enerji şekline dönüştürülemez veya fosil yakıtlarda olduğu gibi depolanamazsa sonunda tekrar uzaya yansyacaktır. Dünyaya ulaşan bu enerjiyi, uzaya yansmadan önce başka enerji türüne dönüştürebilen teknolojilerin geliştirilmesiyle insanların günlük gereksinimleri olan enerji karşılanabilir.



Şekil 1.1 Tipik bir tuz tabakalı güneş havuzu ve enerji dengesi [3]

Güneş enerjisinin halen geliştirilmekte olan çok çeşitli kullanım alanları vardır. Bunlar konut ısıtılmasından elektrik üretimine kadar değişik alanlara dağılmıştır. Şu anki en önemli sorun, yukarıda da belirtildiği gibi, güneş ışınımının iki temel karakteristiği olan düzensizlik ve düşük enerji yoğunluğu nedeniyle toplanması yanında, uzun süre depolanmayı gerektirmesidir. Bundan dolayı, güneş enerjisinden daha iyi faydalanabilmek için düşük maliyetli ve yüksek verimli toplayıcı ve depolayıcıların geliştirilmesi zorunlu hale gelmiştir. Şayet toplama ve depolama işlemleri, ayrı ayrı sistemler tarafından yapılırsa, bu durumda daha büyük sisteme gerek duyulacağından, sistemin büyüklüğünden dolayı maliyet artacak verim düşecektir. Toplama ve depolama işlemlerinin her ikisinde aynı ortamda yapıldığı takdirde, diğerine göre hem maliyet azalacak, hemde verim artacaktır [2,4,5]. Bu yüzden güneş enerjisinin toplanması ve depolanması bakımından en uygun olan sistem, Şekil 1.'de de görüldüğü gibi yüzeyine gelen güneş ışınımının % 20–30'unu toplayabilen ve topladığı bu ışınımı, ısı enerjisi olarak uzun bir süre depolayabilen güneş havuzlarıdır [5,6,7]. Güneş havuzlarında depolanan bu ısının % 15'i dolayındaki miktarı, kullanılabilir ısı olarak havuzdan çekilebilmektedir [3]. Güneş enerjisi çevrim sistemleri arasında, güneş havuzları toplama ve depolama işlemlerinin her ikisinde aynı ortamda yapmasından dolayı diğer alternatif sistemlere göre daha büyük bir avantaja sahiptir. Ekonomikliği yönünden güneş havuzunun maliyeti, güneş kollektörü sistemlerinin beşte birine eşdeğerdir [3,4]. Bu oran, güneş havuzu ile düz plakalı bir kollektör karşılaştırıldığında, güneş havuzunun uygulanabilirliğinin bir göstergesi olabilir.

1.2. Güneş Havuzları

Güneş havuzları, güneş enerjisinin doğrudan depolanıp muhafaza edildiği en basit metodlardan birisidir [2-5]. Herhangi bir havuzda güneş radyasyonunu depolayabilir. Ancak sıvı içindeki doğal ısı taşınımı ve sıvı yüzeyinden taşınım ve buharlaşma ısı kayıpları çok fazladır. Su kütlesinin fazla olması nedeniyle, hiç güneş radyasyonu olmaması halinde, havuzdaki sıcaklık düşmesi birkaç haftada 10 °C civarındadır [1,3].

Güneş havuzları birim ısı girişine göre, birim kollektör yüzeyi yönünden düzlem kollektörlerden daha ucuzdur. Geniş bir iklim şeridinde kullanılabilir. Kışın yüzeyi

donsa bile, iç kısımlar düşük sıcaklıkta çalışan ısı pompası uygulamalarına yetecek sıcaklıktadır. Düzlemsel toplayıcılara göre sakıncası, çatılara kurulamayışıdır. Güneş havuzları, havuz içinde gerçekleşen fiziksel olaylara göre kendi arasında taşınımlı ve taşınımsız güneş havuzları olmak üzere iki gruba ayrılır [1,8].

1.2.1. Taşınımsız güneş havuzları

Güneş havuzu fikrinin esası, Von Kaleczinsky tarafından Medve Sığı Gölü'nde yapılan ölçümlere dayanmaktadır [2,4,9]. Gölde yapılan ölçümlere göre, yüzey sıcaklığının yaklaşık olarak ortam sıcaklığına eşit olduğu eylül ayında, gölün 1 m. derinliğinde, sıcaklığın 65 °C olduğu ve yoğunluğun derinlikle değiştiği tesbit edilmiştir. Kaleczinsky, göl yüzeyi ile 1 m. derinlikteki sıcaklık farkına, güneş ışınımının soğurulmasının ve yoğunluk farkı nedeniyle taşınımla ısı geçişine mani olunmasının sebep olduğunu ileri sürmüştür [2,4].

1954 yılında İsrail'li bilim adamı Dr. Rudolph Bloch'un, Von Kaleczinsky'nin Medve Gölü'ndeki çalışmalarına dayanarak ileri sürdüğü yapay güneş havuzu inşası fikri, 1958 yılının başlarında ilk defa Tabor tarafından gerçekleştirilmiştir [2,4]. Bu nedenle güneş havuzları konusunda ilk yapay çalışmalar İsrail'de yapıldığından ve geliştirildiğinden dolayı taşınımsız güneş havuzlarına İsrail tipi güneş havuzları da denilmektedir [2,7,10]. Bu havuzlar, ısıl dengesizliklerden dolayı oluşan taşınım hareketlerinin engellenmesi esasına göre oluşturulur. Taşınım hareketlerinin tesirlerini yok etmek için bir kaç teknik geliştirilmiştir. Taşınımsız güneş havuzları, taşınım hareketlerini önlemek için kullanılan sisteme bağlı olarak tuz tabakalı, jel (gel) ve bal peteği (honeycomb) güneş havuzu olmak üzere üç grupta incelenebilir. Bunlar arasında, en çok çalışılanı ve kullanılanı tuz tabakalı güneş havuzlarıdır [3,11].

1.2.1.1. Tuz tabakalı güneş havuzlarının fiziki yapısı

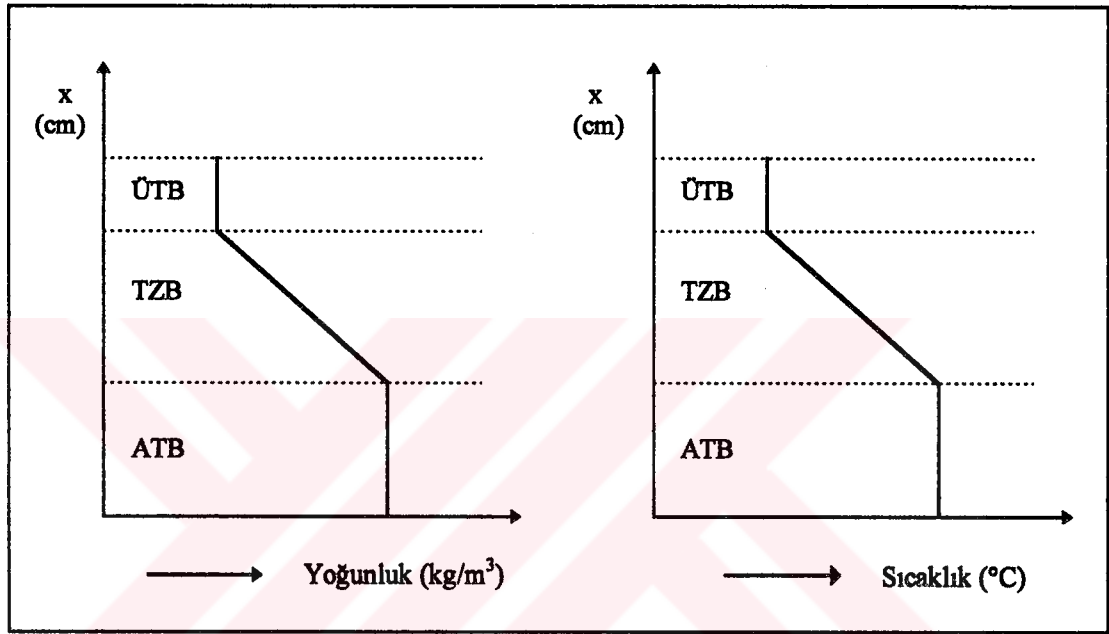
Tuz tabakalı güneş havuzlarının fiziki yapısı, atmosfere açık herhangi bir havuzda; örneğin, bir bahçe havuzunda güneş enerjisinin soğurulması sonucu meydana gelen olayların incelenmesiyle açıklanabilir [12]. Böyle bir havuzun yüzeyine çarpan güneş

ışınları kısmen yansıyacak, kısmende havuz yüzeyinde ve dibinde soğurulacaktır [9,13,14].

Havuzun dibindeki soğurulmanın, bağıl olarak diğer kısımlardaki soğurulmadan yüksek olması, suyun dibe yakın kısımlardaki sıcaklığın artmasına, dolayısıyla yoğunluğunun azalmasına neden olur. Dipten uzakta bulunan su zerrecikleri daha az enerji soğurduğundan dolayı, sıcaklıkları dipteki su zerreciklerine göre daha düşük, yoğunlukları ise daha yüksek olacaktır. Yukarıda ağır, aşağıda hafif su tabakalarının bulunması bir kararsız denge durumu oluşturur. Dipte soğurulmanın devam etmesi halinde, ısı kaldırma kuvvetinin viskoz sürtünme ve atalet kuvvetlerini yenmesi sonucu, daha yoğun su zerreciklerinin aşağıya yuvarlanması ile denge bozulacak ve taşınım ile ısı geçişi başlayacaktır [2,3,9,12]. Taşınım hareketinin başlamasıyla, havuz tabanında ısınan su, havuz yüzeyine doğru hareket etmeye başlar ve havuz yüzeyinin tabanına göre daha sıcak olmasına neden olunur. Yüzeyde sıcaklığın artması ise, zamana bağlı olarak çeşitli yollarla havuz yüzeyinden atmosfere olan ısı kaybını artırır. Bu olay, basit bir bahçe havuzunda gerçekleşmektedir. Güneş havuzlarında ise oluşan bu taşınım hareketleri, içerdiği akışkanın yoğunluğunun derinlikle arttığı yapılar olarak oluşturulan yoğunluk gradyanı ile önlenir. Tipik bir tuz tabakalı güneş havuzu sıcaklık ve yoğunluk gradyanları Şekil 1.2'de görülmektedir. Yoğunluk gradyanının taşınım hareketini önleyebilmesi için yeterli miktarda büyük olması ve içermiş olduğu tuz yoğunluğunun doğru bir şekilde tasarlanmış olması gerekir. Bu şartlar yerine getirildiği takdirde güneş havuzu, çevreye taşınım yolu ile ısı kaybetmeyen ve böylece tabanında toplanan ısı enerjisini aynı ortamda depolayabilen bir havuz olacaktır [2,3,4].

Tuz tabakalı güneş havuzlarında, taşınım hareketini engelleyecek bir örtü ve ısı kaybına mani olacak bir yüzey elemanı olmaksızın, derinlikle artan sıcaklıktan dolayı azalan yoğunluğu dengelemek gerekir. Bu nedenle, tuz tabakalı güneş havuzlarında çözünürlükleri sıcaklıkla artan tuzlar kullanılır. Böylece havuz tabanından yüzeyine doğru taşınım yolu ile olacak ısı geçişi, su içinde kolayca çözülebilen bu tuzların yerel sıcaklığa bağlı olarak meydana getireceği yoğunluk gradyanı ile kendi kendine önlenmiş olur. Bu tip tuz tabakalı güneş havuzlarına, literatürde doymuş (saturated)

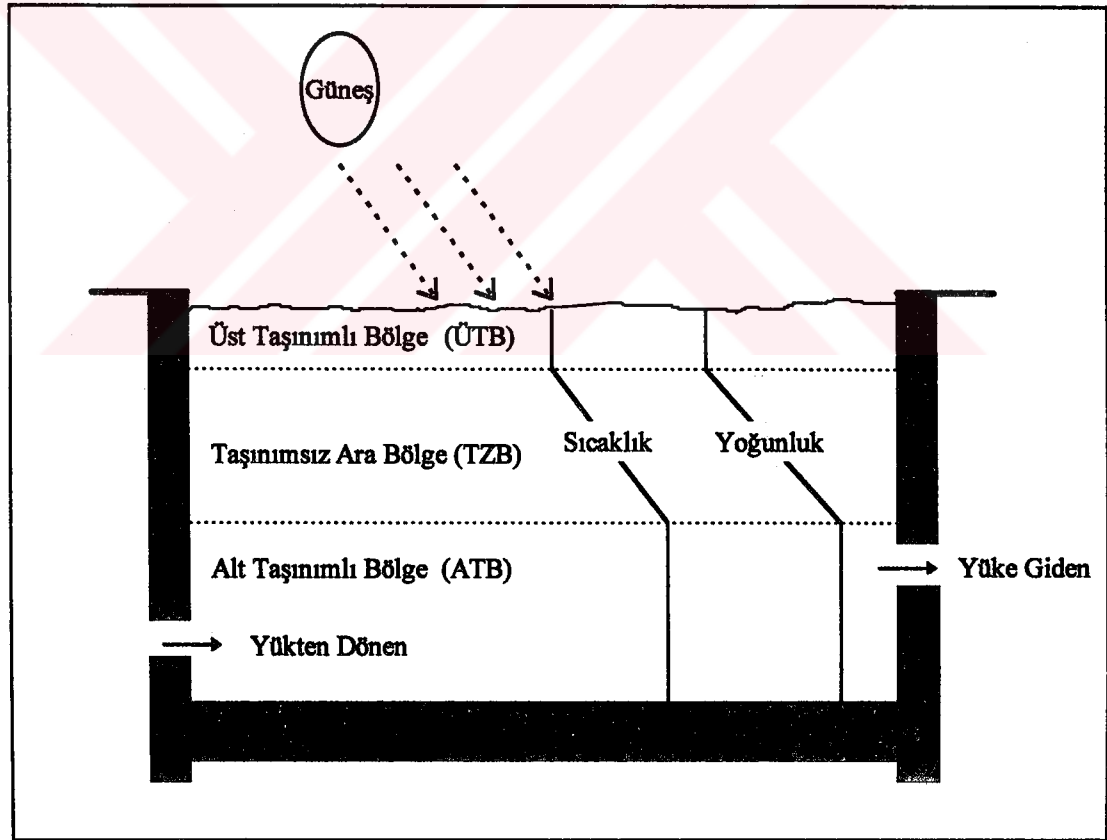
güneş havuzu denilmektedir [11,15,16]. Havuzdan ısı çekme esnasında kendiliğinden sağlanan dengeli bir yoğunluk profiline sahip olma özelliği, daha az temiz su kullanımına ihtiyaç göstermesi ve daha az bakım istemesi doymuş güneş havuzlarının belli başlı avantajlarından bazılarıdır. Bununla birlikte doymuş güneş havuzlarının, doymamış güneş havuzlarına oranla daha fazla tuza ihtiyaç göstermesi maliyet açısından bir dezavantajdır [11,15,16].



Şekil 1.2 Tuz tabakalı güneş havuzu yoğunluk ve sıcaklık gradyanları [6]

Güneş enerjisini toplayan ve depolayan bir tuz tabakalı güneş havuzu şematik olarak Şekil 1.3.'de görülmektedir. Görüldüğü gibi, tuz tabakalı güneş havuzu genellikle havuz yüzeyinden tabanına doğru üst taşınımlı bölge (ÜTB, Upper Convective Zone), ara taşınımsız bölge (TZB, Non Convective Zone) ve alt taşınımlı bölge (ATB, Lower Convective Zone) olmak üzere üç bölgeden meydana gelmektedir [3,5,6]. ATB, tuz yoğunluğunun en fazla olduğu bölge olup, bir yoğunluk gradyanı içermez. ATB üzerinde, bir yalıtıcı görevi yapan ve ÜTB'ye doğru azalan bir yoğunluk gradyanı içeren TZB, güneş havuzunun en önemli kısmıdır. İçerdiği yoğunluk gradyanının yeterli miktarda büyük olmasıyla, bu bölgede taşınım hareketi olmayacak, dolayısıyla havuz dibinde soğurulan enerjinin ATB'de depo edilmesini sağlayacaktır. ÜTB, genellikle tuzsuz su ihtiva eden kısım olup, ince bir tabakadır. Bu bölgenin oluşturulması, güneş havuzunun ekonomikliği yönünden önemlidir [3,6].

Tuz tabakalı güneş havuzlarının temel maddesinden biri olan su, kızıl ötesi ışınları geçirmeyen bir akışkan olması nedeniyle güneş enerjisi spektrumunun sadece görünür kısmı su içerisinde soğurulur [9,12,14,15,17,18]. Işınımın soğurulması, ışınımın dalga boyuna bağlıdır [9,14,15,18]. Kısa ve uzun dalga boylu ışınımın yüzeyden bir kaç cm. aşağıda soğurulurken, geri kalan ışınım havuz dibine kadar ulaşarak katettiği yol boyunca soğurulur. Soğurulan ışınım, alt taşınım bölgesinde ısı enerjisi olarak depolanır. Depolanan bu ısı enerjisi, TZB'nin havuzda oluşan taşınım hareketlerini önlemesi ve ATB üzerinde ısı yalıtıcı görevi yapması nedeniyle ATB'den sadece iletim yoluyla kaybolur [9,14,18]. Havuzun tamamen yalıtılmasıyla ve suyun iletim katsayısının çok küçük olması nedeniyle havuz tabanından yüzeyine doğru olan ısı akışı ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Böylece, tuz tabakalı güneş havuzları sadece bir toplayıcı değil aynı zamanda bir ısı depolayıcı sistem olmaktadır [14,18,19].



Şekil 1.3 Tuz tabakalı güneş havuzunun fiziki yapısı [3]

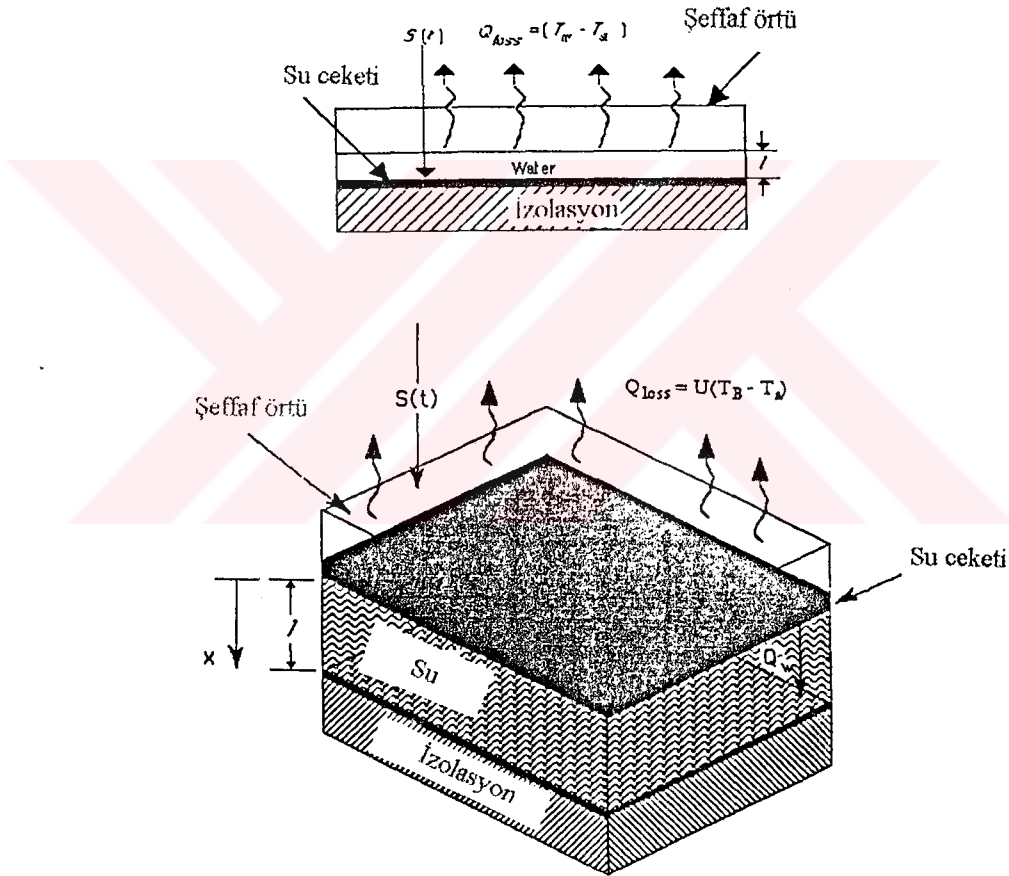
Şekil 1.1 ve 1.3'de görüldüğü gibi, güneş enerjisinin ortalama olarak % 15'ni düşük sıcaklıkta kullanılabilir enerji şekline dönüştürebilen güneş havuzundan bu enerji, iki

türlü çekilebilir. Havuzun alt taşınımı bölgesine yerleştirilecek bir ısı değiştiricisinden farklı bir akışkan dolaştırılarak veya havuzun alt taşınımı bölgesinden sıcak çözelti çekilerek havuz dışında bulunan bir ısı değiştiricisinden geçirildikten sonra tekrar havuz tabanına gönderilmek suretiyle depolanan ısıdan faydalanılmış olur. Fakat ikinci yöntem devrelerde korozyon ve tuz birikimlerine neden olacağından özel boru malzemesi ve pompalama tekniği gerektirmesi nedeniyle çok fazla tercih edilmemektedir [2,15,20].

Tuz tabakalı güneş havuzunun enerji depolama kapasitesi, havuz altındaki zeminin ısı depolayıcı olarak kullanılmasına ATB'nin büyüklüğüne, ışınım şiddetine bağlı olarak artar veya azalır. Genellikle dip kayıplarına engel olmak için havuz zeminden yalıtılması nedeniyle havuzun enerji depolama kapasitesi ATB'nin kalınlığına ve ışınımın şiddetine bağlı olarak değişmektedir. Alt taşınımı bölgesinin büyümesiyle, tutulan ışınım miktarı arttığından dolayı depolanan enerjide artar. Bu nedenle havuzun enerji depolama kapasitesi, güneş ışınımının şiddetine ve ATB'nin büyüklüğüne bağlıdır [14,16]. Işınım şiddetinin artması halinde alt taşınımı bölgesinin daha da büyümesi depolanacak enerji miktarını arttırmakla beraber, taşınım-sız ara bölgesinin küçülmesine ve bu bölgede taşınım hareketinin başlamasına sebep olabilir. Yalıtıcı görevi yapan bu bölgede, dengenin bozulup taşınım-ı ısı geçişinin başlaması, sistemde sürekli ısı kaybına neden olacağından, depolanan fazla enerjinin belirli zaman aralıklarında havuzdan çekilmesi havuz verimini arttıracaktır. Buna ilaveten, başlangıçta yüzeyle dip arasında oluşturulacak olan yoğunluk gradyeninin, taşınım-sız ara bölge için geçerli olan kararlılık teorisi yardımıyla, emniyetli kalınacak şekilde hesaplanması gerekir [9,10].

Taşınım-sız ara bölgedeki yoğunluk gradyenini korumak için gerekli tuz miktarı, bu bölgesinin kalınlığına, kullanılan tuzun cinsine ve bu tabakadaki sıcaklık gradyenine bağlıdır. Azda olsa havuz dibinden yüzeyine doğru olan çok yavaş bir tuz yayılımı (difüzyonu), taşınım-sız ara bölgesinin yoğunluğunun azalmasına neden olur. Bu nedenle havuz dibine tuz ilavesinin yanısıra, yüzeyine de tatlı suyun periyodik olarak ilave edilmesi gerekir [20]. Tuz ekonomisi açısından yüzeyden taşacak olan tuzlu suyun bir buharlaşma tankına alınmasıyla tuz geri kazanılabilir.

Tuz tabakalı güneş havuzlarının diğer toplayıcı sistemlere göre başlıca üstünlükleri; güneş ışınımını topladığı gibi aynı ortamda bu enerjiyi depolama kabiliyeti, depolama döneminin aylarca uzayabilirliği, maliyetlerindeki düşüklük, tasarımı ve uygulanabilmesi için gelişmiş bir teknolojiye ihtiyaç duyulmaması, bakımı ve işletme kolaylığı olarak sıralanabilir [3,7,21]. Ancak, kırsal yörelerde veya toplu konutların bulunduğu sahalarda kullanılma yeri olan güneş havuzlarını, oldukça büyük bir yüzey alanına ihtiyaç göstermeleri nedeniyle diğer tip güneş toplayıcıları gibi çatıların üzerine kurmak mümkün değildir [1,2,6].



Şekil 1.4 Taşınımlı güneş havuzlarının fiziki yapısı [8]

1.2.2. Taşınımlı güneş havuzları

Taşınımlı güneş havuzları, havuzda ısıl dengesizlik sonucu meydana gelen taşınım hareketleri engellenmediğinden dolayı bu adı almıştır. Ayrıca bu tip güneş havuzlarının

geliştirilmesi ve uygulaması ilk defa A.B.D.'de yapıldığından literatürde bu tip güneş havuzlarına A.B.D. tipi güneş havuzları da denilmektedir [6,8]. Gölge ve derin tuzsuz sulu havuzlar olmak üzere iki çeşit yapılabilmektedirler. Gölge güneş havuzlarında su derinliği 10 cm. kadardır. Şekil 1.4'de görüldüğü gibi su kapalı büyük bir cepte bulunmaktadır. Boyutları tipik olarak 3.5x60 m. olabilmektedirler. Havuz tabanı siyaha boyanır ve üst kısım cam çatı ile örtülür. En altta ise izolasyon malzemesi bulunur. Gece su büyük bir depoya pompalanır, gündüz ise tekrar sisteme gönderilir. Bazı hallerde su sürekli devir daim yaptırılabilir. Su yüksekliği arttıkça depolama sıcaklığı düşmekte, buna karşı daha çok güneş enerjisi depolanabilmektedir [1,8].

Derin tuzsuz sulu güneş havuzlarının geliştirilmesiyle, gölge güneş havuzlarının bazı sakıncaları giderilmiştir. Derin tuzsuz güneş havuzlarında sürekli çalışan sirkülasyon pompasına, taban izolasyonuna ve su ceketine gerek kalmamıştır. Sistemin normal çalışmasında gölge güneş havuzlarındaki gibi çift kat cam örtü kullanılmaktadır. Güneş radyasyonunun yetersiz olduğu zamanlarda ise ek bir izolasyon yapılmaktadır. Gece su püskürtülen sıvı köpük, yüzeyden olan ısı kayıplarını % 50-85 oranında azaltmaktadır. Gölge güneş havuzlarına göre boru donanımı, ikinci depo ve sirkülasyon pompası gibi elemanların olmaması, taban izolasyonuna gerek duyulmaması belirli üstünlükleridir [1,8].

Yukarıdaki üstünlükleri nedeniyle diğer güneş toplayıcıları arasında ön plana çıkan güneş havuzları için bugüne kadar yapılan teorik ve deneysel çalışmalar bundan sonraki kısımda detaylı olarak anlatılmıştır.

BÖLÜM 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Doğal Güneş Havuzları

Güneş havuzlarına ilişkin ilk çalışma; 1902 yılında, Von Kaleczinsky tarafından Romanya'nın Karpat dağları eteklerinde (46° 35' K, 26° 6' D) bulunan, derinliği 15 m., yüzey alanı 42.000 m² olan Medve Sığ Gölü, doğada tabii olarak keşfedilen taşınımsız havuzlara ait ilk örnektir [2,4]. Gölde yapılan ölçümlere göre, yüzey sıcaklığının yaklaşık olarak ortam sıcaklığına eşit olduğu eylül ayında, gölün 1 m. derinliğinde sıcaklığın 65 °C olduğu tesbit edilmiştir. Bu yüksek sıcaklığa, güneş ışınımının soğurulmasının ve yoğunluk farkı nedeniyle taşınım ile ısı geçişine mani olunmasının sebep olduğunu ilk defa ileri süren Von Kaleczinsky, yine ilk defa yoğunluğu, derinliğin bir fonksiyonu olarak bu gölde ölçmüştür. NaCl (Sodyum klorür) çözeltisi içeren bu gölde, ağırlıkça derişikliğin yüzeyde 0.05 kg/kg, 1 m. derinlikte ise 0.24 kg/kg olduğu tesbit edilmiştir [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 tesbit etmiştir [2,4]. 0-1-2 m. derinliklerde yapılan mevsimsel sıcaklık ölçümlerinin, sinüsoidal bir değişim gösterdiği görülmüştür. Ocak ayında göl yüzeyi buzla kaplı olmasına rağmen, sıcaklığın 1 m. derinlikte 10 °C ve 2 m. derinlikte 23 °C civarında seyrettiği, temmuz ayında yüzey sıcaklığının 27 °C olduğu bir zamanda ise, 1 m. derinlikte 40 °C, 2 m. derinlikte 50 °C civarında olduğu Rozsa tarafından Medve Gölü için rapor edilen neticelerdir.

Anderson, Washington'nun kuzeyindeki tuzlu sığ bir gölde yaz aylarında yapmış olduğu çalışmaya göre 2 m. derinlikte sıcaklığın 50 °C'ye kadar ulaştığını gözlemlemiştir [2,4].

Diğer bir doğal güneş gölü, Antartika'da Mc-Murdo Sound'da bulunan ve yüzey alanı 11.7 km², maksimum derinliği 66 m. olan Vanda Gölü'dür (77° 32' G, 161° 34' D). Wilson ve Wellman yapmış oldukları çalışmalar neticesinde, gölün üzeri 3-4 m. arasında değişen kalınlıkta buzla kaplı ve dış ortam sıcaklığı -20 °C olmasına rağmen, 65 m. derinlikte 25 °C sıcaklık artışı olduğunu tesbit etmişlerdir [2]. Yine aynı bölgede bulunan ve yüzey alanı 5.94 km², maksimum derinliği 31 m. olan Bonney Gölü'nde de (77° 43' G, 162° 26' D) aynı şartlarda yaklaşık olarak aynı sıcaklık değeri ölçülmüştür. Araştırmacılar bu olayı, sürekli rejimde bir boyutlu ısı geçişi problemi olarak ele almış ve yapmış oldukları analizlerde 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 [2,4].

İsrail'de Eliat Gölü'nde, Cohen ve arkadaşları tarafından yapılan sıcaklık ve tuz konsantrasyonu ölçümlerinde, göl yüzey sıcaklığının 38 °C olduğu anda, 3 m. derinlikte sıcaklığın 50 °C olduğu belirlenmiştir [2,4].

Kaliforniya'da Castle Gölü'nde, sistematik olarak gerçekleştirilen ölçümler sonucunda, gölün 5 m. derinliği ile yüzeyi arasındaki sıcaklık farkının 20 °C olduğu tesbit edilmiştir [2,4].

Doğal güneş gölleri konusundaki en son keşiflerden biri de, Hudec ve Sonnenfield tarafından Venezuela Kıyıları yakınlarında Los Roques adasında (11°36' K, 63°30' D) bulunan küçük, tuzlu, sıg 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 [2,4].

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 [2,4].

2.2. Güneş Havuzları Konusunda Ülkemizde Yapılan Çalışmalar

2.2.1. Çukurova Üniversitesi'nde yapılan çalışmalar

Ülkemizde güneş havuzlarıyla ilgili ilk bilimsel araştırma 1979 yılında Çukurova Üniversitesi, Temel Bilimler Fakültesi Fizik Bölümünde, 4.5x4.5x1.5 m. boyutlarında bir tuz tabakalı güneş havuzu Kayalı [13,22] tarafından inşa edilerek başlatılmıştır. Bu deneme havuzundan elde edilen sonuçlara göre; havuzun verimliliğinin % 16 dolayında, 1979 yılındaki maliyetinin 6000 TL/m², metre karesinden yılda alınacak enerji miktarının 35 kg. fuel-oil'e denk olduğu tesbit edilmiştir. Düzlemsel toplaçlarla karşılaştırıldığında, metre kare başına maliyetinin 2,5 kez daha az, bakım ve onarımının daha kolay olduğu görülmüştür. Yapılan maliyet hesabına göre havuzun kendi bedelini 7 yılda karşılayabileceği tahmin edilmektedir. Hiçbir önlem alınmadığı takdirde, tuz gradyeninin yaz mevsiminde 2-3 ay, kış mevsiminde ise 4-5 ay sonra tamamen bozulmakta olduğu edinilen tecrübeler arasındadır.

Araştırmalar sırasında, yukarıdaki avantajlar yanında bu konuda karşılaşılabilecek önemli sorunlarda olduğu görülmüştür. Bunlardan en önemlisi havuzda tuz yoğunluğu gradyeninin uzun süre bozulmadan korunması ve değişik yoğunlukta tuzlu su tabakalarının (özellikle büyük havuzlar için) oluşturulması gelmektedir. Bu bakımdan tuz yoğunluğu gradyeninin uzun süre bozulmadan korunmasını sağlayacak bir düzeneğin geliştirilmesi gerektiği kanaatine varılmıştır. Havuzun depolama bölgesi sıcaklığı ağustos ayında maksimum 60 °C dolayında olduğu kaydedilmiştir.

Daha sonraki yıllarda bu havuzdan alınan ölçümlerden ve kazanılan deneyimlerden yararlanılarak 1984 yılında, araştırma projesi olarak Tübitak ve Çukurova Üniversitesi Rektörlüğü'nün desteği ile Çukurova Üniversitesi Kampüsünde yüzey alanı 10x10 m. ve derinliği 2.5 m. olan yalıtımsız bir tuz tabakalı güneş havuzu inşa edilmiştir [13,22].

Projenin amacı, Çukurova Bölgesi'nde uygulama boyutlarında bir güneş havuzunun performansını deneysel ve teorik olarak saptayarak Çukurova Bölgesi'nde uygulanabilirliğinin olup olmadığını tesbit etmektir. Tabanı 50 cm., yan duvarları 26

cm. kalınlığında betondan yapılan söz konusu havuzun iç yüzeyi, suyun sızmasını önlemek amacıyla sıkalı şapla sıvanmış ve suya dayanıklı izolasyon maddesi ile kaplanmıştır. Havuz üst seviyesine kadar toprağa gömülmüş, maliyeti ucuz tutmak amacı ile toprakla havuz arasına ayrıca bir izolasyon maddesi konulmamıştır. Bu bakımdan havuz, yalıtımsız bir tuz tabakalı güneş havuzu özelliği taşımaktadır. Ayrıca havuzun hemen yanına, tuz yoğunluğu eğimini oluştururken tuz-su çözeltisini hazırlamak ve havuzun çalışması sırasında tuzluluğu artan havuz yüzeyi suyunu alıp buharlaştırmak ve elde edilen tuzu tekrar havuza göndermek amacıyla yüzeyi 5x5 m. ve derinliği 0.6 m. olan ikinci küçük bir havuz daha inşa edilmiştir. Havuz tuz yoğunluğu eğimini korumak için yine aynı Üniversitede Ünal ve arkadaşları tarafından geliştirilen tuz yoğunluğunu koruma düzeneği kullanılmıştır. Havuz, alt taşınımli bölge 100 cm., taşınımli ara bölge 110 cm. ve üst taşınımli bölge 40 cm. olmak üzere üç bölgeden oluşmaktadır. Küçük havuzda hazırlanan % 20'lik NaCl çözeltisi ile havuzun ilk önce alt taşınımli bölgesi oluşturulmuştur. Daha sonra yine küçük havuzda hazırlanan farklı yoğunluktaki NaCl çözeltileri bir hortum aracılığı ile büyük havuzda oluşturulan bir önceki tabaka üzerinde yüzen geniş yüzeyli bir levha üzerine akıtılarak, türbülans oluşturmayacak şekilde hızı kesilmek suretiyle havuz doldurulmuştur. Fakat havuz çalışmaya başladıktan üç ay sonra havuzdaki tuz gradyeninin bozulmaya başladığı görülmüştür. Yapılan araştırmalar sonunda bunun nedeninin havuz tabanında oluşan sızıntıdan ileri geldiği anlaşılmış ve çalışmalara bir müddet ara verilmek zorunda kalınmıştır. Havuzun tamir işlemleri tamamlanarak 1987 yılında çalışmalara tekrar başlanmıştır.

Yeni başlanılan çalışmalarda, deneysel çalışmaların yanısıra havuzun detaylı orijinal bir matematiksel modeli geliştirilerek havuz sıcaklık dağılımı bir bilgisayar yardımıyla analiz edilmiştir. Matematiksel modelin çözümünde sonlu farklar metodu kullanılarak nümerik çözüm yapılmıştır. Nümerik çözümden elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında karşılıklı uyum içinde oldukları görülmüştür. Yapılan çalışmalar sonucunda havuz depolama bölgesi sıcaklığı, ağustos ayında maksimum 64 °C ile 70 °C arasında değiştiği kaydedilmektedir. Daha sonraki yıllarda Çukurova Üniversite'sinde bu havuz üzerindeki çalışmalar değişik araştırmacılar tarafından devam ettirilmiştir [13,23].

2.2.2. İstanbul Teknik Üniversitesi'nde yapılan çalışmalar

Ülkemizdeki diğer bir çalışmada, İstanbul Teknik Üniversitesi'nde 1983 yılında Göktun[10] tarafından yapılmıştır. Yapılan bu çalışmada, 5 mm. kalınlığındaki saydam pleksiglas malzemedan 290x190x240 mm. boyutlarında, bir havuz imal edilmiş ve aralarındaki boşluk 100 mm. olan 5 mm. kalınlığındaki ahşap malzemedan yapılmış bir muhafaza içine oturtulmuştur. Havuz ile ahşap muhafaza arasındaki boşluğa ısı yalıtımı maksadıyla cam pamuğu doldurulmuştur. Deneylerde akışkan olarak saf su içinde KNO_3 (Potasyum nitrat) tuzunun eritilmesi ile elde edilen çeşitli yoğunluktaki çözeltiler kullanılmıştır. Bu çözeltilerin havuza doldurulması sırasında birbirine karışmasını en az değere indirmek gayesiyle oluşturulan havuz doldurma düzeneği, bir litrelik plastik bir kap ve buna ince polietilen hortum ile birleştirilen bir cam büretten ibarettir. Doldurma işlemi esnasında önce en yoğun tabaka yavaşça havuza doldurulmuş daha sonra bu tabaka üzerinde yüzdürülen ve dört köşesinden havuza çok ince iplerle bağlanan bir tahta parçası üzerine büret vasıtasıyla yavaşça dökülmek suretiyle diğer tabakalar sırasıyla oluşturulmuştur. Havuzun en üst tabakası tatlı su ihtiva etmektedir. Yapılan deneysel çalışmada kullanılan enerji kaynağı, güneş enerjisi spektrumuna yakın bir spektrum ve paralel bir ışınım elde etmek amacıyla tasarlanmış bir yansıtıcıdır. Bu yansıtıcının odağına 1000 W, 220-240 V. Sylvania Tungsten- Halojen quartz bir lamba ışın kaynağı olarak yerleştirilmiştir.

Bu deneysel çalışma sonunda, asıl malzemeleri su ve KNO_3 tuzu olan tuz tabakalı bir havuzun soğurduğu güneş enerjisini depolayabilmesi için havuzda kararlı bir taşınım ara bölgenin oluşturulması gerektiği anlaşılmıştır. Taşınım ara bölgenin kararlı olabilmesi için havuz yüzeyi ile dibi arasında en az 100 kg/m^3 'lük bir yoğunluk farkının tesis edilmesi gerektiği tesbit edilmiştir. Havuzdan maksimum $65 \text{ }^\circ\text{C}$ dip sıcaklığı elde edildiği kaydedilmektedir. Bu çalışma daha sonraki yıllarda enerji kaynağı olarak güneş ve akışkan olarak çeşitli tuz çözeltileri kullanılarak devam ettirilmiştir [7]. Çalışma konumuz olan bu deneysel çalışmalardan birisi ileriki bölümlerde detaylı olarak anlatılacaktır.

Taşdemiroğlu [4,24], güneş havuzu konusunda dünyada yapılan çalışmalarını incelemiştir

ve ülkemizin güneş havuzu uygulaması yönünden oldukça zengin olmasına rağmen bu konuda yeterli çalışmanın yapılmadığı kanaatine varmıştır. Bu konuda Tuz Gölü hakkında bile yeterli bilgiye sahip olunacak araştırmaların yapılmadığı görülmüştür. Bu konudaki çalışmaların, verimli bir uygulama programı ile şu iki temel amaç doğrultusunda yapılmasının faydalı olacağı teklif edilmektedir.

1. Suni havuz konstrüksiyonu için, kil ve çamurdan uzak ve su kaynaklarına yakın olan Tuz Gölü çevresindeki yerler araştırılmalı.
2. Tuz Gölü'nün sıcaklık ve yoğunluk gradyanlarını tesbit etmek amacıyla farklı derinliklerde ölçümler yapabilmek için gerekli deney sistemi kurulmalı.

Diğer bir araştırmacı olan Külünk [25], tuz tabakalı güneş havuzlarının konsantrasyon ve sıcaklık profillerinin elde edilmesi hakkında güneş havuzları konusundaki araştırmaların ülkemizde yaygınlaştırılmasına yardımcı olmak amacıyla değişik teorik çalışmalar yapmıştır.

2.2.3. Bu konuda yapılan diğer çalışmalar

Yapmış olduğumuz literatür araştırmasına göre, tuz tabakalı güneş havuzlarının Eskişehir ilinde uygulaması konusunda Anadolu Üniversitesi'nde bir çalışma yapılmıştır. Diğer bir çalışma, tuz tabakalı güneş havuzlarının oluşturulması ve zar tabakalı güneş havuzlarının matematik modellenmesi konusunda Gazi Üniversitesi'nde yapılmıştır. Bu konuda, bu çalışmalar dışında herhangi başka bilgiye rastlanamamıştır.

2.3. Taşınımsız Yapay Güneş Havuzları (İsrail Tipi)

2.3.1. İsrail'de yapılan çalışmalar

1954 yılında İsrail'li bilim adamı Dr. Rudolph Bloch'un, Von Kaleczinsky'nin Medve Gölü'ndeki çalışmalarına dayanarak ileri sürdüğü yapay güneş havuzu inşası fikri, 1958 yılının başlarında ilk defa Tabor tarafından gerçekleştirilmiştir [2,9]. İsrail'de, güneş havuzu konusunda ilk olarak Macar Göller (Hungarian Lakes) grubunun doğal güneş havuzu özelliğine sahip olup olmadığı araştırılmaya başlanmıştır. Yapılan gözlemler ve incelemeler sonucunda gölde gerçekleşen olayların güneş havuzlarında

gerçekleşen olaylarla aynı yapıya sahip olduğu tesbit edilmiştir. Göllerde yapılan ölçümlerde, gölün dip kısımları daha sıcak olmasına rağmen daha yoğun olduğu ortaya çıkmış, bu durumda gölün içerisinde bulunan doğal bir yoğunluk gradyeninin neden olabileceği tahmin edilmiştir. Böylece havuzun dip kısmında depolanan ısının başlatacağı taşınım hareketi bu yoğunluk gradyeni vasıtasıyla önlenmiş olabileceğinden göl dibinde soğurulan ısınının, ısı enerjisi olarak depolandığı tesbit edilmiştir. Göldeki tuz yoğunluk gradyeninin, göl dibindeki tuz kaynağı ve göle akan tatlı su akıntıları tarafından doğal olarak korunmakta olduğu yapılan gözlemler sonucunda ortaya çıkarılmıştır. Göllerde, yaz aylarında yapılan ölçümlere göre 1.3 m. derinlikte, sıcaklığın 70 °C 'ye kadar ulaşabildiği görülmüştür [9].

İsrail'de ilk deneysel yapay güneş havuzu, 1959 yılında, Lut Gölü'nün güney kıyısında tuz elde edilmesinde kullanılan 25x25 m. boyutlarında ve 1 m. derinliğinde eski bir buharlaşma havuzu, Tabor'un rehberliğinde MgCl₂ (Mağnezyum klorür) tuzu kullanılarak bir güneş havuzuna çevrilmiştir. Yüzey sıcaklığının 28 °C ile 32 °C arasında değiştiği bu havuzda, 80 cm. derinlikte 90 °C dip sıcaklığı elde edilmiştir. Havuz, yan duvarlarında meydana gelen çökmeler nedeniyle bir yıl sonra terkedilmiştir [2].

1963 yıllarında, Hayfa (İsrail) yakınlarında 1.5 metre derinliğinde bir tuz bataklığının üzerine inşa edilen 1375 m² yüzey alanına sahip daha büyük güneş havuzunun dip sıcaklığı 60 °C'ye ulaştığında, dipte mevcut bakterilerin bozulmasıyla meydana gelen gaz kabarcıklarının havuzdaki yoğunluk gradyeninin bozulmasına neden oldukları Tabor ve Matz tarafından belirtilmiştir. Güneş havuzunun verimli bir şekilde çalışması için sistemin yerleşiminin bazı önemli incelikleri havuz inşa edilmeden önce detaylı olarak incelenmesi ve buna göre havuz inşasının yapılıp yapılmamasına karar verilmesi gerektiği bu deneysel çalışmadan elde edilen tecrübeler arasındadır. Çalışma sonunda yüksek güneşlenme, düşük yağış, rüzgarsız bir ortam, kirlenmemiş bir çevre, su kaçaklarına karşı su geçirmez sert bir zemin, ucuz ve kullanılmaya elverişli tuz ve tatlı su temininin kolaylığı gibi önemli faktörlerin havuz inşası öncesinde dikkate alınması gerektiği tesbit edilmiştir [2].

İsrail’de güneş havuzu konusundaki ilk çalışmalar, ucuz güç üretmek amacıyla başlatılmış ve bunun için güneş havuzlarından kaynama noktasına yakın sıcaklıkta su çekilmesi ve bu suyun bir buharlaştırıcıda buharlaştırılarak elde edilen buharla klasik bir buhar türbininin çalıştırılması düşünülmüştür. Güç üretme gayesi ile başlatılan bu çalışmalar 1966 yılına kadar devam etmiş olup, bu yıllarda meydana gelen petrol fiyatlarındaki düşüş nedeniyle alternatif enerji kaynakları konusundaki araştırmalara belirli bir müddet ara verildiğinden dolayı güneş havuzları konusundaki çalışmalarda önemini belirli bir süre kaybetmiştir. 1973 yılında tekrar yaşanan enerji krizi ve petrol fiyatlarındaki aşırı artışlar, alternatif enerji kaynakları konusundaki araştırmalara ve çalışmalara yeniden başlanılmasını zorunlu kıldığından, güneş havuzu konusundaki çalışmalarda tekrardan hız kazanmıştır. Yeni başlayan bu çalışmalarda, havuzlardan çekilen ısının, endüstri alanında ısıtma işlemlerinde kullanılması amaçlamıştır [2].

Yukarıdaki deneysel çalışmaların yanı sıra Weinberger [9], güneş havuzları için matematiksel bir model geliştirerek bu konuda ilk analitik çalışmayı yapmıştır. Weinberger’ın 1964 yılında yapmış olduğu bu analitik çalışma, güneş havuzu konusunda, o günden bu güne kadar yapılan çalışmalara ışık tutmuş ve bu konuda yapılan bir çok çalışma, bu çalışmayı temel alarak geliştirilmiştir. Weinberger’ın bu çalışması, güneş havuzları konusundaki çalışmalara temel teşkil etmesi nedeniyle detaylı olarak incelenmesinin faydalı olacaktır. Bu çalışmada, havuz yüzeyine direk ve yaygın olarak gelen ışınların zamana bağlı olarak ne kadarının havuza nüfuz edebileceği Fresnel eşitlikleri kullanılarak hesaplanmıştır. Havuz içindeki soğurulmanın, çözeltilerin ışınımı doğal olarak soğurmasına ve çözeltiler içindeki partiküllerin etkinliğine bağlı olarak değiştiği kabul edilmiştir. Weinberger, su içinde eriyebilen tuzların suyun optik özelliğini bozmadığını ve tuzlu suyun fiziksel özelliklerinin sıcaklık ve derişiklikle değişmediğini kabul ederek, havuz içindeki sıcaklık dağılımını zamana bağlı, bir boyutlu genel enerji denklemini çözerek bulmuştur. Problemin çözümünde, yukarıdakilere ilaveten havuzun yüzey sıcaklığının daima ortam sıcaklığına eşit olduğu ve havuz içinde taşınım ile ısı transferi olmadığı, sadece iletim rejimi ile ısı transferi olayı gerçekleştiği kabul edilmiştir. Havuzdan çekilen ısının, tatlı su elde edilmesinde, endüstriyel amaçlı işlemlerde ve elektrik enerjisi üretiminde kullanılabilmesi önerilmiştir.

Güneş havuzları, tuz kararlılığının korunması konusunda problemlere sahiptirler [9,11,15,20]. Bundan dolayı da, Weinberger ayrıca havuzun ısıl kararlılığını incelemiş ve havuz içindeki konsantrasyon dağılımını, kütle difüzyon denklemini kullanarak analitik olarak bulmuştur. Difüzyon katsayısının kuvvetli bir şekilde sıcaklığa bağlı olduğu ve bu bağlılığın ısıl iletkenlik katsayısının % 1'i kadar olması nedeniyle sıcaklık içindeki günlük küçük değişimlerin konsantrasyonu etkilemediği varsayılmıştır. Buna bağlı olarak havuzun uzun zaman aralığında çalışmasından dolayı konsantrasyonun zamanla değişmediği kabul edilerek kütle difüzyon denklemi çözülmüştür. Weinberger derinlikle artan yoğunluk gradyeninin sadece taşınım ile ısı geçişini durdurmaya yeterli olacağı, fakat havuz içinde zamanla oluşan ve büyüyerek devam eden salınımlı bir harekete mani olmak için büyük bir yoğunluk gradyeninin gerekli olduğunu söylemektedir. Bir metre derinliğindeki havuzda, taşınım ile ısı geçişine mani olmak için, havuz tabanı ile yüzeyi arasında gerekli olan $MgCl_2$ çözeltisi yoğunluk farkının 349 kg/m^3 olması gerektiğini hesaplayan Weinberger, çözülebilirliği sıcaklıkla artmayan $NaCl$ tuzu kullanılarak aynı havuzda ısıl dengenin oluşturulmasının çok zor olduğunu tesbit etmiştir.

İsrail'de Weinberger'ın çalışmasını, 1965 yılında Matz, Feist ve Bloch tarafından yapılan tuz üretim endüstrisinde güneş havuzlarının kullanılması konusundaki teorik çalışma takip etmiştir [2]. Bir mühendislik çalışması olan bu çalışma sonunda, tuz üretiminde güneş havuzlarının kullanılmasının verimi ve kaliteyi arttıracığı tesbit edilmiştir.

1973'deki enerji krizinden sonra 1974 yılında İsrail'de Bilimsel Araştırma Kurumu tarafından güneş havuzu çalışmalarına tekrar başlanmıştır. Takip eden yıllarda bu kurum devlet tarafından desteklenerek milli bir proje hazırlanmış ve bu proje özel şirketler tarafından da finansal olarak desteklenerek bu konuda veri toplamak için bazı deneysel güneş havuzları inşa edilmiştir. Bu çalışmalar neticesinde, güneş havuzundan elde edilen ısı enerjisinin elektrik ve mekanik enerjiye dönüştürülmesi fikrinin oluşmasıyla bu yönde yeni yöntemler geliştirilmeye başlanmıştır. Isı enerjisini mekanik enerjiye çevirmek için düşük sıcaklıkta çalışan ısı makinalarının kullanılmasının verimli olabileceği kanısına varılmış ve bu konudada Tabor ve Bronicki tarafından geliştirilen

organik Rankine buhar türbinninin dönüştürücü olarak kullanılması önerilmiştir [2]. Daha sonraki yıllarda bu konudaki çalışmalar ve tecrübeler dahada geliştirilerek uygulamaya geçilmiştir. İlk olarak Yavne şehrinde bir fabrikada 1500 m² yüzey alanlı bir havuz inşa edilerek, elde edilen ısı enerjisi 6 kW'lık bir turbo generatorün çalıştırılmasında kullanılmıştır. 7.000 m² yüzey alanlı ikinci bir havuz Lut Gölü kıyısında inşa edilmiş ve 150 kW'lık maksimum güç elde edilerek 1979 yılında dünyanın en büyük güneşle çalışan güç ünitesi özelliğine sahip olmuştur [2]. Bu iki güç ünitesinde, çalışma sıcaklığının 90 °C olduğu rapor edilmektedir. Daha sonraki yıllarda bu çalışmalar, elde edilen tecrübelerle dahada geliştirilerek uygulanmaya başlanmıştır. 1984 yılında Rubin ve arkadaşlarınca [26], güneş havuzunun ısı yapısı ve havuzdan ısı çekme işlemi geliştirilen bir simülasyon modeli ile analiz edilmiştir. Simülasyon modelinde, daha önceden Rabl ve Nielsen [11], Weinberger [9] tarafından önerilen temel denklemler kullanılmıştır. Havuz içindeki sıcaklık dağılımı, bir boyutlu zamana bağlı, iç ısı üretimli ısı iletim denklemi sonlu farklar metodu yardımıyla nümerik olarak çözümlenerek bulunmuştur. Çalışma sonunda derin güneş havuzlarında ısı depolama periyodunun daha uzun, sıcaklık dalgalanmasının daha az olduğu tesbit edilmiştir. Buna göre, sıcaklığın mevsimsel olarak dalgalanmasının çok büyük olduğu bölgelerde, daha derin güneş havuzu kullanmanın daha uygun olacağı edinilen tecrübeler arasındadır [26].

İsrail'de 1987 yılında, güneş havuzu konusunda bir başka çalışmada Anati[27] tarafından yapılmıştır. Anati, teorik olarak taşınimsız güneş havuzlarında havuz büyüklüğünün ve eğimli havuz yan duvarlarının havuz yoğunluk gradyanına etkisini incelemiştir. Modelde, havuz yan duvarları eğimli olduğundan havuz yüzey alanı havuz derinliği ile ters orantılı olarak azalmaktadır. Yapılan bu çalışmada, havuz tabanından yüzeyine doğru olan tuz difüzyonu, havuz yüzeyinin tabanına göre daha büyük olmasından dolayı yüzeydeki tuz oranını arttırmaktadır. Artan tuzluluk, havuz yüzeyinden buharlaşma ile olan ısı kaybını azaltmakta, fakat derişiklik gradyanı kararlılığının bozulmasına sebep olmaktadır. Bundan dolayı yüzeydeki tuzlu su yardımcı bir tanka alınarak, bu tankta havuz tabanındaki akışkan yoğunluğu değerine getirilerek tekrar havuz tabanına pompalanmaktadır. Böylece havuzun kararlılığı sağlanmış olmaktadır [27].

2.3.2. A.B.D.'de yapılan çalışmalar

A.B.D.'de güneş havuzu konusundaki ilk çalışma, 1974 yılında Ohio State Üniversitesinde, Rabl ve Nielsen tarafından güneş havuzunda enerji depolanmasının teorik olarak araştırılmasıyla başlatılmıştır [2,11]. Güneş havuzlarının taşınımlı ve taşınımsız olmak üzere iki bölge içerdiklerini, fakat havuz yüzeyinde atmosferik etkiler nedeniyle taşınımlı bir üçüncü bölgenin kendiliğinden oluştuğunu kabul eden bu araştırmacılar, Weinberger'm [9] teorik çalışmasını kendi havuz modelleri için geliştirmişlerdir. Yapılan bu çalışma sonucunda, Ohio'da 1975 yılında 200 m² yüzey alanına ve 2.5 m. derinliğe sahip ilk güneş havuzu, Nielsen tarafından inşa edilmiştir. İç yüzeyi siyah plastik bir örtü ile kaplanmış olan bu havuzun yan duvarları 45°'lik bir açıya sahip olacak şekilde eğimli olarak yapılmıştır. Havuzun yanında küçük bir tank içerisinde hazırlanan farklı yoğunluktaki çözeltiler, önce daha yoğun çözeltiden başlamak üzere havuza bir hortum yardımıyla doldurulmaya başlanmış ve alttaki en yoğun tabaka oluşturulduktan sonra bu tabaka üzerinde bir tahta parçası yüzdürülerek daha az yoğun tabakaların üst üste yerleştirilmesiyle havuzun doldurma işlemi tamamlanmıştır. Böylece yoğunlukları bir birinden farklı olan çözeltilerin bir birine karışması önlenmiş ve üç ayrı bölge oluşturulmuştur.

İkinci olarak, 156 m² yüzey alanına ve 3 m. derinliğe sahip bir başka güneş havuzu, yine Ohio'da bulunan Wooster Tarım Araştırma ve Geliştirme Merkezi'nde, tarımsal uygulamalarda prototip olarak; örneğin bir sera için gerekli olan ısının elde edilip seranın ısıtılmasında kullanmak amacıyla Short ve arkadaşları tarafından inşa edilmiştir [2,11,28]. Yapılan çalışmalardan elde edilen tecrübelerle daha sonraki yıllarda NaCl çözeltisi kullanılarak, Ohio'nun Columbus yöresinde 400 m² 'lik daha büyük bir güneş havuzu inşa edilmiştir. Kış ayları süresince bu havuzların üzeri buzla kaplı olmasına rağmen, Ohio şehrinin havuzun verimli bir şekilde çalışması için oldukça yüksek bir enlem (40°50' K, 81°92' B) noktasında bulunmasından dolayı havuzların çalışmasıyla ilgili herhangi bir problemle karşılaşılmamıştır [2].

Yapılan bu çalışmalar, daha sonraki yıllarda A.B.D.'nin diğer Üniversitelerinde güneş havuzu konusunda yeni çalışmaların başlamasına ve gelişmesine temel teşkil etmiştir.

New Meksika Üniversitesi'nde, Zangrando ve Bryant [19] tarafından NaCl çözeltisi kullanılarak inşa edilen 13.7 m. çapında ve 2.43 m. derinliğindeki silindirik bir havuzda yapılan çalışma bu çalışmalardan birisidir. Havuzdan, 100 °C'lik bir sıcaklık elde edildiği kaydedilmektedir [2,20].

Güneş havuzu konusunda diğer bir başka çalışmada, Utah State Üniversitesi'nde Kooi [29,30] tarafından yapılmıştır. Kooi, üst taşınımlı, ara taşınımsız ve alt taşınımlı bölge olmak üzere, üç bölge bir TTGH'ı (Tuz Tabakalı Güneş Havuzu), sürekli rejimde düz plakalı bir güneş enerji toplayıcısı gibi düşünerek, havuz içindeki sıcaklık dağılımını ve enerji akısını teorik olarak hesap etmiştir. TZB'nin kalınlığı ince olduğu zaman, taşınımla olan ısı kayıpları artacak, büyük olduğunda ise ATB'ye ulaşacak olan ışıma miktarı azalacağından dolayı havuz verimini maksimum yapacak şekilde ayarlanması gerekir. Kooi'de, bunları göz önüne alarak, modelinde tabaka sınırlarının kararlı olduğunu, bu sınırların makul ölçülere göre ayarlanabileceğini ve bu kararlılığın bozulmadan havuzdan ısı çekilebileceğini kabul etmiştir. Tabaka sınırları, düz plakalı kollektörler ile performans kıyaslaması yapıldığı zaman havuzdan maksimum verim alabilecek şekilde ayarlanmıştır. Yapılan çalışmada havuz tamamıyla yalıtılmış olarak kabul edildiğinden dolayı ısı kayıpları ihmal edilmiştir. Havuz içindeki dikey sıcaklık dağılımı, sürekli rejimde bir boyutlu ısı iletim denklemi kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre TTGH ile düz plakalı güneş kollektörü kıyaslandığında; güneş ışınımının çok olduğu güneşli günlerde kollektör veriminin, güneş ışınımının az olduğu bulutlu günlerde ise havuz veriminin daha iyi olduğu tesbit edilmiştir. Yapılan çalışma neticesinde, güneş havuzundan maksimum 55 °C sıcaklık elde edilebileceği söylenmektedir [29].

Kooi diğer bir çalışmasında da, havuz tabanının yansıtıcı bir yüzey olmasının, havuz performansına etkisini çözünürlük sınırına yakın bir değerde çalışan doymuş güneş havuzu modelinde teorik olarak incelemiş ve bu konuda yapılan deneysel sonuçlarla karşılaştırmıştır [30]. Yapılan çalışmada, doymuş TTGH'larda kullanılan tuzun çözünürlüğü sıcaklığın bir fonksiyonu olarak artması gerektiğinden, doymuş TTGH'lar için NaCl tuzunun uygun olmadığı, NaCl tuzuna göre daha iyi bir çözünürlüğe sahip olan $MgCl_2$ tuzunun daha uygun olduğu tesbit edilmiştir. Havuz

içindeki sıcaklık dağılımı, sürekli rejimde bir boyutlu, iç ısı üretimli ısı iletim denkleminde bulunmuştur. Sonuç olarak, havuz tabanının yansıtıcı bir yüzey olması havuz verimini düşürdüğü ve bu düşüşün sıg havuzlarda daha büyük olacağı edinilen tecrübeler arasındadır [30].

A.B.D.'de bu konuda ismi çok duyulan ve çalışmalarıyla güneş havuzları konusundaki çalışmalara yeni bir boyut kazandıran bir diğer araştırmacı da J. R. Hull'dur. Hull [14], geliştirmiş olduğu bir bilgisayar modeli ile TTGH'nin ısıl yapısını incelemiştir. Güneş havuzu konusunda, ilk olarak bilgisayar modeli kullanılması fikri Tybout [31] tarafından önerilmiş isede bu fikir ilk defa Hull tarafından dikkate alınarak uygulamaya geçirilmiştir. Geliştirilmiş olan bu bilgisayar modelinde, taşınımsız havuzlar için Weinberger [9] tarafından ve taşınımlı havuzlar için Rabl ve Nielsen [11] tarafından yapılan çalışmalar referans alınmıştır. Modelde kullanılan havuzun, ATB ve TZB olmak üzere iki bölge, 140 m² yüzey alanına ve 4 m. derinliğe sahip olduğu ve NaCl çözeltisi içerdiği kabul edilmiştir. Bilgisayar modelinden elde edilen sonuçlara göre; havuzun termal yapısını, havuz yüzeyine gelen günlük toplam ışıının, ortam sıcaklığının ve TZB'nin şeffaflığının önemli bir şekilde etkilediği, havuz yüzeyindeki ışıının kırılma açısının havuzun termal yapısına aşırı bir etkisi olmadığı tesbit edilmiştir [14].

TTGH'nin güneş enerjisini yıllık toplama ve depolama kapasitesini analiz eden dinamik bir başka bilgisayar modeli Shah [28] tarafından geliştirilmiştir. Modelde, Short ve arkadaşları tarafından Ohio Wooster Tarım Araştırma ve Geliştirme Merkezinde inşa edilen güneş havuzundan alınan deneysel ölçümler kullanılmıştır. Modelden, havuzun üzerinin bir örtü ile örtülmesinin havuzun toplama verimini düşürdüğü, havuz yerleşiminin ve yoğunluk gradyeni derinliğinin havuzun ATB'sine ulaşan ışıını etkilediği, havuzun verimli bir şekilde çalışmasının ATB üzerindeki yoğunluk gradyeninin oluşturulduktan sonra korunmasına bağlı olduğu, optimum yoğunluk gradyeni kalınlığının, yaz aylarında kış aylarına oranla daha az olması gerektiği tesbit edilen sonuçlar arasındadır [28].

Diğer bir bilgisayar modeli, TTGH'larda, taşınımlı ve taşınımsız bölgeler arasındaki

ara yüzeylerin zamana bağlı olarak davranışlarını incelemek için Meyer [32] tarafından yapılmıştır. Yoğunluk ve sıcaklık profilleri, difüzyon ve ısı transferi denklemlerinden zamana bağlı olarak elde edilmiştir. Havuz tabanından yüzeyine doğru olan tuz difüzyonu, yüzeydeki tuzluluk oranını arttıracığından dolayı artan bu tuzluluk oranı ÜTB ile TZB arasındaki sınırı aşağıya doğru hareket ettirir. ATB'nin alt sınırı ile üst sınırı arasındaki sıcaklık farkının sebep olduğu doğal salınımlar ise, TZB alt yüzeyini yukarıya doğru hareket ettirmektedir. Sonuç olarak, havuz içinde gelişen bu olaylar TZB'nin küçülmesine, ÜTB ve ATB'nin büyümesine neden olmaktadır [32].

1.5x1.2x1 m. boyutlarındaki bir TTGH'da, yoğunluk gradyeninin oluşturulması ve korunması, Atkinson ve arkadaşları tarafından deneysel olarak incelenmiştir [33]. Havuz, arası küçük bir boşlukla ayrılan iki paralel plakadan oluşan, havuzun orta noktasına monte edilen sabit bir çubuk üzerinde aşağı yukarı hareket edebilen basit bir difüzör ile çok küçük hızlarda ve basınçta bu iki paralel plaka arasına çözeltinin pompalanmasıyla doldurulmuştur.

Bir diğer çalışmada, Batty ve arkadaşları tarafından TTGH'ların performansını etkileyen taşınımsız ara bölgenin optimum kalınlığını tesbit etme konusunda yapılmıştır [34]. TZB kalınlığı, havuz tasarımlarında genellikle kararlılık kriteri temel alınarak veya kabuller yapılarak bulunmuştur. Utah State Üniversitesi'nde, Batty ve arkadaşlarınca daha kesin bir yöntem geliştirmek için önceki çalışmalar referans alınarak havuz içindeki zamana bağlı, bir boyutlu sıcaklık ve yoğunluk profillerini mevsimlik olarak hesaplayan bir simülasyon modeli geliştirilmiş ve bu model nümerik olarak çözülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre, TZB kalınlığının ortam sıcaklığının ve güneş ışınımının az olduğu kış aylarında, yaz aylarına oranla daha büyük olması gerektiği tesbit edilmiştir [34].

Zhang ve Nielsen [35], 75 cm. çapında ve 120 cm. derinliğinde silindirik ve laboratuvar tipi plastik bir tankta, ortam sıcaklığının ve yüzey tuzluluğunun göstermiş olduğu değişimin, havuzun ÜTB'sinde ki etkilerini inceleyen deneysel bir çalışma yapmışlardır. Deneysel çalışma, tank tamamiyle yalıtılarak laboratuvar yapay şartlar altında gerçekleştirilmiştir. Yani havuzun ısıtılması, rüzgara maruz bırakılması, ortam

sıcaklığı, buharlaşma kayıpları v.b. olaylar, laboratuvarında gerçek değerlerine yakın değerlerde yapay olarak gerçekleştirilmiştir. Bu deneysel çalışma sonunda, ortam sıcaklığı, rüzgar hızı, güneş ışınımının soğurulması ve suyun buharlaşması gibi etkenlerin havuz yüzeyini önemli şekilde etkilediği gözlemlenmiştir. Özellikle rüzgar ve buharlaşma olaylarının, havuzun ÜTB'sinde önemli sorunlara sebep olduğu tesbit edilmiştir [35].

2.3.3. Hindistan'da yapılan çalışmalar

Joshi ve Kishore [36], sürekli rejim şartlarında çalışan bir TTGH'm performansını yapmış oldukları nümerik simülasyon modeli ile saatsel olarak incelemişlerdir. TTGH'm sürekli rejim şartlarındaki analizini ilk olarak Kooi [29] ve Nielsen [11] yapmıştır. Bu çalışmalar daha sonraki yıllarda Kishore ve Joshi [36], Wang ve Akbarzadeh [37] ve değişik araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir. Ülkemizde ise bu konudaki ilk detaylı çalışma Kayalı ve arkadaşları [13,22] tarafından yapılmıştır. Simülasyon modelinde, havuz içindeki sıcaklık dağılımı zamana bağlı bir boyutlu ısı iletim denkleminin sonlu farklar metodu ve Crank-Nicolson yaklaşımıyla yapılan nümerik çözümden bulunmuştur. Nümerik çözümde, saatlik meteorolojik değerler kullanıldığından dolayı, çözümden elde edilen sonuçlarda saatlik değişen değerlerdir. Bu yüzden çalışma sonunda yapılan değerlendirme sonuçlarında oldukça kesin sonuçlar olmuştur. Sonuç olarak, güneş havuzunun performansını güneş ışınımındaki yıllık ve günlük değişimler, depolanan ısı kütesinin artması ve tutulan ışınımın faydalı ısıya dönüştürülmesi gibi etkenlerin etkilediği tesbit edilmiştir.

Hindistan'da yapılan diğer bir çalışmada doymuş güneş havuzları konusundadır. Bu konuda geniş bir çalışma serisi, Subhakar ve Murthy [15,16,38,39] tarafından deneysel ve teorik olarak yapılmıştır. Bu iki bilim adamı ilk olarak 1991 yılında, 1 m. çapında ve 0.7 m. derinliğinde paslanmaz çelikten deneysel amaçlı kurmuş oldukları silindirik güneş havuzunda $MgCl_2$ (Mağnezyum klörür) tuzu kullanarak doymuş güneş havuzunun sıcaklık ve yoğunluk profillerini incelemişlerdir. Doymuş güneş havuzu konusunda ilk deneysel çalışma Nevada Üniversitesi'nde Ochs ve Bradley tarafından boraks tuzu kullanılarak yapılmıştır [15,30,38]. İkinci bir başka deneysel çalışma ise

sodyum potasfat tuzu kullanılarak Jain ve Mehta tarafından gerçekleştirilmiştir. Subhakar ve Murthy'nin yapmış oldukları bu deneysel çalışmaya benzer bir çalışma Vitner ve arkadaşları tarafından 0.31 m. çapında, 1 m. derinliğinde silindirik bir havuzda potasyum alüminyum sulfat tuzu kullanılarak yapılmıştır [13-15]. Subhakar ve Murthy elde etmiş oldukları deneysel verilerden havuzun sıcaklık ve yoğunluk profillerini oluşturarak güneş havuzlarının uzun zaman aralığında ısı depolama yapabileceğini tesbit etmişlerdir [16].

Yine aynı araştırmacılar 1993 yılında yapmış oldukları diğer bir çalışmada; doymuş güneş havuzunu oluşturan bölgelerin kütle ve enerji dengelerini matematiksel olarak liner olmayan kısmi diferansiyel denklemler ile ifade ederek matematiksel bir havuz simülasyon modeli geliştirmişlerdir [15]. Bu çalışma, havuz performansını maksimum yapacak optimum havuz bölge kalınlıklarını tesbit etmek için yapılmıştır. Yapılan matematiksel model, uzun zaman aralığında ve değişik sınır şartlarında sonlu farklar metodu yardımıyla nümerik olarak çözülmüştür. İncelenen havuz oldukça büyük, havuzda gerçekleşen olaylar bir boyutlu, tamamıyla yalıtılmış, yüzeyde yutulan ışınımın ortama kaybolmadığı ve havuzda tuz olarak $MgCl_2$ ve KNO_3 çözeltileri kullanıldığı kabul edilmiştir. Doymamış güneş havuzlarında, havuzda oluşturulan yoğunluk gradyeninin belirli bir zaman geçtikten sonra sıcaklık gradyeninin oluşmasına mücade etmesiyle havuz tabanında ısı depolanmaktadır. Ayrıca doymamış güneş havuzları, havuz tabanından yüzeyine doğru olan tuz difüzyonu problemine ve atmosferik ve diğer etkenlerden dolayı yoğunluk gradyeni kararsızlıklarına sahiptirler. Subhakar ve Murthy, bu problemlerin sıcaklıkla çözünürlüğü artan bir tuzla havuz tamamen doymuş hale getirilerek çözülebileceğini düşünerek böyle bir çalışmayı yaptıklarını söylemektedirler. Güneş havuzları için uygun bir tuzun seçiminde asıl kriterin; düşük sıcaklıklarda daha az çözünen ve çözünürlüğünde sıcaklıkla lineer olarak artan bir yapıda olması ve ayrıca kararlı, çözelti içinde renksiz, zehirsiz, ucuz, kolayca bulunabilen ve ekolojik dengeyi bozmayan bir tuz olması gerektiği edinilen tecrübeler arasındadır. Yapılan çalışma sonunda, Hindistan şartlarında, $MgCl_2$ ile doyuma ulaşmış güneş havuzunda maksimum 85 °C, KNO_3 ile doyuma ulaşmış havuzda ise maksimum 80 °C depolama sıcaklığı elde edilebileceği ve ATB'nin daha da büyümesiyle bu değerlerin artabileceği tesbit edilmiştir [15].

Yine aynı araştırmacılar, yapmış oldukları doymuş güneş havuzu simülasyon modelinin devamı olarak havuzun performansını etkileyen faktörlerin parametrik çalışmasını yapmışlardır [16]. Yapılan çalışmada, incelenmiş olan parametreler şu şekilde sıralanmaktadır;

1. Havuz bölgelerinin (ÜTB, TZB, ATB) kalınlıkları,
2. Havuzu ısıtma periyodu,
3. Havuz yüzeyinden atmosfere taşınım, buharlaşmayla ve ışınlama ile olan ısı kayıpları,
4. Havuzdan ısı çekme yöntemleri,
5. Meteorolojik parametrelerin (ışınım, ortam sıcaklığı, rüzgar hızı vb.) saatsel değişimi,
6. Kullanılan çözeltilerin termofiziksel özelliği, ışınlama geçirgenliği ve çeşidi
7. Havuz zeminindeki toprağın ısı iletkenliği,
8. Havuz tabanının yansıtıcılığı.

Yapılan parametrik çalışma sonunda elde edilen sonuçlar, daha önce doymamış havuz performansı konusunda her biri farklı araştırmacılar tarafından yapılan çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Kamal [21], depolama bölgesi sıcaklığına diğer bölge kalınlıklarının, Wang ve Akbarzadeh [37] havuzdan çeşitli ısı çekme yöntemlerinin, Akbarzadeh ve Ahmed [40] yüzeyden olan çeşitli ısı kayıplarının havuz performansına etkilerini analiz etmişlerdir. Beniwal ve arkadaşları farklı toprak şartlarındaki güneş havuzunun performansını [17], Kooi [30] havuz tabanı yansıtıcılığının kararlılığa etkisini, Hawlader [19] farklı enlemlerde çalışan iki havuzun performansını karşılaştıran çalışmalar yapmışlardır. Akbarzadeh eğimli duvarların havuz performansına katkısını [37], Meyer [32], Atkinson ve Harleman [33] havuzun üst taşınım bölgesinde meydana gelen kararsızlığa rüzgarın etkisini araştırmışlardır. Subhakar ve Murthy [17], bu çalışmaları ayrı ayrı inceleyerek elde edilmiş olan sonuçları, çalışmalarından elde ettikleri sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma sonucunda, doymuş güneş havuzunun performansı doymamış güneş havuzunun performansından daha iyi olduğu görülmüştür. Doymuş güneş havuzunun kendi arasında karşılaştırılması sonucunda ise, MgCl₂ tuzu kullanılan havuzdan, KNO₃ tuzu kullanılan havuza göre daha büyük depolama sıcaklığı elde edildiği tesbit edilmiştir. Bununla birlikte MgCl₂ tuzunun geçirgenlik ve termofiziksel özelliklerinin daha iyi

olmasından kaynaklandığı söylenmektedir. Suyun, $MgCl_2$ çözeltisine göre daha büyük bir geçirgenliğe sahip olmasına rağmen, $MgCl_2$ çözeltisinde soğurulan ışınım miktarı, suya göre daha fazla olmaktadır. Bundan dolayıda, $MgCl_2$ çözeltisi içeren güneş havuzu, su dolu güneş havuzuna göre daha büyük ATB sıcaklığına sahiptir [17].

Sreenivas ve arkadaşları [40] Nielsen'nin denge şartlarını temel alarak, tuz gradyeninin bozulması ve büyümesi üzerindeki difüzyon olayını incelemek için yeni bir model geliştirmişlerdir. Benzer çalışma, daha önce Hull ve Mehta, Hull ve Katti tarafından yapılmıştır [40]. Modelde ele alınan havuz, TTGH olup, toprağa gömülmüş ve alt taşınımı bölgesine yerleştirilen bir ısı değiştiricisi ile havuzdan ısı çekilmektedir. Sonuç olarak, daha büyük alt taşınımı bölgeye sahip olan havuzda daha iyi kararlılık sağlandığı tesbit edilmiştir.

2.3.4. Avustralya'da yapılan çalışmalar

Avustralya'da güneş havuzu konusundaki çalışmalar, İsrail'deki bu konuda yapılan çalışmalar referans alınarak Bilimsel ve Endüstriyel Araştırma Merkezi'nde (CSIRO) 1964 yılında Davey tarafından başlatılmıştır [2,3,4]. Yapılan ilk çalışmalara tuz üretmek amacıyla başlanmış olup, takip eden yıllarda ise deneysel çalışmalar yapılmıştır. Havuz verimini incelemek için ilk olarak 86 cm. derinliğinde, üst yüzey boyutları 10.29x10.29 m., taban yüzey boyutları ise 6.63x6.63 m. olan yan duvarları eğimli ve NaCl çözeltisi içeren deneysel bir güneş havuzu inşa edilmiştir. Havuzda gelişen olaylar iki yıl boyunca gözlemlenmiş ve ölçümler yapılmıştır. Bu ölçümlere göre ilk yılda havuzdan elde edilen maksimum sıcaklık 60 °C, takip eden ikinci yılda ise 63 °C olarak, veriminin ise % 15 ile % 20 arasında değiştiği kaydedilmektedir [2].

Daha sonraki yıllarda, Avustralya'da bu konuda çalışanlardan biriside yaptığımız literatür araştırmasına göre A. Akbarzadeh'dir. Akbarzadeh'nin bu konuda değişik çalışmaları vardır [37,41]. 1982 yılında Wang ile birlikte güneş havuzunun performansını etkileyen parametreler konusunda bir çalışma yapmışlardır [37]. Yapılan çalışmada, sürekli rejim şartlarında üç bölge, NaCl çözeltisi içeren TTGH'nun performansına ÜTB ve TZB kalınlıklarının ve havuz zemininin etkisi incelenmiştir. Sürekli rejimdeki bir boyutlu iç ısı üretimli ısı iletim denklemi

kullanılarak, havuzun matematiksel modeli oluşturulmuştur. Modelde ki yaklaşımlar, Weinberger [9], Rabl ve Nielsen [11], ve Hull [14] tarafından yapılan yaklaşımlar dikkate alınarak yapılmıştır. Yapılan çalışma sonunda, ÜTB kalınlığı ne kadar az olursa havuzun veriminin o kadar arttığı, TZB kalınlığı optimum değerinin altında ve üstünde artırıldığı zaman havuzun verimini düşürdüğü, havuz tabanı ızalasyon yapılmadığı takdirde önemli derecede ısı kayıpları olduğu elde edilen tecrübeler arasındadır [37].

2.3.5. Japonya'da yapılan çalışmalar

Japonya'da güneş havuzu konusundaki çalışmalar, 1979 yılında başlamış ve bu konu ile ilgilenen pek az araştırmacı olmuştur. Bu araştırmacılardan biri olan Taga, ilk olarak Kinki Üniversitesinde küçük ölçekli TTGH ve jel (gel) güneş havuzu üzerinde deneysel çalışmalar yapmıştır [42]. Diğer bir araştırmacı olan Kamiuto [42] 1988 yılında, üst taşınimli bölgesi olmayan güneş havuzunun termal yapısını teorik olarak incelemiştir. Çalışmasında ele almış olduğu havuzun ışıyım toplama verimini ve toplanan bu ışıyımın ısı enerjisine dönüşüm verimini, kendisinden önce bu konuda yapılan çalışmalarla ve üst taşınimli bölgesi olan havuzlarla karşılaştırmıştır. Havuz içindeki sıcaklık dağılımını, zamana bağlı bir boyutlu ve iç ısı üretimli ısı iletim denklemini kullanarak, sonlu farklar metodu yardımıyla nümerik olarak çözmüştür. Yapmış olduğu bu nümerik çözüm sonunda, havuzdan 60 °C depolama sıcaklığı elde edilebileceğini söylemektedir. Ayrıca üst taşınimli bölgesi olan güneş havuzu ile olmayan güneş havuzu karşılaştırıldığında, üst taşınimli bölgesi olmayan güneş havuzlarının toplama veriminin ve depolama sıcaklığının daha düşük olduğu tesbit edilmiştir [42].

Kanayama [43] 1991 yılında, Kitami Teknoloji Enstitüsünde inşa edilen büyük ölçekli, 44 m. çapında, 3 m. derinliğindeki NaCl çözeltisi içeren silindirik bir TTGH'nun deneysel ve teorik olarak performansını incelemiştir. Yapmış olduğu havuz matematik modelini, sonlu farklar metodu yardımıyla nümerik olarak çözmüş ve havuzda yaptığı ölçümlerden elde ettiği deneysel veriler ile karşılaştırma yapmıştır. Yapılan karşılaştırma sonucunda, deneysel verilerle nümerik analiz sonuçlarının uyum içinde

olduğu görülmüştür. Havuzdan eylül ayında maksimum depolama sıcaklığı 70 °C olarak ölçüldüğü kaydedilmektedir [43].

2.3.6. Diğer ülkelerde yapılan çalışmalar

Sovyetler Birliği'nde, güneş havuzları üzerinde yapılan teorik ve deneysel çalışmaların sonuçları 1963-1973 yılları arasında yayınlanmıştır. İlk teorik çalışma, İsrail'deki çalışmaların genel bir tekrarı niteliğinde olup daha sonra ki yıllarda bu çalışmalar değişik çalışmalarla geliştirilmiştir. Güneş ışımının su içinde soğurulması ile ilgili optik çalışmada, soğurulmanın $MgCl_2$ tuzunun derişikliği ile artmasına karşın $NaCl$ tuzu derişikliğinin soğurulma olayını çok az etkilediği tesbit edilmiştir. Güneş havuzlarında sıcaklık dağılımının bulunmasını amaçlayan çalışmada, bir boyutlu ısı iletim denklemi sonlu farklar yöntemi kullanılarak çözülmüş ve bu matematiksel modelde havuz yüzeyinden meydana gelen ısı kayıplarının, taşınım, buharlaşma ve ışınım ile olduğu kabul edilmiştir [2,7,10].

Sovyetler Birliği'nde yapılan ilk deneysel çalışmada, 40x40x50 cm. boyutlarında, yalıtılmış bir tank güneş havuzu olarak kullanılmış ve güneş yerine 1000 W'lık Xenon lambası enerji kaynağı olarak kullanılmıştır. Çalışmada, lamba iki saat yakılıp bir saat söndürülerek sadece zamana bağlı sıcaklık değişimleri incelenmiş ve beş gün sonunda maksimum 75 °C dip sıcaklığına erişilmiştir. İkinci bir deneysel çalışma, 4.8 m² yüzey alanına ve 18 cm. derinliğe sahip bir havuz ve yine aynı enerji kaynağı kullanılarak yapılmıştır. Birinci deneyden farklı olarak, bu deneyde havuz toprağa gömülmüş ve altındaki zeminin ısı depolayıcı olarak kullanılabilirliği teorik olarak incelenmiştir [2,10].

1974 yılında, Kanada Mc-Gill Üniversitesi'nde yapılan teorik ve deneysel çalışmada, göz önüne alınan güneş havuzu 40 cm. çapında 80 cm. derinliğinde silindirik yalıtılmış bir tank olup, sistemde üç adet 250 W'lık tungsten-halogen lamba enerji kaynağı olarak kullanılmıştır. Havuzun tabanından itibaren 56 cm.'sinin yoğunluğu 300 kg/m³ olan $MgCl_2$ çözeltisi ile doldurulan bu deneysel çalışmada, sıcaklığın ve yoğunluğun zamana bağlı değişimi incelenmiş ve 15 gün devamlı ışınım sonunda maksimum 65 °C

dip sıcaklığına erişildiği bildirilmektedir. Bu çalışmanın teorik kısmında, güneş havuzunun bir boyutlu matematik modeli çıkartılarak 20, 40 ve 80 cm. olmak üzere üç ayrı havuz derinliği için genel enerji denklemi sonlu farklar yöntemi kullanılarak çözülmüş ve deney sonuçları ile uyum içinde olduğu görülmüştür [2,10].

1962 yılında Şili’de Hirschmann tarafından yapılan teorik çalışmada, güneş havuzlarındaki yoğunluk gradyeninin buharlaşma kaybını % 65 azalttığı rapor edilmektedir. Çalışmada yoğunluk gradyeninin havuz yüzeyine tatlı su, tabanında tuz ekleyerek korunduğu varsayılmıştır. Yapılan bu kabullerden sonra yoğunluk farkının derinlikle değişimini ifade eden lineer bir diferansiyel denklem çözülerek, yoğunluk için derinliğe ve havuz yüzeyine ilave edilen su tabakasının kalınlığına bağlı üstel bir ifade elde edilmiştir. Hirschmann, Medve Gölü’nde ölçülen parametreleri kullanarak sürekli difüzyon olayının gerçekleşmesi halinde gerekli sabitleri belirlemiş ve göl yüzeyi ile dibi arasındaki maksimum derişiklik farkının 240 kg/m^3 olması gerektiğini tesbit etmiştir. Hesaplanan bu derişiklik gradyeninin Medve Gölü’nde yapılan ölçümlerle uyum içinde olması yapılan hesaplamaların ve geliştirilen ifadenin doğru olduğunu göstermektedir [10].

1993 yılında El-Refae ve Al-Marafie [18] adında Kuveyt’li iki bilim adamı. 1989 yılında Al-Homoud ve arkadaşlarının, Kuveyt’te deneysel amaçlı kurmuş oldukları 1740 m^2 yüzey alanına sahip TTGH’nun termal performansını incelemek için bir boyutlu zamana bağlı güneş havuzunun matematik modelini yapmışlardır. Matematik modeldeki lineer olmayan diferansiyel denklemler, Al-Homoud ve arkadaşları tarafından ölçülmüş olan meteorolojik değerler temel alınarak oluşturulan sınır şartlarında Gauss-Seidel yaklaşımı kullanılarak nümerik olarak çözülmüştür. Sonuç olarak aralık ayında havuz depolama bölgesi sıcaklığının $65 \text{ }^\circ\text{C}$ ’ye kadar ulaştığı kaydedilmektedir [18].

Kamal [21] adındaki Katar’lı bir bilim adamı, Wang ve Akbarzadeh [37], Kooi [29], ve değişik araştırmacılar tarafından yapılan parametrik çalışmaları temel alarak, 100 m^2 ’den daha küçük ölçekli güneş havuzlarının parametrik çalışmasını yapmıştır. Yapılan çalışmada ele alınan havuzun, ATB ve TZB olmak üzere iki bölgeden

oluştugu, toprağa gömülü ve üzeri şeffaf bir örtü ile örtülü olduğu kabul edilmiştir. Kamal, güneş havuzunun performansını araştırmak için deneysel çalışmanın daha isabetli olacağını, fakat bu konuda yapılacak olan deneysel çalışmanın uzun zaman gerektirmesi ve deney teçhizatının pahalı olmasından dolayı teorik bir çalışma yaptığını söylemektedir. Çalışma sonunda, havuz büyüklüğünün ısı depolama verimine etkisi havuz büyüdükçe azalmakta olduğu, dizayn edilecek havuzun geometrik şeklinin kare olması havuzun verimini arttırdığı, küçük ölçekli güneş havuzunun derinliğinin 2 m.'den fazla olmaması ve bu derinliğin 0.5 m.'si depolama bölgesine geri kalan kısmının ise taşınmaz bölgeye ayrılmasının gerektiği, küçük ölçekli havuzlarda, depolama bölgesi kalınlığının artırılmasının herhangi önemli bir depolama avantajı sağlamadığı tesbit edilen sonuçlar arasındadır [21].

Bir diğer ilginç çalışma, Nijerya'da Akoshile [44] tarafından yapılmıştır. Akoshile, tamamen doğal deneysel bir çalışma yapabilmek için kilden, hiperbolik şeklinde 28 cm. derinliğinde bir güneş havuzu inşa etmiştir. Havuzun iç yüzeyinin tamamını siyaha boyayarak, sırasıyla su ve NaCl çözeltisi kullanarak deneysel veriler elde etmiştir. Bu deneysel verilere göre, NaCl çözeltisi kullanılan havuzun yüzeyi ile dibi arasında 20 °C sıcaklık farkı elde edilirken, su kullanıldığında bu sıcaklık farkının 10 °C'ye düştüğü görülmüştür. Akoshile deneysel olarak elde etmiş olduğu değerlerin doğal güneş havuzu değerlerine yakın değerler olduğunu ve bunun da yapmış olduğu deneysel çalışmada kullandığı havuz modelinden kaynaklandığını söylemektedir [44].

Meksika'lı bilim adamları Munoz ve Almanza [45], yapmış oldukları çalışmada, güneş havuzunda gelişen kütle ve ısı transferi olaylarının zamanın bir fonksiyonu olduğunu göstermişlerdir.

İngiltere'de ilk çalışma 1976 yılında Hawlader ve Brinkworth [17] tarafından başlatılmıştır. Brinkworth bu çalışmada, güneş havuzunda güneş ışınımının % 10'u eşdeğerinde bir enerji depolanabildiğini ve bu enerjinde konut ısıtılmasında kullanılabilecek bir sıcaklıkta olduğunu söylemektedir. Daha sonraki yıllarda yapmış olduğu deneysel çalışmalarda ise Bryant ve Colbeck ve Rabl ve Nielsen'nin güneş ışınımının soğurulması konusunda geliştirmiş oldukları denklemleri kullanarak gelen

ışınının % 20'si dolayındaki miktarının depolanabileceğini göstermiştir. Son yapılan çalışmaya göre; yıllık ortalama depolama sıcaklığının, havuzun taşınimsız ara bölgesinin ve depolama bölgesinin kalınlıklarına bağlı olarak 70 °C dolayında olduğu kaydedilmiştir [17].

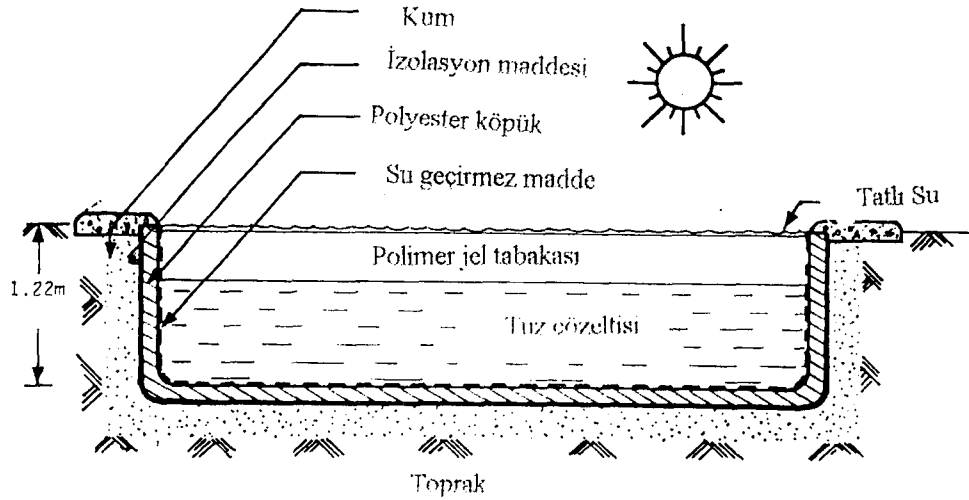
Diğer bir çalışmada İran'da Akbarzadeh ve Ahmadi tarafından yapılmıştır. Akbarzadeh ve Ahmadi [41], İran'ın güneyine inşa edilen güneş havuzunun performansını incelemek için bir bilgisayar simülasyon modeli geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri bu modelde, Weinberger [7] tarafından yapılan analitik çalışmadaki ısı transferi denge denklemleri kullanılmıştır. Bilgisayar simülasyon sonuçlarına göre, İran'ın güneyinde güneş havuzlarının güneş kollektörü olarak sıcak su üretiminde kullanılmasının oldukça uygun olduğu görülmüştür. Araştırmacılar İran'ın güney bölgelerinde maksimum havuz depolama sıcaklığının 90 °C'ye kadar ulaşabileceğini söylemektedirler [41].

2.4. Güneş Havuzlarının Performansını Arttırmak İçin Yapılan Çalışmalar

TTGH teknolojisi, oldukça geniş ve gelişmiş bir teknolojiye sahip olmasına rağmen çeşitli problemlere sahip olduklarından dolayı performansları beklenenin altındadır. Bu yüzden son yıllarda yapılan çalışmalar genellikle TTGH'nin performansını arttırmak için neler yapılabileceği yönünde olmuştur. Bu konuda bir çok bilim adamı ve araştırmacı, gerek teorik gerekse deneysel olarak yaptıkları çalışmalar sonunda ortaya değişik fikirler çıkarmışlardır. Bunlardan biriside A.B.D.'de Wilkins tarafından yapılan çalışmadır [46]. Wilkins, TTGH'ı modife ederek, TTGH teknolojisinin sahip oldukları problemlerin üstesinden gelecek yeni bir havuz modeli geliştirmiştir. Geliştirilen bu havuz modeline, modelde tuz tabakası yerine % 98.3 su ve % 1.7 poliakrilikten oluşan jel (gel) tabakası kullanıldığından dolayı jel güneş havuzu denilmiştir. Havuz, jel tabakasından başka birde ısı depolamak için depolama bölgesi içermektedir. Jel tabakası depolama bölgesi üzerinde yüzmekte ve taşınimsız ara bölgenin görevini yapmaktadır. Jel tabakasının yüzmesini muhafaza etmek için, depolama bölgesi % 2 ile % 7 arasında değişen tuz çözeltisi ile doldurulması gerekmektedir. Tuzlu su, sadece jel tabakasının yüzmesi için kullanıldığından dolayı ayrıca bir yoğunluk gradyanına gerek

yoktur. Bu nedenle, havuzun kuruluş maliyeti oldukça azalmış olmaktadır. Böyle bir havuz modeli, rüzgarın ve buharlaşma olaylarının havuz yüzeyindeki etkisini önemli miktarda önlemekte, havuz yüzeyinde iletimle olan ısı kayıplarını elimine etmekte, gradyen kararsızlığını ve ısı çekme esnasında havuzda meydana gelen kararsızlıkları ortadan kaldırmaktadır. Jel güneş havuzlarında TTGH'lardaki gibi yoğunluğu daima kontrol altında tutmaya gerek yoktur. Jel güneş havuzunun sağlamış olduğu bu avantajlarla, TTGH'ların en önemli sorunlarının üstesinden gelindiği görülmektedir. İlk olarak orta ölçekli, 18 m² yüzey alanına sahip jel havuzu, 1980 yılında New Meksika Üniversitesi'nde Yang adında bir bilim adamı tarafından inşa edilmiştir [46]. Şekil. 2.1'de Yang tarafından deneysel çalışma amaçlı olarak inşa edilen bu havuzun yapısı şematik olarak görülmektedir. Havuz çalışmaya başladıktan bir yıl sonra, havuzdan 57 °C dip sıcaklığı elde edilmiştir. Daha sonraki yıllarda, bu çalışma referans alınarak Chamberino'da (New Meksika) Polka tarafından bir yiyecek fabrikasında proses ısısı elde etmek için 110 m²'lik ikinci bir havuz kurulmuştur [46]. Çalışmaya başladığı ilk iki hafta içinde, havuzdan 55 °C sıcaklık elde edildiği rapor edilmektedir. Ticari amaçlı 400 m² yüzey alanına sahip üçüncü ve daha büyük diğer bir havuz ise, yine New Meksika'da Wilkins ve Ramachandran tarafından inşa edilmiştir. Havuzdan, çalışmaya başladıktan bir yıl sonra 60 °C sıcaklık kaydedildiği söylenmektedir. Jel tabakalı güneş havuzlarının yapısını, Wilkins ve arkadaşları daha detaylı inceleyerek bu konuda yeni gelişmeler sağlamışlardır. TTGH teknolojisindeki havuz performansını önemli bir şekilde etkileyen faktörler, jel havuzu teknolojisi ile elimine edildiğinden dolayı havuz performansı kendiliğinden artmaktadır [46].

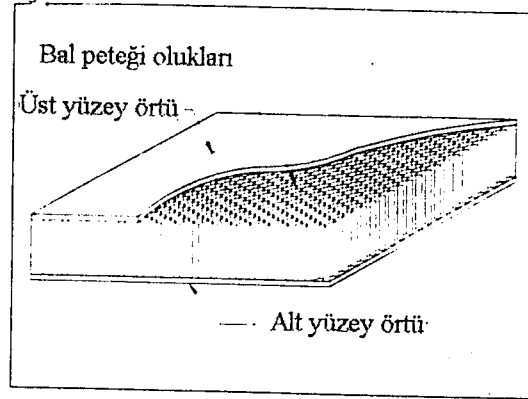
Bu konuda, yine A.B.D.'de bir başka çalışma Newell tarafından yapılmıştır. 1983 yılında Newell [47], TTGH'ların performansını artırma düşüncesiyle üç bölge klasik bir TTGH'nın alt taşınımli bölgesi ile zemini arasına depolama bölgesi adını verdiği dördüncü ve taşınımli bölge ekleyerek dört bölge yeni bir güneş havuzu modeli geliştirmiştir. Modelde dördüncü bölgenin oluşturulmasıyla; havuzun alt taşınımli bölgesi ile zemini arasında depolanan ısının zeminden kaybolmasını önlemek amaçlanmıştır. Ayrıca Newell, bu iki havuz modelinin performanslarını kıyaslayabilmek için nümerik bir simülasyon programı geliştirmiştir. Yapılan bu simülasyon programı, daha önce Hull [14], Ahmadi ve Akbarzadeh [37] tarafından



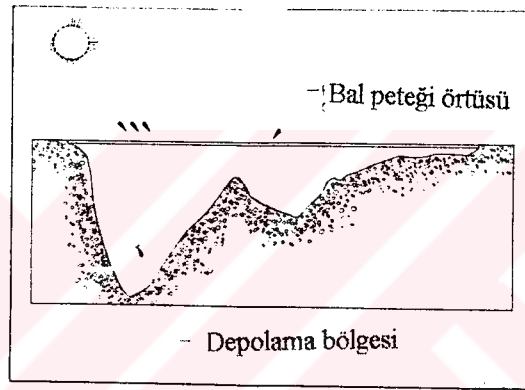
Şekil 2.1 Jel (gel) güneş havuzunun şematik olarak fiziki yapısı [46]

yapılan nümerik simülasyonlara benzemektedir. Nümerik simülasyondan elde edilen sonuçlara göre, haziran ayında geliştirilen havuz modelinden 85 °C sıcaklık elde edilirken, klasik TTGH'dan 65 °C sıcaklık elde edilmiştir. Karşılaştırmadan da görülebileceği gibi geliştirilen bu model havuzun performansını artırmaktadır [47].

1992 yılında, Schaefer ve Lowrey [48] adındaki araştırmacılar, TTGH'ın performansını arttırmak için TTGH'ı modife ederek yeni bir havuz modeli geliştirmişlerdir. Modelde ki havuz, üst yüzeyinde yüzen bal peteğine (honeycomb) benzer bir örtü ile kaplıdır. Bu yüzden, geliştirilen bu havuz modeline bal peteği güneş havuzu denilmekle beraber literatürde bu havuz modeli, zar tabakalı güneş havuzu olarakta geçmektedir. Şekil 2.2a'da bal peteği örtüsü şematik olarak görülmektedir. Bu örtü, yarı saydam plastik bir yapıya sahip olup en belirgin özelliği kızıl ötesi ışınımı geçirmesidir. TTGH'lara göre en önemli avantajı, bal peteği havuzlarında tuzlu su yerine tatlı su kullanılmasıdır. Bu durumda hem kuruluş maliyeti düşmekte, hemde TTGH'lara sürekli olarak tuz ikmal edilmesi gerektiğinden sistemin işleyiş maliyeti de düşmektedir. Tuz, TTGH'lar için yakıt gibi düşünülürse, sistemin işleyiş sürekliliği için büyük önem arz etmektedir. Ayrıca tuz kullanılmaması, bal peteği havuzunda depolama bölgesi kalınlığını arttıracığından, bu bölgede tutulan ışımda artacak, dolayısıyla depolanan ısıda artacaktır. Böylece, havuzun performansı kendiliğinden



(a)



(b)

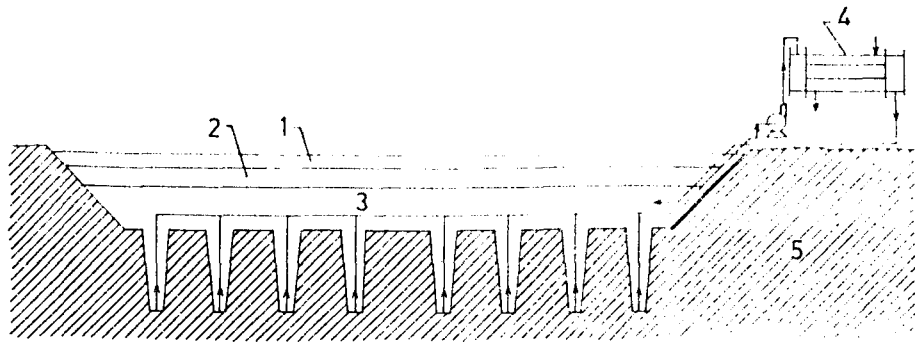
Şekil 2.1a Bal peteği örtüsünün (honeycomb) şematik görünümü [48]

2.1b Doğal bir göl üzerine bal peteği örtüsü yerleştirilerek elde edilen bal peteği güneş havuzu (honeycomb solar pond) [48]

artmaktadır. Bal peteği güneş havuzlarında akışkan olarak tatlı su kullanıldığından dolayı, bal peteği örtüsünün doğal göllere ve yapay tanklara uygulanabilmesi oldukça kolay görünmektedir. Şekil 2.2b'de bal peteği örtüsünün doğal bir göle yerleştirilmesi ile oluşan tipik bir bal peteği güneş havuzu kesiti görülmektedir. Schaefer ve Lowrey [48] geliştirdikleri bu havuz modelinde, bal peteği örtüsünün havuz termal yapısına etkisini inceleyen bir bilgisayar modeli yapmışlardır. Elde edilen bilgisayar sonuçlarına göre; TTGH'lar ile kıyaslandığında, geliştirilen bal peteği güneş havuzunun performansı yaklaşık olarak yüzde yüz artmaktadır. Bu oranda beklenenin üzerinde bir değerdir [48] .

İtalyan araştırmacı Keren ve arkadaşları [49] 1993 yılında yapmış oldukları teorik ve deneysel çalışma ile, TTGH'ı modife ederek havuz performansını arttırıcı bir model geliştirmişlerdir. 9.15x0.60x1.62 m. boyutlarında inşa ettikleri güneş havuzunda önermiş oldukları modeli uygulayarak deneysel veriler elde etmişlerdir. Deneysel çalışmada, havuzda yoğunluk gradyeni $MgCl_2$ çözeltisi kullanılarak oluşturulmuştur. Keren ve arkadaşlarının [49] önermiş oldukları bu modelde, TTGH'm ara taşınımsız bölgesi ile alt taşınımlı bölgesi arasına ek bir bölge ekleyerek, havuzun tuzluluğunu arttırmayı amaçlamışlardır. Böylece artan tuzluluk oranı, havuzun üst taşınımlı bölgesinden atmosfere olan buharlaşma ısı kaybını azaltacak, dolayısıyla havuzda depolanan ısının artmasına neden olacaktır. Bu olay, deneysel çalışmalarla gözlemlenerek doğruluğu teyid edilmiştir. Çalışma sonunda, deneysel ve teorik çalışma sonuçlarının uyum içinde olduğu ve havuzdan 70 °C depolama sıcaklığı elde edilebileceği kaydedilmektedir [49].

Hindistan'lı Prasad ve Rao [50] adındaki iki bilim adamı, TTGH'ların dip kısmının girintili olarak yapılmasının havuz performansını arttıracağını düşünerek yeni bir fikir ortaya atmışlardır. Geliştirdikleri modelde havuzda depolanan ısıyı arttırmak için havuzun zeminini ısı depolayıcısı olarak kullanmayı amaçlamışlardır. Bundan dolayıda, Şekil 2.3'de görüldüğü gibi havuzun tabanında oluşturulan trapezoid şeklindeki çukurların havuz performansına etkisini araştırmışlardır. Prasad ve Rao trapezoid şeklindeki bu çukurlardaki ısı transferi olayının, fin kanatçıklı yüzeylerdeki ısı transferi olayına benzetilebileceğini söylemektedirler. Çukurların tabanında daha sıcak olan bu



Şekil 2.3 Tabanı trapezoid şeklinde tepeli güneş havuzunun şematik gösterimi
(1); ÜTB, (2); TZB, (3); ATB, (4); ısı değiştirici, (5); zemin [50]

çözelti, bir devirdaim pompası yardımıyla çekilerek havuz dışında bulunan bir ısı eşanjöründe ısı alandıktan sonra daha soğuk olarak alt taşınımı bölgeye gönderilmektedir. Alt taşınımı bölgeden zemine olan ısı kayıpları değerlendirildiği için, geliştirilen bu havuz modelinin performansı, TTGH'ların performansına göre artmaktadır. Çalışma sonunda, zeminde depolanan ısının, havuz tabanında oluşturulan çukurların derinliklerinin artmasıyla doğru orantılı olarak arttığı ve bu çukurların geometrik şeklinin trapezoid yerine dikdörtgensel olması depolanan ısıyı dahada arttıracığı tesbit edilmiştir. Fakat bu durumun 10 m.'den daha fazla derinliklerde geçerli olduğu söylenmektedir [50].

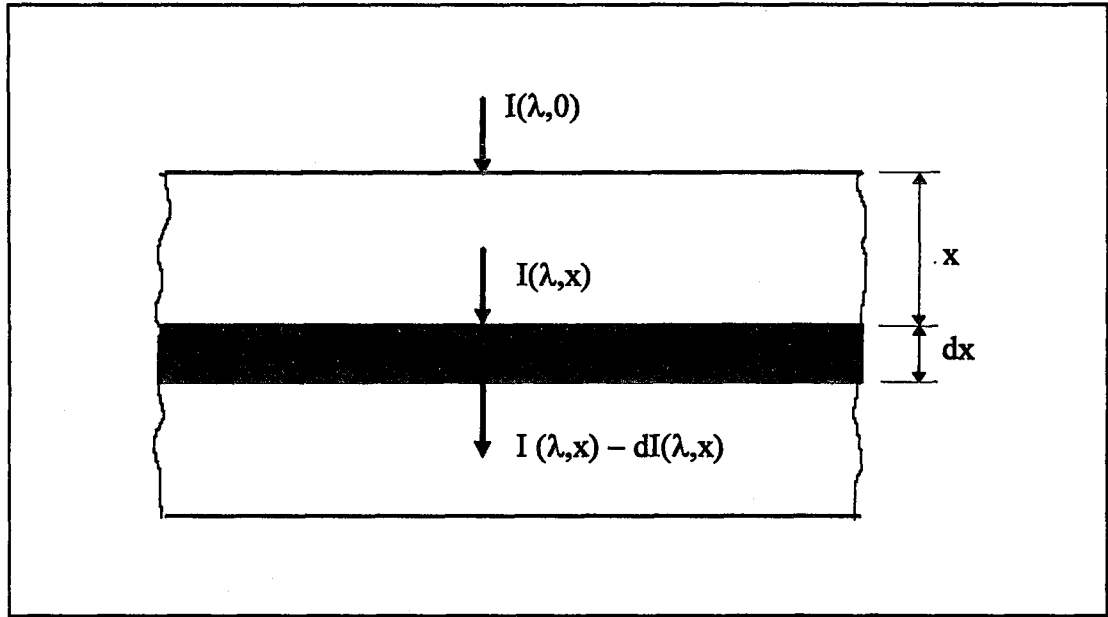


BÖLÜM 3. GÜNEŞ HAVUZLARININ FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

3.1. Güneş Işınımının Güneş Havuzu İçinde Soğurulması

Sıvıların güneş ışınımını soğurması, katı ve gazların soğurmasından farklı bir özelliğe sahiptir. Havuz yüzeyine direk ve dağınık olarak gelen güneş ışınlarının bir kısmı havuz yüzeyinde ince bir tabaka tarafından soğurulur, diğer bir kısmı havuz yüzeyinden yansır, geri kalan kısmı ise havuz içinde su tabakasının derinliklerine doğru ilerler. Havuz içinde herhangi bir noktaya ulaşan ışınım miktarı, güneşin pozisyonuna, günün zamanına, havuzun yerleşimine, havuz içindeki akışkan türüne, havuz içinde ışınımın hareket mesafesine, akışkanın sıcaklığına, ışınımın dalga boyuna, akışkan içinde bulunan toz ve canlı organizmaların dağılımına bağlı olarak değişiklik gösterir [13,14,15].

Güneş ışınları, yeryüzüne değişik dalga boylarında ulaşan bir spektruma sahip olduklarından, güneş ışınımının dalga boyuna bağlı olarak su içinde soğurulması, soğurulan enerji miktarını önemli şekilde etkileyen etkenlerden birisidir [13,14,15,17]. Güneş spektrumunun uzun ve kısa dalga boylu kısmı havuz yüzeyinin birkaç santimetre altında soğurulurlar, geri kalan kısmı ise havuzun derinliklerine doğru ilerlerler [9,14,19,51]. Güneş spektrumunun yaklaşık % 40'ı 0.8 μm 'den daha büyük dalga boyunda olup, düşük enerji ihtiva etmektedirler. Bu ışınların tamamı, suyun moleküler yapısından dolayı havuzun yüzey soğurma tabakası tarafından soğurulduklarından havuzun verimine önemli bir katkı sağlamazlar. Fakat bu enerjinin havuz yüzeyinden ortama kaçması önlenemediği takdirde, depolama bölgesi sıcaklığının daha hızlı artmasına yardımcı olunabilir. Işınların dalga boyu küçüldükçe, havuz içinde daha derinlere gidebilmekte ve havuzun depolama bölgesinde toplanarak ısı enerjisi olarak depolanabilmektedir. Temiz ve berrak bir su tabakasında, yaklaşık olarak toplam enerjinin % 20-30'u 1.5 m. derinliğe kadar ulaşabilmektedirler [13,14].



Şekil 3.1 Bir akışkan tabakası içinde güneş ışınımının soğurulması [55]

Su tabakası içinde ışınımın soğurulma olayı, matematiksel olarak Beer Kanunu ile ifade edilebilir [15,51]. Şekil 3.1'deki sistem gözönüne alınarak havuz yüzeyine gelen λ dalga boyunda ve $I(\lambda,0)$ şiddetindeki bir ışın demeti, havuz yüzeyinden x mesafesi kadar derinlikte küçük bir dx kalınlığındaki su tabakasından geçtiğinde tabakaya giren ve çıkan ışınım enerjisi farkı tabaka tarafından soğurulur. Böylece tabakada oluşan enerji dengesi,

$$-\frac{\partial I(\lambda,x)}{\partial x} = I(\lambda,0) \cdot \mu(\lambda) \quad (3.1)$$

şeklinde formülize edilebilir [13,15,51]. Eşitliğin sol tarafı, dx kalınlığındaki su tabakasının birim uzunluğundaki ışınım enerji artışı, sağ tarafıda birim hacimde soğurulan enerji miktarını göstermektedir. Denklemden $I(\lambda,0)$; havuz yüzeyinden suya giren λ dalga boylu ışınım enerjisini, $\partial I(\lambda,x)$; dx kalınlığındaki tabakada soğurulan ışınım enerjisini, $\mu(\lambda)$; soğurma katsayısını temsil etmektedir. dx kalınlığındaki tabakada soğurulma miktarı; gelen ışınımın şiddetine, soğurma katsayısına ve dx 'in büyüklüğüne bağlı olarak değişiklik gösterir [13,51].

Havuzla giren ışınımın katettiği yol boyunca soğurulması,

$$\frac{\partial I(\lambda, x)}{I(\lambda, 0)} = -\mu_i(\lambda) \cdot x \quad (3.2)$$

şeklinde yazılıp integrali alınırsa,

$$I(\lambda, x) = I(\lambda, 0) \cdot e^{-\mu_i(\lambda) \cdot x} \quad (3.3)$$

denklemini elde edilir. Bu eşitlik kullanılarak her dalga boyu için ayrı ayrı enerji soğurulma hesabı yapılabilir. Ancak, bu hesaplama oldukça fazla zaman alacağından pratikte uygulaması oldukça zordur. Bu nedenle, güneş enerjisi spektrumunun N tane ışın demetine sahip olduğu kabul edilirse, yukarıdaki denklem,

$$\sum_{i=1}^N I_i(\lambda, x) = \sum_{i=1}^N I_i(\lambda, 0) \cdot e^{-\mu_i(\lambda) \cdot x} \quad (3.4)$$

şeklinde genelleştirilebilir. Elde edilen bu eşitliğin, havuza giren toplam enerjiye bölünmesi ile soğurma fonksiyonu $I(\lambda, x)$,

$$I(\lambda, x) = \frac{\sum_{i=1}^N I_i(\lambda, 0) \cdot e^{-\mu_i(\lambda) \cdot x}}{\sum_{i=1}^N I_i(\lambda, 0)} \quad (3.5)$$

şekline dönüşür. Bu eşitlik,

$$\eta_i = \frac{I_i(\lambda, 0)}{\sum_{i=1}^N I_i(\lambda, 0)} \quad (3.6)$$

şeklinde bir denklemle kısaltılırsa soğurma fonksiyonu, $I(\lambda, x)$ 'in son hali,

$$I(\lambda, x) = \sum_{i=1}^N \eta_i \cdot e^{-\mu_i(\lambda) \cdot x} \quad (3.7)$$

şeklinde olur [13,14,15,51]. Işınım spektrumu, belirli sayıda kısımlara ayrılarak her kısma ait soğurma katsayısı tanımlamak suretiyle, $I(\lambda, x)$ soğurma fonksiyonunun derinliğe bağlı olarak grafiği çizilebilir. Bu amaçla, deneysel verilerle uyum içinde olan soğurma fonksiyonları elde edebilmek için bir çok çalışma yapılmıştır. Bunlardan biriside Rabl ve Nielsen'nin yapmış oldukları çalışmadır [13,14]. Rabl ve Nielsen 0.2

ve 1.2 μm . dalga boyları arasındaki ışınım demetini 4 eşit parçaya ayırarak 10 cm.'den 2 m. derinliğe kadar 10 cm. aralıklarla değişen her konum için $I(\lambda, x)$ değerini hesaplayan yeni bir ifade geliştirmişlerdir. Buldukları bu değerlerin,

$$I(x) = 0.36 - 0.08 \cdot \ln(x) \quad (3.8)$$

şeklinde bir bir fonksiyonla temsil edilebileceğini ortaya koymuşlardır. Baryant ve Colbeck, Rabl ve Nielsen'in soğurma fonksiyonuna benzeyen bir soğurma fonksiyonu modeli geliştirerek soğurma fonksiyonunun,

$$I(x) = 0.73 - 0.08 \cdot \ln(x) \quad (3.9)$$

şeklinde logaritmik bir fonksiyonla temsil edilebileceğini göstermişlerdir [13,14,15]. Denklemden x cm. cinsinden, ışınımın su içinde takip ettiği yolu göstermektedir.

Daha sonraki yıllarda, Hull 0.3125 ve 1.3125 μm . dalga boyları arasındaki ışınım demetini 40 eşit parçaya bölerek,

$$I(x) = 0.727 - 0.0561 \cdot \ln(x) \quad (3.10)$$

şeklinde yeni bir soğurma fonksiyonu modeli geliştirmiştir [14]. Hull, geliştirmiş olduğu bu yeni modelin, Rabl ve Nielsen'in geliştirdikleri modele göre % 10 daha fazla enerji soğurabileceğini yapmış olduğu hesaplamalarla ortaya koymuştur. Daha sonraki yıllarda, Hull tarafından geliştirilmiş olan bu yeni soğurma fonksiyonunun doğruluk derecesi, temiz su içeren doğal göllerde değişik araştırmacılar tarafından yapılan ölçümlerle desteklenmiştir [13,14]. Yapılan bu çalışmaların grafikleri, Şekil 3.2'de görülmektedir.

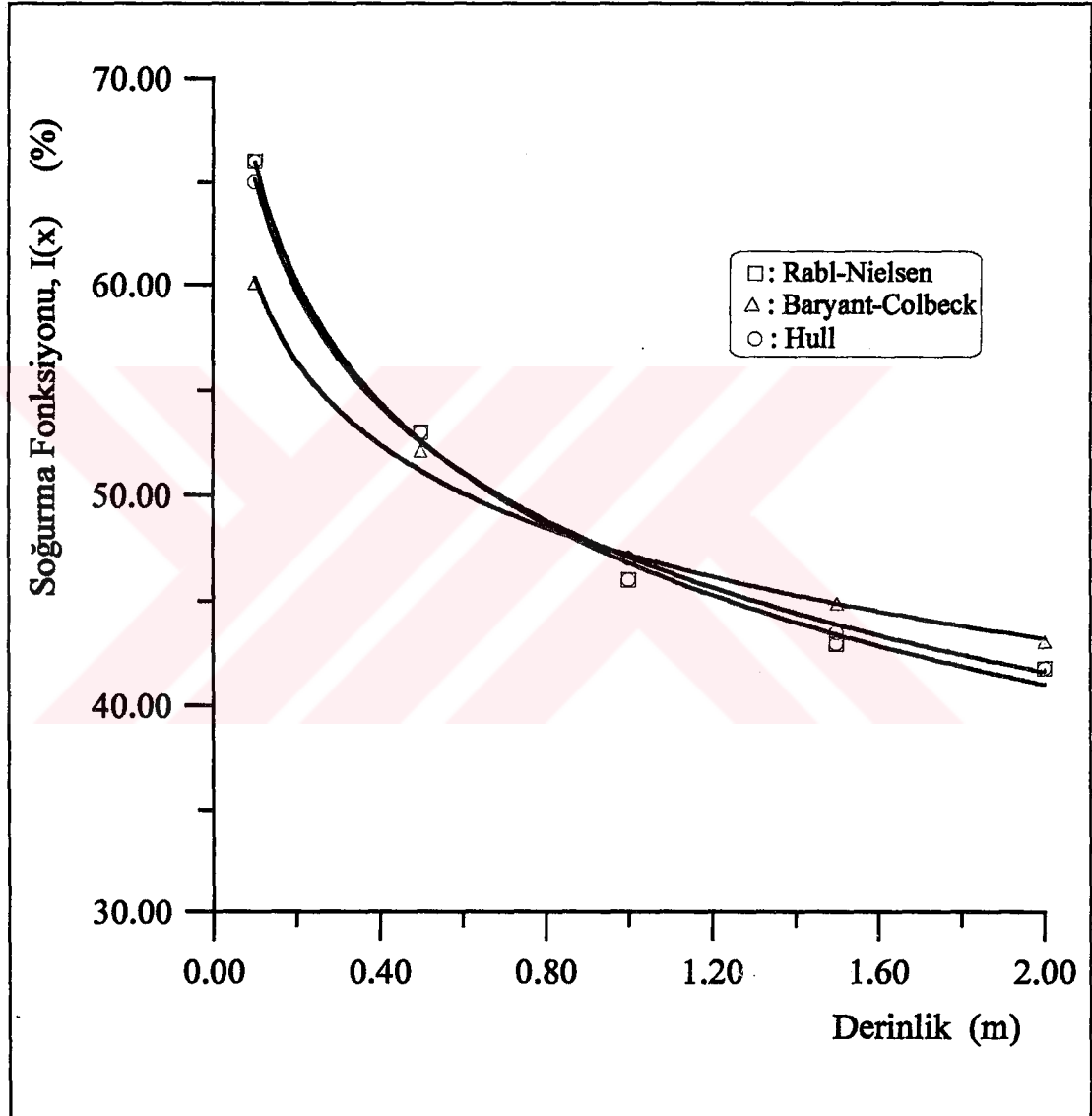
Bu konuda yapılan bu çalışmalardan başka Dake ve Harleman, uzun ve kısa dalga boylu güneş ışınımının suyun üst tabakalarında çok çabuk soğurulduğunu ve su tabakası içinde soğurulma olayının suyun derinliğiyle eksponensiyel olarak azalan şu ifade ile,

$$\frac{I_x}{I_s} = (1 - \beta) \cdot e^{-\mu \cdot x} \quad x > 0 \quad (3.11a)$$

$$I_s = I_x \quad x = 0 \quad (3.11b)$$

$$I_s = (1 - a) \cdot I_0 \quad (3.11c)$$

gösterilebileceğini, çeşitli göllerde yapmış oldukları ölçümlerden elde ettikleri verilerle ortaya koymuşlardır [51].



Şekil 3.2 Su içerisinde güneş ışımınının soğurulması için geliştirilen soğurma fonksiyonlarının karşılaştırması [14]

Daha sonraki yıllarda, Dake ve Harleman'ın yapmış oldukları bu yaklaşım, Hawlader ve bir çok araştırmacı tarafından da desteklenerek kesinlik kazanmıştır [17,18,19]. Denklemde I_x ; x derinliğine ulaşan ışınım miktarını, I_s ; havuz yüzeyinden havuza giren

ışınım miktarını, I_0 ; havuz yüzeyine gelen ışınım miktarını, β ; havuz yüzeyinde soğurulan ışınım oranını, μ ; suyun ışınımı soğurma katsayısını, a ; yüzeyin ışınımı yansıtma oranını (yansıyan ışınım şiddetinin soğurulan ışınım şiddetine oranını), x ; havuz yüzeyinden itibaren ışınımın su içinde takip ettiği yolu göstermektedir.

3.2. Havuz Yüzeyine Gelen Işınım İlgili Formülasyon

Yeryüzünün herhangi bir noktasına gelen güneş ışınımı, günün zamanına, aylara ve mevsimlere göre değişiklik gösterdiğinden dolayı havuza giren güneş enerjisi de gelme açısının bir fonksiyonu olarak değişiklik göstermektedir. Havuz yüzeyine gelen ışınımın havuz yüzeyinde soğurulan ve havuza giren oranı, Fresnel eşitliği kullanılarak,

$$\beta = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\sin^2(\theta_k - \theta_g)}{\sin^2(\theta_k + \theta_g)} \right] + \left[\frac{\tan^2(\theta_k - \theta_g)}{\tan^2(\theta_k + \theta_g)} \right] \quad (3.12)$$

geliş ve kırılma açısına bağlı olarak bulunabilir [9,13,15,37]. Havuz yüzeyine gelen ışınımın geliş açısı, güneş zenit açısına eşit olup,

$$\cos\theta_g = \cos(\delta) \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(W) + \sin(\delta) \cdot \sin(\phi) \quad (3.13)$$

eşitliği ile hesaplanır [9,13,15]. Denklemden, θ_g ; ışınımın geliş açısını, δ ; deklinasyon açısını, ϕ ; enlem açısını, W ; güneş saat açısını göstermektedir. Güneş deklinasyon açısı,

$$\delta = 23.45 \cdot \sin \left[\frac{360 \cdot (284 - n_d)}{365} \right] \quad (3.14)$$

formülü ile bulunabilir [9,13,15]. Havuz yüzeyinden yansıyarak atmosfere kaybolan ışınımın kırılma açısı ise Snell Kanunundan,

$$\frac{\sin\theta_g}{\sin\theta_k} = \frac{n_{\text{tuzlu-su}}}{n_{\text{hava}}} \quad (3.15)$$

bulunur [9,15,29]. Denklemden θ_g ; havuz yüzeyine ışınımın geliş açısını, θ_k ; havuz yüzeyinde ışınımın kırılma açısını, $n_{\text{tuzlu su}}/n_{\text{hava}}$ ise ışınımın kırılma indeksi oranını temsil

etmektedir. Kırılma indeksi oranı, tuzlu su çözeltisi için yapılan deneysel çalışmalar sonucunda 1.33 olarak tesbit edilmiştir [29,37,42]. Havuz içinde ışımın takip ettiği gerçek uzunluk ise,

$$x' = \frac{x}{\text{Cos}\theta_k} \quad (3.16)$$

fomülüyle hesaplanır. Yüzeyden yansıyan ışınım oranı ile havuza giren ışınım oranının toplamı bire eşit olacağından havuza giren ışınım miktarı,

$$\tau + a = 1 \quad (3.17a)$$

$$I_s = \tau \cdot I_0 \quad (3.17b)$$

$$I_s = (1 - a) \cdot I_0 \quad (3.17c)$$

eşitliğinden bulunur [18,19,17,51].

Bu çalışmada, havuzda soğurulan ışınım değerleri Dake ve Harleman'ın geliştirmiş oldukları soğurma fonksiyonu kullanılarak hesaplanmıştır. Bu fonksiyonun kullanılmasının nedeni, fonksiyonun tamamen doğal şartlarda yapılan deneysel çalışmalar sonucunda geliştirilmiş olmasından kaynaklanmaktadır.

Dake ve Harleman'ın yapmış oldukları deneysel çalışmaya göre; β 'nın havuz yüzeyinde soğurulan ışınım miktarı ile ilgili olup yaklaşık olarak 0.4 civarında zamana bağlı olmayan sabit bir değer olduğu; soğurma katsayısı μ ise, temiz ve berrak su kütlesi için 0.16 m^{-1} , bulanık ve koyu su kütlesi için 0.89 m^{-1} olduğu; suyun, ışımın geliş açısına bağlı olarak yüzeyine gelen ışımın % 3.0 - % 10.0 arasında değişen miktarını yansıttığı tesbit edilmiştir [17,51].

3.3. Güneş Havuzunun Isıl Kararsızlığı

Güneş havuzunun verimli bir şekilde çalışabilmesi, havuzda oluşan dikey hareketlerin kararlılığına bağlıdır. Zamana bağlı olarak yüzeyinden ışınım ile ısınan yatay bir akışkan tabakası içinde önce iletim hareketi başlar [9,12,51]. Bu iletim hareketiyle, akışkan tabakasının alt tarafına kadar ulaşan ışınım enerjisi akışkan tabakasını alt tarafından

ısıtmaya başlayacak ve zamana bağlı olarak üst tabakaların sıcaklığına oranla alt tabakaların sıcaklığı artacaktır. Alt tabakaların sıcaklıklarının artmasıyla birlikte yoğunlukları azalacak ve akışkan tabakasının üst yüzeyi ile alt yüzeyi arasında oluşan yoğunluk farkı, alttan üste doğru molekül sel bir hareketin başlamasına neden olacaktır. Havuz içinde molekül sel hareketin başlamasıyla birlikte havuzun kararsızlığı başlamış olur. Buna benzer olaylara, tabiatta doğal göllerde ve bahçe havuzlarında rastlanmaktadır [2,3,12,20]. Bundan dolayı da doğal göllerin ve bahçe havuzlarının yüzeyleri daha sıcak olmakta, sıcaklıkları derinlikle ters orantılı olarak artıp azalmaktadır. Güneş havuzlarında ise bu molekül sel hareket belirli bir yoğunluk gradyeni içeren taşınımsız ara bölge tarafından önlenmekte ve alt taşınımlı bölgeye ulaşan ışınım enerjisi yine bu bölgede tutularak ısı enerjisi olarak depolanabilmektedir. Güneş havuzundan verimli bir şekilde faydalanabilmek için, taşınımsız ara bölgenin sahip olduğu gradyen büyüklüğünün doğru bir şekilde tasarlanması ve bu bölge içinde oluşan molekül sel düşey harekete mani olunmasına bağlıdır. Havuz yüzeyinde rüzgarın etkisiyle oluşan dalgalar, ısı çekme esnasında alt taşınımlı bölgede meydana gelen yatay akış hareketleri, ısınan akışkanın genişmesi, havuz yüzeyinde tuz konsantrasyonunun artmasıyla artan buharlaşma, yüzeydeki akışkanın yoğunluğu gibi etkenler taşınımsız ara bölge içinde molekül sel düşey bir hareketin başlamasına sebep olduğu gibi havuz içinde taşınım hareketinin başlamasına da neden olabilen önemli etkenlerdir. Havuz içinde gelişen bu olaylar, taşınımsız ara bölge içinde kararsızlıkların başlamasına ve belirli bir zaman sonrada taşınımsız ara bölgenin yalıtım görevinin bozulmasına neden olurlar [9,12].

3.4. Tuz Yoğunluğu Gradyeninin Kararlılık Koşulları

Güneş havuzlarının yapısı gereği, tuz yoğunluğu havuz tabanından yüzeyine doğru azalmaktadır. Havuz içinde, ışınımın soğurulmasıyla birlikte tabakalar arasındaki sıcaklık farkından dolayı bir ısıl dengesizlik başlar. Sıcaklık farkı nedeniyle oluşan bu ısıl dengesizlik, havuzda yoğunluk gradyeni kararsızlığına ve taşınım hareketinin başlamasına neden olur. Havuz içinde oluşan bu kararsızlıklar, güneş havuzlarının çözülmesi gereken en önemli problemleridir [15,38]. Bu nedenle bu konuda bir çok çalışma yapılmış ve havuzun kararlılık kriterinin,

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} \geq 0 \quad (3.18)$$

eşitliğini sağlaması gerektiği sonucuna varılmıştır [9,15,30]. Bu eşitlik, havuz içindeki yoğunluğun, derinlikle değişiminin sıfırdan büyük veya eşit olması gerektiğini ifade eden taşınımın ara bölge kararlılık kriteridir. Buna göre, yoğunluk derinlikle artmak zorundadır. Tuz çözeltisi yoğunluğunun sıcaklığa ve konsantrasyona bağlı olduğu göz önüne alınırsa yukarıdaki kararlılık kriteri,

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} = \frac{\partial \rho}{\partial C} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \geq 0 \quad (3.19)$$

şeklinde olur [9,15,30]. Denklemden ρ ; akışkanın yoğunluğunu (kg/m^3), x ; havuz derinliğini (m), C ; tuz konsantrasyonunu (kg.mol/m^3), T ; sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$) göstermektedir. Bu şart, havuz içinde tuz konsantrasyonunun artmasıyla artan yoğunluğun, sıcaklığın artışıyla artan yoğunluk değişiminden daha büyük olması durumunda, kararlılık kriterinin sağlanmış olacağını ifade etmektedir. Bazı araştırmacılara göre, bu şart havuz içinde gelişen taşınım hareketlerinin önlenmesi için yeterli olacağını söylerken, Weinberger [9] ve Kooi [30] sadece bu şartın sağlanmasıyla havuzun kararlılığının sağlanmış olamayacağını ileri sürmüştür. Weinberger ve Kooi, bu kararlılık kriterinin, havuz yüzeyi ile tabanı arasındaki sıcaklık farkından dolayı zamanla artan salınım hareketlerini önleyemeyeceğini ve bundan dolayı da havuzun statik kararlılığının yanında, yoğunluk gradyeni ile tuz konsantrasyonu arasındaki bağıntıdan aşağıdaki şekilde elde edilen,

$$(v + \alpha) \cdot \frac{\partial \rho}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + (v + D) \cdot \frac{\partial \rho}{\partial C} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \geq 0 \quad (3.20)$$

dinamik kararlılık kriterinde sağlanması gerektiğini ifade etmektedir [9,30,32]. Denklemden v ; çözeltinin kinematik viskozitesini, α ; çözeltinin ısı yayılım katsayısını, D ; çözeltinin kütle yayılım katsayısını göstermektedir. Bu şartlar sağlandığı takdirde havuzun yoğunluk gradyeni kararlılığı sağlanmış olacaktır.

3.5. Tuz Yoğunluğu Gradyeninin Korunması

Güneş havuzlarında, yoğunluk gradyeninin korunması ve sürekliliğinin sağlanabilmesi, güneş havuzunun verimli bir şekilde çalışması için oldukça önemli bir kriterdir [20,23,52]. Yoğunluk gradyeni, havuz içindeki tabakaların farklı yoğunlukta çözeltilerle yapay olarak oluşturulduktan belirli bir müddet sonra kendiliğinden kararlı hale gelmektedir [2,9,20]. Bu gradyenin korunması, yüzeydeki ve tabandaki tuz yoğunluğunu kontrol etmekle mümkün olur. Yoğunluk gradyeninin korunması, güneş havuzlarının sahip olduğu en önemli problemlerden birisi olması nedeniyle bu konuda çok çeşitli deneysel ve teorik çalışmalar yapılmıştır [20,27,52]. Yapılan bu çalışmalar sonucunda, yoğunluk gradyeninin korunması ve sürekliliğinin sağlanması için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yöntemler üç ana grupta şu şekilde sıralanabilir.

1. Doğal güneş havuzlarında olduğu gibi havuz tabanına tuz ekleyerek, havuz yüzeyinde tath ve temiz su ile yıkayarak yoğunluk gradyeni korunmuş olur [9].
2. Yoğunluk koruma düzenekleri dizayn ederek, havuza belirli noktalardan belirli yoğunlukta çözelti enjekte etmek suretiyle yoğunluk gradyeni korunabilir [13].
3. Sıcaklıkla çözünürlüğü artan bir tuz kullanılarak, havuz doymuş hale getirilmek suretiyle yoğunluk gradyeni yerel sıcaklığa bağlı olarak kendi kendine korunmuş olur [15,16,38].
4. Diğer bir metod ise, çökeltme havuzu (rising pond) yöntemidir. Havuz yanına ek küçük bir havuz inşa edilmek suretiyle, havuz yüzeyinde difüzyon olayı ile birlikte zamanla artan tuz oranı yüksek çözeltilin, bu havuza alınıp yoğunluğu havuz tabanındaki çözeltilin yoğunluğuna eşit olacak şekilde hazırlandıktan sonra, tekrar havuz tabanına göndererek yoğunluk gradyeni korunmuş ve sürekliliği sağlanmış olur [27,53].

3.6. Güneş Havuzu Isı Transferi Analizi

Güneş havuzu, çeşitli ısı transferi olaylarının gerçekleştiği homejen olmayan bir sistemdir. Havuz içindeki sıcaklık dağılımı, soğurulan ışınım enerjisine, havuz içinde meydana gelen düşey taşınım hareketlerine, havuz yüzeyinden buharlaşma, ışınım ve

taşınım ile olan ısı kayıplarına bağlı olarak değişiklik gösterir [15,51]. Ayrıca havuzdaki sıcaklık dağılımı, mevsimsel değişimlerle doğru orantılı olarak artmakta veya azalmaktadır. Havuzda gerçekleşen ısı transferi olayları iletim, taşınım ve ışımla olmak üzere üç ayrı grupta detaylı olarak incelenebilir [12,13,45,51].

3.6.1. İletim yoluyla olan ısı akısı

Zamana bağlı olarak yüzeyi ışımla enerjisine maruz kalan bir akışkan tabakasında, ilk önce iletim rejimi başlamaktadır [12]. Havuz yüzeyine gelen ışımla yüzeyde belirli bir kısmının soğurulmasıyla, yüzey sıcaklığı taban sıcaklığına oranla daha hızlı artar. Yüzey ile taban arasındaki bu sıcaklık farkı, yüzeyden tabana doğru iletim rejiminin başlamasına neden olur [12]. Böylece, havuz yüzeyinden tabanına doğru ısı akısı hareketi ilk olarak iletim rejimiyle başlamış olur. Bu ısı akısı,

$$\Delta q = -k \cdot A \left(\frac{\Delta T}{\Delta x} \right) \cdot \Delta t \quad (3.21)$$

şeklinde formülize edilebilir [12,23,45,51]. Denklemden, k ; ısı iletim katsayısını ($W/m^{\circ}C$), A ; havuz yüzey alanını (m^2), ΔT ; sıcaklık farkını ($^{\circ}C$), Δx ; tabaka kalınlığını (m), Δt ; zaman aralığını ($san.$) göstermektedir.

3.6.2. Taşınım yoluyla olan ısı akısı

Havuz içinde taşınım ile olan ısı akısı, tabakalar arasındaki sıcaklık farkı nedeniyle oluşan yoğunluk farkından dolayı, daha az yoğun su moleküllerinin daha yoğun su molekülleriyle yer değiştirmesi sonucu olmaktadır. Bu ısı akısında,

$$q = \rho \cdot C_p \cdot \omega \cdot T \quad (3.22)$$

formülüyle ifade edilebilir [12,23,51]. Denklemden, ρ ; akışkanın yoğunluğunu (kg/m^3) C_p ; akışkanın özgül ısısını ($kJ/kg^{\circ}C$), ω ; taşınım hareketinin düşey doğrultudaki ortalama hızını (m/s), T ; akışkanın sıcaklığını ($^{\circ}C$) göstermektedir. Taşınım hızının çok küçük olması nedeniyle taşınım ile olan ısı akısı ihmal edilebilmektedir [9,12,23].

3.6.3. Işınım yoluyla olan ısı akısı

Güneş havuzu içinde ışınım enerjisi ile olan ısı akısı, ışınımın soğurulmasıyla meydana gelmektedir. Daha öncede belirtildiği gibi, bu çalışmada Dake ve Harleman'ın [51] deneysel çalışmaları sonucu elde etmiş oldukları soğurma fonksiyonu kullanıldığından ışınım ile olan ısı akısı formülasyonu bu çalışma temel alınarak yapılmıştır. Bu çalışmada, ışınımın su içinde soğurulması havuz derinliği ile eksponensiyel olarak azalmaktadır. Buna göre havuz içinde ışınımın soğurulmasıyla oluşan ısı akısı,

$$q = -\frac{\partial I(\lambda, x)}{\partial x} \quad (3.23a)$$

$$I(\lambda, x) = (1-a) \cdot (1-\beta) \cdot I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (3.23b)$$

$$\frac{\partial I(\lambda, x)}{\partial x} = -\mu \cdot (1-a) \cdot (1-\beta) \cdot I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (3.23c)$$

$$q = \mu \cdot (1-a) \cdot (1-\beta) \cdot I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (3.23d)$$

şeklinde formülüne edilebilir [17,18,19,51].

3.7. Güneş Havuzunda Meydana Gelen Isı Kayıpları

Bu çalışmada ele alınan güneş havuzu modeli, yarlardan ve zeminden tamamen yalıtıldığından dolayı ısı kayıpları sadece havuz yüzeyinden taşınım, buharlaşma ve ışınım yoluyla olmaktadır. Buna göre havuz yüzeyinden ortama olan toplam ısı kaybı,

$$Q_t = Q_c + Q_e + Q_r \quad (3.24)$$

şeklinde ifade edilir [15,18]. Q_c ; taşınım, Q_e ; buharlaşma, Q_r ; ışınım ile olan ısı kayıplarını göstermektedir. Taşınım ile olan ısı kaybı,

$$Q_c = h_c \cdot (T_y - T_\infty) \quad (3.25a)$$

$$h_c = 5.7 + 3.8 \cdot V_{\text{rüzgar}} \quad (3.25b)$$

formülüyle hesap edilir [15,18]. Denklemden, h_c ; ısı taşınım katsayısını ($W/m^2 \cdot ^\circ C$), T_y ;

yüzey sıcaklığını ($^{\circ}\text{C}$), T_{∞} ; ortam sıcaklığını ($^{\circ}\text{C}$), V ; rüzgar hızını (m/san.) temsil etmektedir.

Buharlaştırma ile olan ısı kaybı, atmosferdeki su buharının kısmi basıncı, suyun buhar basıncı ve ısı taşınım katsayısıyla ilgili olup şu şekilde,

$$Q_e = \frac{h_e \cdot h_c \cdot (P_y - P_{\infty})}{1.6 \cdot C_p \cdot P_{\text{atm}}} \quad (3.26a)$$

$$P_y = \exp\left(18.403 - \frac{3885}{T_y + 230}\right) \quad (3.26b)$$

$$P_{\infty} = R_h \cdot \exp\left(18.403 - \frac{3885}{T_{\infty} + 230}\right) \quad (3.26c)$$

hesaplanabilir [18]. Denklemden, h_e ; buharlaştırma gizli ısısını (kJ/kg), h_c ; ısı taşınım katsayısını ($\text{W}/\text{m}^2\text{C}$), P_y ; T_y sıcaklığındaki suyun buhar basıncını (kPa), P_{∞} ; T_{∞} sıcaklığında atmosferdeki su buharının kısmi basıncını (kPa), C_p ; havanın özgül ısısını ($\text{kJ}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$), P_{atm} ; atmosfer basıncını (kPa), R_h ; % bağıl nem oranını göstermektedir.

Işımla olan ısı transferi, sıcaklıkları farklı iki cisim arasındaki elektromagnetik dalgalar şeklinde olmaktadır. Buna göre ışımla olan ısı kaybı,

$$Q_r = \epsilon_w \cdot \sigma (T_y^4 - T_{\text{sky}}^4) \quad (3.27a)$$

$$T_{\text{sky}} = T_{\infty} + (0.55 + 0.061(\sqrt{P_{\infty}}))^{0.25} \quad (3.27b)$$

formülü ile hesaplanabilir [18]. Denklemden ϵ_w ; suyun neşretme katsayısını, σ ; Stefan-Boltzman sabitini ($5.68 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2\text{K}^4$), T_y ; yüzey sıcaklığını (K), T_{sky} ; gökyüzü sıcaklığını (K) temsil etmektedir.

BÖLÜM 4. MATERYAL VE METOD

4.1. Güneş Havuzu Matematik Modeli

Bu çalışmanın ana gayesi, İ.T.Ü. Makina Fakültesi çatısında kurulu bulunan güneş havuzunun matematik modelini oluşturarak elde edilen ısı transferi ve difüzyon denklemlerinin nümerik ve analitik çözümünü yapıp havuzun sıcaklık ve yoğunluk dağılımını bularak, bulunan bu değerleri aynı havuzda daha önce yapılmış olan deneysel çalışma sonuçlarıyla karşılaştırmaktır.

Güneş havuzları homejen bir sistem olmadığından dolayı, homejen sistemler için geliştirilen ısı-difüzyon denklemlerinin, güneş havuzları ısı ve kütle transferi analizinde doğrudan kullanılması doğru sonuç vermeyebilir [3,13]. Bu nedenle, güneş havuzunda gerçekleşen olaylar gözönüne alınarak, güneş havuzlarının nasıl çalıştığını incelemek, ısıl ve kütle davranışlarını taklidi olarak bulmak amacıyla havuzun matematik modeli oluşturulmuştur. Şekil 4.1'de, matematik modeli yapılan güneş havuzunun fiziki yapısı görülmektedir.

4.2. Güneş Havuzu Isı Transferi Matematik Modeli

Güneş havuzu ısı transferi matematik modeli, tabakaya giren ve çıkan enerjinin o tabakada soğurulan enerjiye eşit olması ilkesine dayanmaktadır. Buna göre dx kalınlığındaki yatay bir akışkan tabakasında zamana bağlı olarak oluşan enerji dengesi,

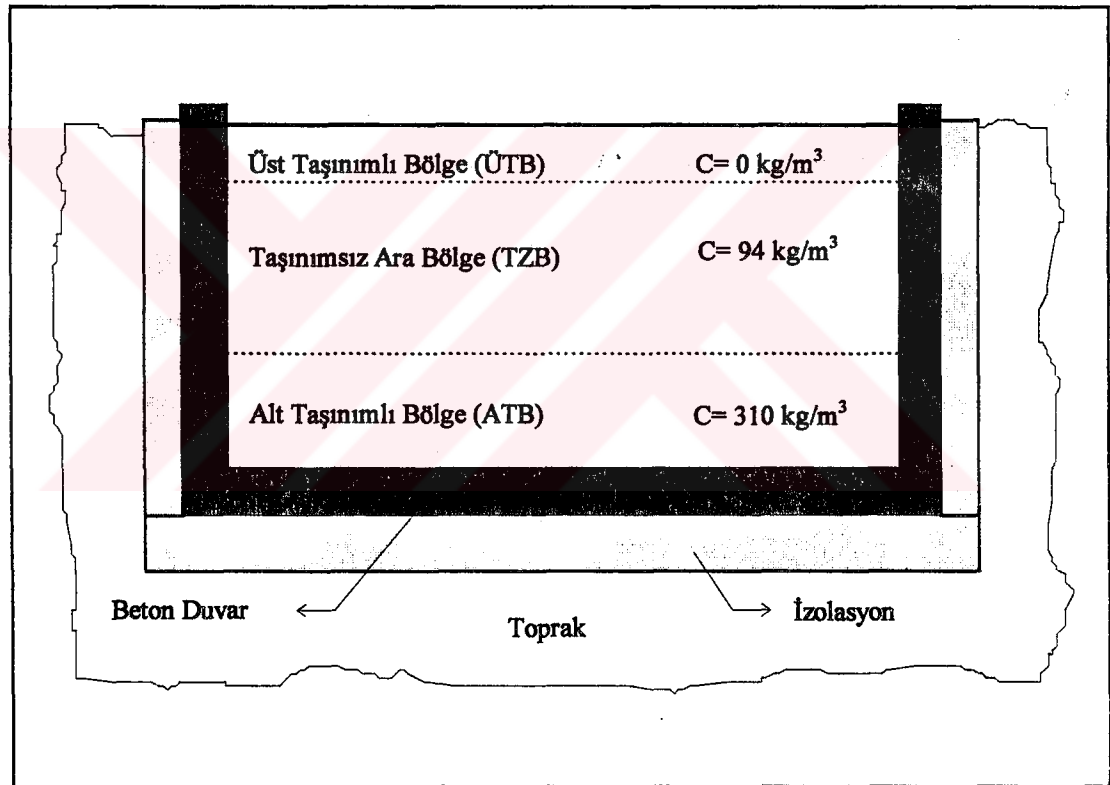
$$\begin{bmatrix} \text{İletimle} \\ \text{tabakaya} \\ \text{giren ısı} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{Taşınım} \\ \text{la} \\ \text{tabakaya} \\ \text{giren ısı} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{Tabakada} \\ \text{soğurulan} \\ \text{ısı} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Tabakadan} \\ \text{iletimle} \\ \text{kaybolan} \\ \text{ısı} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{Tabakadan} \\ \text{taşınım} \\ \text{la} \\ \text{kaybolan} \\ \text{ısı} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{Tabakada} \\ \text{depolanan} \\ \text{ısı} \end{bmatrix}$$

veya,

$$-(k+k_t)\frac{\partial T}{\partial x} + \rho.C_p.\omega.T + \dot{q} =$$

$$-(k+k_t).\left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\partial x\right) + \rho.C_p.\omega.\left(T + \frac{\partial T}{\partial x}\partial x\right) + \rho.C_p\frac{\partial T}{\partial t}\partial x \quad (4.1)$$

şeklinde formülize edilebilir [12,13,51]. Denklemden, k_t ; eddy iletim katsayısını ($W/m^{\circ}C$), ω ; taşınım hareketinin düşey doğrultudaki ortalama hızını (m/s) göstermektedir.



Şekil 4.1 Matematik modeli yapılan tuz tabakalı güneş havuzunun fiziki yapısı

Matematik modelden elde edilen denklemin tamamı ele alındığında, çözümü oldukça karmaşık ve zordur. Bu nedenle, denklemin çözümünü yapabilmek için bazı kabuller yaparak denklemin basitleştirilmesi gerekmektedir. Bu konuda, Weinberger [9], Subhaker ve arkadaşları [15], Dake ve Harleman [51]'nin yapmış oldukları yaklaşımlar dikkate alınarak yapılan bu kabuller şu şekilde sıralanabilir.

1. Modelde ele alınan havuz, ÜTB, TZB ve ATB olmak üzere üç bölgeden oluşmaktadır.
2. Havuzda kullanılan NaCl çözeltisinin ısıl fiziksel özellikleri (k , ρ , C_p , α , D) sabittir; sıcaklığa, konsantrasyona ve derinliğe bağlı olarak değişmemektedir.
3. Güneş ışınımı, havuz içinde ulaştığı her noktada derinliğe bağlı olarak soğurulmaktadır.
4. Havuz zeminden ve yan taraflarından tamamen yalıtılmış olduğundan, ısı kaybı sadece havuz yüzeyinden taşınım, buharlaşma ve ışınım yoluyla olmaktadır.
5. Taşınım hızının çok küçük olması nedeniyle havuz içinde taşınım yoluyla olan ısı akısı ve eddy iletim katsayısı ihmal edilmiştir.
6. Üst ve alt taşınımlı bölgelerin tabaka kalınlıkları boyunca yoğunlukları üniform olduğu için sıcaklıkları da üniformdur.

Yapılan 5. kabule göre, eddy iletim katsayısının ve ortalama taşınım hızının çok küçük olması nedeniyle, bu değerler ihmal edilip gerekli düzenlemeler yapıldığında, enerji denge denklemi,

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} + \dot{q} = -k \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \partial x \right) + \rho \cdot C_p \frac{\partial T}{\partial t} \partial x \quad (4.2)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} + \dot{q} + k \frac{\partial T}{\partial x} + k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \partial x = \rho \cdot C_p \frac{\partial T}{\partial t} \partial x \quad (4.3)$$

şeklinde olur [12,51]. Güneş ışınımının soğurulmasıyla birim hacimde üretilen ısı,

$$\dot{q} = q \cdot dx \quad (4.4a)$$

$$\dot{q} = -\frac{\partial I(\lambda, x)}{\partial x} \partial x \quad (4.4b)$$

eşitliği ile ifade edilir ve denklemde yerine konulursa,

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \partial x - \frac{\partial I(\lambda, x)}{\partial x} \cdot \partial x = \rho \cdot C_p \frac{\partial T}{\partial t} \partial x \quad (4.5a)$$

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{\partial I(\lambda, x)}{\partial x} = \rho \cdot C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.5b)$$

eşitliği elde edilir [9,12,15,51]. Denklemden, ısı fiziksel özellikler, aşağıdaki şekilde ısı yayılım katsayısı ile kısaltılarak denklemden yerine yazılırsa,

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p} \quad (4.6)$$

$$\alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{1}{\rho \cdot C_p} \cdot \frac{\partial I(\lambda, x)}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.7)$$

şeklinde bir denklem elde edilir [9,12,15,18,51]. Enerji dengesinden elde edilen bu denklem, bir boyutlu zamana bağlı yüzeyinden ısı akısına maruz ısı iletim denklemdir. Yapılan modelden daha kesin sonuçlar elde edebilmek için, ısı transferi analizinin Şekil 4.2'de görülen model güneş havuzu tabaka sınırlarına göre her bölge için ayrı ayrı yapılması daha uygun bir yol olacaktır. Buna göre her bölgenin enerji denge denklemini:

Üst taşınım bölge (ÜTB) için;

$$\alpha \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_1} + \frac{1}{\rho \cdot C_p} \cdot (I|_{x=0} - I|_{x=x_1} - Q_t) = \frac{\partial T}{\partial t} \cdot x_U \quad (4.8)$$

Ara taşınım bölge (TZB) için;

$$\frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(\alpha \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{1}{\rho \cdot C_p} \cdot \frac{\partial I}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.9)$$

Alt taşınım bölge (ATB) için;

$$\alpha \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_2} + \frac{1}{\rho \cdot C_p} \cdot (I|_{x=x_2} - I|_{x=L}) = \frac{\partial T}{\partial t} \cdot x_A \quad (4.10)$$

şeklinde olur [13,15,18,54].

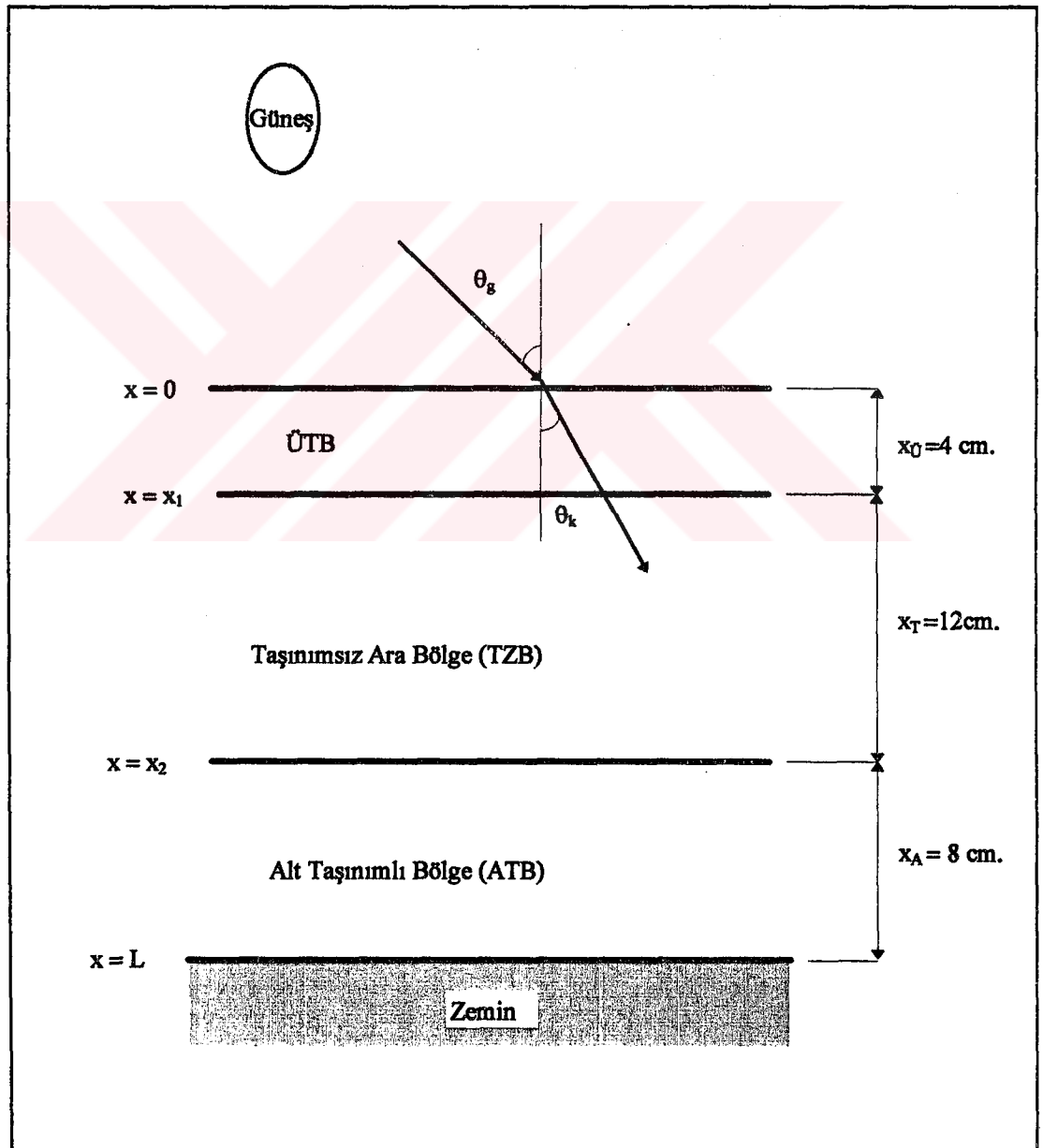
4.3. Analitik Çözüm İçin Değişkenlerin Ayırımı Yöntemi

Homojen diferansiyel denklemlerin çözümünde kullanılan en kolay yöntemlerden birisi olan değişkenlerin ayırımı yöntemi, geçici rejimde ısı iletim problemlerinin

çözümünde de kullanılmaktadır. Bu yöntemle çözülecek olan diferansiyel denklemin ve belirli sayıda sınır şartlarının homojen olması gerekir [55,56,57]. Çözüm yöntemini daha kolay anlayabilmek için, diferansiyel denklemin 4.11'deki gibi,

$$\alpha \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} = \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \quad (4.11)$$

geçici rejimde ısı iletim denklemini kabul edelim.



Şekil 4.2 Matematik modeli yapılan tuz tabakalı güneş havuzunun tabaka sınırları

$T(x,t)$ sıcaklığı, 4.12 denklemindeki gibi yazıldığında, $\Psi(x)$ fonksiyonu x 'e (konuma), $\Gamma(t)$ fonksiyonu ise t 'ye (zamana) bağlı iki fonksiyonun çarpımı formunda daha basite indirgenmiş olur.

$$T(x,t) = \Psi(x) \cdot \Gamma(t) \quad (4.12)$$

Bu fonksiyonlar iki ayrı adi diferansiyel denklem olduğundan, 4.11 denkleminin çözümü daha kolay yapılabilir. 4.12 denklemi, 4.11 denkleminde yerine yazıldığında,

$$\frac{1}{\Psi(x)} \cdot \left(\frac{\partial^2 \Psi(x)}{\partial x^2} \right) = \frac{1}{\alpha \cdot \Gamma(t)} \cdot \left(\frac{\partial \Gamma(t)}{\partial t} \right) \quad (4.13)$$

şeklinde bir diferansiyel denklem elde edilir. Eşitliğin sol tarafı konumun fonksiyonu, sağ tarafı ise sadece zamanın fonksiyonudur. Denklemin her iki tarafı bir birine eşit olduğuna göre, her iki taraf bir sabite eşit olmalıdır. Eşitliğin her iki tarafında $-\lambda^2$ gibi bir sabite eşit olduğu kabul edilirse, 4.13 denklemi,

$$\frac{1}{\Psi(x)} \cdot \left(\frac{\partial^2 \Psi(x)}{\partial x^2} \right) = \frac{1}{\alpha \cdot \Gamma(t)} \cdot \left(\frac{\partial \Gamma(t)}{\partial t} \right) = -\lambda^2 \quad (4.14)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi(x)}{\partial x^2} + \lambda^2 \cdot \Psi(x) = 0 \quad (4.15)$$

$$\frac{\partial \Gamma(t)}{\partial t} + \alpha \cdot \lambda^2 \cdot \Gamma(t) = 0 \quad (4.16)$$

şeklinde olur. $\Gamma(t)$ fonksiyonunun zamanla azalması gerektiğinden dolayı λ^2 sabiti negatif seçilmiştir. $\Gamma(t)$ fonksiyonu birinci, $\Psi(x)$ fonksiyonu ise ikinci dereceden adi bir diferansiyel denklemdir. $\Psi(x)$ fonksiyonunun çözümü için iki ayrı sınır şartına ihtiyaç vardır. Bu sınır şartları ısı iletim denklemini çözmek için oluşturulan sınır şartlarından elde edilir. Buna göre $\Psi(x)$ fonksiyonu,

$$\Psi(\lambda, x) = C_1 \cdot \sin(\lambda \cdot x) + C_2 \cdot \cos(\lambda \cdot x) \quad (4.17)$$

şeklinde özel bir çözüme sahiptir. Denlemdaki C_1 ve C_2 sabitleri, sınır şartlarına bağlı olarak bulunur ve yerine yazılarak $\Psi(\lambda, x)$ fonksiyonunun çözümü elde edilmiş olur. $\Gamma(t)$ fonksiyonunun çözümü ise, adi bir diferansiyel denklem olması nedeniyle kolayca

şu şekilde,

$$\Gamma(t) = e^{-\alpha \lambda^2 t} \quad (4.18)$$

bulunur [55]. $\Gamma(t)$ ve $\psi(\lambda_n, x)$ fonksiyonlarının çözümlerinden, $T(x, t)$ 'nin özel çözümü,

$$T(x, t) = e^{-\alpha \lambda_n^2 t} \cdot \Psi(\lambda_n, x) \quad (4.19)$$

şeklinde olur. Denklemin tam çözümü, özel çözümlerin lineer toplamına eşittir. Buna göre, $T(x, t)$ fonksiyonu,

$$T(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-\alpha \lambda_n^2 t} \cdot \Psi(\lambda_n, x) \quad (4.20)$$

şekline dönüştür. Denklemdaki C_n sabiti,

$$C_n = \frac{1}{N} \int_0^l F(x) \cdot \Psi(\lambda_n, x) \quad (4.21)$$

$$F(x) = T(x, t) \quad t = 0 \quad (4.22)$$

$$N = \int_0^l [\Psi(\lambda_n, x)]^2 \cdot dx \quad (4.23)$$

şeklinde tanımlanır. Buna göre $T(x, t)$ sıcaklığının genel çözümü,

$$T(x, t) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\alpha \lambda_n^2 t} \cdot \Psi(\lambda_n, x) \cdot \int_0^l F(x') \cdot \Psi(\lambda_n, x') \cdot dx' \quad (4.24)$$

şeklinde olur [55].

4.4. Geçici Rejimde Isı İletim Denkleminin Analitik Çözümü

Çeşitli fiziksel durumlar için geliştirilen zamana bağlı sıcaklık şemaları, ısı iletim problemlerini çözmek için her zaman uygun olmayabilir. Bu nedenle, böyle durumlarda analitik çözümün kullanılması çözümden elde edilen sonuçların doğruluğu

bakımından daha faydalı olur. Yukarıda matematik modeli yapılmış olan güneş havuzunun sıcaklık dağılımını bulmak için matematik modelden elde edilen ısı iletim denklemi sonlu kalınlıkta havuz modeli için çözülmüştür. ATB ve ÜTB sıcaklıklarının bölge kalınlığı boyunca uniform olması nedeniyle, bu bölgeler sınır şartı kabul edilerek sadece TZB için çözüm yapılmıştır. Denklemin çözümü için gerekli olan sınır şartlarının oluşturulmasında Weinberger [9], ve Dake ve Harleman [51]'nin yapmış oldukları çalışmalar referans alınmıştır. Buna göre, yapılan kabuller şu şekilde sıralanabilir.

1. Işınım soğurulmaya başlamadan önceki havuz sıcaklığı, ortam sıcaklığına eşittir.
2. Havuz yüzeyinde ($x=L$) taşınım ile ısı transferi olayı gerçekleşmektedir.
3. Havuz zeminden ($x=0$) tamamen yalıtılmış olması nedeniyle zeminden ısı kaybı olmamaktadır.

Yapılan bu kabullere göre ısı iletim denkleminin ve sınır şartlarının yeni matematik formülasyonu,

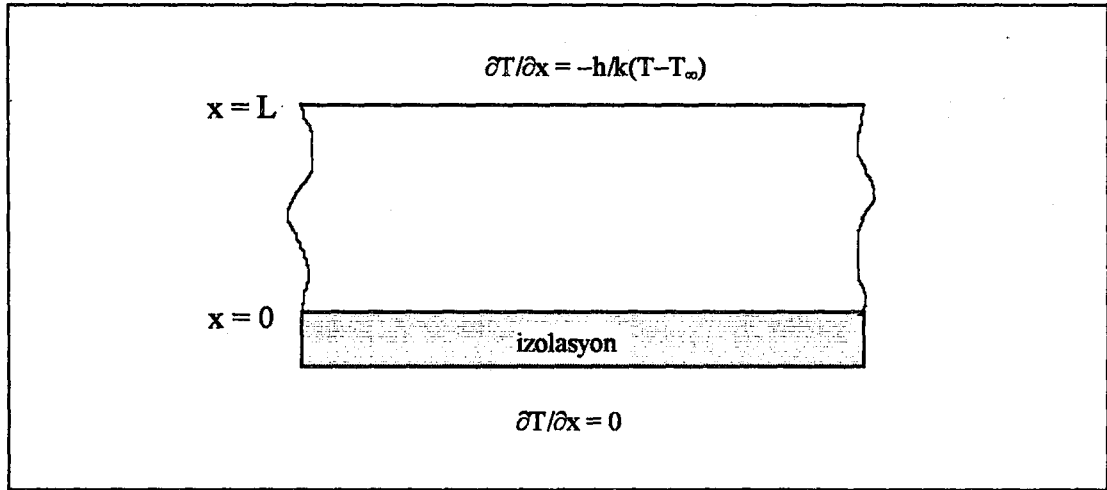
$$\alpha \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} + \frac{q}{\rho \cdot C_p} = \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \quad 0 \leq x \leq L, t > 0 \quad (4.25a)$$

$$T(x,0) = T_\infty \quad t = 0 \quad (4.25b)$$

$$\frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = 0 \quad x = 0, t > 0 \quad (4.25c)$$

$$-k \frac{\partial T(L,t)}{\partial x} = h[T(L,t) - T_\infty] \quad x = L, t > 0 \quad (4.25d)$$

şeklinde olur (Şekil 4.3). $x = L$ sınır şartının homojen olmaması ve sistemde iç enerji üretimi olması ısı iletim denkleminin homojenliğinin bozulmasına neden olmaktadır. Bu nedenle homojen diferansiyel denklemlerin çözümünde kullanılan değişkenlerin ayırımı metodunun yukarıdaki ısı iletim denkleminin çözümünde kullanılması uygun olmaz. Denklemin çözümünü yapabilmek için homojenliğin bozulmasına neden olan etkenlerin ortadan kaldırılması gerekir. Bu yüzden denklemin çözümüne başlamadan önce homojen olmayan sınır şartları homojen hale getirilmelidir [55,57]. Buna göre problemin dönüşüm formülasyonunu yapabilmek için $\theta(x,t)$ şeklinde yeni bir sıcaklık tanımlanır ve şu şekilde,



Şekil 4.3 Isı iletim denkleminin analitik çözümü için oluşturulan sınır şartları

$$\theta(x,t) = T(x,t) - T_\infty \quad (4.26)$$

ifade edilir. Tanımlanan bu sıcaklığa göre problemin matematik formülasyonu,

$$\alpha \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{q}{\rho \cdot C_p} = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad \theta(x,0) = 0, \quad t = 0 \quad (4.27a)$$

$$\frac{\partial \theta(0,t)}{\partial x} = 0 \quad x = 0, \quad t > 0 \quad (4.27b)$$

$$\theta(L,t) = 0 \quad x = L, \quad t > 0 \quad (4.27c)$$

$$\theta(x,t) = T(x,t) - T_\infty \quad t = 0 \quad (4.27d)$$

şeklinde olur. Bu dönüşüm sayesinde sınır şartları homojen hale getirilebilir. İç enerji üretiminden dolayı kaynaklanan homojensizlik ise, yukarıda tanımlanan $\theta(x,t)$ sıcaklığının iki sıcaklığın toplamı formunda,

$$\theta(x,t) = \Phi(x,t) + \phi(x) \quad (4.28)$$

yazılarak yok edilebilir. Böylece denklem tamamen homojen hale getirilmiş olur. Denklemden $\Phi(x,t)$ fonksiyonu,

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} \quad \Phi(x,0) = -\phi(x) \quad t = 0 \quad (4.29a)$$

$$\frac{\partial \Phi(0,t)}{\partial t} = 0 \quad x = 0, \quad t > 0 \quad (4.29b)$$

$$\Phi(L,t) = 0 \quad x = L, \quad t > 0 \quad (4.29c)$$

şartını, $\phi(x)$ fonksiyonu ise,

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{q}{k} = 0 \quad 0 \leq x \leq L \quad (4.30a)$$

$$\frac{\partial \phi(0)}{\partial x} = 0 \quad x = 0 \quad (4.30b)$$

$$\phi(L) = 0 \quad x = L \quad (4.30c)$$

şartını sağlamaktadır [55,57]. Denklemin çözümünü yapabilmek için iki fonksiyonun ayrı ayrı çözülmesi gerekir. $\Phi(x,t)$ fonksiyonu homojen bir diferansiyel denklem olması nedeniyle değişkenlerin ayırımı metodu kullanılarak çözülebilir. $\phi(x)$ fonksiyonunun çözümü ise, $\phi(x)$ denkleminin sürekli rejimdeki ısı iletim denklemi olması nedeniyle oldukça kolaydır. Buna göre, $\phi(x)$ fonksiyonunun çözümü için gerekli işlemler yapıldığında,

$$\phi(x) = \frac{1}{2} \cdot \frac{q \cdot L^2}{k} \left[1 - \left(\frac{x}{L} \right)^2 \right] \quad (4.31)$$

sonucu elde edilir [55,57]. $\Phi(x,t)$ 'nin çözümü ise değişkenlerin ayırımı metodu formunda,

$$\Phi(x,t) = \Psi(x) \cdot \Gamma(t) \quad (4.32)$$

yazılıp çözümü yapıldığında,

$$\Phi(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cdot e^{-\alpha \lambda_n^2 t} \cdot \text{Cos}(\lambda_n \cdot x) \quad (4.33)$$

$$-\phi(x) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cdot \text{Cos}(\lambda_n \cdot x) \quad (4.34)$$

$$C_n = -(-1)^n \cdot \frac{2}{(\lambda_n \cdot L)^3} \left(\frac{q \cdot L^2}{k} \right) \quad (4.35)$$

$$\Phi(x,t) = -\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot \left(\frac{q \cdot L^2}{k} \right) \cdot \left(\frac{2}{(\lambda_n \cdot L)^3} \right) \cdot e^{-\alpha \cdot \lambda_n^2 \cdot t} \cdot \text{Cos}(\lambda_n \cdot x) \quad (4.36)$$

şeklinde bir çözüm elde edilir [55,57]. Elde edilen bu çözümler, $\theta(x,t)$ fonksiyonunda yerine yazıldığında, $\theta(x,t)$ sıcaklığının çözümü,

$$\theta(x,t) = \frac{1}{2} \cdot \frac{q \cdot L^2}{k} \left[1 - \left(\frac{x}{L} \right)^2 \right] - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{q \cdot L^2}{k} \right) \frac{(-1)^n}{(\lambda_n \cdot L)^3} \cdot e^{-\alpha \cdot \lambda_n^2 \cdot t} \cdot \text{Cos}(\lambda_n \cdot x) \quad (4.37)$$

şeklinde olur. Bu sonuç, 4.26 denkleminde yerine yazıldığında ise güneş havuzunun sıcaklık dağılımı, $T(x,t)$ 'nin analitik çözümü,

$$T(x,t) = T_{\infty} + \frac{q \cdot L^2}{2 \cdot k} \left[1 - \left(\frac{x}{L} \right)^2 \right] - 2 \cdot \left(\frac{q \cdot L^2}{k} \right) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(\lambda_n L)^3} \cdot e^{-\alpha \cdot \lambda_n^2 \cdot t} \cdot \text{Cos}(\lambda_n x) \quad (4.38)$$

elde edilir [55,57]. Elde edilen bu denkleme göre yapılan havuz sıcaklık dağılımı hesaplama neticeleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

4.5. Isı İletim Denkleminin Nümerik Çözümü

4.5.1. Nümerik çözüm için sonlu farklar metodu

Geçici rejimde ısı iletim problemleri, ısı iletimi kısmi diferansiyel denklemlerinin sonlu farklar metodu kullanılarak zamana ve konuma bağlı denklemlere dönüştürülmesiyle nümerik olarak çözülebilir. Kayalı ve arkadaşları [13], Rubin ve arkadaşları [26], El-Rafae ve arkadaşları [18], Subhaker ve arkadaşları [15] zamana bağlı güneş havuzu sıcaklık dağılımını, ısı iletim denklemini sonlu farklar metoduna göre çözerek bulmuşlardır. Matematik modelden elde edilen diferansiyel denklemleri sonlu farklar metoduna dönüştürmek için çeşitli şemalar geliştirilmiştir. Burada sadece bu çalışmada kullanılan açık (explicit) şema çözüm metodu gösterilecektir. Çözüm metodunu daha iyi anlayabilmek için, çözümü yapılacak olan denklemin, denklem 4.39'daki gibi bir

boyutlu zamana bağılı ısı iletim denklemi olduğunu kabul edelim.

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \alpha \cdot \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \quad (4.39)$$

Bu diferansiyel denklemi, sonlu farklar formunda yazabilmek için konum ve zaman değişkenleri Δx ve Δt şeklinde, Şekil 4.4'de görüldüğü gibi küçük bölümlere ayırılır ve şu şekilde,

$$x = m \cdot \Delta x \quad m = 0,1,2,\dots,M \quad (4.40a)$$

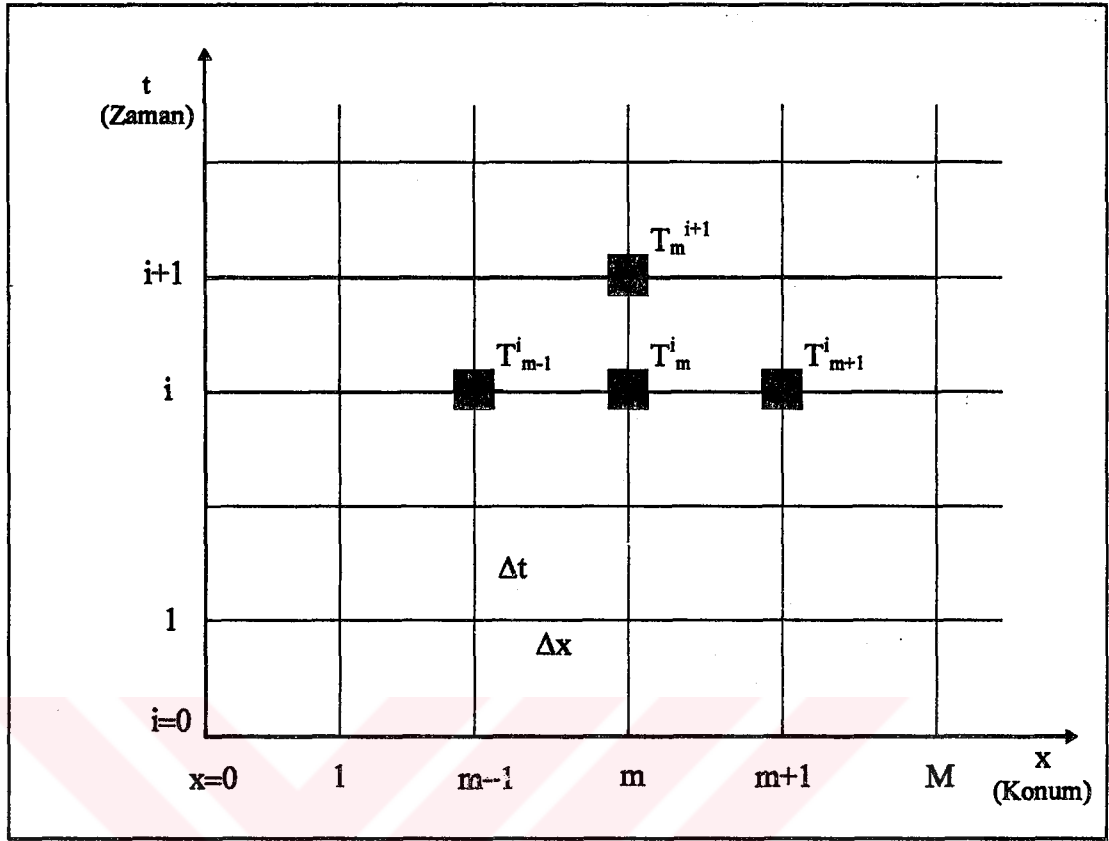
$$t = i \cdot \Delta t \quad i = 0,1,2,\dots \quad (4.40b)$$

$$M = \frac{L}{\Delta x} \quad (4.40c)$$

ifade edilir.

Tablo 4.1 Isı iletim denkleminin analitik çözümünden elde edilen havuz bölge sıcaklıkları

Zaman (Saat)	Işınım Miktarı (W/m ²)	ÜTB Sıcaklığı (°C)	TZB Sıcaklığı (°C)			ATB Sıcaklığı (°C)
			7. cm.	10. cm.	13. cm	
10.00	394	32.6	33.3	33.9	34.4	34.7
10.30	523	33.4	34.4	35.2	35.8	36.3
11.00	534	33.5	34.5	35.3	35.9	36.4
11.30	545	33.6	34.6	35.4	36.1	36.5
12.00	534	33.5	34.5	35.3	35.9	36.4
12.30	710	34.6	36.0	37.1	37.9	38.5
13.00	399	32.6	33.4	34.0	34.4	34.8
13.30	489	33.2	34.1	34.9	35.4	35.9
14.00	455	33.0	33.8	34.5	35.1	35.4
14.30	469	33.1	33.9	34.7	35.2	35.6
15.00	367	32.4	33.1	33.7	34.1	34.4
15.30	464	33.0	33.9	34.6	35.2	35.6
16.00	360	32.3	33.0	33.6	34.0	34.3



Şekil 4.4 Bir boyutlu zamana bağlı ısı iletim denkleminin sonlu farklar formunda gösterilmesi için konum-zaman kafesi [55].

Yapılan bu tanımlara göre, x konumundaki ve t zamanındaki sıcaklık $T(x,t)$, T_m^i olarak sembolize edilirse,

$$T(x,t) = T(m \cdot \Delta x, i \cdot \Delta t) = T_m^i \quad (4.41)$$

eşitliği elde edilir. Buna göre sıcaklığın konuma göre 1. türevi,

$$\left. \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right|_{m+1} \cong \frac{T_{m+1}^i - T_m^i}{\Delta x} \quad (4.42a)$$

$$\left. \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right|_{m-1} \cong \frac{T_m^i - T_{m-1}^i}{\Delta x} \quad (4.42b)$$

şeklinde olur. Sıcaklığın $m \cdot \Delta x$ konumunda ve $i \cdot \Delta t$ zaman aralığında konuma göre 2. türevi şu şekilde,

$$\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \Big|_m \cong \left[\frac{\frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \Big|_{m+1} - \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \Big|_{m-1}}{\Delta x} \right] \quad (4.43a)$$

$$\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \Big|_{m,i} = \left[\frac{T_{m-1}^i - 2 \cdot T_m^i + T_{m+1}^i}{(\Delta x)^2} \right] \quad (4.43b)$$

bulunur. T_{m-1}^i ve T_{m+1}^i sıcaklıkları T_m^i 'ye en yakın komşu iki noktadır. Zamana göre sıcaklığın 1. türevi $m \cdot \Delta x$ konumunda ve $i \cdot \Delta t$ zaman aralığında,

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \Big|_{m,i} = \left[\frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t} \right] \quad (4.44)$$

şeklinde ifade edilir. T_m^{i+1} , $m \cdot \Delta x$ noktasındaki ve $(i+1) \cdot \Delta t$ zaman aralığındaki sıcaklık değeridir. 5.b ve 6. denklemler, 1. denklemde yerine yazıldığında,

$$\frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t} = \alpha \cdot \left[\frac{T_{m-1}^i + T_{m+1}^i - 2 \cdot T_m^i}{(\Delta x)^2} \right] \quad (4.45)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlikte gerekli düzenlemeler yapıldığında,

$$T_m^{i+1} = r \cdot [T_{m-1}^i + T_{m+1}^i] + (1 - 2 \cdot r) \cdot [T_m^i] \quad (4.46a)$$

$$r = \frac{\alpha \cdot \Delta t}{(\Delta x)^2} \quad (4.46b)$$

$$\begin{aligned} i &= 0,1,2,\dots,\dots\dots \\ m &= 0,1,2,\dots,\dots\dots, M \end{aligned} \quad (4.46c)$$

şeklinde ısı iletim denkleminin sonlu farklar formunda yazılmış son hali elde edilmiş olur [55].

4.5.2. Güneş havuzu sıcaklık dağılımının bilgisayar yardımıyla nümerik olarak hesaplanması

Güneş havuzunun sıcaklık ve yoğunluk dağılımını hesaplayabilmek için ilk önce havuzun matematik modeli oluşturuldu. Modelden elde edilen diferansiyel denklemler, yukarıda çözüm metodu açıklanan sonlu farklar metodu yaklaşımıyla, fortran bilgisayar dilinde yazılan bilgisayar programı yardımıyla nümerik olarak çözüldü. Yazılan fortran programı Ek A'da sunulmuştur.

Bölüm 4.2'de her bölge için ayrı ayrı oluşturulan enerji denge denklemleri, zamanla parabolik olarak değişen kısmi diferansiyel denklemlerdir. Bu kısmi diferansiyel denklemlerin çözülebilmesi için gerekli kabullerin yapılarak uygun başlangıç ve sınır şartlarının oluşturulması gerekmektedir. Kayalı [13], Rubin ve arkadaşları [26], El-Rafae ve arkadaşları [18], Subhakar ve arkadaşları [15]'nin çalışmaları dikkate alınarak yapılan kabuller;

1. Işınımın soğurulmaya başlamadan önceki havuz sıcaklığının ortam sıcaklığına eşit olduğu,
2. Ara taşınımsız bölgenin dört eşit kısma ayrıldığı,
3. Çözeltinin ısı fiziksel özelliklerinin sıcaklık, konsantrasyon ve derinlikle değişmediği,
4. Havuz zeminden yalıtılmış olması nedeniyle zeminden ısı kaybının olmadığı,
5. Havuz tabanına kadar ulaşan ışınım siyah zemin tarafından soğurulmakta ve soğurulan bu ışınımın ATB sıcaklığına katkısının %10 dolayında olduğu, şeklinde sıralanabilir.

Yapılan birinci kabule göre başlangıç sınır şartı,

$$T = T_{\infty}, \quad 0 \leq x < L, \quad t = 0 \quad (4.47)$$

şeklinde olur ve denklemin çözümüne başlanabilmesi için yeterli olmaktadır.

Havuzu oluşturan bölgelerin enerji denge denklemleri açık (explicit) şema sonlu farklar formunda:

Üst taşınımlı bölge (ÜTB) için;

$$T_m^{i+1} = r \cdot [T_{m+1}^i] + (1-r) \cdot [T_m^i] + \frac{\Delta t}{\rho \cdot C_p \cdot x_0} \cdot \left(\dot{I}|_{x=0} - \dot{I}|_{x=x_1} - Q_t \right) \quad (4.48a)$$

$$r = \frac{\alpha \cdot \Delta t}{x_0 \cdot \Delta x} \quad (4.48b)$$

Ara taşınımsız bölge (TZB) için;

$$T_m^{i+1} = r \cdot [T_{m+1}^i + T_{m-1}^i] + (1-2 \cdot r) \cdot [T_m^i] - \frac{\Delta t}{\rho \cdot C_p} \cdot \left(\frac{\partial I}{\partial x} \right) \quad (4.49a)$$

$$r = \frac{\alpha \cdot \Delta t}{(\Delta x)^2} \quad (4.49b)$$

Alt taşınımlı bölge (ATB) için;

$$T_m^{i+1} = r \cdot [T_{m+1}^i] + (1-r) \cdot [T_m^i] + \frac{\Delta t}{\rho \cdot C_p \cdot x_A} \cdot \left(\dot{I}|_{x=x_2} - \dot{I}|_{x=L} + 0.1 \cdot \dot{I}|_{x=L} \right) \quad (4.50a)$$

$$r = \frac{\alpha \cdot \Delta t}{x_A \cdot \Delta x} \quad (4.50b)$$

şeklinde olur [13,18,26].

4.5.3. Sonlu farklar metoduna göre nümerik çözüm işlem basamakları

Çözüm metodunun daha kolay anlaşılabilmesi bakımından sonlu farklar metoduna göre yazılmış olan ısı iletim denkleminin

$$T_m^{i+1} = r \cdot [T_{m-1}^i + T_{m+1}^i] + (1-2 \cdot r) \cdot [T_m^i] \quad (4.51a)$$

$$r = \frac{\alpha \cdot \Delta t}{(\Delta x)^2} \quad (4.51b)$$

$$\begin{aligned} i &= 0,1,2,\dots,\dots \\ m &= 0,1,2,\dots,\dots,M \end{aligned} \quad (4.51c)$$

şeklinde bir denklem olduğu kabul edilsin. Bu denklem, bir boyutlu zamana bağlı ısı

iletim denkleminin açık (explicit) şema sonlu farklar formunda yazılmış son halidir. m noktasında, $i+1$ zamanındaki T_m^{i+1} sıcaklık değeri, m noktasına komşu iki noktada i zamanındaki sıcaklık değerlerinden ve önceden belirlenmiş r parametresinin değerine göre hesaplanır. Sonucun hassasiyeti önceden belirlenen r parametresine, dolayısıyla Δt ve Δx değerlerine bağlıdır. Δt ve Δx değerlerinin büyük seçilmesi çözümün kısa zamanda elde edilmesini sağlamasına rağmen elde edilen sonuçların hassasiyetinin azalmasına neden olur. Bu bakımdan Δx ve Δt değerleri ne kadar küçük seçilirse çözümden elde edilen sonuçların hassasiyetleri o kadar artar. Fakat bu değerler gelişmiş güzel seçilemez. Yukarıda r parametresiyle tanımlanan bu değerler nümerik hesaplamaların kararlılığı ve kesinliği yönünden önemlidir. Bundan dolayı çözümde r parametresi kararlılık kriteri adını almaktadır. Şayet kararlılık kriteri bozulursa nümerik hesaplamaların kararlılığı da bozulur.

Herhangi bir zaman aralığında T_{m-1}^i ve T_{m+1}^i sıcaklıkları, T_m^i sıcaklığından küçük olması gerekir. Şayet r parametresinin değeri 0.5 değerini aşarsa T_m^i sıcaklığının katsayısı $(1-2r)$ 'nin değeri negatif olur ve çözümün kararlılığı bozulur. Buna göre T_m^{i+1} sıcaklığı bir sonraki zaman aralığında iki komşu noktadaki sıcaklıklardan daha düşük olamaz. Aksi halde ısı, alçak sıcaklıktan yüksek sıcaklığa akmış olurki bu durum termodinamiğin ikinci kanununa aykırıdır. Bu yüzden de T_m^i sıcaklığının komşu nokta sıcaklıklarından daha büyük olduğu kabul edilir. Bundan dolayı da T_m^i sıcaklığının katsayısı $(1-2r)$ 'nin değeri negatif olmamalıdır. Buna göre kararlılık kriteri,

$$1-2.r \geq 0 \quad (4.52a)$$

$$r \leq 0.5 \quad (4.52b)$$

şeklinde olur. Kararlılık kriteri için en iyi seçim 0.5 değeridir. Böylece T_m^i sıcaklığının katsayısı sıfır olur.

Hesaplamalara başlangıç sınır şartları girilerek ve $i=0$ değeri konularak başlanır. T_m^0 sıcaklıkları ilk şart olarak kabul edildiğinden dolayı, T_m^1 sıcaklığı $m=0,1,2,\dots,M$

noktaları için hesaplanmış olur. T_m^1 sıcaklığı hesaplandıktan sonra, $i=1$ değeri konularak aynı işlem tekrarlanır. Böylece T_m^2 sıcaklıklarında bir önceki işlemde bulunan T_m^1 sıcaklıkları kullanılarak hesaplanmış olur. Bu işlem belirtilen zaman aralığına kadar devam ettirilerek diğer sıcaklıklar hesaplanır [13,15,55]. Yapılan bu hesaplamalardan elde edilen havuz bölge sıcaklıkları, Tablo 4.2’de verilmiştir.

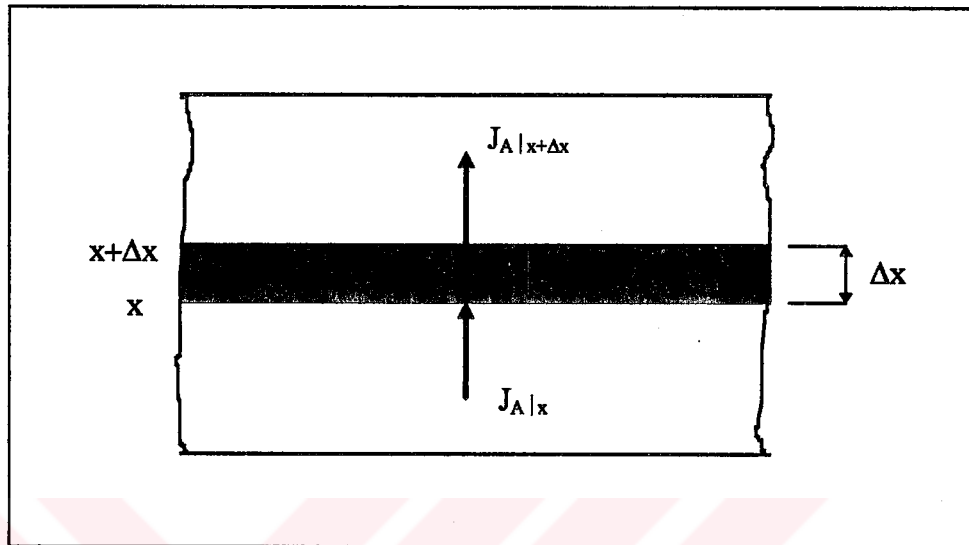
Tablo 4.2 Isı iletim denkleminin nümerik çözümünden elde edilen model güneş havuzu bölge sıcaklıkları.

Zaman (Saat)	Işınım Miktarı (W/m^2)	Yüzey Sıcaklığı ($^{\circ}C$)	ÜTB Sıcaklığı ($^{\circ}C$)	TZB Sıcaklığı ($^{\circ}C$)			ATB Sıcaklığı ($^{\circ}C$)
				7. cm.	10. cm.	13. cm	
10.00	394	31.9	31.2	31.2	31.2	31.2	31.7
10.30	523	33.1	31.7	31.3	31.4	31.6	32.4
11.00	534	33.2	32.6	31.6	31.6	31.9	33.0
11.30	545	33.4	33.0	32.0	31.8	32.3	33.7
12.00	534	33.4	33.3	32.4	32.2	32.7	34.3
12.30	710	34.2	33.4	32.8	32.5	33.2	35.2
13.00	399	32.6	33.9	33.0	32.9	33.7	35.8
13.30	489	32.3	33.0	33.4	33.3	34.2	36.4
14.00	455	31.9	32.5	33.4	33.8	34.7	37.0
14.30	469	31.7	32.1	33.3	35.1	35.2	37.5
15.00	367	31.0	31.8	33.3	35.3	35.7	37.9
15.30	464	30.9	31.3	33.2	35.4	36.1	38.5
16.00	360	30.8	31.0	33.1	35.6	36.4	38.9

4.6. Güneş Havuzu Kütle Transferi Matematik Modeli

Bir çok mühendislik uygulamalarında konsantrasyon dağılımı, zaman ve konuma bağlı olarak her ikisi ile birlikte aynı anda değişim gösterir. Buna benzer kütle transferi problemlerinin anlaşılması oldukça karmaşık ve zordur. Çünkü problemler birden fazla bağımsız değişkene bağlı diferansiyel denklemlerin çözümünü gerektirir. Bu nedenle, zamana bağlı kütle transferi problemlerinin büyük bir kısmı, zamana bağlı ısı iletim

problemleri gibi düşünülerek bu formda ifade edilmektedirler. Böylece zamana bağlı ısı iletim denklemlerini çözmek için uygulanan matematiksel yaklaşımlar, zamana bağlı kütle yayılım problemlerinin çözümüne de uygulanarak çözüm yapılabilmektedir [55].



Şekil 4.5 Yoğun bir ortamdaki akışkan tabakasında meydana gelen kütle difüzyonu [55]

Bu bölümde, bir boyutlu, zamana bağlı kütle-difüzyon denkleminin matematiksel formülasyonu ve bu formülasyonun çözümü gösterilecektir. Formülasyonu yapabilmek için bazı kabuller yapılması gerekmektedir. Buna göre;

1. Ortamda kimyasal reaksiyonun oluşmadığı,
 2. Ortamın sahip olduğu kütle miktarının sabit olduğu; azalma ve artışın olmadığı,
 3. Kütle transferinin molekül difüzyonla gerçekleştiği,
- varsayılmıştır [55].

Yapılan bu varsayımlara göre, havuz içindeki kütle dengesi, kütle korunum denkleminde,

$$\left[\begin{array}{c} \text{Tabakaya olan net} \\ \text{kütle yayılım miktarı} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Tabakadaki kütle} \\ \text{artış miktarı} \end{array} \right]$$

şeklinde ifade edilir [55]. Şekil 4.5’de görüldüğü gibi, A alanına sahip Δx kalınlığında ki bir diferansiyel hacim elementi için, x yönünde bir boyutlu kütle-difüzyonu, kütle korunumuna göre matematiksel bir ifade ile yazılacak olursa,

$$\left(J_A \Big|_x - J_A \Big|_{x+\Delta x} \right) \cdot A = A \cdot \Delta x \cdot \left(\frac{\partial C_A}{\partial t} \right) \quad (4.53)$$

ifadesi elde edilir. Denklemde, A alanına sahip ortamın J_A ; molekül difüzyon akısını, C_A ; molekül difüzyon konsantrasyonunu, t ise zamanı göstermektedir. Denklemde, Δx değerinin sıfıra yakın küçük bir değer olduğu kabul edilirse,

$$-\frac{\partial J_A}{\partial x} = \frac{\partial C_A}{\partial t} \quad (4.54)$$

şeklinde bir denklem elde edilir. Fick kütle-difüzyon kanununa göre difüzyon akısı, J_A 'nın, konsantrasyon ile bağıntısından,

$$J_A = -D \cdot \frac{\partial C_A}{\partial x} \quad (4.55)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlik 4.54 denklemine yerine yazıldığında,

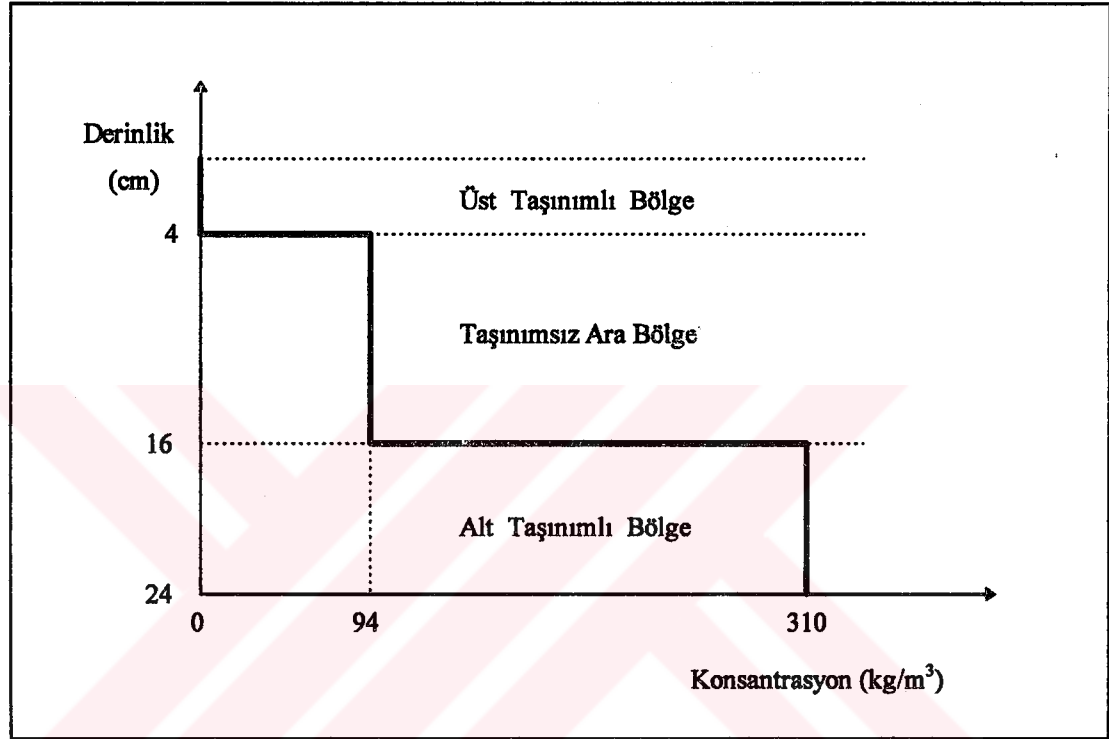
$$D \cdot \frac{\partial^2 C_A(x,t)}{\partial x^2} = \frac{\partial C_A(x,t)}{\partial t} \quad (4.56)$$

güneş havuzunun konsantrasyon dağılımını belirleyen kütle-difüzyon denklemi elde edilmiş olur [55]. Denklemde, C_A ; ortamın molekül difüzyon konsantrasyonunu ($\text{kg}\cdot\text{mol}/\text{m}^3$), D; kütle yayılım katsayısını (m^2/s), t; zamanı (s), x; konumu (m) göstermektedir. Elde edilen bu denklem, güneş havuzu konsantrasyon dağılımının hesaplanmasında çeşitli araştırmacılar tarafından kullanılmıştır [3,15,25,32,40].

4.7. Kütle Difüzyon Denkleminin Analitik Çözümü

Havuz içindeki yoğunluk, alt ve üst taşınımı bölgelerde uniform olduğundan kütle-difüzyon denklemi, yoğunluğun derinlikle değiştiği ara taşınimsız bölge için çözülür. Denklem çözümü, havuz içinde meydana gelen tuz difüzyon olayı gözönüne alınarak oluşturulan sınır şartlarına göre yapılır. Buna göre, ATB uniform yoğunluğa sahip olduğundan tuz difüzyonunun TZB'den itibaren başladığı kabul edilirse, havuz sonlu kalınlıkta cisim gibi ele alınarak denklemin çözümü yapılabilir. Yine aynı şekilde

ATB'nin tuz difüzyonunun kaynağı olduğu ve difüzyon olayının ATB'den itibaren başladığı kabul edilirse, havuz yarı sonsuz cisim olarak düşünülür ve buna göre çözüm yapılır. Bu çalışmada, difüzyon denklemini her iki havuz modeli için çözülerek, hangi modelin havuz konsantrasyon dağılımına daha uygun olduğu araştırılmıştır. Şekil 4.6'da model güneş havuzunun oluşturulan ilk konsantrasyon dağılımı görülmektedir.



Şekil 4.6 Matematik modeli yapılan güneş havuzunun ilk konsantrasyon dağılımı

4.7.1. Sonlu kalınlıkta havuz modeli için çözüm

Bir boyutlu, zamana bağlı kütle-difüzyon denkleminin çözümü yapılabilmesi için uygun kabullerin yapılarak başlangıç ve sınır şartlarının oluşturulması gerekir. Buna göre denklemin çözümünde, Weinberger [9], Subhakar ve arkadaşları [15], Meyer [32], Sreenivas ve arkadaşları [42]'nin çalışmaları gözönüne alınarak aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

1. Havuz tabanında ($x = 0$) tuz difüzyonunun olmamaktadır.
2. ÜTB tatlı su içerdiğinden, havuz yüzeyinde ($x = L$) tuz konsantrasyonu sıfırdır.
3. Kütle difüzyon katsayısı sabit olup, sıcaklık ve konsantrasyon ile değişmemektedir.

Çözümünden daha kesin sonuçlar elde edebilmek için, güneş havuzunun ara taşınınsız bölgesi 12 eşit parçaya bölünerek her parça için bir konsantrasyon değeri elde edilmesi düşünülmüştür. Yapılan kabullere göre, kütle-difüzyon denkleminin matematiksel ifadesi,

$$D \cdot \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad 0 \leq x \leq L, \quad t > 0 \quad (4.57a)$$

$$\frac{\partial C}{\partial x} = 0 \quad x = 0, \quad t > 0 \quad (4.57b)$$

$$C = 0 \quad x = L, \quad t > 0 \quad (4.57c)$$

$$C = 94 \quad 0 < x < L, \quad t = 0 \quad (4.57d)$$

şeklinde olur. Difüzyon denklemini homojen bir diferansiyel denklem olması nedeniyle değişkenlerin ayrımı metodu kullanılarak çözülebilir [55]. Buna göre konsantrasyon değeri, $C(x,t)$, değişkenlerin ayrımı metodu formunda,

$$C(x,t) = \psi(x) \cdot \Gamma(t) \quad (4.58)$$

şeklinde yazılıp, çözümü yapıldığında,

$$C(x,t) = e^{-D\lambda_n^2 t} \cdot \text{Cos}(\lambda_n x) \quad (4.59)$$

şeklinde bir özel çözüm elde edilir. Denklemin tam çözümü, özel çözümlerin lineer toplamına eşittir. Buna göre $C(x,t)$,

$$C(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot e^{-D\lambda_n^2 t} \cdot \text{Cos}(\lambda_n x) \quad (4.60a)$$

$$A_n = \frac{1}{N} \int_0^L C_0 \cdot \text{Cos}(\lambda_n x) \cdot dx \quad (4.60b)$$

$$\frac{1}{N} = \frac{2}{L} \quad (4.60c)$$

$$\lambda_n = \frac{(2n-1)\pi}{2L} \quad (4.60d)$$

şeklinde olur [55]. Bu denklemde gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra, kütle-difüzyon denkleminin genel çözümü,

$$C(x,t) = C_0 \cdot \frac{2}{L} \sum e^{-D \cdot \lambda_n^2 \cdot t} \cdot \text{Cos}(\lambda_n x) \cdot \frac{\text{Sin}(\lambda_n x)}{\lambda_n} \quad (4.61)$$

şeklinde bulunur [55].

4.7.2. Yarı sonsuz havuz modeli için difüzyon denkleminin çözümü

Güneş havuzunu yarı sonsuz cisim gibi düşünerek, gerekli uygun sınır şartlarında kütle-difüzyon denkleminin çözülebilmesi için, denklemin boyutsuzlaştırılması gerekmektedir [55,56,57]. Buna göre, kütle-difüzyon denklemi,

$$D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} = \frac{\partial C(x,t)}{\partial t} \quad (4.62)$$

$$\theta(x,t) = \frac{C - C_0}{C_1 - C_0} \quad (4.63)$$

şeklinde boyutsuz bir fonksiyon ile tanımlanmış olsun. Bu boyutsuz fonksiyona göre, difüzyon denkleminin yeni matematik formülasyonu,

$$\frac{\partial \theta(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \theta(x,t)}{\partial x^2} \quad 0 \leq x \leq \infty, \quad t > 0 \quad (4.64a)$$

$$C = C_1 \quad x = 0, \quad t > 0, \quad \theta = 1 \quad (4.64b)$$

$$C = C_0 \quad x = \infty, \quad t > 0, \quad \theta = 0 \quad (4.64c)$$

şeklinde olur. $\theta(x,t)$ fonksiyonu, bu parametreye bağlı $\phi(\eta)$ gibi bir başka fonksiyon ile 4.65a'daki denklem şeklinde tanımlandığında, kolaylıkla çözülebilir [56,57].

$$\theta(x,t) = \phi(\eta) \quad (4.65a)$$

$$\eta = \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \quad (4.65b)$$

$\theta(x,t)$ fonksiyonu, tanımlanan $\phi(\eta)$ fonksiyonu cinsinden yazılacak olursa,

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \cdot \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (4.66)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \cdot \left(-\frac{\eta}{2t} \right) \quad (4.67)$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\partial \phi}{\partial \eta} \cdot \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) \cdot \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (4.68)$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial \eta^2} \left(\frac{\eta^2}{x^2} \right) \quad (4.69)$$

denklemleri elde edilir. 4.66a ve 4.66c denklemlerindeki ifadeler, 4.64a denkleminde yerine yazıldığında,

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial \eta^2} + 2\eta \frac{\partial \phi}{\partial \eta} = 0 \quad (4.70)$$

şeklinde 2. derece diferansiyel bir denklem elde edilir. Elde edilen bu denklemde,

$$\psi = \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \quad (4.71)$$

şeklinde bir dönüşüm yapıldığında, 2. derece diferansiyel denklem, 4.72 denklemini gibi 1. derece diferansiyel bir denkleme dönüşür.

$$\frac{\partial \psi}{\partial \eta} + 2\eta \cdot \psi = 0 \quad (4.72)$$

Bu denklemin çözümü yapıldığında,

$$\psi = \frac{\partial \phi}{\partial \eta} = A \cdot e^{-\eta^2} \quad (4.72)$$

şeklinde bir sonuç elde edilir. Elde edilen bu denkleme, ikinci bir integral işlemi uygulandığında ise,

$$\phi = A \int_0^{\eta} e^{-\eta^2} \cdot d\eta + B \quad (4.73)$$

$\phi(\eta)$ fonksiyonu elde edilir. Bu fonksiyonun çözümü için, 4.64b ve c denklemlerindeki sınır şartlarının tanımlanan boyutsuz fonksiyona göre düzenlenmesi gerekir. Buna göre, yeni sınır şartları,

$$\begin{aligned} t > 0 \quad x = 0 \quad \eta = 0 \quad \phi = 1 \\ t > 0 \quad x = \infty \quad \eta = \infty \quad \phi = 0 \end{aligned} \quad (4.74)$$

şeklinde olur. Bu sınır şartlarına göre 4.73 denkleminde A ve B integrasyon sabitleri,

$$A = \left[\int_0^{\infty} e^{-\eta^2} \cdot d\eta \right]^{-1} \quad (4.75a)$$

$$B = 1 \quad (4.75b)$$

şeklinde bulunur. A sabitindeki integral standart tipte olup,

$$A = -\frac{2}{\sqrt{\pi}} \quad (4.76)$$

değerindedir. Elde edilen bu değerler, 4.73 denkleminde yerine yazıldığında, boyutsuz konsantrasyon dağılımı,

$$\theta(x, t) = \phi(\eta) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \left[\int_0^{\eta} e^{-\eta^2} \cdot d\eta \right] \quad (4.77)$$

şeklinde elde edilmiş olur. Denklemdaki 2. terim gauss hata fonksiyonu olup,

$$\text{erf}(\eta) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\eta} e^{-\eta^2} \cdot d\eta \quad (4.78)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Buna göre denklem düzenlenirse,

$$\theta(x, t) = \phi(\eta) = 1 - \text{erf}\eta \quad (4.79a)$$

$$\theta(x, t) = \frac{C(x, t) - C_0}{C_1 - C_0} = 1 - \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}}\right) \quad (4.79b)$$

şeklinde bir sonuç elde edilir. Bu denklemin düzenlenmesiyle yarı sonsuz cisim için zamana bağlı konsantrasyon dağılımı, $C(x, t)$,

$$C(x, t) = C_0 + (C_1 - C_0) \cdot \left[1 - \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}}\right) \right] \quad (4.80)$$

şeklinde olur [56,57].

4.8. Kütle-Difüzyon Denkleminin Nümerik Çözümü

Kütle difüzyon denkleminin nümerik çözümünde de, ısı iletim denkleminin nümerik çözümünde kullanılan sonlu farklar metodu kullanılmıştır. Analitik çözümde yapılan kabuller, nümerik çözümde de geçerlidir. Dolayısıyla analitik çözümde kullanılan başlangıç ve sınır şartları, nümerik çözümde de kullanılmıştır. Hesaplama işlem basamakları, Bölüm 4.5.3'de izah edilen sıcaklık dağılımının hesaplama işlem basamaklarıyla aynıdır. Kütle-difüzyon denklemi, sonlu farklar metodu formunda yazıldığında,

$$C_m^{i+1} = r \cdot [C_{m-1}^i - C_{m+1}^i] + (1-2r) \cdot [C_m^i] \quad (4.81a)$$

$$r = \frac{D \cdot \Delta t}{(\Delta x)^2} \quad (4.81b)$$

denklemi elde edilir. Elde edilen bu denklemin çözümünü yapabilmek için, yazılan fortran bilgisayar programı Ek B'de sunulmuştur.

4.9. Referans Alınan Deneysel Çalışma

Deney havuzu, 290 x 190 x 240 mm. boyutlarında olup tahta kalıplar arasına betondan dökmüştür (Şekil 4.1). Daha sonra iç kısmının pürüzlülüğünü gidermek için sıva yapılmış ve belirli bir müddet bekledikten sonra havuzun içi siyah mat bir boya ile boyanmıştır. Havuzun kenarlarına ve altına ısı yalıtımı yapıp etrafı toprak ile doldurulmuştur. Bütün bunların sebebi tamamen doğal şartları yakalayarak daha kesin sonuçlar elde edilmek istenmesindedir. Topraklı kısmın etrafına tahtadan bir kovan yapılarak deney havuzu tamamlanmıştır [7].

4.9.1. Enerji kaynağı

Yapılan çalışmaların gerçeğe uygun bir çalışma olması istendiğinden dolayı enerji kaynağı olarak güneş tercih edilmiştir. Bu amaçla çatıya bir güneş havuzu kurulmuş, havuz yüzeyine gelen güneş ışınımı bir solorimetre yardımıyla Count cinsinden okunmuştur. Daha sonra bu değerler W/m^2 'ye çevrilmiştir [7].

4.9.2. Sıcaklık ölçme düzeni

Deney havuzunda, akışkan sıcaklığının derinlikle değişimi demir-konstantan termoelemanlar ile ölçülmüştür. Bu değerler multimetreden mV. olarak ölçülmüş, daha sonra tablolar yardımıyla °C 'ye dönüştürülmüştür. Multimetrenin ölçüm hassasiyeti 0.01 mV 'tur. Deneyde, ATB'ye havuz yüzeyinden 22 cm., TZB'ye havuz yüzeyinden 11 cm. ve ÜTB'ye yüzeyden 1 cm. aşağıya havuzun sağ ve sol tarafına olmak üzere ikişer adet termo eleman yerleştirilmiştir. Aynı zamanda hava sıcaklığı, toprak sıcaklığı ve cam sıcaklığı içinde birer termo eleman kullanılmıştır [7].

Tablo 4.3 Deneysel çalışmada yapılan ölçümlerden elde edilen havuz sıcaklık değerleri [7]

Zaman (Saat)	Işınım Oranı (W/m ²)	Rüzgar Hızı (m/s)	ÜTB 1cm. Sağ	TZB 11cm Sağ	ATB 22cm Sağ	ÜTB 1 cm. Sol	TZB 11cm Sol	ATB 22cm Sol	Top. Sıcaklığı	Ortam Sıcaklığı
10.00	394	0.4	30.5	28.5	31.2	29.9	28.9	26.0	30.7	33.1
10.30	523	0.4	26.8	23.0	27.4	28.0	27.2	27.6	32.8	28.5
11.00	534	0.4	26.8	27.8	27.4	27.2	20.8	27.4	33.9	28.0
11.30	545	0.4	28.9	23.9	29.5	28.2	28	28.3	35.2	29.5
12.00	534	0.5	29.9	30.8	31.6	29.1	28.9	28.9	35.2	29.5
12.30	710	0.7	30.3	32.0	33.1	30.3	29.7	32.2	26.8	32.4
13.00	399	0.3	30.1	31.8	34.3	30.3	29.9	31.2	37.5	33.1
13.30	489	0.35	30.1	31.8	35.4	30.5	30.3	30.5	37.9	34.1
14.00	455	0.5	30.3	31.3	35.2	29.9	30.1	30.8	37.9	34.7
14.30	469	0.9	27.8	30.8	34.3	27.8	30.1	29.9	36.4	33.1
15.00	367	1.2	27.0	30.5	33.7	26.6	29.9	29.7	35.1	31.8
15.30	464	1.4	26.4	29.9	33.1	25.4	29.5	29.3	34.3	31.4
16.00	360	0.8	25.2	28.9	32.4	25.1	28.9	28.9	32.4	31.2

4.9.3. Deneyin yapılışı

Havuzun, ATB'si 310 kg/m³, TZB'si 94 kg/m³, ÜTB'si 0 kg/m³ olacak şekilde doldurularak üzeri cam ile kapatılmıştır. Bu şekilde, bir hafta bekledikten sonra 21.09.1994 tarihinde ölçümler alınmıştır. Alınan ölçümler, Tablo 4.3'de

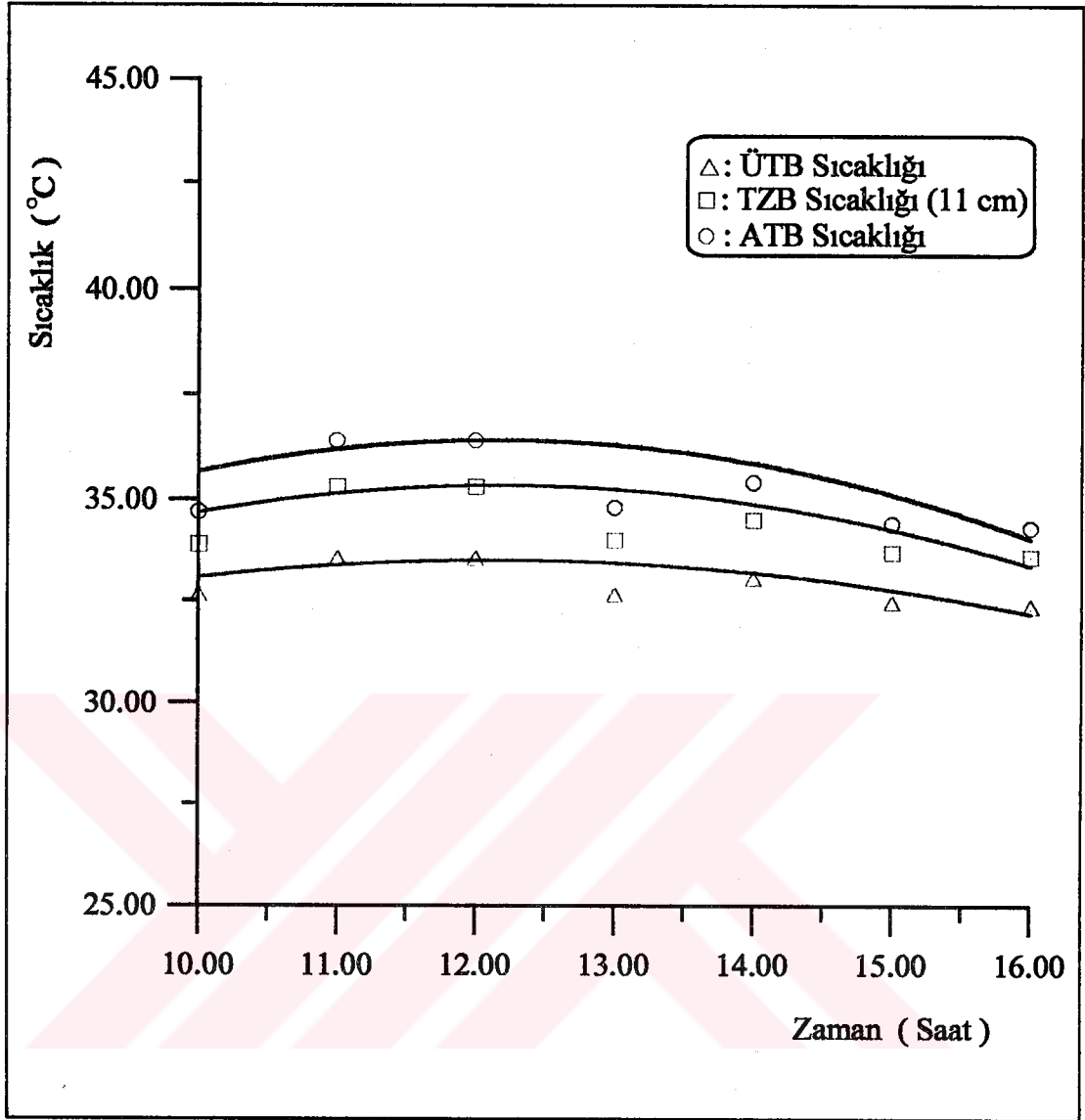
görülmektedir. Deneyde, sağ taraftaki termo elemanlarda, üst taşınımı bölge ile alt taşınımı bölge arasında 7.2 °C gibi bir sıcaklık farkı elde edilmesine rağmen, bu değer sol tarafta 0 °C mertebelerinde olunca gölgenin havuz üzerindeki büyük etkisi ortaya çıkmıştır. Saat 13.00 civarında soldaki tüm duyar eleman uçlarına gölge düşerken, sağ tarafta yalnızca üst taşınımı bölgenin üzerine gölge düşmektedir.



BÖLÜM 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, İstanbul Teknik Üniversitesi'nde, 290x190x240 mm. boyutlarında deneysel amaçlı inşa edilen tuz tabakalı güneş havuzunun matematiksel modeli yapıldı. Modelden elde edilen ısı ve kütle transferi denklemleri, analitik ve nümerik olarak çözüldü. Analitik çözümde, değişkenlerin ayırımı yöntemi, nümerik çözümde ise sonlu farklar metodu kullanılarak model güneş havuzunun sıcaklık ve konsantrasyon dağılımları elde edildi. Analitik ve nümerik çözümden elde edilen sonuçların nitelik ve nicelik bakımından güneş havuzu için uygunluğu, aynı havuzda Dalgıç [7] tarafından 21.9.1994 tarihinde NaCl çözeltisi kullanılarak yapılan deneysel çalışma sonuçlarıyla karşılaştırıldı. Karşılaştırma sonucunda, model sonuçlarının deneysel sonuçlarla nitelik olarak uyum içinde olduğu, fakat nicelik bakımından sonuçlar arasında uyumsuzlukların olduğu gözlemlendi. Deneysel sonuçlarının, modelden elde edilen değerlerden daha küçük olduğu ortaya çıktı. Bu farklılığa, analitik ve nümerik çözümün yapılabilmesi için, yapılan kabullerin neden olduğu sanılmaktadır. Yapılan çözümlerde, çözeltinin; ısı iletim katsayısı, yoğunluğu, özgül ısısı, ısı yayılım katsayısı, kütle yayılım katsayısı gibi fiziksel özelliklerinin sıcaklık, konsantrasyon ve derinlikle değişmeyip sabit kaldığı varsayılarak sonuçlar elde edilmişti. Gerçekte bu değerler sabit olmayıp sıcaklık, konsantrasyon ve derinlikle değişim göstermektedir. Ayrıca, havuz tamamen yalıtılmış olduğundan, ısı kaybının sadece havuz yüzeyinden olduğu kabul edilmişti. Yapılan izolasyona rağmen, deneysel çalışmada ölçümü yapılan toprak sıcaklığı ortam sıcaklığıyla karşılaştırıldığında, havuz tabanından ve yanlarından da ısı kaybı olduğu görülmektedir. Bu nedenlerden dolayı, analitik ve nümerik çözüm sonuçları, deneysel sonuçlarıyla nicelik bakımından uyumsuz olmaktadır.

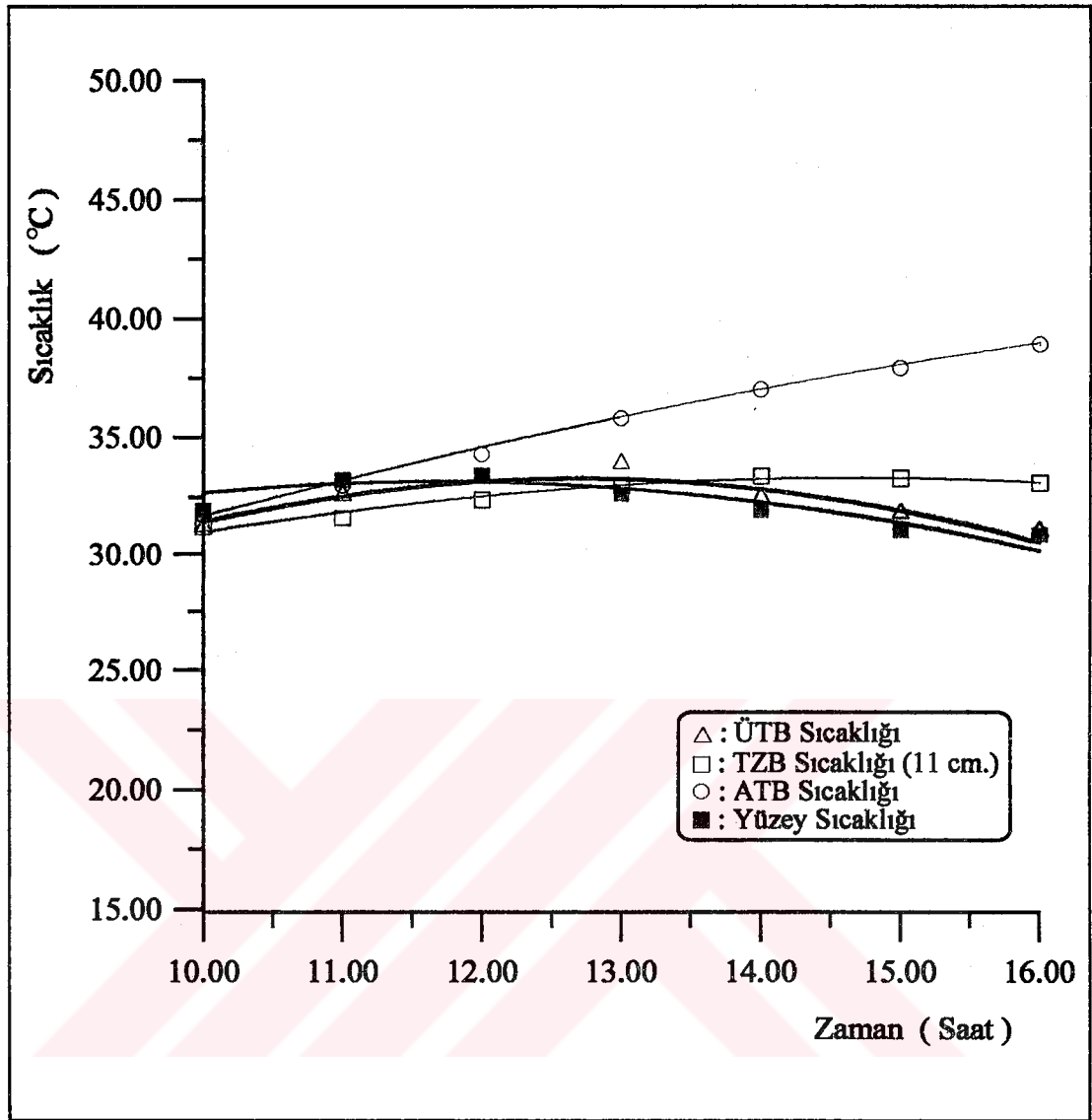
Deneysel çalışmada, sıcaklık ölçümleri havuz çözelti ile doldurulduktan bir hafta sonra bir gün için yapıldığından, analitik ve nümerik çözümlerden elde edilen sonuçlarda havuzun bir günlük sıcaklık değişimini vermektedir. Şimdide elde edilen sonuçları daha iyi değerlendirebilmek için, sonuçlara göre oluşturulan grafikleri inceleyelim.



Şekil 5.1 Analitik çözümden elde edilen bir günlük havuz bölge sıcaklıkları (21.9.1994)

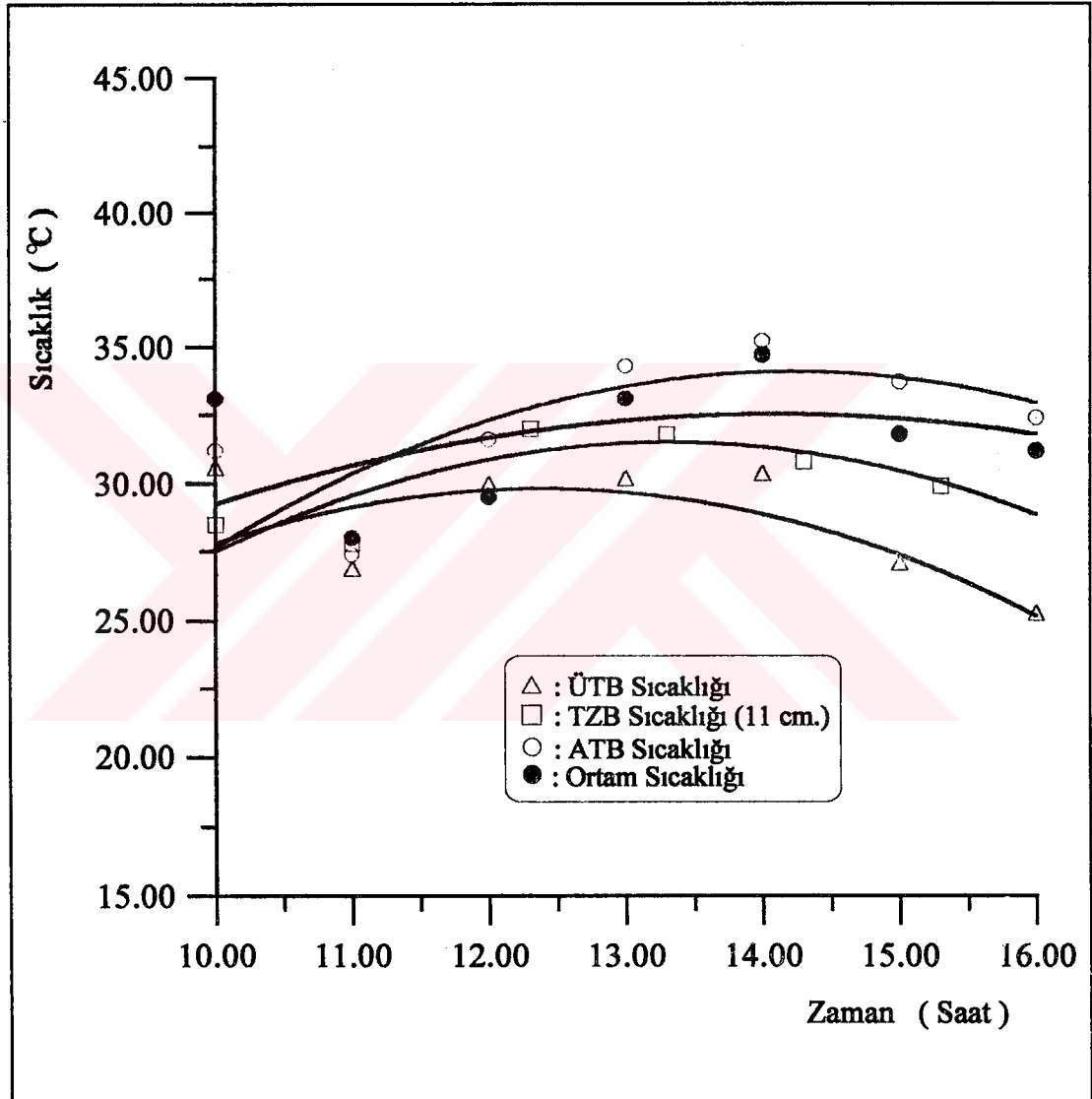
Şekil 5.1’de, analitik çözümden elde edilen sonuçlara göre oluşturulan havuz bölge sıcaklıkları görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, bölge sıcaklıklarının güneş havuzu yapısına nitelik bakımından uygun olduğu görülmektedir. Analitik çözüm sonuçlarına göre, ÜTB ile ATB arasındaki bir günlük maksimum sıcaklık farkı 4 °C olmaktadır.

Şekil 5.2’de ise, nümerik çözümden elde edilen bir günlük havuz bölge sıcaklıklarının değişimi verilmiştir. Yapılan çözüme göre, ÜTB ile ATB arasındaki maksimum sıcaklık farkı yaklaşık 8 °C’dir.

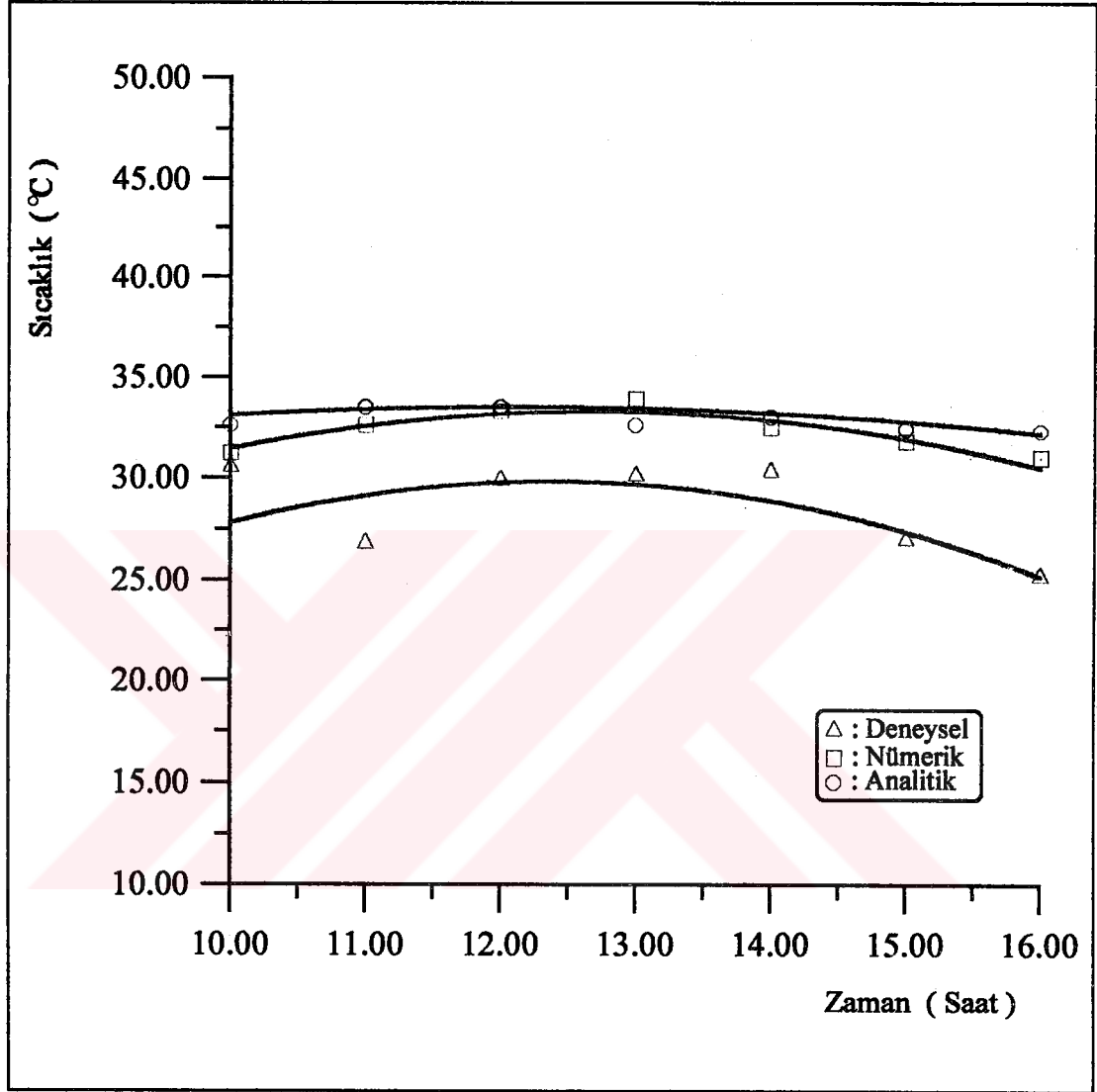


Şekil 5.2 Nümerik çözümden elde edilen bir günlük havuz bölge sıcaklıkları (21.9.1994)

Şekil 5.3'de, deneysel çalışma bölge sıcaklıkları verilmiştir [7]. Yapılan deneysel çalışmaya göre, bir günde maksimum 7.2 °C'lik sıcaklık farkı elde edilmiştir. Bu üç şekilden de anlaşılacağı üzere, nümerik sonuçlardan elde edilen eğrilerin, deneysel sonuçlardan elde edilen eğrilerle nitelik olarak aynı olduğu görülmektedir. Nümerik ve deneysel sonuçlara göre maksimum sıcaklık farkı saat 16.00'da elde edilirken, analitik çözümde saat 12.30 civarında elde edilmektedir.

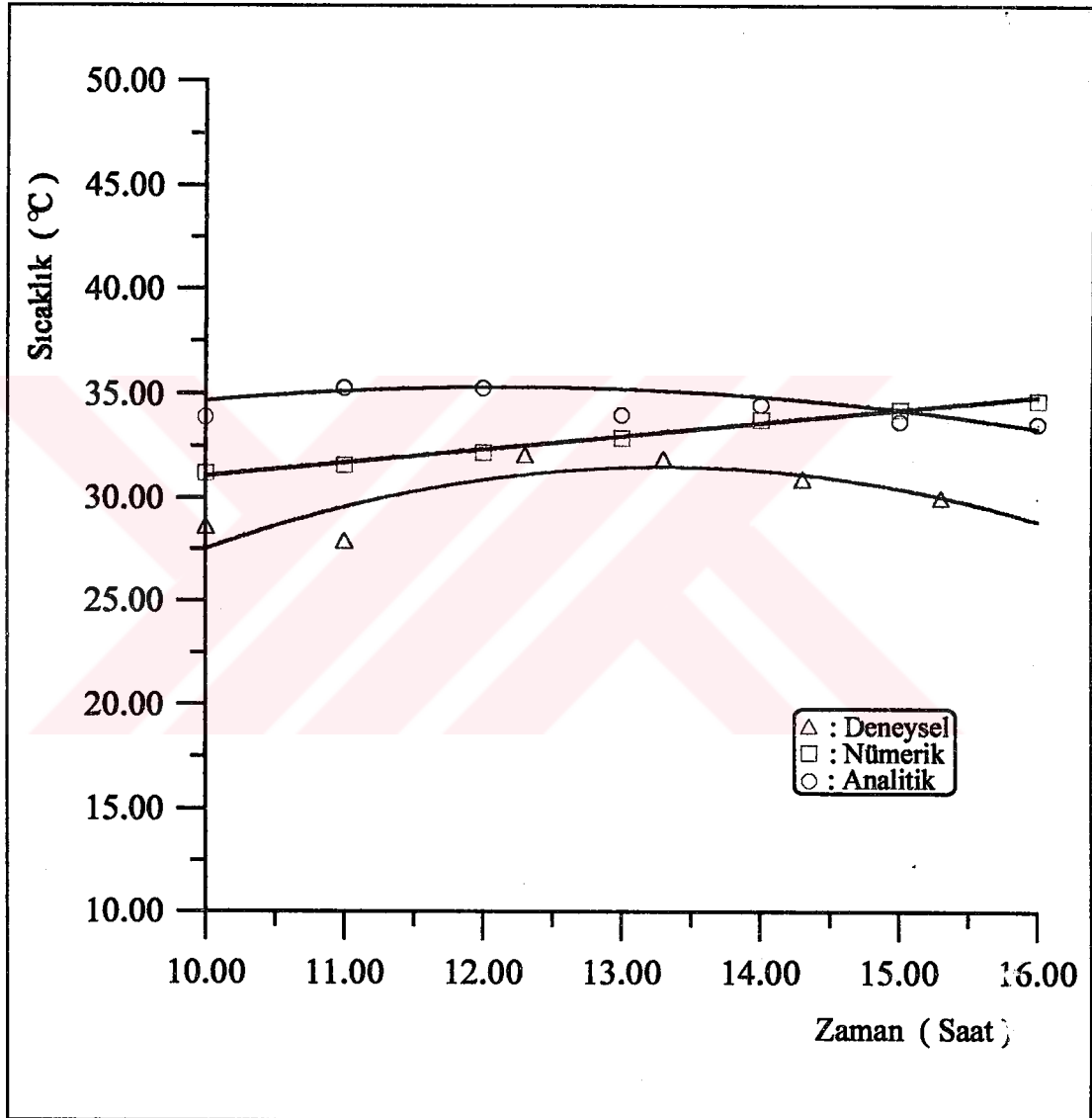


Şekil 5.3 Deneysel çalışmadan elde edilen bir günlük havuz bölge sıcaklıkları (21.9.1994) [7]

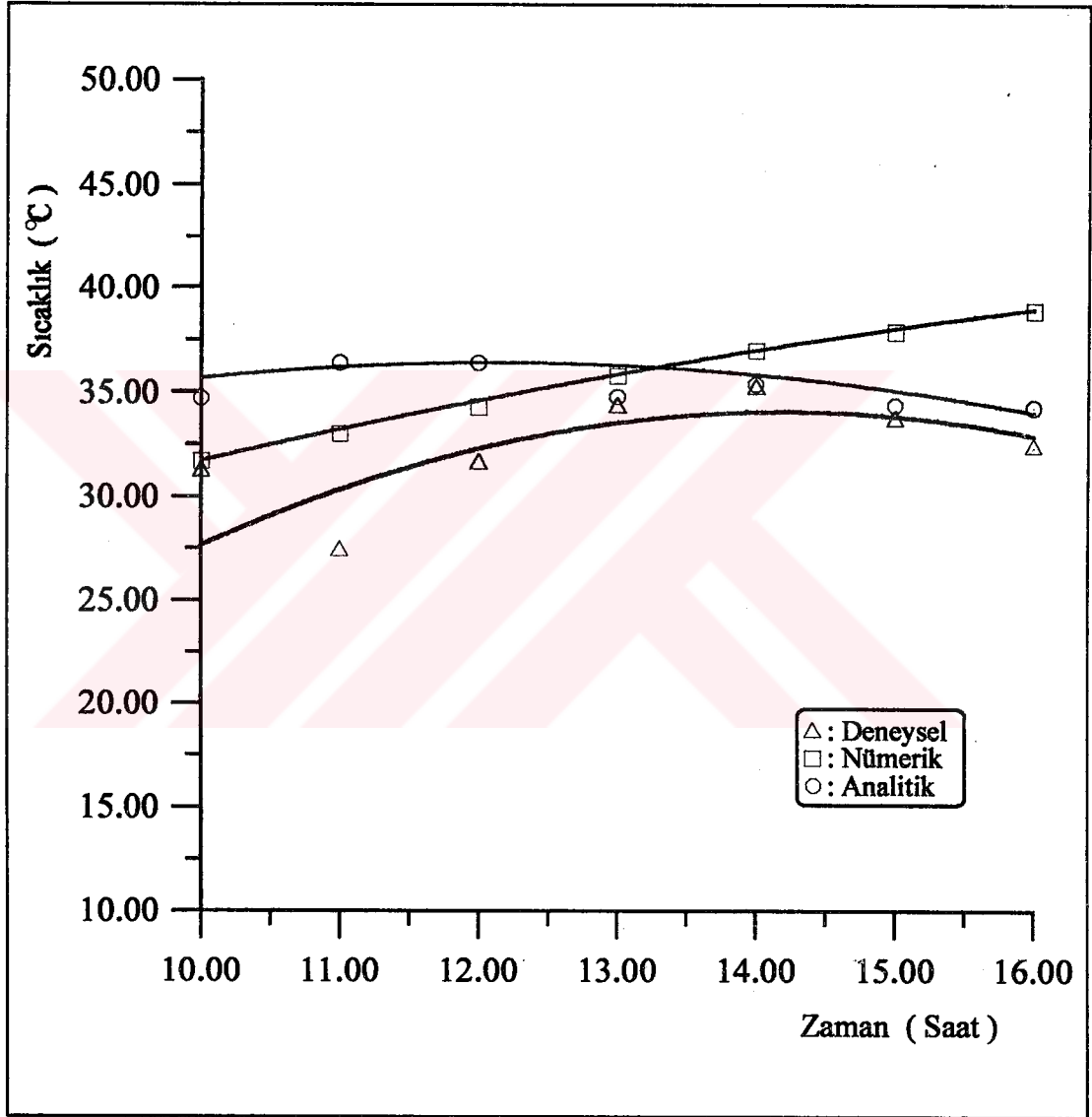


Şekil 5.4 Analitik, nümerik ve deneysel sonuçlardan elde edilen ÜTB sıcaklığı (21.9.1994)

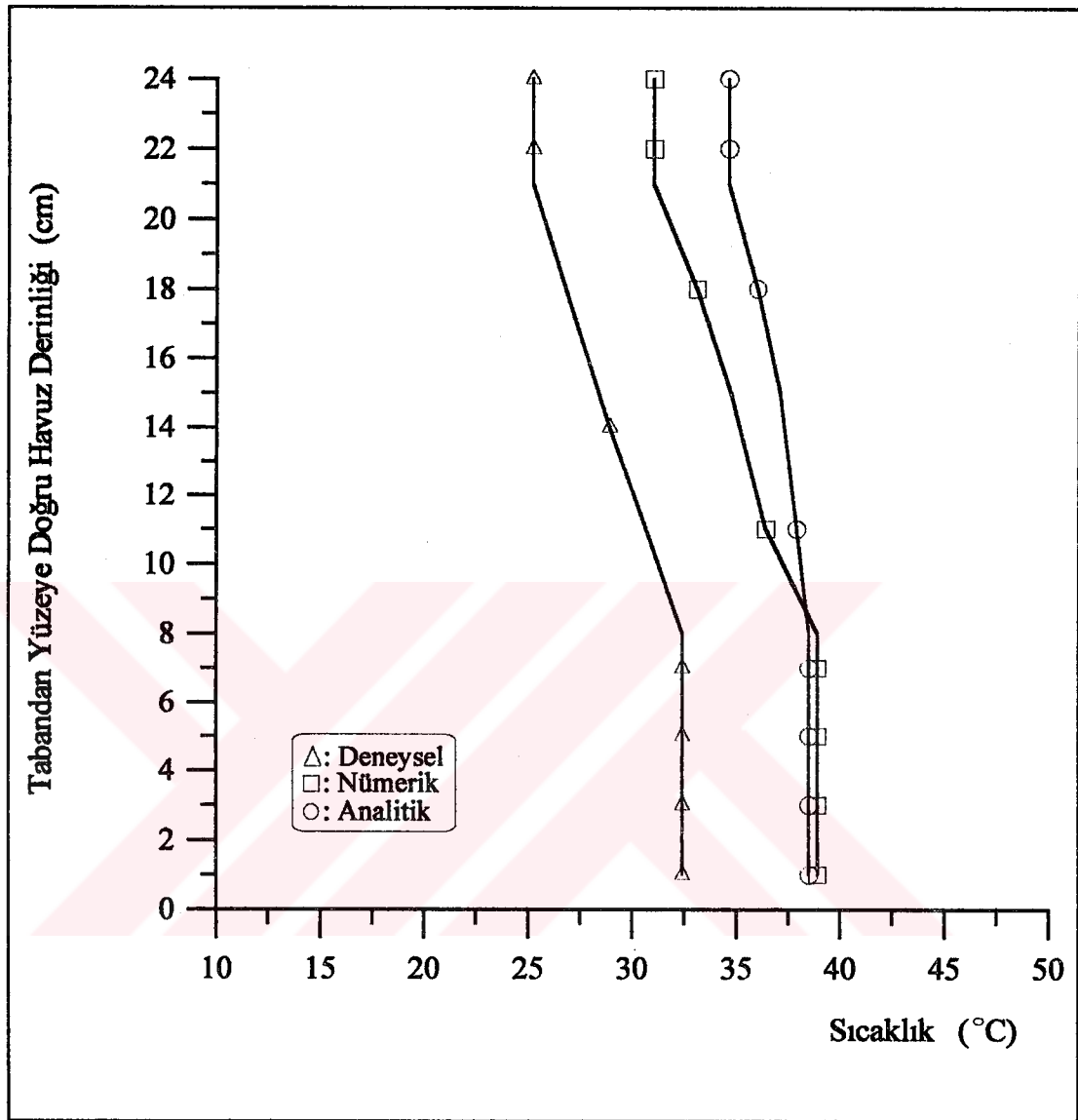
Şekil 5.4, 5.5 ve 5.6'da analitik, nümerik ve deneysel çalışma sonuçlarına göre ÜTB, TZB ve ATB sıcaklık değişimleri görülmektedir. ÜTB sıcaklık değişimi için, analitik ve nümerik çözüm sonuçlarının nitelik ve nicelik bakımından uyum içinde olduğu, aynı durumun TZB ve ATB için geçerli olmadığı görülmektedir. Ayrıca ÜTB, TZB ve ATB için nümerik ve deneysel sonuçlar nitelik bakımından birbiriyle uyum içindedir.



Şekil 5.5 Analitik, nümerik ve deneysel sonuçlardan elde edilen TZB sıcaklığı (21.9.1994)

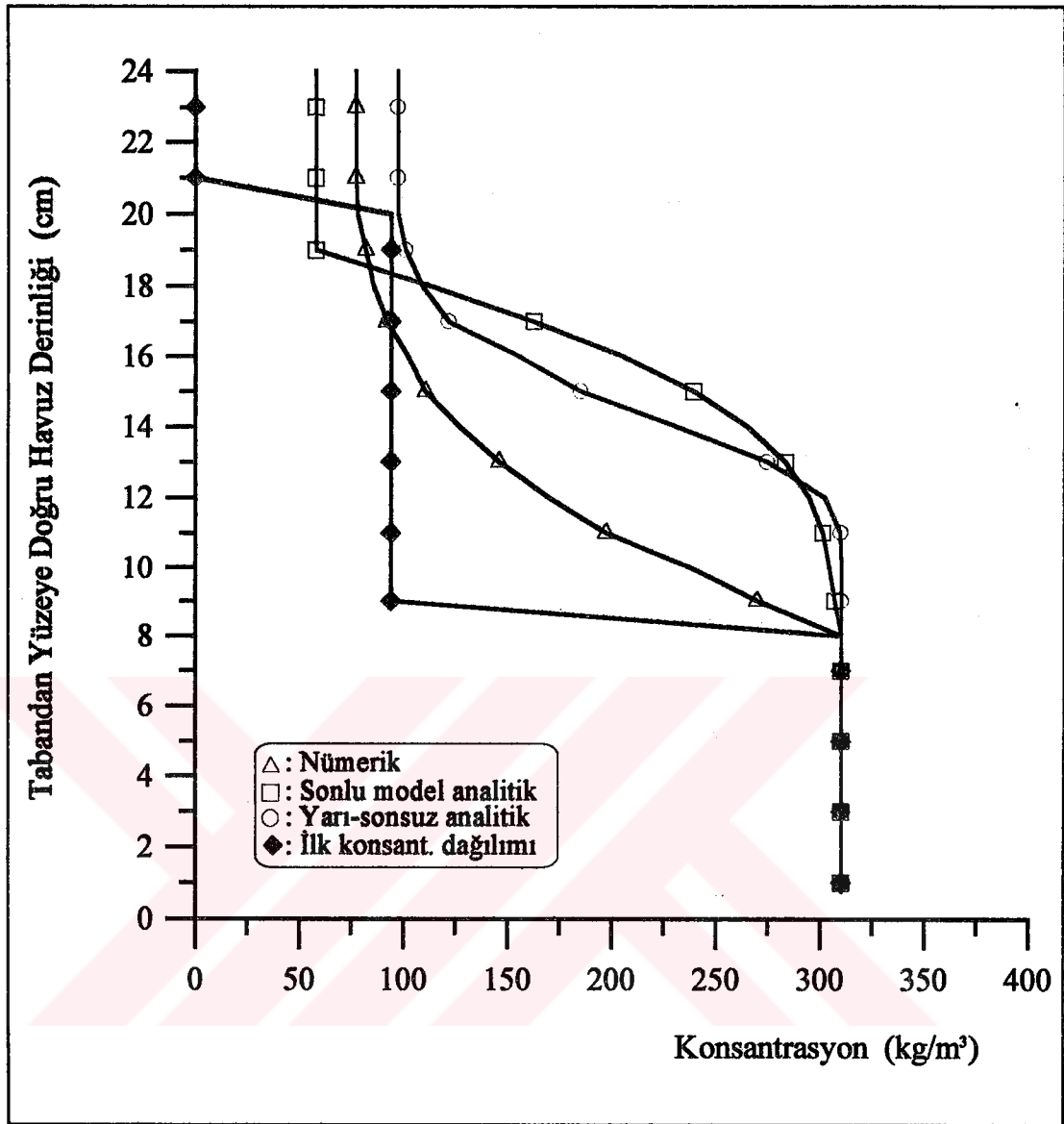


Şekil 5.6 Analitik, nümerik ve deneysel sonuçlardan elde edilen ATB sıcaklığı (21.9.1994)



Şekil 5.7 Analitik, nümerik ve deneysel sonuçlara göre bir günlük havuz sıcaklık dağılımı (21.9.1994)

Şekil 5.7'de analitik, nümerik ve deneysel çalışma sonuçlarına göre model güneş havuzunun bir günlük sıcaklık dağılımı verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, elde edilen eğrilerin, güneş havuzu yapısına göre elde edilebilecek sıcaklık eğrileriyle uyum içinde olduğu görülmektedir. Buda yapılan çalışmada takip edilen yolun doğruluğunun ve kesinliğinin bir göstergesidir.



Şekil 5.8 Analitik ve nümerik çözümlerden elde edilen havuz konsantrasyon dağılımı (21.9.1994)

Şekil 5.8'de ise, model güneş havuzu kütle-difüzyon denkleminin analitik ve nümerik çözümünden elde edilen sonuçlara göre oluşturulan konsantrasyon dağılımı görülmektedir. Eğriler, çözeltinin havuza doldurulmasından bir hafta sonraki değerlerinden elde edilmiştir. Yapılan hesaplamalara göre, havuz yoğunluk dağılımının, havuz içinde lineer hale gelebilmesi için, havuz çözeltiyle doldurulduktan sonra yaklaşık olarak bir hafta beklenilmesi gerektiği ortaya çıkmıştır. Tesbit edilen bu zaman aralığı, literatürde değişik araştırmacılar tarafından da teyid edilmektedir [2,9,20].

Tuz tabakalı bir güneş havuzunun soğurduğu güneş enerjisini depolayabilmesi için, kararlı taşınımsız bir ara bölge içermesi gerekmektedir. Bu bölgenin oluşabilmeside, NaCl çözeltisi için ÜTB ile ATB arasında 216 kg/m^3 'lük bir yoğunluk farkının başlangıçta tesis edilmesine bağlıdır [7,9,20]. Buna göre, kütle-difüzyon denkleminin sonlu kalınlıkta havuz modeli için analitik ve nümerik çözüm sonuçlarının kararlı bir taşınımsız ara bölgenin oluşturulmasında uygun çözüm yöntemleri olduğu, yarı sonsuz havuz modeline göre yapılan analitik çözümün ise kararlı bir taşınımsız ara bölgenin oluşturulmasında istenilen sonuçları vermediği tesbit edilmiştir.

Bu çalışmaya göre elde edilen sonuçların, başka araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen çalışma sonuçları ile karşılaştırmasının yapılması, yapılan bu çalışmanın doğruluğunun ve kesinliğinin bir göstergesi olacaktır. Ancak yapılan bu çalışma, özel şartlar için yapıldığından literatürde bu çalışmanın tam benzerine rastlanamamıştır. Çalışma sonunda, elde edilen havuz sıcaklık profilinin, literatürde bir çok araştırmacının elde etmiş olduğu sıcaklık profilleriyle nitelik bakımından, konsantrasyon profilinin ise, hem nicelik hemde nitelik bakımından uyum içinde olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, güneş enerjisinin depolanabilmesi için kullanılan güneş havuzları, doğru olarak tasarımılandırıldığı takdirde uzun süreli depolama yapmak mümkün olacaktır.

Yapmış olduğumuz yurtiçi literatür araştırmasına göre, güneş havuzunun konstrüksiyonu için gerekli olan dört temel madde; güneş ışınımı, arazi, su ve tuza tükemiz zengin bir şekilde sahip olmasına rağmen, ülkemizde şu ana kadar güneş havuzları konusunda pratik olarak yeterli çalışma yapılmadığı görülmüştür. Bir çok ülkede bu konuda yapılan çalışmalardan biriside, o ülkede bulunan göllerin yapısının incelenerek, güneş havuzu yapısına benzeyip benzemediğinin araştırılması konusundadır. Özellikle İsrail bu konuda Lut Gölü üzerinde ciddi çalışmalar yapmıştır. Maalesef tükemiz bir çok göle sahip olmasına rağmen bu tür bir çalışmanın yapıldığına dair bir bilgiye rastlanamamıştır. Bu konuda, özellikle Tuz Gölü ve Van Gölü'nün incelenerek, sıcaklık ve yoğunluk gradyenlerinin ortaya çıkarılması için sistemli bir çalışmanın yapılması gerekir. Verimli bir uygulama programı ile bu konudaki çalışmaların şu iki temel amaç doğrultusunda yapılması, bundan sonra yapılacak olan

çalışmalar açısından faydalı olacaktır.

1. Suni havuz konstrüksiyonu için Tuz Gölü ve Van Gölü çevresinde, kil ve çamurdan uzak ve tatlı su kaynaklarına yakın uygun yerlerin olup olmadığı araştırılmalıdır.
2. Tuz Gölü ve Van Gölü'nün sıcaklık ve yoğunluk gradyanlarının tesbit edilebilmesi için, farklı derinliklerde deney sistemi kurarak gerekli ölçümler yapılmalı ve bu göllerin yapısı hakkında gerekli bilgiler toplanmalıdır.

Bu program uygulandığında, Tuz Gölü ve Van Gölü'nün doğal sıcaklık gradyanları tesbit edilmiş olacaktır. Şayet yapılan ölçümler sonucunda, güneş havuzu yapısına benzer bir özellik tesbit edilirse, basit konstrüksiyon teknikleriyle bu göller etrafında kurulu bulunan yerleşim yerlerinin ısıtılması, elektrik ihtiyacının sağlanması, tuz ve tatlı su elde edilmesi gibi endüstriyel uygulamalar daha ucuz maliyetle yapılabilir. Ayrıca İsrail'de olduğu gibi, bu göller etrafında geniş yüzey alanına sahip yapay güneş havuzları inşa edilerek, güneş havuzunun temel maddesinden biri olan farklı yoğunluktaki çözeltiler basit uygulama teknikleriyle bu göllerden sağlanır ve aynı uygulamalar emsallerine göre daha basit teknoloji ve maliyetle yapılabilir.

Sonuç olarak bu program takip edilerek uygulamaya geçildiği takdirde, ülkemizde güneş havuzu teknolojisinin gelişmemesi için herhangi ciddi bir engel gözükmemektedir.

KAYNAKLAR

- [1] UYAREL, A.Y. ve ÖZ, E.S., "Güneş Enerjisi ve Uygulamaları", Birsen Yayınevi, Ankara, 1987.
- [2] TABOR, H., "Solar Ponds", Solar Enerji, Vol.27, No.3, pp.181-194, 1981.
- [3] LODHI, M.A.K., "Solar Ponds in Alkaline Lake and Oil Well Region", Energy Convers. Mgmt., Vol.27, No.12, pp.1677-1694, 1996.
- [4] TAŞDEMİROĞLU, E., "Salt Availability in Turkey and Its Potential Use in Solar Ponds", Resources and Conservation, Vol.15, pp.215-228, 1987.
- [5] BİNARK, A.K., DALGIÇ, B., KARADENİZ, E., "Güneş Havuzu Tasarımında Belirleyici Faktörler", 5. Türk-Alman Enerji Sempozyumu Bildiri Kitabı, s.320-327, 19-21 Nisan, 1995.
- [6] GÜNERHAN, G.G., "Tuz Tabakalı Güneş Havuzları", Termodinamik Aylık Dergi, s.46-48, Kasım-1994.
- [7] DALGIÇ, B., "Güneş Havuzları ile Enerji Depolanması", Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Mak. Fak., İstanbul, 1995.
- [8] GONZALES, L.R., PEREZ, L.R., and BENITEZ, J., "Modeling the Thermal Process in a Shallow Solar Pond Water Heater", Solar Energy, Vol.48, No.4, pp.261-265, 1992.
- [9] WEINBERGER, H., "The Physics of the Solar Pond", Solar Energy, Vol.8, No.2, 1964.
- [10] GÖKTUN, S., "Güneş Enerjisinin Güneş Havuzlarında Depolanması", Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, Cilt 10, Sayı 3, s.15-21, 1987.
- [11] RABL, A., and NIELSEN, C.F., "Solar Pond for Space Heating", Solar Energy, Vol.17, pp.1-12, 1975.
- [12] KOZANOĞLU, B. ve GENCELİ, O.F., "Üstten Isıtılan Akışkan Tabakasında Isıl Kararsızlık", Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, Cilt.6, Sayı.3, s.29-33, 1984.
- [13] BOZDEMİR, S. ve KAYALI, R., "Güneş Havuzlarının Matematik Modeli ve Deneysel Verilerle Karşılaştırılması", Doğa Bilim Dergisi, Seri A, Cilt.3, No.3, s.387-397, 1983.

- [14] HULL, J.R., "Computer Simulation of Solar Pond Thermal Behavior", Solar Energy, Vol.25, pp.33-40, 1980.
- [15] SUBHAKAR, D., and MURTHY, S.S., "Saturated Solar Ponds:1. Simulation Procedure", Solar Energy, Vol.50, No.3, pp.275-282, 1993.
- [16] SUBHAKAR, D., and MURTHY, S.S., "Saturated Solar Ponds: 2. Parametric Studies", Solar Energy, Vol.50, No.4, pp.307-319, 1993.
- [17] HAWLADER, M.N.A., and BRINKWORTH, B.J., "An Analysis of the Non-Convecting Solar Pond", Solar Energy, Vol.27, No.3, pp.195-204, 1988.
- [18] EL-REFAEE; M.M., and AL-MARAFIE, A.M., "Numerical Simulation of the Performance of the Kuwait Experimental Salt Gradient Solar Pond", Energy Sources, Vol.15, pp.145-158, 1993.
- [19] HAWLADER, M.N.A., "The Influence of the Extinction Coefficient on the Effectiveness of Solar Ponds", Solar Energy, Vol.25, pp.461-464, 1980.
- [20] ZANGRANDO, F., "On the Hydrodynamics of Salt Gradient Solar Ponds", Solar Energy, Vol.46, No.6, pp.323-341, 1991.
- [21] KAMAL, W.A., "A Parametric Study of the Small Scale Solar Pond", Energy Convers. Mgmt., Vol.26, No.3-4, pp.337-345, 1986.
- [22] KAYALI, R., "Derivation of Analytic Functions for Air and Soil Temperatures and Usage of These Functions in a Computer model Developed for Solar Ponds", Doğa-Tr. J. of Engineering and Environmental Sciences, Vol.17, pp.65-69, 1993.
- [23] KARAKILÇIK, M., "Yalıtımlı ve Yalıtımsız Güneş Havuzlarının Performansını Etkileyen Etmenler", Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana,1992.
- [24] TAŞDEMİROĞLU, E., "Hidden Power of Water in Turkey ", Energy, Vol.18, No.1, pp.25-29, 1993.
- [25] KÜLÜNK, H., "Tuz Tabakalı Güneş Havuzu Sisteminde Isı Depolama Problemi",1. Balıkesir Mühendislik Sempozyumu Bildiri Kitabı, s.26-31, Balıkesir, 26-27 Nisan, 1988.
- [26] RUBIN, H., and BENEDICT, B.A., "Modeling the Performance of Solar Pond as a Source of Thermal Energy", Solar Energy, Vol.32, No.6, pp.771-778, 1984.
- [27] ANATI, D.A., "Salinity Profiles in Steady-State Solar Pond", Solar Energy, Vol.38, No.3, pp.159-163, 1987.
- [28] SYED, A.S., SHORT, T.H., and FYNN, R.P., "Modeling And Testing a Salt Gradient Solar Pond in Northeast Ohio", Solar Energy, Vol.27, No.5, pp.393-401, 1981.

- [29] KOOL, C.F., "The Steady State Salt Gradient Solar Pond", Solar Energy, Vol.23, pp.37-45, 1979.
- [30] KOOL, C.F., "Salt Gradient Solar Pond with Reflective Bottom: Application to the Saturated Pond", Solar Energy, Vol.26, pp.113-120, 1981.
- [31] TYBOUT, R.,A., "A Recursive Alternate to Weinberger's Model of the Solar Pond", Solar Energy, Vol.11, pp.109-111, 1966.
- [32] MEYER, K.A., "A Numerical Model to Describe the Layer Behavior in Salt Gradient Solar Pond", J. of Solar Energy Eng., Vol.105, pp.341-347, 1983.
- [33] ATKINSON, J.F., "A Note on Gradient Maintenance in a Salt Gradient Solar Pond", Solar Energy, Vol.34, No.2, pp.163-169, 1985.
- [34] BATTY, J.C., RILEY, J.P., and BHISE; N.K., "Optimum Thickness of the Nonconvective Zone in Salt Gradient Solar Pond", Solar Energy, Vol.36, No.1, pp.15-20, 1986.
- [35] ZHANG, R., and NIELSEN, C.E., "Study of Surface Convective Zone Behavior of Solar Pond in Laboratory", Renewable Energy, Vol.4, No.1, pp.47-51, 1994.
- [36] JOSHI, V., and KISHORE, V.V.N., "Applicability of Steady State Equations for Solar Pond Thermal Performance Predictions Energy", Vol.11, pp.821-827, 1986.
- [37] WANG, Y.F., and AKBARZADEH, A., "A Parametric Study on Solar Ponds", Solar Energy, Vol.30, No.6, pp.555-562, 1983.
- [38] SUBHAKAR, D., and MURTHY, S.S., "Saturated Solar Ponds:3. Experimental Verification", Solar Energy, Vol.53, No.6, pp.469-472, 1994.
- [39] SUBHAKAR, D., and MURTHY, S., "Experiments on a Magnesium Chloride Saturated Solar Pond", Solar Energy, Vol.1, No.5/6, pp.655-660, 1991
- [40] SREENIVAS, K.R., ARAKERI, J.H., and SRINIVASAN, J., "Modeling the Dynamics of the Mixed Layer in Solar Ponds", Solar Energy, Vol.54, No.3, pp.193-202, 1995.
- [41] AKBARZADEH, A., and AHMADI, G., "Computer Simulation of the Performance of a Solar Pond in The Southern Part of Iran", Solar Energy, Vol.24, pp.143,151, 1979.
- [42] KAMIUTO, K., "Optimum Pond Temperature for Maximizing Power Production of a Nonconvecting Solar Pond Heat Conversion System", Applied Energy, Vol.30, pp.305-316, 1988.
- [43] KANAYAMA, K., INABA, H., BABA, H., and FUKUDA, T., "Experiment and Analysis of Practical Scale Solar Pond Stabilized with Salt Gradient", Solar Energy,

Vol.46, No.6, pp.353-359, 1991.

[44] AKOSHILE, C.O., "Mini Solar Pond", *Renewable Energy*, Vol.1, No.3/4, pp.463-467, 1991.

[45] MUNOZ, F., and ALMANZA, R., "A Survey of Solar Pond Developments", *Energy*, Vol.17, No.10, pp.927-938, 1992.

[46] WILKINS, E.S., "Operation of a Commercial Solar Gel Pond", *Solar Energy*, Vol.46, No.6, pp.383-388, 1991

[47] NEWELL, T.A., "Simulation of a Solar Pond with a Stratified Storage Zone", *J.of Solar Energy Eng.*, Vol.105, pp.363-367, 1983.

[48] SCHAEFER, R., and 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.

[49] KEREN, Y., RUBIN, H., ATKINSON, J., PRIVEN, M., and BEMPORAD, G.A., "Theoretical and Experimental Comparison of Conventional and Advanced Solar Pond Performance", *Solar Energy*, Vol.51, No.4, pp.255-270, 1993.

[50] PRASAD, R., and 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.

[51] DAKE, M.K., and HARLEMAN, F., "Thermal Stratification in Lakes: Analytical and Laboratory Studies", *Water Resources Research*, Vol.5, No.2, pp.484-495, 1969.

[52] ZANGRANDO, F., "A Simple Method to Establish Salt Gradient Solar Ponds", *Solar Energy*, Vol.25, pp.467-470, 1980.

[53] ALAGAO, F.B., AKBARZADEH, A., and JOHNSON, P.W., "Construction and Initial Operation of a Closed Cycle", *Solar Energy*, Vol.53, No.4, pp.343-351, 1994.

[54] ZHANG, Z.M., and 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.243-248, 1990.

[55] ÖZİŞİK, M.N., "Heat Transfer, A Basic Approach", McGraw-Hill International Editions, Singapore, 1985.

[56] CARSLAW, H.S., and JAEGER, J.C., "Conduction of Heat in Solids", Oxford University Press, London, 1959.

[57] ARPACI, V.S., "Conduction Heat Transfer", Addison-Wesley, Reading, 1966.

EK A

GÜNEŞ HAVUZU SICAKLIK DAĞILIMINI HESAPLAYAN BİLGİSAYAR PROGRAMI

```
C
C *****
C **      BU FORTRAN PROGRAMI I.T.U. MODEL GÜNEŞ HAVUZUNDA      **
C **      YAPILAN DENEYSSEL ÇALIŞMANIN SONUÇLARINI KARSILAŞTIRMAK **
C **      İÇİN YAPILMIŞ OLUP, İ.T.Ü. M.G.H. PARAMETRELERİNE GÖRE **
C **      İ.T.Ü. M. G. H. SICAKLIK DEĞERLERİNİ HESAP EDER.      **
C *****
C

DIMENSION Por(15),Po(15),Tor(15),To(15),X(25),VA(15),HO(15)
DIMENSION T(500,500),hc(15),QC(15),QR(15),QE(15),QT(15),H4(15)
DIMENSION W(500,500),HA(15),TTo(15),TTor(15),H2(100,100)
DIMENSION H16(50,50),H24(50,50),XGU(25,25),SA(15),SAAT(15)
DIMENSION KAS(15),KAC(15),GAS(15),GAC(15),SEK(15),SAR(15)
DIMENSION GAT(15),KAT(15),TEK(15),TAR(15),BET(15),FARK(15)
REAL kw,KAS,KAC,KAT
OPEN(UNIT=100,FILE='S1.DAT',STATUS='OLD',FORM='FORMATTED')

C
C *****
C **      HAVUZ YÜZEYİNE GELEN İŞİNİM MİKTARININ, ORTAMIN RÜZGAR **
C **      HIZININ, SICAKLIĞININ, BASINCININ SAAT 10.00 -16.00 ARASI **
C **      YARIM SAAT ARALIKLI DEĞERLERİNİN DATA OLARAK GİRİLMESİ **
C *****
C
DATA (HO(I),I=1,13)/394,523,534,545,534,710,499,489,455,469,
+367,364,360/
DATA (VA(I),I=1,13)/4*0.4,0.5,0.7,0.3,0.35,0.5,0.9,1.2,1.4,0.8/
DATA (Tor(I),I=1,13)/33.1,28.5,28,29.5,29.9,32.4,33.1,34.1,
+34.7,33.1,31.8,31.4,31.2/
DATA (To(I),I=1,13)/30.5,2*26.8,28.9,29.5,30.3,30.1,30.1,30.3,
+27.8,27,26.4,25.2/
DATA (Por(I),I=1,13)/5103,3993,3815,4138,4224,4910,5103,5379,
+5540,5103,4744,4633,4577/
DATA (Po(I),I=1,13)/4383,2*3560,4000,4138,4330,2*4274,4330,
+3772,3600,3470,3212/

C
C *****
C **      HAVUZ YÜZEYİNE GELEN İŞİNİMİN SAATLİK GELİŞ AÇISININ,SNELL **
C **      YASASINA GÖRE İŞİNİMİN HAVUZ YÜZEYİNDE KIRILMA AÇISININ VE **
C **      FRESNEL YASASINA GÖRE İŞİNİMİN HAVUZ YÜZEYİNDEN YANSIMA **
C **      YÜZDESİNİN HESAPLANMASI **
C *****
C
DATA (SAAT(I),I=1,13)/10.0,10.30,11.0,11.30,12.0,12.30,13.0,
+13.30,14.0,14.30,15.0,15.30,16.0/
GUNSAY= 206
RAD=3.1416/180.0
EA=41.0
DA=23.45*SIN(RAD*360*(284+GUNSAY)/365)

C
DO 123 I=1,13
```

```

FARK(I)=SAAT(I)-12.0
SA(I)=ABS(FARK(I))*15.0
GAC(I)=COS(DA*RAD)*COS(EA*RAD)*COS(SA(I)*RAD)+SIN(DA*RAD)*
+SIN(EA*RAD)
GAS(I)=SQRT(1-(GAC(I)**2))
KAS(I)=GAS(I)/1.33
KAC(I)=SQRT(1-(KAS(I)**2))
123 CONTINUE
C
DO 124 M=1,24
DO 124 I=1,13
X(M)=M+0.0
XGU(M,I)=X(M)/KAC(I)
WRITE(*,*)XGU(M,I)=,XGU(M,I)
124 CONTINUE
WRITE(100,111) ((XGU(M,I),M=1,24),I=1,13)
111 FORMAT(10X,4HXGU(I2,1H,,I2,2H)=,F6.2)
C
DO 127 I=1,13
SEK(I)=(GAC(I)*KAS(I)-GAS(I)*KAC(I)**2
SAR(I)=(GAC(I)*KAS(I)+GAS(I)*KAC(I)**2
GAT(I)=GAS(I)/GAC(I)
KAT(I)=KAS(I)/KAC(I)
TEK(I)=((KAT(I)-GAT(I))/(1-GAT(I)*KAT(I)))**2
TAR(I)=((KAT(I)+GAT(I))/(1+GAT(I)*KAT(I)))**2
BET(I)=0.5*(SEK(I)/SAR(I)+TEK(I)/TAR(I))
WRITE(*,*)BET(I)=,BET(I)
WRITE(100,*)BET(I)=,BET(I)
127 CONTINUE
C
C *****
C ** HAVUZA GİREN İŞİNİM MİKTARININ VE HAVUZ İÇİNDE **
C ** SOĞURULAN İŞİNİM MİKTARININ HESABI **
C *****
C
B=0.425
BETA=0.4
A=0.06

DO 215 I=1,13
HA(I)=(1-A)*HO(I)
WRITE(*,*)HA(I)=,HA(I)
WRITE(100,*)HA(I)=,HA(I)
215 CONTINUE

C BETA=GELEN İŞİNİMİN YÜZEYDE TUTULMA ORANI
C IO=SU YÜZEYİNDE BİRİM ALANA DÜŞEN ENERJİ
C FFB=SUYUN YUTMA KATSAYISI

C Port=ORTAM SICAKLIĞINDAKİ SU BUHARININ DOYMA BASINCI
C BNEM=BAĞIL NEM
C Po=To SICAKLIĞINDAKİ SU BUHARININ DOYMA BASINCI
C To=YÜZEY SICAKLIĞI
C Tort=ORTAM SICAKLIĞI
C

```



```

DO 235 I=1,13
HA(I)=(1-A)*HO(I)
WRITE(*,*)'HA(I)=' ,HA(I)
WRITE(100,*)'HA(I)=' ,HA(I)
235 CONTINUE
DO 225 I=1,13
DO 225 M=4,4
H4(I)=(1-BETA)*HA(I)*EXP(-B*XGU(M,I)*1.0E-2)
WRITE(*,*)'H4(I)=' ,H4(I)
WRITE(100,*)'H4(I)=' ,H4(I)
225 CONTINUE

R=0.67
UTX=4.0
DELTAX=1.0
DELTA=(R*DELTAX*UTX)/ALFA
ZU=(DELTA*ALFA*1.0E-4)/(kw*UTX*1.0E-2)

DO 400 I=1,13
DO 400 M=4,4
W(M,I)=ZU*((1-BETA)*HA(I)-H4(I))
WRITE(*,*)'W(M,I)=' ,W(M,I)
WRITE(100,*)'W(M,I)=' ,W(M,I)
400 CONTINUE
C
C *****
C **          YÜZEY SICAKLIGI DEGERLERININ HESABI          **
C *****
C
DO 355 I=1,13
DO 355 M=1,1
T(M,I)=30.0
355 CONTINUE
C
WRITE(100,*)'YUZEY SICAKLIGI DEGERLERI'
DELTAX=1.0
kw=0.563
DO 370 I=1,13
DO 370 M=0,0
T(M,I)=(DELTAX*1.0E-2/kw)*(BETA*HA(I)-(-QT(I)))+T(M+1,I)
WRITE(*,*)'T(M,I)=' ,T(M,I)
WRITE(100,*)'T(M,I)=' ,T(M,I)
370 CONTINUE
C
WRITE(100,*)'ÜST TASINIMLI BOLGENIN SICAKLIK DEGERLERI'
DO 500 I=0,12
DO 500 M=1,1
T(M,I+1)=R*T(M-1,I)+(1-R)*T(M,I)+W(M,I+1)
WRITE(*,*)'T(M,I+1)=' ,T(M,I+1)
WRITE(100,*)'T(M,I+1)=' ,T(M,I+1)
500 CONTINUE
C
C *****
C **          ARA TASINIMSIZ BÖLGENIN SICAKLIK DEGERLERININ          **
C **          HESAPLANMASI          **
C *****
C
DO 444 I=1,13
DO 444 M=4,13,3
H2(M,I)=(1-BETA)*HA(I)*EXP(-B*XGU(M,I)*1.0E-2)
WRITE(*,*)'H2(M,I)=' ,H2(M,I)
WRITE(100,*)'H2(M,I)=' ,H2(M,I)
444 CONTINUE

```

```

R=0.30
DELTAX=3.0
DELTA= R*(DELTAX**2)/ALFA
kw=0.563
ZA=DELTA*ALFA*1.0E-4/(kw*DELTAX*1.0E-2)
C
DO 455 I=1,13
DO 455 M=7,13,3
W(M,I)=ZA*(H2(M-3,I)-H2(M,I))
WRITE(*,*)'W(M,I)=',W(M,I)
WRITE(100,*)'W(M,I)=',W(M,I)
455 CONTINUE
C
WRITE(100,*)'ARA TASINIMSIZ BOLGENIN SICAKLIKLARI'
C
DO 555 I=0,12
DO 555 M=7,13,3
T(16,I)=T(13,I)
T(4,I+1)=T(1,I+1)
T(M,I+1)=R*(T(M+3,I)+T(M-3,I))+(1-2*R)*T(M,I)+8.0*W(M,I+1)
WRITE(*,*)'T(M,I+1)=',T(M,I+1)
WRITE(100,*)'T(M,I+1)=',T(M,I+1)
555 CONTINUE
C
C *****
C **      ALT TASINIMLI BÖLGENİN SICAKLIK DEĞERLERİNİN      **
C **      HESAPLANMASI                                       **
C *****
C
WRITE(100,*)'ALT TASINIMLI BOLGE İÇİN YAPILAN HESAPLAMALAR'
C
R=0.333
kw=0.563
ATX=8.0
DELTAX=1.0
DELTA= ATX*DELTAX/ALFA
ZL=(DELTA*ALFA*1.0E-4)/(kw*ATX*1.0E-2)
C
DO 560 I=1,13
H16(16,I)=(1-BETA)*HA(I)*EXP(-B*XGU(16,I)*1.0E-2)
H24(24,I)=(1-BETA)*HA(I)*EXP(-B*XGU(24,I)*1.0E-2)
560 CONTINUE

DO 565 I=1,13
DO 565 M=16,16
W(M,I)=ZL*(H16(16,I)-H24(24,I))
WRITE(*,*)'W(M,I)=',W(M,I)
WRITE(100,*)'W(M,I)=',W(M,I)
565 CONTINUE
C
WRITE(100,*)'ALT TASINIMLI BÖLGENİN SICAKLIK DEĞERLERİ'
C
DO 575 I=0,12
DO 575 M=16,16
W(M,I)=W(M,I+1)
T(15,I)=T(16,I)
T(M,I+1)=R*T(M-1,I)+(1-R)*T(M,I)+8.0*W(M,I)
WRITE(*,*)'T(M,I+1)=',T(M,I+1)
WRITE(100,*)'T(M,I+1)=',T(M,I+1)
575 CONTINUE
STOP
END

```

EK B

GÜNEŞ HAVUZU KONSANTRASYON DAĞILIMINI HESAPLAYAN BİLGİSAYAR PROGRAMI

```
C
C *****
C **      BU FORTRAN PROGRAMI I.T.U. MODEL GÜNEŞ HAVUZUNUN      **
C ** ÇALIŞMA PARAMETRELERINE GÖRE YOGUNLUK VE KONSANTRASYON    **
C **      PROFİLİNİ HESAP EDER.                                  **
C *****
C
C      INTEGER ZA,x,t
C      DIMENSION C(50,50),G(50,50)
C      OPEN(1,FILE='TEZ.DAT',STATUS='NEW')
C      WRITE(*,*)'KÜTLE DIFFÜZYON KATSAYISINI "D" cm2/saat BİRİMİ
C      *CİNSİNDEN GIRINIZ'
C      READ(*,*)D
C      WRITE(*,*)D
C      WRITE(1,*)'D=',D, 'cm2/saat'
C
C *****
C * TASNIMSIZ ARA BÖLGE 12 ESİT PARÇAYA BÖLÜNEREK 0. NOKTA ALT *
C * TASNIMLI BÖLGE İLE TASNIMSIZ ARA BÖLGENİN ARA YÜZEYİNİ,12. *
C * NOKTA İSE ÜST TASNIMLI BÖLGE İLE TASNIMSIZ ARA BÖLGENİN ARA *
C * YÜZEYİNİ GÖSTERDİĞİ KABUL EDİLDİ VE BU KABULE GÖRE BALANGIÇ *
C *      SINIR SARTLARI GIRILDI.                                  *
C *****
C
C      N=12
C      X=N/12
C      R=0.5
C      DELTA=(R*X**2)/D
C
C ***** BALANGIÇ SINIR SARTLARI *****
C
C      DO 10 I=0,0
C      DO 10 M=1,11
C      G(M,I)=94.0
C 10  CONTINUE
C
C      G(0,0)=310.0
C      G(-1,0)=310.0
C      DO 20 I=0,0
C      DO 20 M=12,14
C      G(M,I)=0.0
C 20  CONTINUE
C
C
C      WRITE(*,*)'KAÇ GÜN SONRAKI KONSANTRASYON DEĞERLERİNİ BULMAK
```


*ISTYORSANIZ ONA GÖRE ZAMAN ARALIĞINI SAAT OLARAK GIRINIZ.'

```

READ(*,*) t
WRITE(*,*) t
WRITE(1,*) 't=',t, 'SAAT SONRAKI KONSANTRASYON DEĞERLERİ'
ZA=t/DELTA

```

```

C
C *****
C ** SONLU FARKLAR METODUNA GÖRE YAZILMIŞ OLAN DİFÜZYON **
C ** DENKLEMINE GÖRE HESAPLAMALARI YAPAN DÖNGÜNÜN BAŞLANGICI **
C *****
C
J=ZA
DO 30 M=-1,-1
DO 30 I=1,J
G(M,I)=G(-1,0)
30 CONTINUE
C
WRITE(1,*)'YOĞUNLUK DEĞERLERİ - kg/m3'
DO 40 I=0,J
DO 40 M=0,12
G(M,I+1)=R*(G(M-1,I)+G(M+1,I))+((1-2*R)*G(M,I))
DO 50 K=13,13
DO 50 L=1,J
G(K,L)=G(12,L)
WRITE(*,80)M,I+1,G(M,I+1)
WRITE(1,80)M,I+1,G(M,I+1)
80 FORMAT(10X,'G(',I2,',',I2,')=',F8.3)
50 CONTINUE
40 CONTINUE
C
WRITE(1,*)'KONSANTRASYON DEĞERLERİ - % '
DO 60 I=0,J
DO 60 M=0,12
C(M,I+1)=G(M,I+1)*100/1000.0
WRITE(*,70)M,I+1,C(M,I+1)
WRITE(1,70)M,I+1,C(M,I+1)
70 FORMAT(10X,'C(',I2,',',I2,')=',' % ',F7.3)
60 CONTINUE
CLOSE(1)
STOP
END

```

ÖZGEÇMİŞ

Hüseyin KURT, 1971 yılında Mersin İli, Silifke İlçesi, Esenbel Köyü'nde doğdu. İlk ve ortaöğrenimini doğum yeri olan köyünde tamamladı. 1988 yılında Silifke Endüstri Meslek Lisesinden elektrik teknisyeni olarak mezun oldu. Aynı yıl üniversite sınavlarında Gaziantep Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümünü kazandı. Bir yıl İngilizce hazırlık sınıfı okuduktan sonra 1994 yılında aynı okuldan makina mühendisi olarak mezun oldu. Halen Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Karabük Teknik Eğitim Fakültesi, Makina Eğitimi Bölümü, Enerji Eğitimi Anabilim Dalı'nda araştırma görevlisi olarak çalışmalarına devam etmektedir.