

TUZ TABAKALI GÜNEŞ HAVUZLARINDA SICAKLIK VE YOĞUNLUK GRADYENLERİNİN TEORİK VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Hüseyin KURT, Mehmet ÖZKAYMAK ve A. Korhan BİNARK*

Makina Eğitimi Bölümü, Karabük Teknik Eğitim Fakültesi, ZKÜ, 78200 Karabük,
huseyin_kurt@hotmail.com, mozkaymak@hotmail.com,

* Makina Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Marmara Üniversitesi, Göztepe, İstanbul,
kbinark@marmara.edu.tr

(Geliş/Received: 10.08.2004; Kabul/Accepted: 26.11.2004)

ÖZET

Bu çalışmada, tuz yoğunluk gradyenlerinin oluşturulmasında bu güne kadar kullanılmamış olan sodanın (sodyum karbonat) TTGH'ların yoğunluk gradyeninin oluşturulmasında uygun bir tuz olup olmadığı denenecek, soda çözeltili havuzun ısı depolama karakteristiği deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda, laboratuvar şartlarında küçük ölçekli bir havuzda yapılan deneysel çalışma ile birlikte TTGH'ın bir boyutlu ısı ve kütle transferi matematik modeli oluşturulmuştur. Modelden elde edilen diferansiyel denklemler, sonlu farklar metodu ile nümerik olarak çözülerek, deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, soda çözeltili havuz içerisinde sıcaklık gradyeninin oluşabilmesi için, %12 büyüklüğünde tuzluluk oranına sahip bir yoğunluk gradyeninin oluşturulması gerektiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tuz tabakalı güneş havuzları, matematik model, sodyum karbonat.

THE THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF TEMPERATURE AND SALINITY GRADIENTS IN SALT GRADIENT SOLAR PONDS

ABSTRACT

In this study, both experimental and theoretical investigations were carried out in order to determine whether sodium carbonate salt which has not been used up to now for establishing salinity gradients is suitable for establishing salinity gradient in Salt Gradient Solar Pond (SGSP) or not. The heat storage ability of a solar pond was also examined. For this purpose, a small scale pond in the laboratory conditions was constructed for the experimental work and also one dimensional mathematical model for the SGSP's heat and mass transfer was developed. Differential equations obtained through by the developed model were solved numerically using finite difference method. The experimentally and theoretically obtained results showed that in order to establish temperature gradient in the sodium carbonate solution pond, a salinity gradient with salinity of about 12 % needs established.

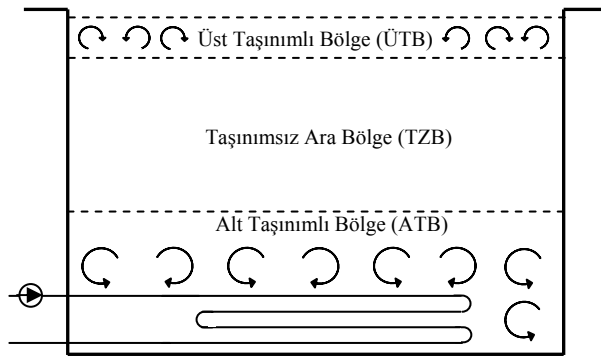
Keywords: Salt gradient solar pond, mathematical model, sodium carbonate.

1.GİRİŞ

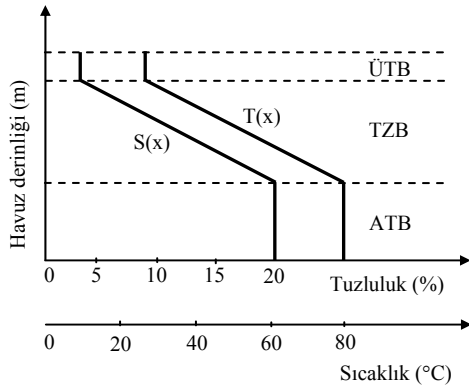
Güneş havuzları, güneş enerjisinin doğrudan toplanıp, yine aynı ortamda depolandığı basit bir güneş enerjisi uygulamasıdır. Güneş havuzlarının fiziki yapısı, basit bir bahçe havuzunda güneş ışınımının soğurulmasıyla meydana gelen olayları inceleyerek daha iyi anlaşılabilir. Böyle bir havuzun yüzeyine gelen

ışınımın küçük bir kısmı yansiyacak, geriye kalan kısmı ise havuz içerisinde soğurulacaktır. Havuzun dip kısmında soğurulan ışınım miktarının, yüzeye yakın kısımda soğurulan ışınım miktarından daha fazla olması, dip kısımdaki sıcaklığın, yüzeye yakın kısımdaki sıcaklığa oranla daha fazla artmasına neden olacaktır. Böylece havuzun dip kısmında daha sıcak, yüzeyde daha soğuk su kütlesi içerisinde kararsız bir

yapı oluşacaktır. Dip kısımda daha sıcak, yüzeyde ise daha soğuk su molekülleri birbirleriyle yer değiştirmek isteyeceğinden havuz içerisinde tabandan yüzeye doğru doğal olarak bir taşınım hareketi başlayacaktır. Havuz içerisinde ışınım soğurulduğu müddetçe, doğal taşınım hareketi devam edeceğinden havuzun dip kısmında ışınımın soğurulmasıyla oluşacak ısıyı tutacak bir metot kullanılmadıkça, havuz sürekli olarak atmosfere ısı kaybedecektir. Yoğunluk farkının neden olduğu taşınım hareketi engellenebilirse, havuzun dip kısımlarında toplanan ışınım, yine aynı ortamda ısı enerjisi olarak depolanabilecektir. Taşınım hareketini engellemek için kullanılan en yaygın metot, havuz içerisinde derinlikle artacak şekilde yapay olarak oluşturulan tuz yoğunluk gradyenidir. Bu metot, yerçekimi kuvvetinden daha büyük olan ısı kaldırma kuvvetinin, yapay olarak oluşturulan yoğunluk gradyeni ile dengelenerek havuz içerisindeki taşınım hareketinin engellenmesine dayanmaktadır. Taşınım hareketinin tuz yoğunluk gradyeni ile engellendiği bu tür havuzlar, Tuz Tabakalı Güneş Havuzu (TTGH) olarak bilinirler. Şekil 1’de TTGH’nin fiziki yapısı, Şekil 2’de ise yoğunluk ve sıcaklık profilleri görülmektedir. TTGH’lar genellikle üst taşınımlı bölge (ÜTB), taşınımsız ara bölge (TZB) ve alt taşınımlı bölge (ATB) olmak üzere üç farklı bölgeden oluşur. ATB, ısının depolandığı, tuz konsantrasyonunun en fazla olduğu bölge olup, yoğunluğu sabittir. ATB üzerinde, şeffaf yalıtıcı bir malzeme gibi yalıtıcı görevi yapan ve ÜTB’ye doğru azalan bir yoğunluk gradyeni içeren TZB bulunmaktadır. TZB,



Şekil 1. TTGH'nin fiziki yapısı



Şekil 2. TTGH yoğunluk ve sıcaklık gradyenleri

TTGH'ların en önemli kısmı olup, içerdiği tuz yoğunluk gradyeninin yeterli miktarda büyük olması halinde, havuzun tabanı yüzeyine oranla daha sıcak olmasına rağmen taşınım hareketinin başlaması engellenebilecektir. Bu nedenle, ATB'de toplanan ışınımın yine aynı ortamda depolanabilmesi, TZB'nin sahip olduğu tuz yoğunluk gradyeninin büyüklüğüne bağlıdır. ÜTB, genellikle tuzsuz su ihtiva eden bölge olup, ince bir tabaka kalınlığına sahiptir. Bu bölgenin oluşturulması, yoğunluk gradyeni kararlılığının sağlanması ve korunması açısından önemlidir [1-5].

Güneş havuzları konusunda ilk çalışma İsrail'de Ölü Deniz kıyısında Tabor [2] tarafından 625 m² yüzey alanına, 1 m derinliğe sahip bir havuzda gerçekleştirilmiştir. Yüzey sıcaklığının 28 ile 32 °C arasında değiştiği bir zamanda, havuzun 80 cm derinliğinde 90 °C sıcaklık elde edilmiştir. Bu çalışmanın ardından Tabor ve Doron [6] çözeltisi Ölü Denizden elde edilen 1 km² yüzey alanına, 5 m derinliğe sahip bir güneş havuzu inşa ederek 5 MW_e elektrik üretimi yapan bir tesis kurmuşlardır. TTGH ile ilgili ilk matematik modeli Weinberger [1] yaparak, güneş havuz içerisinde gerçekleşen fiziksel olayları teorik olarak incelemiştir. Hawlader ve Brinkwort [7], Rubin ve Benedict [8], Joshi ve Kishore [9], Chang ve Banerot [10], teorik olarak güneş havuzlarının performansını analiz etmişlerdir. Akbarzadeh ve Ahmadi [11], Hull [12], Zhang ve Wang [13], Munoz ve Almanza [14], Subhaker ve Murthy [15], El-Refae ve Al-Marafie [16], Alagao [17], güneş havuzunun performansını analiz edebilmek için simülasyon modeli geliştirmişlerdir. Bozdemir ve Kayalı [18], Ünal ve ark. [19], Subhaker ve Murthy [20,21], Kho ve ark. [22], Banat ve ark. [23], Alagao ve ark. [24], Pawar ve ark. [25], Hassairi ve ark. [26], doğal ortamda farklı boyutlardaki güneş havuzunun performansını deneysel olarak incelemiştir. Leshuk ve ark. [27], Keren ve ark. [28], Lund ve Keinonen [29], Kanayama ve Baba [30], Kanayama ve ark. [31], Göktun [32], Xiang ve ark. [33], enerji kaynağı olarak halojen lambalar ile tasarladıkları güneş simülatörü kullanarak laboratuvar şartlarında güneş havuzunun performansını incelemiştir. Lund ve Routti [34], Fagbenle [35], Lodhi [36], Khalil ve ark. [37], güneş havuzunun uygulanabilirliği ve uygulama alanları konusunda çalışmışlardır.

Sodyum klorür (NaCl) çözeltisi içeren doğal güneş göllerinden esinlenerek, TTGH yoğunluk gradyeninin oluşturulmasında genel olarak NaCl tuzu kullanılmıştır. Bunun dışında potasyum sülfat (K₂SO₄), potasyum nitrat (KNO₃), potasyum klorür (KCl), amonyum nitrat (NH₄NO₃), magnezyum klorür (MgCl₂) gibi farklı tuzlar denenmiştir. Yapılan literatür taraması sonucunda TTGH yoğunluk gradyeninin oluşturulmasında çamaşır sodası olarak bilinen sodyum karbonat (Na₂CO₃) tuzunun kullanılmadığı görülmüştür. Bu çalışmada, soda

$$\dot{q} = -\frac{dI(x)}{dx} \quad (4)$$

$$I(x) = (1-a)(1-\beta)I_s e^{-\mu x} \quad x > 0 \quad (5)$$

Rubin ve Benedict [8], Chang ve Bannerot [10], Zhang ve Wang [13], Subhaker ve Murthy[15], El-Refae ve Al-Marafie [16], Bozdemir ve Kayalı [18], yukarıda elde edilen ısı iletim denklemini uygun sınır şartlarında sonlu farklar metodu ile nümerik olarak çözmüşlerdir. Yapılan bu çalışmalar dikkate alınarak, TZB için elde edilen enerji denge denklemi, sonlu farklar yaklaşımının açık şema (explicit) metodu kullanılarak nümerik olarak çözülmüştür. Çözümeye başlayabilmek için bir başlangıç ve iki sınır şartına ihtiyaç vardır. Başlangıç şartı olarak, havuz ilk sıcaklık dağılımının, havuz çalışmaya başladığı andaki sıcaklık dağılımına eşit olduğu, sınır şartları olarak ise, ÜTB sıcaklığı ($x=L_1$) ve ATB sıcaklığı ($x=L_2$) kabul edilmiştir. ÜTB ve ATB sıcaklıkları, TZB boyunca ATB'den ÜTB'ye doğru iletimle ısı transferi ve ÜTB'den buharlaşma, taşınım ve ışınım yoluyla ısı kaybı olduğu dikkate alınarak, her iki bölge için ayrı ayrı enerji dengesinin yazılması ile elde edilen eşitliklerden bulunabilir. Buna göre, ÜTB ve ATB için enerji dengesi yazılacak olursa,

$$k \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=x_1} + \left(I \Big|_{x=0} - I \Big|_{x=L_1} \right) - Q_L = \rho C_p \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} X_{ÜTB} \quad x = L_1 \quad (6)$$

$$-k \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=L_2} + \left(I \Big|_{x=L_2} \right) = \rho C_p \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} X_{ATB} \quad x = L_2 \quad (7)$$

eşitlikleri elde edilir.

4.2. TTGH'lerde Meydana Gelen Isıl Kayıplar

Havuz zeminden ve yan yüzeylerden iyi bir şekilde yalıtıldığından dolayı, zeminden ve yan yüzeylerden meydana gelen ısı kaybı çok küçük olacağından, ısı kaybının havuz yüzeyinden taşınım, buharlaşma ve ışınım yoluyla olduğu kabul edilmiştir. Buna göre, havuz yüzeyinden atmosfere olan toplam ısı kaybı,

$$Q_L = Q_c + Q_e + Q_r \quad (8)$$

eşitliğinden hesaplanmıştır [15,16]. Taşınım ile olan ısı kaybı,

$$Q_c = h_c (T_s - T_\infty) \quad (9)$$

$$h_c = 5,7 + 3,8V_r \quad (10)$$

eşitliğiyle [15,16], buharlaşma ile olan ısı kaybı,

$$Q_e = \frac{h_e h_c (P_s - P_\infty)}{1,6 C_a P_{atm}} \quad (11)$$

$$P_s = \exp \left(18,403 - \frac{3885}{T_s + 230} \right) \quad (12)$$

$$P_s = \exp \left(18,403 - \frac{3885}{T_s + 230} \right) \quad (13)$$

eşitliğinden [9,16], ışınım ile olan ısı kaybı ise,

$$Q_r = \varepsilon_w \sigma \left((T_s)^4 - (T_{sky})^4 \right) \quad (14)$$

$$T_{sky} = T_\infty + \left(0,55 + 0,704 \left(\sqrt{P_\infty} \right) \right)^{0,25} \quad (15)$$

eşitliğinden elde edilir [15,16].

2.2. TTGH Kütle Transferi Matematik Modeli

Havuz içerisindeki kütle dengesi için ortamda kimyasal reaksiyonun olmadığı, kütle transferinin kütesel difüzyonla gerçekleştiği, tuz difüzyonunun sıcaklık ve konsantrasyonla değişmeyip sabit olduğu kabul edilmiştir. Kütle dengesi, Şekil 4'de görüldüğü gibi Δx kalınlığındaki bir diferansiyel hacim elemanı için x yönünde bir boyutlu yazılacak olursa,

$$(J_x - J_{x+\Delta x}) = \left(\frac{\partial \rho(x,t)}{\partial t} \right) \Delta x \quad (16)$$

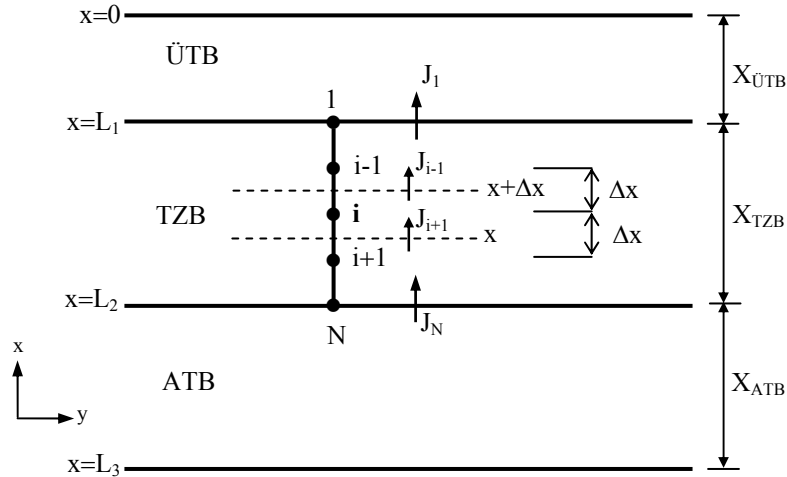
$$-\left(\frac{J_{x+\Delta x} - J_x}{\Delta x} \right) = \frac{\partial \rho(x,t)}{\partial t} \quad (17)$$

$$-\frac{\partial J}{\partial x} = \frac{\partial \rho(x,t)}{\partial t} \quad (18)$$

eşitliği elde edilir. Fick kütle difüzyon kanununa göre, kütle akısı değeri yerine yazılıp düzenlendiğinde, TTGH'nin yoğunluk dağılımını belirlemek için Subhaker ve Murthy [15], Kho ve ark.[22] tarafından havuz yoğunluk dağılımının belirlenmesinde kullanılan aşağıdaki kütle difüzyon denklemi elde edilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial \rho(x,t)}{\partial x} \right) = \frac{\partial \rho(x,t)}{\partial t} \quad (19)$$

Elde edilen bu denklem, ısı transferi modelinden elde edilen denkleme benzediğinden, aynı çözüm yöntemi bu denklemede uygulanabilir. Buna göre, ısı transferi denkleminde olduğu gibi bir başlangıç ve iki sınır şartına ihtiyaç vardır. Başlangıç şartı olarak, havuzun



Şekil 4. TTGH kütle transfer modeli ve fiziksel özellikleri

doldurulduğu andaki yoğunluk değerleri, sınır şartları olarak ise, ATB ve ÜTB sabit bir yoğunluğa sahip olduklarından, TZB'nin alt ve üst sınırları seçilmiştir. Buna göre, TZB'nin ÜTB ve ATB sınırlarındaki kütle dengesi yazıldığında,

$$D \frac{\partial \rho(x,t)}{\partial x} = X_{\text{ÜTB}} \frac{\partial \rho(x,t)}{\partial t}, \quad (20)$$

$x = L_1 \quad t > 0$

$$-D \frac{\partial \rho(x,t)}{\partial x} = X_{\text{ATB}} \frac{\partial \rho(x,t)}{\partial t}, \quad (21)$$

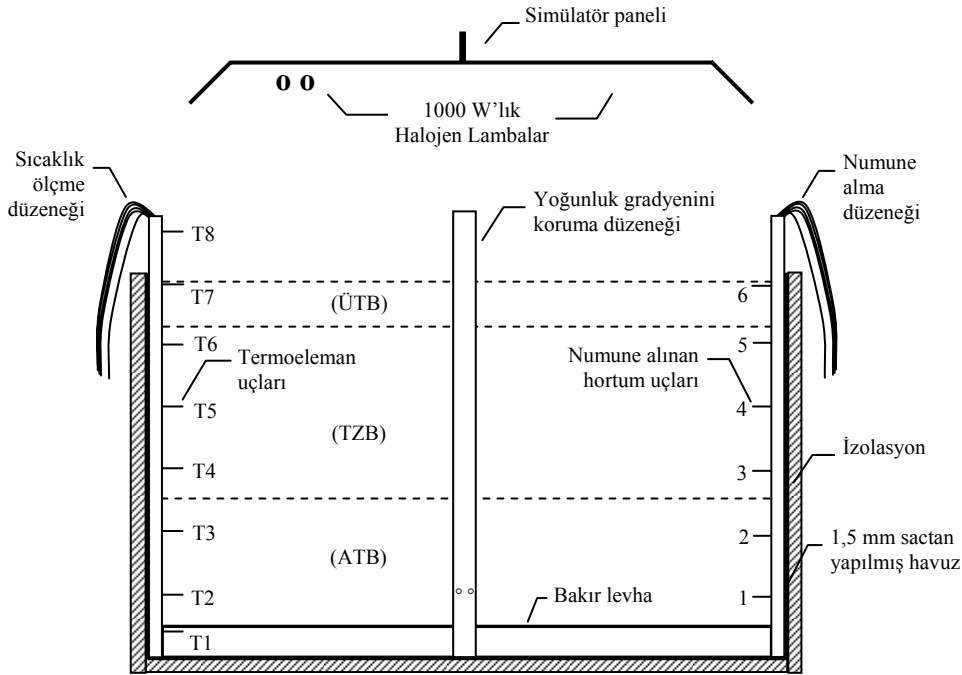
$x = L_2 \quad t > 0$

eşitlikleri elde edilir. Elde edilen bu denklemler, ısı transfer denkleminde olduğu gibi sonlu farklar metodu ile nümerik olarak çözülerek havuzun yoğunluk dağılımı belirlenmiştir.

3. DENEYLER

3.1. Deney Düzenegi

Deneyler, laboratuvar şartlarında $60 \times 50 \text{ cm}^2$ yüzey alanına, 60 cm derinliğe sahip 1,5 mm galvanizli paslanmaz sacdan yapılmış olan küçük ölçekli bir havuzda yapılmıştır. Şekil 5'de deney havuzunun fiziki yapısı görülmektedir. Sıcaklık ve yoğunluk dağılımlarını ölçmek için, bir boru üzerine yerleştirilmiş olan termoeleman düzenegi ve havuz içerisinden numune alma düzenegi havuzun yan yüzeylerine sabitlenmiştir. Havuzun tam orta noktasına ise, yoğunluk gradyeninin başlangıçtaki büyüklüğünü ve kararlılığını koruyabilmek amacıyla, yoğunluk koruma düzenegi yerleştirilmiştir. Plastik borudan oluşan düzenegin ATB içerisinde kalan kısmında çok küçük delikler açılmıştır. Homojen bir



Şekil 5. Deney havuzunun şematik olarak görünümü

depolama sıcaklığının sağlanabilmesi amacıyla havuz tabanına, tabandan yüksekliği 5 cm olacak şekilde, yüzeyi siyah mat boya ile boyanmış 1 mm kalınlığında bir bakır levha yerleştirilmiştir. Havuzun zemin ve yan yüzeylerinden meydana gelecek ısı kayıplarının önlenmesi için 2 cm kalınlığında cam yünüyle, cam yünü üzeri ise 3 cm kalınlığında strafor ile kaplanarak havuz iyi bir şekilde yalıtılmıştır.

Deneylerin laboratuvar şartlarında yapılabilmesi için ışık kaynağı olarak, güneş ışınımına eşdeğer spektral ışınım veren bir güneş simülâtörü dizayn edilmiştir. Simülâtör, 1000 W, 220-230 V, 6.5 A, 25 000 lm, 12 mm çapında, 189 mm uzunluğunda 2 tane Philips tungsten halojen lambadan oluşmaktadır. Lambalar, 50x40 cm boyutlarında yansıtıcı bir yüzeye sahip bir levha üzerine monte edilmiştir. Işınım ölçümleri $\pm \%1,5$ hassasiyete sahip 1500 W/m^2 'ye kadar ölçüm yapabilen solar-130 tipi bir pironometre ile yapılmıştır.

Havuzun sıcaklık dağılımı, K tipi (Kromel-Alumel) termoelemanlarla, doğrudan $^{\circ}\text{C}$ cinsinden ölçüm yapabilen ve 0–400 $^{\circ}\text{C}$ aralığındaki hassasiyeti $\pm \% 1$ olan Mastech MY-64 tipi dijital multimetre ile ölçülmüştür. Deneylere başlamadan önce buz banyosu ortamında 0 $^{\circ}\text{C}$ 'de termoelemanların doğruluğu kontrol edilmiştir. Havuz içerisinde sıcaklık ölçümünün yapılabilmesi için Şekil 5'de görüldüğü gibi, havuzun yan taraflarından birine sabitlenen plastik bir boru üzerine 10 cm aralıklarla 8 adet termoeleman yerleştirilmiştir. Ayrıca deneyin yapıldığı oda sıcaklığı ayrı bir termoeleman ile ölçülmüştür.

Havuzda derinlikle artan tuz yoğunluk gradyeni, farklı konsantrasyonlardaki çözeltilerin birbiri üzerine yerleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Çözeltiler havuza doldurulmadan önce, yoğunluk gradyeninin kararlılığının sağlanabilmesine yardımcı olması

amacıyla havuz tabanına bir miktar tuz konmuştur. Deneylerde kullanılan çözeltilerin doymuş hale gelebilmesi ve su içerisinde çözünmeyip asılı kalan partiküllerin dibe çökerek, berrak bir çözelti elde edilebilmesi amacıyla çözeltiler 3 gün bekletildikten sonra ATB'den başlayarak havuz doldurulmaya başlanmıştır. TZB, farklı konsantrasyonlarda birbirine karışmayacak şekilde ince tabakalar halinde oluşturulmuştur. Bunun için çözelti, su yüzeyinde yüzebilen ve tabanına küçük delikler açılmış küçük plastik bir kap içerisine bir hortum aracılığıyla çok küçük hızlarda dikkatli bir şekilde akıtılmıştır. ÜTB ise, TZB'de olduğu gibi dikkatli bir şekilde tatlı su ile doldurularak havuz doldurma işlemi tamamlanmıştır. Kararlı bir yoğunluk gradyeninin oluşabilmesi için havuz doldurma işleminin tamamlandıktan sonra 3 günlük bir bekleme süresini takiben deneylere başlanmıştır. Havuz yoğunluk dağılımı, 10 cm arayla 6 ayrı noktaya yerleştirilmiş olan numune alma hortumlarından 20 ml'lik enjektörler ile numuneler alınarak hacmi 10 ml olan piknometreye doldurulmuş, 0-310 gr aralığında ölçüm yapabilen Sartorius marka BP 310 P model hassas dijital bir terazide kütlesi ölçülerek oluşturulmuştur. Piknometrenin hassasiyeti $10\text{ml} \pm 0.2 \text{ ml}$, terazinin hassasiyeti ise $1 \text{ gr} \pm 0.03 \text{ mgr} - 50 \text{ gr} \pm 0.1 \text{ mgr}$ 'dir.

3.2. Deneylerin Yapılışı

TTGH'larda yoğunluk gradyeninin oluşturulmasında soda çözeltilisiyle yapılan deneylerden elde edilen sonuçları karşılaştırabilmek amacıyla, TTGH'larda kullanılan en genel tuzlardan birisi olan NaCl çözeltili deneyler yapılmıştır. Deneylere, tecrübe kazanabilmek amacıyla NaCl çözeltilisiyle deneme deneyi yapılarak başlanmış, daha sonra NaCl çözeltilisiyle farklı 2 deney, soda çözeltilisiyle farklı 4 deney yapılmıştır. Tablo 1 ve 2'de bu çalışmada incelenen deneylerde havuza doldurulan çözeltilerin tuzluluk oranları ve yoğunluk değerleri

Tablo 1. NaCl çözeltili deneyde tuzluluk oranları ve yoğunluk dağılımları

Havuz Tabakaları	Tabaka Kalınlığı (cm)	Tuzluluk Oranı (%)	Yoğunluk (kg/m^3)
ÜTB	10	0	998
	25	5	1055,8
		5	1085
		5	1092,8
		5	1132,3
		5	1158,1
ATB	25	23	1192,7

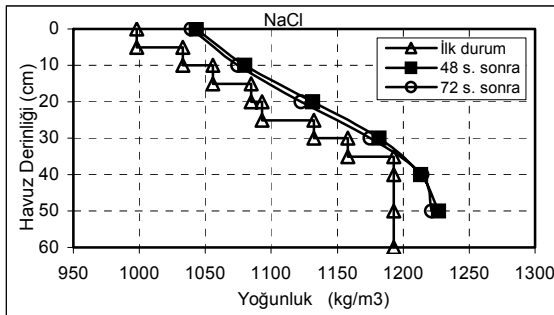
Tablo 2. Soda çözeltili deneyde tuzluluk oranları ve yoğunluk dağılımları

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

görülmektedir. Her iki deneyde de, bölgelerin tabaka kalınlıkları ÜTB 10 cm, TZB ve ATB ise 25 cm seçilmiştir. TZB, 5 cm kalınlığında tabakalar halinde 5 farklı yoğunlukta çözelti ile, ÜTB ise tatlı su ile doldurulmuştur. NaCl ile yapılan deneyde, havuz tabanı ile yüzeyi arasında % 23, soda ile yapılan deneyde ise % 16 tuzluluk oranına sahip yoğunluk gradyeni oluşturulmuştur. Daha büyük tuzluluk oranına sahip yoğunluk gradyeni oluşturulmaya çalışılmasına rağmen sodanın su içerisinde %16'dan daha büyük değerlerde eritilememesi nedeniyle gerçekleştirilememiştir.

Literatürde yapılmış benzer deneysel çalışmalarda, Gökten [84], havuzu devamlı ışınım ve 2 saat ışınım 1 saat karanlığa, Keren ve arkadaşları [34], 24 saat ışınım 12 saat karanlığa, Leshuk ve arkadaşları [18] ise devamlı ışınım maruz bırakarak havuzda meydana gelen olayları incelemiştir. Bu çalışmada ise, simülasyon 12 saat çalıştırılıp, 12 saat söndürülerek havuz bir gün içinde 12 saat süreyle ışınım, 12 saat süreyle karanlığa maruz bırakılmıştır. Havuz yüzeyine gelen ışınım şiddetinin değeri, yapılan deney sonuçlarının gerçeğe yakın olabilmesi için yaz aylarında Karabük şartlarında saat 10:00-16:00 arası yatay düzleme gelen ortalama ışınım şiddeti olan 750 W/m² seçilmiştir. Havuz ışınım maruz bırakıldığı andan itibaren doğal ortam şartlarının sağlanabilmesi amacıyla 650 W gücünde bir fan ile yapay olarak oluşturulan ve havuz yüzeyindeki şiddeti 1.5-2 m/s arasında değişen rüzgara maruz bırakılmıştır. Havuz yüzeyindeki rüzgar hızı, TA2 Anemometer/Thermometer tipi analog bir cihaz ile ölçülmüştür.

Havuzun yoğunluk dağılımını belirlemek için, 12 saat arayla günde 2 defa yoğunluk ölçümü yapılmıştır. Sıcaklık dağılımı ise, havuz ışınım maruz bırakıldığı 12 saat boyunca, 2 saatte bir ölçülerek belirlenmiştir. Havuz yüzeyinden buharlaşma ile olan su kaybını karşılamak ve yoğunluk gradyenini korumak amacıyla havuz yüzeyine her gün NaCl çözeltisi deneylerde yaklaşık 2 lt, soda çözeltisi deneylerde ise 3 lt tatlı su ve havuz tabanına ise yoğunluk gradyenini koruma düzeneği ile her gün 1 lt ATB yoğunluğuna sahip çözelti eklenmiştir.



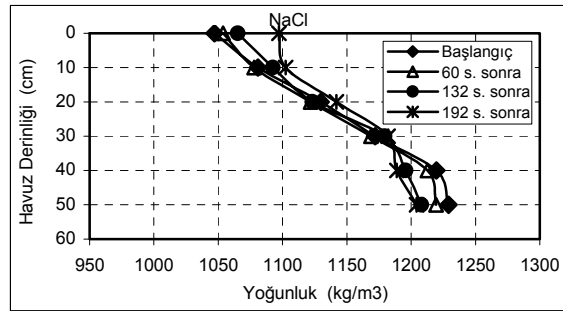
Şekil 6. Deneye başlamadan önceki havuz yoğunluk dağılımı

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

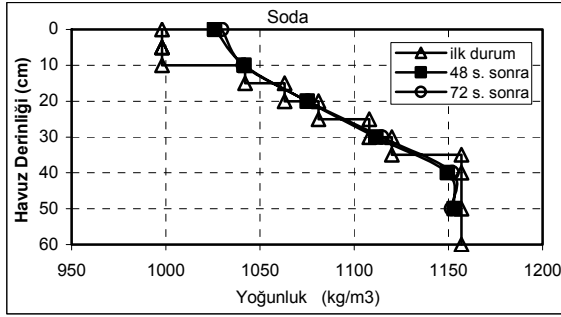
Şekil 6'da, havuz içerisinde kararlı bir yoğunluk gradyeninin oluşabilmesi için NaCl çözeltisinin havuza doldurulduktan sonraki 3 günlük bekleme süresi içerisindeki yoğunluk dağılımı görülmektedir. Bu süre zarfında, havuz doldurulmaya başlamadan önce tabana konulan tuzun yoğunluk gradyeninin oluşumuna etkisi açık bir şekilde görülmektedir. Havuz doldurulduktan kısa bir süre sonra, havuz tabanına konan tuzun çözeltiyi aşırı doymuş hale getirmesi sonucu ATB yoğunluğu ulaşabileceği en büyük değerine ulaşmıştır. Şekil 7'de ise havuz, ışınım maruz bırakıldıktan sonraki havuz yoğunluk dağılımı görülmektedir. Havuz tabanındaki tuz konsantrasyonu, yüzeye doğru olan tuz difüzyonu nedeniyle zamanla azalmakta, yüzeydeki tuz konsantrasyonu ise artmaktadır. Tuz difüzyonuna bağlı olarak, ATB ve ÜTB zamanla büyümüş TZB ise küçülmüştür.

Şekil 8'de soda çözeltisi deneylere başlamadan önceki 3 günlük, Şekil 9'da ise deneyden elde edilen yoğunluk dağılımı görülmektedir. Merdiven basamağı şeklinde olan ilk yoğunluk dağılımı, NaCl çözeltisi deneylere oranla daha kısa zamanda lineer bir hal almıştır. Şekillerden görülebileceği gibi, soda ile oluşturulan yoğunluk gradyeni nicelik ve nitelik bakımından birbirine yakın değerler olmuştur. NaCl çözeltisi deneylerden elde edilen yoğunluk dağılımları ile karşılaştırıldığında soda çözeltisiyle oluşturulan yoğunluk gradyeninin daha kararlı bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Soda çözeltisiyle oluşturulan yoğunluk gradyeninin kararlılığı, sodanın kristal halde bulunmasından dolayı çözelti içerisinde NaCl çözeltisinde olduğu tuz kristalizasyonunun oluşmamasından kaynaklanmaktadır.

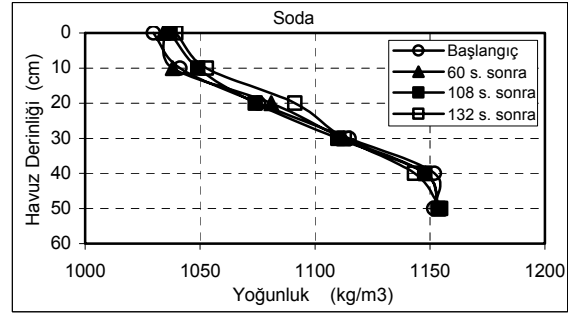
Şekil 10 ve 11'de, havuz derinliğinin bir fonksiyonu olarak ölçülen havuz sıcaklık dağılımları görülmektedir. NaCl çözeltisi deneyde 8. gün sonunda ölçülen sıcaklık değerlerinin, 7. gün ölçülen sıcaklık değerlerine çok yakın olması nedeniyle 8. gün sonunda deneye son verilmiştir. Ortalama 28 °C ortam sıcaklığında, 8. gün sonunda depolama sıcaklığı 45 °C'ye ulaşmış, taban ile yüzey arasında yaklaşık 11 °C sıcaklık farkı elde edilmiştir. Soda çözeltisi



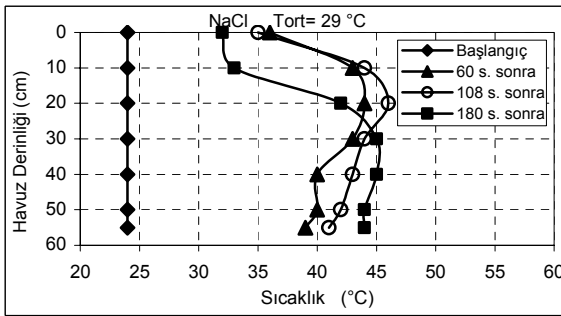
Şekil 7. Deneyden elde edilen havuz yoğunluk dağılımı



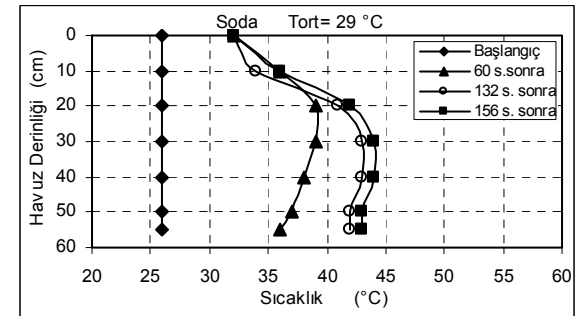
Şekil 8. Deneye başlamadan önceki havuz yoğunluk dağılımı



Şekil 9. Deneyden elde edilen havuz yoğunluk dağılımı



Şekil 10. NaCl çözeltili havuz sıcaklık dağılımı



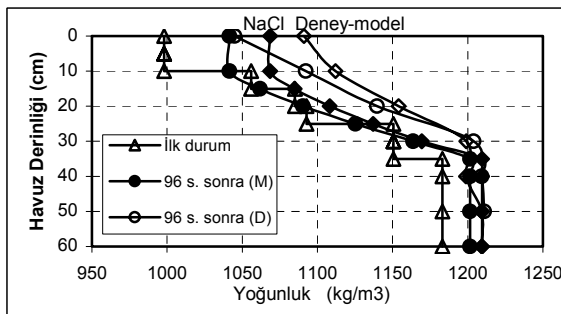
Şekil 11. Soda çözeltili havuz sıcaklık dağılımı

havuzda ise depolama sıcaklığı 6. günden itibaren sabit kalmaya başlamış ve 7. gün sonunda depolama sıcaklığı 43 °C civarında olmuş, taban ile yüzey arasında yaklaşık 12 °C'lik sıcaklık farkı elde edilmiştir.

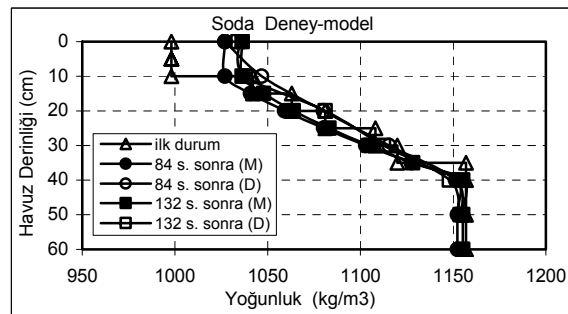
Sıcaklık dağılımları karşılaştırıldığında soda çözeltili havuz sıcaklık eğrilerinin nicelik bakımından daha düzgün bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Her iki deneyde de havuzun yüzey sıcaklığı depolama sıcaklığına göre hızlı bir şekilde artarak ortam sıcaklığından daha büyük bir değerde, NaCl çözeltili deneyde 35 °C, soda çözeltili deneyde ise 32 °C dolayında sabit kalmıştır. Bu durum, deneylerde enerji kaynağı olarak kullanılan lamba ışınım spektrumunun, güneş ışınımı spektrumuna oranla daha çok kızılötesi ışınımına sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Su, kızılötesi ışınımı geçirmeyen bir madde olması nedeniyle, lamba ışınımının güneş ışınımına oranla daha büyük bir bölümü, havuz

yüzeyinde ince bir tabaka tarafından soğurulduğundan havuz tabanına kadar ulaşip soğurulacak olan ışınım miktarı azalmaktadır. Bu nedenle, yüzey sıcaklığı ortam sıcaklığından daha büyük bir değerde depolama sıcaklığı ise olması gereken değerden daha küçük bir değerde sabit kalmıştır. Aynı ışınım akısı değerlerinde güneş ışınımına maruz doğal havuzlar ile laboratuvar şartlarında simüle edilen havuzlar karşılaştırılacak olursa, güneş ışınımının yüzeyde soğurulacak kızılötesi ışınım miktarı daha az havuz tabanına kadar ulaşip soğurulacak olan kısa dalga boylu ışınım miktarı daha fazla olduğundan, doğal havuzlardan elde edilecek sıcaklık farkı daha büyük olacaktır.

Şekil 12'de NaCl çözeltili, Şekil 13'de ise soda çözeltili deney-model yoğunluk dağılımlarının karşılaştırılması verilmiştir. NaCl çözeltili deney sonuçlarıyla model sonuçları deneyin ilk safhalarında birbirine daha yakın olurken, deneyin sonlarına doğru aradaki fark artmıştır. Model sonuçlarında tabaka



Şekil 12. NaCl çözeltili deney ve modelden elde edilen yoğunluk dağılımları



Şekil 13. Soda çözeltili deney ve modelden elde edilen yoğunluk dağılımları

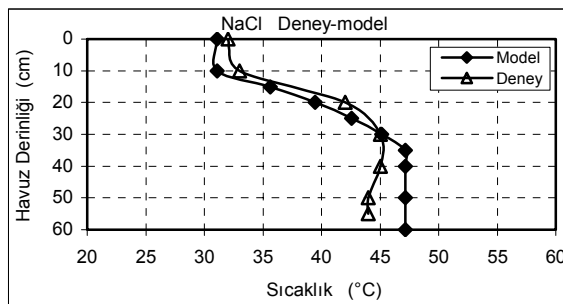
kalınlıkları sabit kalırken deney sonuçlarında taşınımlı bölgelerin TZB'ye doğru büyümesiyle TZB tabaka kalınlığı küçülmüştür. Modelde havuzdaki kütle miktarı sabit kabul edildiğinden, havuz doldurulmaya başlamadan önce havuz tabanına konan tuz ve deney esnasında her gün ATB'ye eklenen çözelti miktarı deney ile model sonuçları arasında farklılık oluşturmuştur.

Şekil 13'den de görülebileceği gibi, NaCl çözeltili yoğunluk dağılımının aksine soda çözeltili deney-model yoğunluk dağılımı nicelik ve nitelik bakımından birbirleriyle uyum içindedir. Soda çözeltili deney, havuz tabanı ile yüzeyi arasında % 16 büyüklüğünde tuzluluk oranına sahip bir yoğunluk gradyeninin oluşturulmasıyla gerçekleştirilmiştir. Ayrıca soda çözeltisi içerisinde NaCl çözeltisinde olduğu gibi tuz kristalizasyonu olmaması deney-model sonuçlarının birbirleriyle uyumlu olmasını sağlamıştır.

Şekil 14 ve 15'de ise NaCl ve soda çözeltili deney-model sıcaklık dağılımlarının karşılaştırılması görülmektedir. Modelden elde edilen depolama sıcaklığı, deneyde ölçülen depolama sıcaklığından daha büyük olurken, TZB ve ÜTB'nin sıcaklıklarında ise deneylerden elde edilen sıcaklık değerleri daha büyük olmuştur. Bu durum daha önce de belirtildiği gibi deneylerde enerji kaynağı olarak kullanılan lamba ışınımı spektrumundan kaynaklanmaktadır. Lamba ışınımı, güneş ışınımına göre daha çok uzun dalga boylu (kızılötesi) ve daha az kısa dalga boylu ışınımına sahiptir. Kızılötesi ışınım yüzeye yakın tabakalarda soğurulduğundan yüzeye yakın tabakaların sıcaklığı artmakta havuz tabanına kadar ulaşım soğurulacak kısa dalga boylu ışınımın az olması, depolama sıcaklığının daha düşük olmasına neden olmaktadır.

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

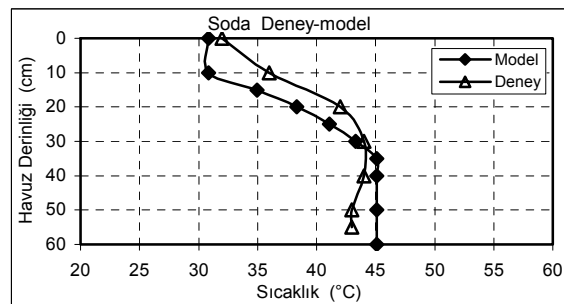
Bu çalışmada, tuz yoğunluk gradyenlerinin oluşturulmasında bu güne kadar kullanılmamış olan sodanın (sodyum karbonat) TTGH'ların yoğunluk gradyeninin oluşturulmasında uygun bir tuz olup olmadığı deneyerek soda çözeltili havuzun ısı depolama karakteristiği deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. İlk defa soda tuzu kullanılarak oluşturulan tuz yoğunluk gradyenli havuzun yoğunluk



Şekil 14. NaCl çözeltili deney ve modelden elde edilen sıcaklık dağılımları

ve sıcaklık gradyenlerini karşılaştırabilmek için TTGH'larda kullanılan en genel tuz çeşidi olan NaCl çözeltisiyle farklı 2 deney yapılmıştır. Havuz tabanı ile yüzeyi arasında 1. deneyde başlangıçta % 23, 2. deneyde ise % 21 büyüklüğünde tuzluluk oranına sahip yoğunluk gradyeni oluşturulmuş, 1. deneyde havuz tabanı ile yüzeyi arasında yaklaşık 11 °C sıcaklık farkı elde edilirken, 2. deneyden 13 °C sıcaklık farkı elde edilmiştir. Soda çözeltisiyle havuz içerisinde başlangıçta % 8, %10, %12 ve %16 büyüklüğünde tuzluluk oranına sahip dört farklı yoğunluk gradyeni oluşturularak, havuzda ısı depolanabilmesi için gerekli olan yoğunluk gradyeni büyüklüğü belirlenmeye çalışılmıştır. Birinci deneyde, havuz içerisinde TTGH'nin sıcaklık gradyenine benzer bir sıcaklık gradyeni elde edilemezken ikinci deneyde, TTGH'nin sıcaklık gradyenine benzer bir sıcaklık gradyenine geçişin başladığı görülmüştür. Üçüncü deneyde, havuz tabanı ile yüzeyi arasında 10 °C sıcaklık farkı elde edilirken dördüncü deneyde bu fark 12 °C olmuştur. TTGH'larda ilk defa soda çözeltisi kullanılarak yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara göre, soda çözeltili bir TTGH'da ısı depolanabilmesi için başlangıçta havuz tabanı ile yüzeyi arasında % 12 büyüklüğünde tuzluluk oranına sahip bir yoğunluk gradyeninin oluşturulması gerektiği tespit edilmiştir. Deneyler süresince, NaCl'nin kimyasal yapısı gereği NaCl çözeltisi içerisinde tuz kristalizasyonu olması, soda çözeltisi içerisinde aynı durumun gerçekleşmemesi nedeniyle soda ile oluşturulan tuz yoğunluk gradyeninin, NaCl ile oluşturulan yoğunluk gradyenine göre daha kararlı olduğu görülmüştür. Deneylerden elde edilen sonuçlar, sodanın TTGH'larda tuz yoğunluk gradyeninin oluşturulmasında kullanılabilir bir tuz olduğunu göstermektedir.

Deney sonuçlarının geçerliliğini gösterebilmek amacıyla, enerjinin ve kütle korunumu prensibine göre TTGH'nin bir boyutlu zamana bağlı ısı ve kütle transferi matematik modeli oluşturularak, sonlu farklar metodu ile nümerik olarak çözülmüştür. Sonuçlar deney sonuçlarıyla karşılaştırılarak deney ve model sıcaklık ve yoğunluk dağılımlarının birbirleriyle nicelik bakımından uyum içinde olduğu, nitelik bakımından farklılıkların olduğu görülmüştür.



Şekil 15. Soda çözeltili deney ve modelden elde edilen sıcaklık dağılımları

Deney ve model çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre, TTGH içerisinde başlangıçta yeterli büyüklükte bir yoğunluk gradyeni oluşturulup, bu yoğunluk gradyeni korunarak sürekliliği sağlanabildiği takdirde, havuzda uzun zaman aralığında ısı depolanabilmesi mümkün olabilecektir.

SEMBOLLER LİSTESİ

a	: Su yüzeyinin ışınımı yansıtma oranı (Albedo), (%)
C_a	: Havanın özgül ısısı, (J/kgK)
C_p	: Çözeltinin özgül ısısı, (J/kgK)
D	: Çözeltinin kütle yayılım katsayısı, (m^2/s)
h_c	: Isı taşınım katsayısı, (W/m^2K)
h_e	: Çözeltinin buharlaşma gizli ısısı, (J/kg)
I	: Işınım şiddeti, (W/m^2)
I(x)	: Derinliğe bağlı ışınım şiddeti, (W/m^2)
I_o	: Havuz yüzeyinden havuza giren ışınım şiddeti, (W/m^2)
I_r	: Havuz yüzeyinden yansıyan ışınım şiddeti, (W/m^2)
I_s	: Havuz yüzeyine gelen ışınım şiddeti, (W/m^2)
J	: Kütle difüzyon akısı, (kg/m^2s)
k	: Çözeltinin ısı iletim katsayısı, ($W/m^{\circ}C$)
N	: Tabaka sayısı
P_{∞}	: T_{∞} sıcaklığında çözeltinin buhar basıncı, (Pa)
P_{atm}	: Atmosfer basıncı, (Pa)
P_s	: T_s sıcaklığında çözelti buharının kısmi basıncı, (Pa)
q	: Isı akısı, (W/m^2)
\dot{q}	: Işınımın soğurulmasıyla oluşan iç ısı üretimi, (W/m^3)
Q_c	: Havuz yüzeyinden taşınım ile olan ısı kayıp, (W/m^2)
Q_e	: Havuz yüzeyinden buharlaşma ile olan ısı kayıp, (W/m^2)
Q_L	: Havuz yüzeyinde meydana gelen toplam ısı kayıp, (W/m^2)
Q_r	: Havuz yüzeyinden ışınım ile olan ısı kayıp, (W/m^2)
R_h	: Bağlı nem oranı, (%)
S(x)	: Tuzluluk oranı, (%)
t	: Zaman, (s)
T	: Sıcaklık, ($^{\circ}C$)
T_{∞}	: Ortam sıcaklığı, ($^{\circ}C$)
T_s	: Yüzey sıcaklığı, ($^{\circ}C$)
T_{sky}	: Gökyüzü sıcaklığı, ($^{\circ}C$)
V_r	: Rüzgar hızı, (m/s)
x	: Havuz derinliği, (m)
X_{ATB}	: ATB tabaka kalınlığı, (m)
X_{TZB}	: TZB tabaka kalınlığı, (m)
X_{UTB}	: ÜTB tabaka kalınlığı, (m)
μ	: Soğurma katsayısı, (m^{-1})
β	: Havuz yüzeyinde ince bir tabakada soğurulan kızılötesi ışınım oranı, (%)
ρ	: Çözeltinin yoğunluğu, (kg/m^3)
α	: Çözeltinin ısı yayılım katsayısı, (m^2/s)
σ	: Stefan-Boltzman Sabiti, (W/m^2K^4)

θ_g	: Işınımın geliş açısı, ($^{\circ}$)
θ_k	: Işınımın kırılma açısı, ($^{\circ}$)
Δt	: Zaman aralığı, (s)
ε_w	: Su yüzeyinin neşretme katsayısı
Δx	: Tabaka kalınlığı, (m)

KAYNAKLAR

- Weinberger, H., "The Physics of the Solar Pond", **Solar Energy**, Vol.8, No.2, 1964.
- Tabor, H., "Solar Ponds", **Solar Energy**, Vol.27, No.3, pp.181-194, 1981.
- Taşdemiroğlu, E., "Salt Availability in Turkey and Its Potential Use in Solar Ponds", **Resources and Conservation**, Vol.15, pp.215-228, 1987.
- Kurt, H., Halıcı, F., Binark, A.K., "Solar Pond Conception-Experimental and Theoretical Studies", **Energy Conversion and Management**, Vol.41, pp.939-951, 2000.
- Kurt, H., Binark, A.K., Halıcı, F., "Mathematical Modelling of Salt Gradient Solar Pond as Solar Energy Storage Medium", **TIEES-98, Second Trabzon International Energy and Environment Symposium**, Trabzon, 26-29 July 1998.
- Tabor, H.Z., Doron, B., "The Beit Ha'arava 5 MW(e) Solar Pond Power Plant (SPPP)-Progress Report", **Solar Energy**, Vol.45, No.4, pp.147-153, 1990.
- Hawladar, M.N.A., Brinkworth, B.J., "An Analysis of the Non-Convecting Solar Pond", **Solar Energy**, Vol.27, pp.195-204, 1981.
- Rubin, H., Benedict, B.A., "Modeling the Performance of a Solar Pond as a Source of Thermal Energy", **Solar Energy**, Vol.32, No.6, pp.771-778, 1984.
- Joshi, V., Kishore, V.V.N., "Applicability of Steady State Equations for Solar Pond Thermal Performance Predictions", **Energy**, Vol.11, No.8, pp.821-827, 1986.
- Chang, C.H., Bannerot, R.B., "Transient Thermal Performance of a Solar Pond with Salinity and Temperature Dependent Properties", **Joint Solar Engineering Conference, ASME**, pp.283-290, 1993.
- Akbarzadeh, A., Ahmadi, G., "Computer Simulation of the Performance of a Solar Pond in the Southern Part of Iran", **Solar Energy**, Vol. 24, pp.143-151, 1980.
- Hull, J.R., "Computer Simulation of Solar Pond Thermal Behavior", **Solar Energy**, Vol.25, pp.33-40, 1980.
- Zhang, Z.M., Wang, Y.F., "A Study on the Thermal Storage of The Ground Beneath Solar Ponds By Computer Simulation", **Solar Energy**, Vol.44, No.5, pp.245-248, 1990.
- Munoz, F., Almanza, R., "A Survey of Solar Pond Developments", **Energy**, Vol.17, No.10, pp.927-938, 1992.

15. Subhakar, D., Murthy, S.S., "Saturated Solar Ponds: 1. Simulation Procedure", **Solar Energy**, Vol.50, No.3, pp.275-282, 1993.
16. El-Refae, M.M., Al-Marafie, A.M., "Numerical Simulation of the Performance of the Kuwait Experimental Salt-Gradient Solar Pond", **Energy Sources**, Vol.15, pp.145-148, 1993.
17. Alagao, F.B., "Simulation of the Transient Behaviour of a Closed Cycle Salt Gradient Solar Pond", **Solar Energy**, Vol.56, No.3, pp.245-260, 1996.
18. Bozdemir, S., Kayalı, R., "Güneş Havuzlarının Matematik Modeli ve Deneysel Verilerle Karşılaştırılması", **Doğa Bilim Dergisi**, Cilt.A7, Sayı.3, ss.387-397, 1987.
19. Ünal, G.G., Kıymaç, K., Bozdemir, S., Kayalı, R., Kurt, Z., "Çukurova Bölgesinde Uygulama Boyutlarında Bir Güneş havuzunun Performansının Deneysel ve Kuramsal Olarak Saptanması", Tübitak Mühendislik Araştırma Grubu, Proje No: MAG-644/A, 1988, Adana.
20. Subhakar, D., Murthy, S.S., "Experiments on a Magnesium Chloride Saturated Solar Pond", **Renewable Energy**, Vol.1, No.5/6, pp.655-660, 1991.
21. Subhakar, D., Murthy, S.S., "Saturated Solar Ponds: 3. Experimental Verification", **Solar Energy**, Vol.53, No.6, pp.469-472, 1994.
22. Kho, T.H., Hawlader, M.N.A., Ho, J.C., Wijesundera, N.E., "Design and Performance Evaluation of a Solar Pond for Industrial Process Heating", **International Journal of Solar Energy**, Vol.10, pp.83-101, 1991.
23. Banat, F.A., El-Sayed, S.E. and El-Temtamy, "Carnalite Salt Gradient Solar Ponds: An Experimental Study", **Renewable Energy**, Vol.4, No.2, pp.265-269, 1994.
24. Alagao, F.B., Akbarzadeh, A., Johnson, P.W., "The Design, Construction, and Initial Operation of a Closed-Cycle, Salt-Gradient Solar Pond", **Solar Energy**, Vol.53, No.4, pp.343-351, 1994.
25. Pawar, S.H., Chapgaon, A. N., "Fertilizer Solar Ponds as a Clean Source of Energy: Some Observations From Small Scale Experiments", **Solar Energy**, Vol.55, No.6, pp.537-542, 1995.
26. Hassairi, M., Safi, M.J., Chibani, S., "Natural Brine Solar Pond: An Experimental Study", **Solar Energy**, Vol.70, pp.45-50, 2001.
27. Leshuk, J.P., Zaworski, R.J., Styris, D.L., Harling, O.K., "Solar Pond Stability Experiment", **Solar Energy**, Vol.21, pp.237-244, 1978.
28. Keren, Y., Rubin, H., Atkinson, J., Priven, M., Bemporad, G.A., "Theoretical and Experimental Comparison of Conventional and Advanced Solar Pond Performance", **Solar Energy**, Vol.51, No.4, pp.255-270, 1993.
29. Lund, P.D., Keinonen, R.S. "Radiation Transmission Measurements For Solar Ponds", **Solar Energy**, Vol.33, No.3/4, pp.237-240, 1984.
30. Kanayama, K., Baba, H., "Transmittance of Distilled Water and Sodium Chloride-Water Solutions", **Journal of Solar Energy Engineering**, Vol.110, pp.113-119, 1988.
31. Kanayama, K., Inaba, H., Baba, H., Fukuda, T., "Experiment and Analysis of Practical-Scale Solar Pond Stabilized with Salt Gradient", **Solar Energy**, Vol.46, No.6, pp.353-359, 1993.
32. Göktun, S., "Güneş Enerjisinin Depolanması", Doktora Tezi, İTÜ., Fen Bil. Enstitüsü, 1983.
33. Xiang, Y.L., Kanayama, K., Baba, H., "Spectral Calculation of Thermal Performance of a Solar Pond and Comparison of the Result With Experiments", **Renewable Energy**, Vol.20, pp.371-387, 2000.
34. Lund, P.D., Routti, J.T., "Feasibility of Solar Pond Heating for Northern Cold Climates", **Solar Energy**, Vol.33, No.2, pp.209-215, 1984.
35. Fagbenle, R.L., "Salt Gradient Solar Ponds for the Tropics: Technical and Economic Appraisal for Nigeria", **International Journal of Ambient Energy**, Vol.14, No.1, 1993.
36. Lodhi, M.A.K., "Solar Ponds in Alkaline Lake and Oil Well Regions", **Energy Conservation and Management**, Vol.37, No.12, pp.1677-1694, 1996.
37. Khalil, R.A.H., Jubran, B.A., Faqir, N.M., "Optimization of Solar Pond Electrical Power Generation System", **Energy Conversion and Management**, Vol.38, No.8, pp.787-798, 1997.