



SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK YAKLAŞIMI İÇİN GÜNEŞ HAVUZU TABAKALARININ TERMODİNAMİK ANALİZİ

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF THE SOLAR POND LAYERS FOR SUSTAINABILITY APPROACH

Murat ÖZTÜRK^{1*}, Abbas Alpaslan KOÇER²

¹Mekatronik Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, 32260, Isparta.

muratozturk@sdu.edu.tr

²Elektrik ve Enerji Bölümü, Uluborlu Selahattin Karasoy Meslek Yüksekokulu, Süleyman Demirel Üniversitesi, 32650, Isparta

alpaslankocer@sdu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 22.11.2013, Kabul Tarihi/Accepted: 23.03.2014

doi: 10.5505/pajes.2014.96967

*Yazışılan yazar/Corresponding author

Özet

Bu çalışmada, termal enerji depolama için güneş havuzu tabakalarının kapsamlı termodinamik modellemesi sürdürülebilirlik yaklaşımını belirlemek için verilmiştir. Güneş havuzu tabakaları üst konvektif bölge (ÜKB), konvektif olmayan bölge (KOB) ve alt konvektif bölge (AKB) ve ya ısı depolama bölgesi (IDB) olmak üzere üç bölgeden oluşmaktadır. Güneş havuzunun üç tabakasının enerjisi, ekserjisi, enerji ve ekserji verimlilikleri global güneş radyasyonu ve çevre sıcaklığının değişmesi durumları altında incelenmiştir. Aynı zamanda, parametrik çalışma sonuçlarına göre global güneş radyasyonu ve çevre sıcaklığı termodinamik parametreleri önemli ölçüde etkilemektedir. Ekserji analizi sonuçlarına göre AKB tabakasında ısı enerjisi toplanması ve bu tabaka ile çevre ortam arasındaki ısı farkının yüksek olması nedeniyle güneş havuzu tabakalarının maksimum ekserjisine AKB'nin sahip olduğu görülmektedir. ÜKB, KOB ve AKB tabakaları için maksimum ekserji verimlilikleri sırasıyla % 38,1, % 39,84 ve % 40,08 olarak elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Güneş havuzu, Enerji ve ekserji analizi, Verimlilik.

Abstract

In this paper, a comprehensive thermodynamic modeling for determining the sustainability approach is given of the solar pond layers for thermal energy storage. The solar pond layers consist of three zones as an upper convective zone (UCZ), a non-convective zone (NCZ) and a lower convective zone (LCZ) or heat storage zone (HSZ). The energy, exergy, energy efficiency and exergy efficiency of the three layers of the solar pond are examined under the variation of the global solar radiation and ambient temperature. Also, the parametric studies show that the global solar radiation and ambient temperature significantly affect the thermodynamic parameters. The exergy results given that the LCZ has the maximum exergy of the solar pond layers, due to the heat energy store in this layer and high temperature difference between the LCZ and ambient temperature. The maximum exergy efficiency for the UCZ, NCZ and LCZ layers are obtained to be 38.1 %, 39.84 % and 40.08 %, respectively.

Keywords: Solar pond, Energy and exergy analysis, Efficiency.

1 Giriş

Enerji kaynaklarının yoğun bir şekilde kullanımı günümüzde ulaştığımız medeniyet seviyesinde önemli bir temel taşı oluşturmuştur. Temel ihtiyaçlarımızı karşılamada olduğu gibi ulaşım ve sanayi uygulamalarında da yoğun olarak kullanılan enerji kaynaklarını fosil veya birincil enerji kaynakları olarak bildiğimiz kömür, petrol ve doğalgaz oluşturmaktadır. Çeşitli jeolojik zamanlarda oluşmuş ve yer altında bulunan bu enerji kaynaklarını verimli ve etkin bir şekilde tüketen toplumlar kalkınma ve gelişmişlikte önde olan toplumlardır. Ancak fosil yakıtlar sonlu enerji kaynaklarıdır ve bir gün tükeneceklerdir. Aynı zamanda fosil enerji kaynaklarının tüketilmesi çevre üzerinde geri dönüşümsüz tahribatlar yaptığı da görülmektedir. Tüm bu olumsuzlukların üstesinden gelmek için çevre ile uyumlu olan alternatif enerji kaynaklarının kullanım potansiyellerinin araştırılması ve artırılması gerekmektedir. Alternatif enerji kaynaklarının hemen hemen hepsinin kökeni olan güneş enerjisi ısıtma, soğutma ve elektrik üretimi gibi kullanım potansiyellerine sahip olduğu için, güneş enerjisi destekli enerji üretim ve depolama sistemlerinin geliştirilmesi büyük önem arz etmektedir. Güneş enerjisi depolama sistemlerinden bir tanesi de güneş havuzlarıdır. Genellikle üç farklı tuzlu su tabakalarından oluşan güneş havuzları ısı toplama ve

depolama sistemidir [1]. Enerji depolama uygulamalarında kullanıldığı gibi güneş havuzları uygun dönüşüm teknolojileri ile elektrik enerjisi üretiminde de kullanılmaktadır [2].

Güneş havuzu hakkındaki ilk araştırma Kalecsinsky tarafından 1902 yılında yürütülmüş ve Transilvanya'da 42°-44° N, 28°-45° E'de konumlanmış, Madoc Gölü olarak bilinen doğal tuz gölü incelenmiştir [3]. Yaz mevsiminde gölün sıcaklığı 1,32 m derinlikte 70 °C olarak ölçülmüştür. İlkbaharın başlarında en düşük sıcaklık ise 26 °C olarak belirlenmiştir. Bu çalışmayı takiben, ülkemizde de güneş enerjisinin termal enerji olarak depolanması düşüncesi, tuzluluk miktarı değişen, yapay bir şekilde oluşturulmuş güneş havuzlarını kullanarak daha da ileriye geliştirilmiştir. Ülkemizde deneysel çalışmalarda bulunmak üzere yapılan ilk güneş havuzu (4,5 m)x(4,5 m)x(1,5 m) boyutlarındadır ve yapılan ölçümler ve değerlendirmeler sonucunda verimliliğin % 16 civarında olduğu görülmüştür [4]. Sunulan bu çalışmaya göre, güneş havuzlarının maliyetinin, düzlemsel güneş kolektörlerine göre 2,5 kez daha ucuz olduğu, bakım ve onarımının daha kolay yapılabildiği belirtilmiştir.

Güneş havuzunun iç bölgelerine ulaşan toplam ışık akısını tahmin etmek için iki basit ve kullanışlı formül literatüre sunulmuştur [5]. Birinci formül Bryant ve Colbeck'in korelasyonunu kullanılarak havuzun tabanından ve

yüzeyinden yansıyan güneş radyasyonunu da kapsayacak şekilde genişletilmiş bir formülasyondur. Diğer ifade ise dördüncü dereceden ampirik bir polinom fonksiyondur. Aynı zamanda sunulan çalışmada yer alan formüllerin havuzun termal hareketlerinin uzun zaman dilimleri içindeki değişimlerinin analiz edilmesindeki etkide incelenmiştir. Tuz difüzyonu ve tuz yoğunluğu gradyentinin kararlılığını araştırmak için bir boyutlu matematiksel model incelenmiştir [6]. Sunulan çalışmada, sonlu farklar yöntemi kullanılarak sıcaklık ve tuz konsantrasyonuna bağlı difüzyon katsayısı kullanılarak tuz difüzyon ifadesinin bir çözümü verilmiştir. Aynı zamanda tuz difüzyonu çok az olmasına rağmen konveksiyonsuz bölge sınırlarındaki tuz konsantrasyonu değişikliğini telafi etmek için doymuş tuzlu su çözeltisini depolama bölgesine ekleyerek üst konvektif bölgeye yükselmesini sağlanarak konveksiyonsuz bölgenin kararlı tutulması gerektiği bildirilmiştir.

Karakılçık ve Dinçer [7], Çukurova Üniversitesi'nde inşa edilen 1,5 m derinliğinde ve 4 m² alanındaki üst konvektif, konvektif olmayan ve ısı depolama tabakaları bulunan tuzlu su ile doldurulmuş güneş havuzunun deneysel ve teorik analizlerini sunmuşlardır. Bu üç bölgenin enerji ve ekserji performansını karşılaştırmak için bir model geliştirmişlerdir. Yaptıkları analiz sonucunda Ağustos ayı için bu havuza ait olan en yüksek enerji ve ekserji verimliliğini sırasıyla: üst konvektif bölge için % 4,22 ve % 3,02 konvektif olmayan bölge için % 13,80 ve % 12,64 ısı depolama alanını bölgesinde % 28,11 ve % 27,45 olarak bulmuşlardır.

Saxena ve arkadaşları, güneş havuzunun derinliğinin ve tabaka kalınlıklarının tuz gradyentli güneş havuzunun termal performansı üzerine olan etkisini araştırmışlardır [8]. Yalıtımsız tuz gradyentli güneş havuzunun daha verimli olması için yalıtımlı yan duvarlardan olan ısı kayıplarının önemli olduğunu belirtmişlerdir. Ancak, kayıpların en büyüğünün su tabakasının derinliğine bağlı olduğunu açıklamışlardır. Yapılan hesaplamalarda, derin su tabakalarındaki ısı kayıplarının daha az olduğu ve bunun sonucunda da güneş havuzu ile elde edilen sıcaklığın daha yüksek olduğunu görmüşlerdir.

Bu çalışmanın amacı güneş havuzlarının sürdürülebilirlik potansiyellerinin belirlenmesinde kullanılmak üzere güneş havuzu tabakaları için enerji ve ekserji analizlerini ve bunlarla ilişkili olarak da enerji ve ekserji verimlilik analizlerini yapmak, her bir tabaka için iyileştirilebilirlik potansiyelleri net bir şekilde ortaya koymaktır. Bununla birlikte, en iyi termodinamik performansı hangi işletim koşulları altında sağladığını belirlemek amacıyla farklı işletim koşulları altında güneş havuzu tabakalarının enerji ve ekserji değerleri ile enerji ve ekserji verimliliklerinin değişimi incelenmiştir.

2 Sistemin Tanıtımı

Güneş havuzunun üst ve konveksiyonsuz bölgesine ulaşan güneş radyasyonu çeşitli kırınım ve absorpsiyonlara uğradıktan sonra güneş havuzunun en alt bölgesinde bulunan yoğun tuzlu su kütlelerinde ısı biçiminde toplanmakta ve depolanmaktadır. Tuz yoğunluğu derinlikle birlikte artar ve bu sayede bir tuzluluk gradyeni meydana gelir. Bundan dolayı güneş havuzlarının iç bölgelerinde kirlilik oluşmaması yani temiz olmasının yanında geçirgenliğinin de iyi olması gerekmektedir. Geçirgenliği yüksek olan bölgelerden geçen güneş radyasyonunun depolama bölgesine ulaşması sistemin ısı performansı bakımından önem arz etmektedir. Havuzun en alt bölgesine ulaşan güneş radyasyonu orada hapsedilir ve

daha sonra biriken termal enerji havuzdan eşanjör yardımıyla faydalı ısı halinde çekilir.

Havuzun en üst kısmındaki tatlı su tabakasına üst konvektif bölge (ÜKB) adı verilir. Bu tabaka tatlı suyla beslenir. Verilen tatlı suyun yoğunluğu ÜKB tabakasındaki suyun yoğunluğuna yakın olmalıdır. Böylece havuzun berraklığı sürdürülebilir ve buharlaşma ile kaybedilen su yerine konabilir. Konvektif olmayan bölge (KOB) adı verilen tabaka alt konvektif bölge (AKB) ile ÜKB arasında yer almaktadır. Bu bölge tuzluluk oranı AKB tabakasına doğru yaklaştıkça artan tuzlu su tabakalarından meydana gelmektedir. KOB güneş havuzunun çalışma sisteminin anahtarıdır. Bu tabaka, uzun dalga boylu güneş ışınlarının kaçmasını engellerken, önemli ölçüde güneş ışınlarının depolama kısmına geçmesini de sağlar. Zira, su kızıl ötesi ışınlar karşısında opaktır. AKB tabakası yoğunluğu en yüksek olan tuzlu su tabakasıdır. Güneş enerjisinin önemli bir kısmı bu kısımda emilir ve depolanır [9]. Isının en yüksek olduğu tabaka AKB tabakasıdır. Dolayısıyla en güçlü termal etkileşim bu tabakayla, bitişindeki yalıtımlı zemin ve yalıtımlı yan duvarlar arasında gerçekleşir.

3 Güneş Havuzunun Enerji Analizi

Enerji üretim, depolama ve dönüşüm sistemleri için genel olarak enerji dengesi denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

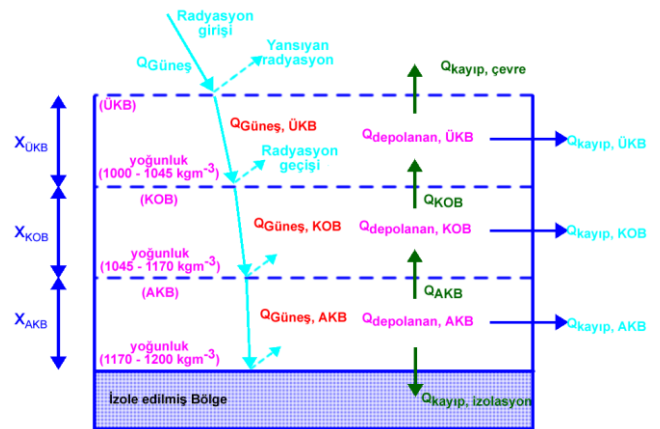
Giren Enerji-Çıkan Enerji=Depolanan Enerji veya matematiksel ifade ile;

$$\sum_{\text{giren}} \dot{E} - \sum_{\text{çıkan}} \dot{E} = \dot{E}_{\text{depolanan}} \quad (1)$$

şeklinde verilebilir. Sunulan bu çalışmada teorik incelemesi yapılan güneş havuzu için tabakalar arasındaki enerji akımı ısı terimleri kullanılarak aşağıdaki gibi verilebilir [9].

$$\dot{Q}_{\text{güneş},i} + \dot{Q}_{i-1} - \dot{Q}_{\text{kayıp},i} - \dot{Q}_i = \dot{Q}_{\text{depo},i} \quad (2)$$

Burada, alt indis i güneş havuzunun tabakalarını (örneğin ÜKB, KOB ve AKB gibi) göstermektedir ve i-1 alt indisi ise bir sonraki alt tabakayı bildirmektedir. Teorik olarak incelemesi yapılan güneş havuzundaki enerji akımları ve tuz yoğunluk gradyenleri Şekil 1'de ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Güneş havuzunun üç tabakası için enerji dengesi ve enerji verimlilik denklemleri aşağıda sunulan alt bölümlerde verilmiştir.



Şekil 1: Güneş havuzunun üç tabakası için enerji akımları.

3.1 ÜKB Tabakasının Enerji Dengesi ve Verimliliği

Şekil 1'de verilen ısı akımlarına ve Denklem (2)'ye bağlı olarak, ÜKB tabakası için enerji denge denklemi aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\dot{Q}_{d,\text{ÜKB}} = \dot{Q}_{g,\text{ÜKB}} + \dot{Q}_{\text{KOB}} - \dot{Q}_{k,\text{ÜKB}} - \dot{Q}_{k,\xi} \quad (3)$$

Burada, $\dot{Q}_{d,\dot{U}KB}$ $\dot{U}KB$ 'de depolanan net enerji miktarını, $\dot{Q}_{g,\dot{U}KB}$ $\dot{U}KB$ tarafından soğurulan net güneş enerjisi miktarını, \dot{Q}_{KOB} KOB'den $\dot{U}KB$ 'ye iletilen net ısı miktarını, $\dot{Q}_{k,\dot{U}KB}$ güneş havuzunun yalıtılmış duvarındaki ısı kaybını ve $\dot{Q}_{k,\dot{c}}$ $\dot{U}KB$ 'nin en üst katmanından çevreye yayılan net ısı kaybını göstermektedir. $\dot{Q}_{g,\dot{U}KB}$ aşağıdaki gibi tanımlanabilir [10].

$$\dot{Q}_{g,\dot{U}KB} = \dot{Q}_g \beta A_h [1 - (1 - F)h_{\dot{U}KB}] \quad (4)$$

Burada; \dot{Q}_g $\dot{U}KB$ 'nin en üst katmanına ulaşan güneş radyasyonunu, β gelen güneş radyasyonunun güneş havuzunun her bir katmanında ki yayılma yüzdesidir ve aşağıda verildiği gibi tanımlanabilir [11].

$$\beta = 1 - 0,6 \left[\frac{\sin(\theta_i - \theta_r)}{\sin(\theta_i + \theta_r)} \right]^2 - 0,4 \left[\frac{\tan(\theta_i - \theta_r)}{\tan(\theta_i + \theta_r)} \right]^2 \quad (5)$$

Burada, alt indisler i ve r sırasıyla gelen ve yansıyan güneş radyasyonunu belirtmektedirler. Ayrıca A_h her bir güneş havuzu katmanının yüzeyinin alanı (m^2), F $\dot{U}KB$ 'nin üst katmanı tarafından soğurulan gelen güneş enerjisinin kesrini ve $h_{\dot{U}KB}$ $\dot{U}KB$ 'nin en alt katmanına ulaşan güneş radyasyonunun en üst katmanına gelen toplam güneş radyasyonuna oranıdır [12].

$$h_{\dot{U}KB} = 0,727 - 0,056 \ln \left(\frac{X_{\dot{U}KB}}{\cos \theta_r} \right) \quad (6)$$

Denklem (3)'de verilen \dot{Q}_{KOB} ifadesi aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\dot{Q}_{KOB} = \frac{k_{\dot{U}KB} A_h}{X_{\dot{U}KB}} (T_{KOB} - T_{\dot{U}KB}) \quad (7)$$

Burada, $k_{\dot{U}KB}$ $\dot{U}KB$ içindeki katmanlarının ısı iletkenliğini (kW/mK), $X_{\dot{U}KB}$ $\dot{U}KB$ 'nin katman kalınlığını (m), T_{KOB} ve $T_{\dot{U}KB}$ sırasıyla KOB ve $\dot{U}KB$ 'nin sıcaklıklarını (K) göstermektedir. $\dot{Q}_{kayıp,\dot{U}KB}$ aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\dot{Q}_{k,\dot{U}KB} = h_{y,\dot{U}KB} A_{y,\dot{U}KB} (T_{\dot{U}KB} - T_{y,\dot{U}KB}) \quad (8)$$

Burada, $h_{y,\dot{U}KB}$ yalıtılmış yüzey alanının ısı iletkenliğini, $A_{y,\dot{U}KB}$ $\dot{U}KB$ 'nin yalıtılmış yüzey alanını, $T_{y,\dot{U}KB}$ $\dot{U}KB$ 'nin yan yüzeyinin sıcaklığını göstermektedir. $\dot{U}KB$ 'nin üst yüzeyinden çevreye olan net ısı kaybı aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\dot{Q}_{k,\dot{c}} = h_{\dot{U}KB} A_h (T_{\dot{U}KB} - T_o) \quad (9)$$

Burada, $h_{\dot{U}KB}$ $\dot{U}KB$ 'nin üst katmanının ısı kayıp katsayısını ve T_o çevre sıcaklığını göstermektedir.

Güneş havuzunun her bölgesindeki enerji verimliliği incelenen bölgede depolanan ısı enerjisinin giren toplam enerjiye oranı şeklinde ifade edilebilir. Bu tanıma göre güneş havuzunun her bölgesindeki enerji verimliliği aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$\eta_i = \frac{\dot{Q}_{d,i}}{\dot{Q}_{g,i}} \quad (10)$$

Eğer, $\dot{Q}_{d,g} = \dot{Q}_{g,i} - \dot{Q}_{c,i}$ denklemi göz önüne alınırsa, güneş havuzu katmanlarının enerji verimliliği aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\eta_i = 1 - \frac{\dot{Q}_{k,i} + \dot{Q}_g}{\dot{Q}_{g,i} + \dot{Q}_{g-1}} \quad (11)$$

Sonuç olarak Denklem (11)'e göre, $\dot{U}KB$ 'nin enerji verimliliği aşağıda verildiği gibi ifade edilebilir.

$$\eta_{\dot{U}KB} = 1 - \frac{\dot{Q}_{k,\dot{U}KB} + \dot{Q}_{k,\dot{c}}}{\dot{Q}_{g,\dot{U}KB} + \dot{Q}_{KOB}} \quad (12)$$

3.2 KOB Tabakasının Enerji Dengesi ve Verimi

Güneş havuzunun ikinci katmanı KOB'dir. Bu katmandaki net enerji akışı Şekil 1'de belirtilmiştir. KOB için enerji denge denklemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\dot{Q}_{d,KOB} = \dot{Q}_{g,KOB} + \dot{Q}_{AKB} - \dot{Q}_{k,KOB} - \dot{Q}_{KOB} \quad (13)$$

Burada, $\dot{Q}_{g,KOB}$ KOB'a ulaşan net anlık güneş radyasyonudur. Güneş havuzuna ulaşan anlık güneş radyasyonunun bir bölümü $\dot{U}KB$ tarafından iletilir ve KOB tarafından soğurulur. KOB'dan $\dot{U}KB$ 'ye yansıyan güneş radyasyonu $\dot{U}KB$ 'de depolanan ısı enerji miktarını artırır. $\dot{Q}_{g,KOB}$ aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\dot{Q}_{g,KOB} = \dot{Q}_g \beta A_h [(1 - F)h_{KOB}] \quad (14)$$

Burada, h_{KOB} KOB'un en alt katmanına ulaşan güneş radyasyonunun KOB'un en üst katmanına gelen güneş radyasyonuna oranıdır. Denklem (6)'de verilen ifadeye bağlı olarak aşağıdaki gibi sunulmuştur.

$$h_{KOB} = 0,727 - 0,056 \ln \left(\frac{X_{KOB}}{\cos \theta_r} \right) \quad (15)$$

Burada, X_{KOB} KOB'un katman kalınlığını göstermektedir. \dot{Q}_{AKB} KOB'den KOB'a iletilen net ısı miktarıdır ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\dot{Q}_{AKB} = \frac{k_{KOB} A_{havuz}}{X_{KOB}} (T_{AKB} - T_{KOB}) \quad (16)$$

Burada, k_{KOB} KOB katmanının ısı iletkenliğini, T_{AKB} KOB'nin sıcaklığını göstermektedir. Denklem (13)'de verilen $\dot{Q}_{k,KOB}$ KOB'dan yalıtılmış duvarına olan ısı kaybını göstermektedir ve aşağıda verildiği gibi ifade edilebilir.

$$\dot{Q}_{k,KOB} = h_{y,KOB} A_{y,KOB} (T_{KOB} - T_{y,KOB}) \quad (17)$$

Burada, $h_{y,KOB}$ KOB'un yalıtılmış yüzeyinin ısı iletkenliğini, $A_{y,KOB}$ KOB'un yan yüzey alanını ve $T_{y,KOB}$ KOB'un yan yüzey sıcaklığını göstermektedir. Denklem (11)'e bağlı olarak KOB'nin enerji verimlilik denklemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\eta_{KOB} = 1 - \frac{\dot{Q}_{k,KOB} + \dot{Q}_{KOB}}{\dot{Q}_{g,KOB} + \dot{Q}_{AKB}} \quad (18)$$

3.3 AKB Tabakasının Enerji Dengesi ve Verimliliği

Şekil 1'de AKB'de ki net enerji akışı bu katmanın enerji dengesi ve enerji verimlilik hesabı için verilmiştir. Güneş radyasyonunun güneş havuzuna gelen bölümü $\dot{U}KB$ ve KOB boyunca iletdikten bir kısmı da bu katmanlar tarafından soğurulur ve geriye kalan bölümü AKB'ye ulaşır. Denklem (2)'ye göre AKB'nin enerji denge denklemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\dot{Q}_{d,AKB} = \dot{Q}_{g,AKB} - \dot{Q}_{AKB} - \dot{Q}_{k,AKB} - \dot{Q}_{k,y} \quad (19)$$

Burada, $\dot{Q}_{g,AKB}$ AKB'ye ulaşan güneş radyasyonudur ve aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\dot{Q}_{g,AKB} = \dot{Q}_g \beta A_h (F \cdot h_{AKB}) \quad (20)$$

Burada, h_{AKB} AKB'nin alt katmanına ulaşan güneş radyasyonunun AKB'nin üst katmanına gelen güneş radyasyonuna oranıdır ve aşağıda verildiği gibi ifade edilebilir.

$$h_{AKB} = 0,727 - 0,056 \ln \left(\frac{X_{AKB}}{\cos \theta_r} \right) \quad (21)$$

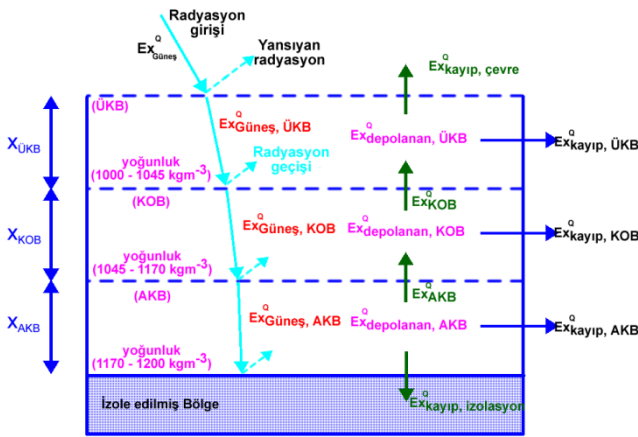
Denklem (11)'e bağlı olarak AKB'nin enerji verimlilik denklemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\eta_{AKB} = 1 - \frac{\dot{Q}_{k,AKB} + \dot{Q}_{AKB} + \dot{Q}_{k,y}}{\dot{Q}_{g,AKB}} \quad (22)$$

4 Güneş Havuzunun Ekserji Analizi

Ekserji analizi, ısı sistemlerde kaybin niteliği, yeri ve miktarının belirlenmesinde yardımcı olmaktadır. Kayıpların azaltılması için uygulanması gereken yöntemler hakkında bilgi verir. Daha verimli ısı sistemleri tasarlamak için yol gösterir. Çok karmaşık olan gerçek süreçlerin her detayını modellemek genellikle mümkün olmayabilir. Bu nedenle gerçek süreçler modellenirken bazı varsayımlar ve tanımlamalar yapılır. Modelden elde edilecek sonuçların geçerliliği bu varsayımlarla sınırlıdır. Modelin uygulamada kullanılabilirliği modelden elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla ne kadar uyum içerisinde olduğuna bağlıdır.

Bu bölümde güneş havuzu tabakalarının ekserji analizi ile ekserji verimliliklerini veren ifade termodinamiğin ikinci yasası kullanılarak sunulmuştur. Güneş havuzunun katmanları arasındaki ekserji akımları Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 2: Güneş havuzunun üç tabakası için ekserji akımları.

Enerji üretim, depolama ve dönüşüm sistemleri için genel olarak ekserji dengesi denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

Giren ekserji-Çıkan ekserji=Depolanan ekserji+Ekserji yıkımı veya

$$\dot{E}x_{G,i}^Q + \dot{E}x_{i-1}^Q - \dot{E}x_{k,i}^Q - \dot{E}x_i^Q = \dot{E}x_{D,i}^Q + \dot{E}x_i^D \quad (23)$$

Güneş havuzunun üç tabakası için ekserji dengesi ve ekserji verimlilik ifadeleri sırasıyla aşağıda sunulan alt bölümlerde verilmiştir.

4.1 ÜKB Tabakasının Ekserji Dengesi ve Verimliliği

Şekil 2 ve Denklem (23)'de verilen ifadeye bağlı olarak, ÜKB için ekserji denge denklemi aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\dot{E}x_{G,ÜKB}^Q + \dot{E}x_{KOB}^Q - \dot{E}x_{k,ÜKB}^Q - \dot{E}x_{ÜKB}^Q = \dot{E}x_{D,ÜKB}^Q + \dot{E}x_{ÜKB}^D \quad (24)$$

Burada, $\dot{E}x_{G,ÜKB}^Q$ ÜKB yüzeyine ulaşan güneş radyasyonunun ekserjisini, $\dot{E}x_{KOB}^Q$ KOB'dan ÜKB'ye iletilen net ısı miktarının ekserjisini, $\dot{E}x_{k,ÜKB}^Q$ güneş havuzunun yalıtılmış duvarındaki ısı kaybının ekserjisini, $\dot{E}x_{ÜKB}^Q$ ÜKB'nin en üst katmanından çevreye yayılan net ısı kaybının ekserjisini, $\dot{E}x_{D,ÜKB}^Q$ ÜKB'de depolanan net ısının ekserjisini ve $\dot{E}x_{ÜKB}^D$ ÜKB'deki ekserji yıkımını göstermektedir. Denklem (24)'de verilen güneş radyasyonu ekserjisi aşağıdaki gibi alınmıştır [13].

$$\dot{E}x_{Güneş,ÜKB}^Q = \dot{Q}_G \left[1 - \frac{4T_o}{3T_s} + \frac{1}{3} \left(\frac{T_o}{T_s} \right)^4 \right] A_{ÜKB} \quad (25)$$

Burada, \dot{Q}_G ÜKB yüzeyine ulaşan anlık net güneş radyasyonunu, $A_{ÜKB}$ ÜKB'nin net yüzey alanını ve T_s güneşin yüzey sıcaklığını göstermektedir. Bu çalışmada T_s değeri 5777 K olarak alınmıştır.

KOB'dan ÜKB'ye transfer edilen ısı enerjisinin ekserjisi aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\dot{E}x_{KOB}^Q = m_{KOB} C_{p,KOB} \left[(T_{KOB} - T_{ÜKB}) - T_o \left(\ln \frac{T_{KOB}}{T_{ÜKB}} \right) \right] \quad (26)$$

Burada, $m_{KOB} = \rho_{KOB} V_{KOB}$ olarak KOB'daki tuzlu suyun kütlesidir. Yalıtımlı duvara ve çevreye olan ekserji kayıpları aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\dot{E}x_{k,ÜKB}^Q = m_{ÜKB} C_{p,yd} \left[(T_{ÜKB} - T_{yd,ÜKB}) - T_o \left(\ln \frac{T_{ÜKB}}{T_{yd,ÜKB}} \right) \right] \quad (27)$$

ve

$$\dot{E}x_{ÜKB}^Q = m_{ÜKB} C_{p,ÜKB} \left[(T_{ÜKB} - T_o) - T_o \left(\ln \frac{T_{ÜKB}}{T_o} \right) \right] \quad (28)$$

$C_{p,yd}$ ve $C_{p,ÜKB}$ sırasıyla yalıtımlı yan duvarın ve ÜKB'nin spesifik ısıdır. $T_{ÜKB}$ ve $T_{yd,ÜKB}$ sırasıyla ÜKB'nin ve ÜKB'nin yalıtımlı yan duvarının sıcaklığını göstermektedir.

ÜKB'de depolanan ısının ekserjisi enerji analizinde verilen Denklem (3) kullanılarak aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\dot{E}x_{D,ÜKB}^Q = \dot{Q}_{d,ÜKB} \left(1 - \frac{T_o}{T_{ÜKB}} \right) \quad (29)$$

Güneş havuzunun her bölgesindeki ekserji verimliliği incelenen bölgede depolanan ısı enerjisinin ekserji değerinin toplam ekserji girdisine oranı olarak ifade edilir. Bu tanıma bağlı olarak güneş havuzunun her üç bölgesindeki ekserji verimliliği aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\psi_i = \frac{\dot{E}x_{D,i}^Q}{\dot{E}x_{g,i}^Q} \quad (30)$$

Eğer Denklem (23) göz önüne alınırsa güneş havuzu katmanlarının ekserji verimliliği aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\psi_g = 1 - \frac{\dot{E}x_{k,i}^Q + \dot{E}x_g^Q + \dot{E}x_D^Q}{\dot{E}x_{G,i}^Q + \dot{E}x_{i-1}^Q} \quad (31)$$

Sonuç olarak yukarıda verilen denkleme bağlı olarak ÜKB'nin ekserji verimliliği aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\psi_{ÜKB} = 1 - \frac{\dot{E}x_{k,ÜKB}^Q + \dot{E}x_{ÜKB}^Q + \dot{E}x_{D,ÜKB}^Q}{\dot{E}x_{G,ÜKB}^Q + \dot{E}x_{KOB}^Q} \quad (32)$$

4.2 KOB Tabakasının Ekserji Dengesi ve Verimi

KOB'daki ekserji akışı Şekil 2'de gösterilmiştir. Bu katman için ekserji denge denklemi aşağıda verildiği gibi yazılabilir.

$$\dot{E}x_{G,KOB}^Q + \dot{E}x_{AKB}^Q - \dot{E}x_{k,KOB}^Q - \dot{E}x_{KOB}^Q = \dot{E}x_{D,KOB}^Q + \dot{E}x_{KOB}^D \quad (33)$$

Burada, $\dot{E}x_{G,KOB}^Q$ KOB'a ulaşan net anlık güneş radyasyonunun ekserjisini göstermektedir.

$$\dot{E}x_{G,KOB}^Q = \dot{Q}_{G,KOB} \left(1 - \frac{T_o}{T_{KOB}} \right) \quad (34)$$

$\dot{E}x_{AKB}^Q$ AKB'den KOB'a iletilen net ısı enerjisinin ekserjisini göstermektedir ve aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\dot{E}x_{AKB}^Q = \dot{m}_{AKB} C_{p,AKB} \left[(T_{AKB} - T_{KOB}) - T_o \left(\ln \frac{T_{AKB}}{T_{KOB}} \right) \right] \quad (35)$$

Burada, T_{AKB} AKB'nin sıcaklığıdır. KOB'dan yalıtımlı duvara olan ısı kaybının ekserjisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\dot{E}x_{k,KOB}^Q = \dot{m}_{KOB} C_{p,yd} \left[(T_{KOB} - T_{y,d,KOB}) - T_o \left(\ln \frac{T_{KOB}}{T_{y,d,KOB}} \right) \right] \quad (36)$$

KOB'da depolanan ısı enerjisinin ekserjisi KOB için yapılan enerji analizi bölümünde verilen Denklem (13) kullanılarak aşağıdaki gibi verilir.

$$\dot{E}x_{d,KOB}^Q = \dot{Q}_{d,KOB} \left(1 - \frac{T_o}{T_{KOB}} \right) \quad (37)$$

Denklem (31)'e bağlı olarak KOB'un ekserji verimliliği aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\psi_{KOB} = 1 - \frac{\dot{E}x_{k,KOB}^Q + \dot{E}x_{KOB}^Q + \dot{E}x_{KOB}^D}{\dot{E}x_{G,KOB}^Q + \dot{E}x_{AKB}^Q} \quad (38)$$

4.3 AKB Tabakasının Ekserji Dengesi ve Verimliliği

Şekil 2'de KOB için ekserji akımları gösterilmiştir. AKB için ekserji denge denklemi aşağıda verildiği gibi yazılabilir.

$$\dot{E}x_{G,AKB}^Q - \dot{E}x_{AKB}^Q - \dot{E}x_{k,AKB}^Q - \dot{E}x_{k,y}^Q = \dot{E}x_{D,AKB}^Q + \dot{E}x_{AKB}^D \quad (39)$$

Burada, $\dot{E}x_{G,AKB}^Q$ AKB'ye ulaşan net anlık güneş radyasyonunun ekserjisidir ve aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\dot{E}x_{G,AKB}^Q = \dot{Q}_{G,AKB} \left(1 - \frac{T_o}{T_{AKB}} \right) \quad (40)$$

AKB'den yalıtımlı duvara olan ısı kaybının ekserjisi aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\dot{E}x_{k,AKB}^Q = \dot{m}_{AKB} C_{p,yd} \left[(T_{AKB} - T_{y,d,AKB}) - T_o \left(\ln \frac{T_{AKB}}{T_{y,d,AKB}} \right) \right] \quad (41)$$

AKB'nin en alt katmanından yalıtıma olan ısı kaybının ekserjisi aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\dot{E}x_{k,y}^Q = \dot{m}_{AKB} C_{p,y} \left[(T_{AKB} - T_y) - T_o \left(\ln \frac{T_{AKB}}{T_y} \right) \right] \quad (42)$$

Burada, T_y izole edilmiş bölgenin sıcaklığını göstermektedir. AKB'de depolanan ısı enerjisinin ekserjisi AKB için yapılan enerji analizi bölümünde verilen Denklem (19) kullanılarak aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\dot{E}x_{d,AKB}^Q = \dot{Q}_{d,AKB} \left(1 - \frac{T_o}{T_{AKB}} \right) \quad (43)$$

Denklem (31)'e bağlı olarak AKB'nin ekserji verimliliği aşağıdaki gibi verilebilir.

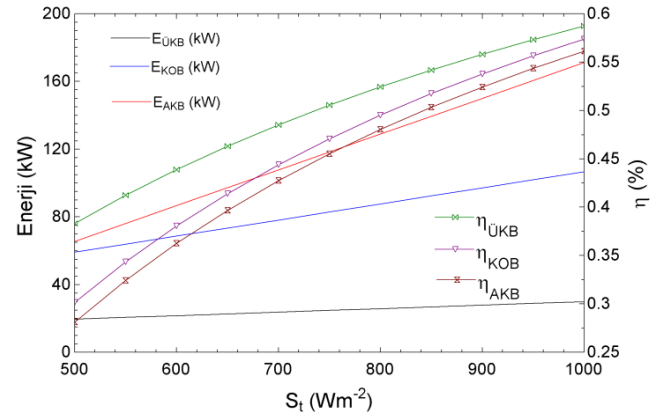
$$\psi_{AKB} = 1 - \frac{\dot{E}x_{AKB}^Q + \dot{E}x_{k,AKB}^Q + \dot{E}x_{k,y}^Q + \dot{E}x_{AKB}^D}{\dot{E}x_{G,AKB}^Q} \quad (44)$$

5 Sonuçlar

Bu bölümde EES (Engineering Equation Solver) mühendislik yazılım programı kullanılarak güneş havuzu tabakaları performanslarının değişen dış ortam şartları altında nasıl

değiştirdiği analiz edilmiştir. İncelemesi yapılan güneş havuzu sistemi için gerekli olan parametreler sırasıyla; dış ortam sıcaklığı 25 °C, güneş havuzu üzerine ulaşan toplam güneş radyasyonu 850 Wm⁻², ÜKB, KOB ve AKB tabakalarının sıcaklıkları ise sırasıyla 30 °C, 85 °C ve 105 °C, güneş havuzunun yüzey alanı 150 m² ve derinliği 2 m olarak alınmıştır. Şekil 3'de 500 ile 1000 Wm⁻² aralığında değişen global güneş radyasyonunu bağlı olarak güneş havuzu sisteminin her üç tabakası için enerji ve enerji verimlilik analizinin sonuçları sunulmuştur.

Şekil 3'den görüldüğü üzere global güneş radyasyon değeri 500 Wm⁻² değerinden 1000 Wm⁻² değerine yükseldiğinde güneş havuzu katmanlarında toplanan faydalı enerji miktarının arttığı görülmektedir. Ancak en fazla faydalı enerji depolanan bölgenin güneş havuzunun en alt bölgesi olan AKB olduğu görülmektedir. Bu bölgede toplanan faydalı enerjinin miktarı artan global güneş radyasyonu değerine bağlı olarak 44 kW değerinden 115 kW değerine ulaşmaktadır. Bu bölgeye kurulacak olan ısı eşanjörü sistemi ile depolanmış enerji dışarıya alınarak faydalı işe çevrilebilir.



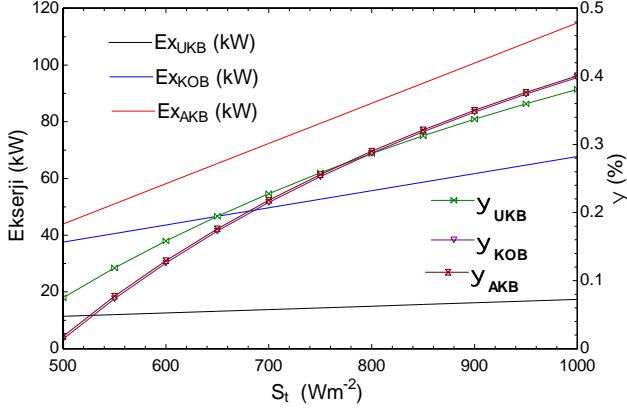
Şekil 3: Değişen global güneş radyasyonuna karşılık güneş havuzu katmanlarının enerji ve enerji verimliliklerinin değişimi.

Değişen global güneş radyasyonuna karşılık güneş havuzu sisteminin her üç katmanı için ekserji ve ekserji verimliliğinin nasıl değiştiği Şekil 4'de sunulmuştur. Şekil 3 ve 4'den görüldüğü üzere güneş havuzunun ilk bölgesi olan ÜKB'nin enerji ve ekserji verimlilikleri diğer iki bölgeden yani KOB ve AKB'den daha düşük olmaktadır.

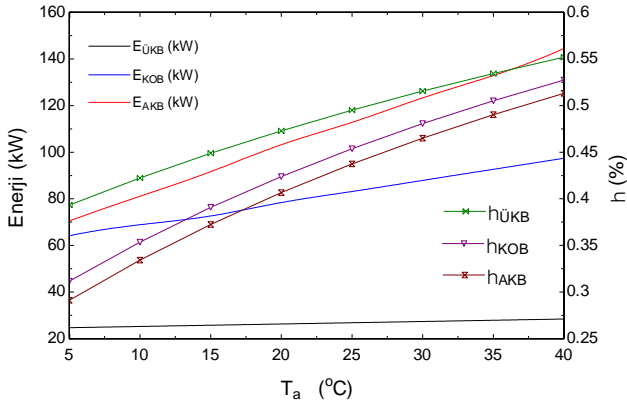
Güneş havuzu sisteminin yalıtımı ve ısı eşanjörü sisteminin verime bağlı olarak güneş havuzu sisteminin ekserji değeri ve ekserji verimliliği daha da iyileştirilebilir. Görüldüğü üzere güneş havuzu sisteminin ekserji verimliliği en yüksek olan AKB bölgesinde artan global güneş radyasyonu değerine bağlı olarak yaklaşık % 1,9 değerinden % 40 değerine kadar artmıştır. Güneş havuzu sistemi için ekserji verimliliği güneş radyasyonunun ekserjisine ve sistem ekserjetik kayıplarını da içerdiği için enerji verimliliğinden daha fazla kullanışlı bilgiyi sunmaktadır. Güneş havuzu sisteminden sağlanan maksimum enerji ve ekserji üretim değeri güneş havuzu sisteminin yüzey alanına ulaşan global güneş radyasyonu değeri ile doğru orantılı olarak değiştiği için güneş havuzu sisteminin kurulacak bölgenin ortalama güneş radyasyonu değerinin ne kadar önemli olduğu da Şekil 3 ve 4'ten görülmektedir.

Şekil 5'de dış ortam sıcaklığının 5 °C'den 40 °C'ye artışına bağlı olarak güneş havuzu tabakalarının enerji içeriğinin ve enerji verimliliğinin nasıl değiştiği gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere dış ortam sıcaklığı arttıkça güneş havuzu tabakalarının enerjisi de artmaktadır. Bunun nedeni güneş havuzu

tabakalarında oluşan enerji kaybının ısı transferinden kaynaklanması ve dış ortam sıcaklığı arttıkça ısı transfer hızının azalmasıdır. Aynı zamanda AKB ve KOB tabakalarının enerji birikim hızı ÜKB tabakasına göre daha büyük olduğu görülmektedir. Güneş havuzu tabakalarının enerji verimliliği de artan dış ortam sıcaklığı ile birlikte hemen hemen aynı oranda yaklaşık % 20 oranında arttığı belirlenmiştir.



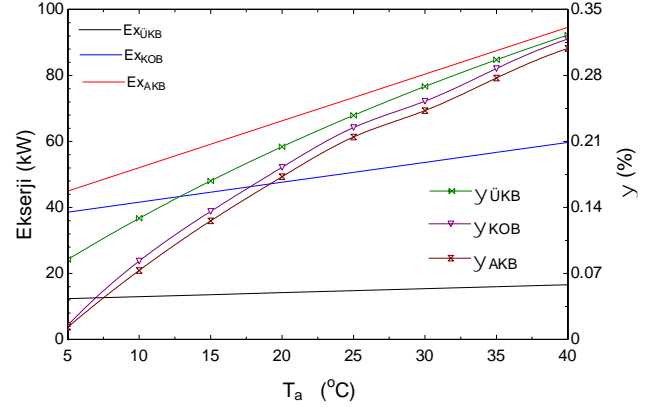
Şekil 4: Değişen global güneş radyasyonuna karşılık güneş havuzu katmanlarının ekserji ve ekserji verimliliklerinin değişimi.



Şekil 5: Değişen dış ortam sıcaklığına karşılık güneş havuzu katmanlarının ekserji değerlerinin değişimi.

Şekil 6'da ise değişen dış ortam sıcaklığına bağlı olarak güneş havuzu tabakalarının ekserjisi ve ekserji verimliliklerinin değişim değerleri verilmiştir. Tabakaların ekserji miktarları ve ekserji verimlilikleri artan dış ortam sıcaklığı ile birlikte artmaktadır. ÜKB tabakasının ekserjisi 12,37 kW'dan 16,56 kW'ya, KOB tabakasının ekserjisi 38,57 kW'dan 59,7 kW'ya, AKB tabakasının ekserjisi ise 44,96 kW'dan 94,58 kW'ya arttığı görülmektedir. Her üç tabakanın ekserji verimliliği de artan dış ortam sıcaklığına bağlı olarak hemen hemen aynı miktarda arttığı belirlenmiştir.

Güneş enerjisi depolama uygulaması olarak kullanım alanı bulan güneş havuzu sisteminden sağlanan maksimum enerji ve ekserji üretim değerinin güneş havuzu sisteminin yüzey alanına ulaşan global güneş radyasyonu değeri ve dış ortam sıcaklığı ile doğru orantılı olarak değiştiği için sistemin kurulacağı bölgenin seçiminin önemli olduğu görülmektedir. Aynı zamanda güneş havuzlarında ortaya çıkan enerji ve ekserji kayıpları genellikle ısı transferi yoluyla ve havuz kirliliği ile ortaya çıktığı için sistemin dış ortamdan yalıtımı ve tabakaların temiz tutulması sistemin sürdürülebilirliği açısından gereklidir.



Şekil 6: Değişen dış ortam sıcaklığına karşılık güneş havuzu katmanlarının ekserji verimliliklerinin değişimi.

6 Değerlendirme

Alternatif enerji kaynaklarının kullanım ve depolama potansiyellerinin araştırılması ve geliştirilmesi sürdürülebilirlik yaklaşımı için önem taşımaktadır. Yapılan bu çalışmada da alternatif enerji teknolojileri arasında yer alan güneş havuzu sisteminin işletim ve tasarım parametreleri, enerji ve ekserji analizi kullanılarak incelenmiş ve elde edilen yaklaşımlar sunulmuştur. Aynı zamanda bu güneş havuzu sisteminin potansiyelinin belirlenmesi için enerji ve ekserji verimlilikleri tanımlanarak ifade edilmiştir. Özellikle ekserji verimliliği sistemlerin performansının değerlendirilmesi ve birbirleri ile karşılaştırılmasında bir araç olarak kullanılmıştır. Bununla birlikte ekserji analizi, ısı sistemindeki gerçek kayıpların yerleri ve büyüklükleri hakkında yeterli bilgiyi sunduğu için sistemin iyileştirilebilirlik potansiyelinin belirlenmiş ve ekserji analizini kullanarak sistem performansının ne kadar artırılacağı hakkında daha önemli bilgileri sunabileceği sunulan bu çalışmada gösterilmiştir. Bu çalışmada elde edilen ana sonuçlar aşağıda verilmiştir;

- Enerji ve ekserji denge denklemleri sistemin anlaşılmasında ve modellenmesinde önemlidir,
- Enerji ve ekserji denge denklemlerinin kullanılmasıyla sistem bileşenlerinin verimliliğinin belirlenmesi gibi daha geniş kapsamlı sonuçlara ulaşılabilir,
- Ekserji analizi sonuçlarına göre en büyük ekserji yıkımına güneş havuzundan olan ısı transferinden kaynaklandığı görülmektedir,
- Sunulan güneş havuzu sistemi için farklı çalışma koşulları altında sistem performansının değişiminin incelenmesi yapılmıştır,
- Ölü durum (veya referans) sıcaklığının proses üzerine etkisi çok ilginçtir. Referans sıcaklığının enerji verimliliği üzerine hemen hemen hiç bir etkisi yokken, ekserji verimliliği ölü durum sıcaklığının artışı ile birlikte iyileştiği görülmüştür,
- Güneş havuzu sisteminin katmanları ile ilişkili ekserji yıkım değerlerinin azaltılması ile enerji ve ekserji verimliliklerinin arttığı görülmüştür.

7 Kaynaklar

- [1] Öztürk, M., Bezir, N. Ç., Özek, N., "Güneş Havuzlarının Kullanım Ömrü Maliyet Analizi", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 14-3, 247-252, 2008.

- [2] Koçer, A. A., Öztürk, M., "Elektrik Üretimi İçin Entegre Sistemin Termodinamik Analizi", 2. Güneş Sempozyumu, Antalya, 11-15, 2013.
- [3] Tabor, H., "Solar Ponds", *Solar Energy*, 27-3, 181-194, 1981.
- [4] Kayalı, R., *Kullanılabilir Boyutlarda Bir Güneş Havuzunun Fiziksel Parametrelerinin İncelenmesi ve Matematiksel Modellemesi*, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana, 1986.
- [5] Husain, M., Patil, S.R., Samdarshi, S.K., "Simple Methods for Estimation of Radiation Flux in Solar Ponds", *Energy Conversion and Management*, (45), 303-314, 2004.
- [6] Angeli, C., Leonardi, E., "One Dimensional Numerical Study of the Salt Diffusion in a Salinity-Gradient Solar Pond", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, (47), 1-10, 2004.
- [7] Karakılçık, M., Dinçer, İ., "Exergetic performance analysis of a solar pond", *International Journal of Thermal Sciences*, (47), 93-102, 2008.
- [8] Saxena, A.K., Sugandhi, S., Husain, M., "Significant Depth of Ground Water Table for Thermal Performance of Salt Gradient Solar Pond", *Renewable Energy*, 34-3, 790-793, 2009.
- [9] Koçer, A. A., *Elektrik Üretimi İçin Güneş Havuzu Destekli Çoklu Üretim Sisteminin Termodinamik Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2013.
- [10] Karakılçık, M., Dinçer, İ., Rosen, M.A., "Performance investigation of a solar pond", *Applied Thermal Engineering*, (26), 727-735, 2006.
- [11] Hawlader, M.N.A., "The influence of the extinction coefficient on the effectiveness of solar pond", *Solar Energy*, (25), 461-464, 1980.
- [12] Bryant, H.C., Colbeck, I., "A Solar Pond for London", *Solar Energy*, (19), 321-322, 1977.
- [13] Petela, R., "Exergy of undiluted thermal radiations", *Solar Energy*, (74), 469-488, 2003.