

AL₂O₃/ERİMİŞ TUZ NANOAKIŞKAN KARIŞIMININ PARABOLİK GÜNEŞ KOLEKTÖRLERİNDE ISI TRANSFERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Investigation Of Heat Transfer Effect In Parabolic Trough Collectors With Using Al₂O₃/ Molten Salt Nanofluid

F. Mertkan ARSLAN
Hüseyin GÜNERHAN

ÖZET

Bu çalışmada, hacimsel konsantrasyonu %1 ile %5 arasında değişen Al₂O₃ nano parçacıkları ile, limit çalışma sıcaklıkları 220 °C ile 600 °C arasında değişen, ağırlıkça %60 sodyum nitrat (NaNO₃) ve ağırlıkça %40 potasyum nitrat (KNO₃) karışımı olan erimiş tuz karıştırılarak elde edilen nanoakışkanın parabolik güneş kolektöründe kullanımı ele alınmış ve erimiş tuza göre ısı transfer performansının artışı sayısal olarak incelenmiştir. Hesaplamalar, tam gelişmiş türbülanslı akışta gerçekleştirilmiş olup, alıcı boru uzunluğu 7,8 m ve açıklık alanı 39 m² olan bir parabolik güneş kolektörüne uygulanmıştır. Ayrıca, alıcı boru ile cam boru arası vakumlu olarak kabul edilmiştir ve alıcı boru üzerine kaplanan seçici kaplama metal ile seramik karışımı olan cermet olarak seçilmiştir. Sonuç olarak %5 hacimsel konsantrasyondaki nanoakışkanın erimiş tuza göre ısı taşınım katsayısında maksimum %9,38 ve kolektörün ısı veriminde ise maksimum %0,6 artış sağlandığı görülmüştür. Ayrıca, nanoakışkan içerisinde nanoparçacığın hacimsel konsantrasyonun artışı ile absorber boru içerisinde oluşan basınç düşümünün artışı doğru orantılı olduğu ve maksimum basınç düşümünün %7,7 olduğu hesaplamalar sonucunda gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Güneş enerji sistemleri, parabolik güneş kolektörü, nanoakışkan

ABSTRACT

In this study, the nanofluid was obtained by mixing with Al₂O₃ nanoparticles which a volumetric concentration ranging from 1% to 5% and molten salt which working temperatures ranging from 220 °C to 600 °C and wt 60% sodium nitrate (NaNO₃) and wt 40% potassium nitrate (KNO₃). The use of nanofluids in the parabolic solar collector and the increase of heat transfer performance according to the molten salt were investigated numerically. The calculations were carried out in a fully developed turbulent flow and the receiver tube length is 7.8 m and the aperture area is 39 m². In addition, the receiving tube is evacuated between the glass tube and the selective coating coated on the receiving tube is selected as cermet, which is a ceramic mixture with metal. As a result, the heat convective coefficient of the nanofluid at 5% volumetric concentration was increased 9.38% and the heat efficiency of the collector was increased by 0.6% compared to the molten salt. In addition, the pressure drop in the absorber tube increases as the volume of the nanoparticle in the nanoparticle increases and the maximum pressure drop is calculated as 7.67%.

Key Words: Solar energy systems, Parabolic trough collector, Nanofluid

1. GİRİŞ

Güneş enerjisi teknolojileri arasında, parabolik güneş enerjisi teknolojisi, düşük maliyetli teknolojilerden biridir [1]. Parabolik güneş kolektörü yansıtıcından yansıyan güneş ışınları alıcı tüp üzerine yansıtılır. Güneş ışınları alıcı boru içinde dolaşan akışkanı ısıtır ve güneş ışınımını yararlı ısıya dönüştürür. Parabolik güneş kolektörünün yansıtıcısı, bir yansıtıcı malzeme tabakasını parabolik bir şekle bükerek yapılır. Odak çizgisi boyunca ısı kayıplarını azaltmak için siyah metal bir boru etrafına cam örtü yerleştirilir.[2].

Parabolik güneş kolektörü (PGK) genel olarak, elektrik üretimi ve endüstriyel işlemler için güneş enerjili ısı uygulamaları olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir. Parabolik güneş kolektörleri Rankine çevrimi sayesinde elektrik üretimi sağlanır. Öte yandan, bazı endüstriyel işlemler için ısı enerji üretimi, 85 °C ile 250 °C arasındaki sıcaklıklar arasında gerçekleşir. Bu uygulamalar temizlik, kurutma, buharlaşma, damıtma, pastörizasyon, sterilizasyon, pişirme, konut ısıtması, konut içi su ısıtımı, yüzme havuzu ısıtması ve ısı ile çalışan soğutma sistemlerinin çalıştırılması olabilmektedir [3].

PGK çalışma akışkanı olarak, su (100 °C sıcaklığına kadar), basınçlı su, ısı yağlar (400 °C sıcaklığına kadar), nitrat tuzları gibi erimiş tuzlar (600 °C'ye kadar), sodyum ve kurşun-bizmut gibi sıvı metaller (900 °C sıcaklığına kadar) ve hava, karbondioksit ve helyum gibi gazlar (1000°C ve üstü sıcaklıklar) kullanılabilir [4]. Isı transferi performansı, çalışma akışkanının ısı iletkenliği artırılarak artırılabilir. Metalik parçacıkların, metalik oksitlerin ve nanotüplerin ısı iletkenliği sıvılardan nispeten daha yüksektir. İnce partiküllerin çalışma akışkanına eklenmesi (yani nanoakışkanların oluşturulması) ısı transfer miktarını önemli ölçüde artırabilir. Son yıllarda nanoakışkan uygulamaları üzerine yapılan araştırmaların popüler olduğu açıkça görülmektedir [5]. Nanoakışkanların popüleritesi arttıkça, güneş enerjisi, ısı eşanjörü, yakıt hücresi, nükleer reaktörler, tıp alanı gibi farklı uygulama alanlarına genişlemiştir. Ayrıca, son yıllarda nanoakışkanların parabolik güneş kolektörleri üzerindeki araştırmaların yaygınlaşmasına rağmen, yüksek maliyet bu teknolojinin kullanılmasında önemli bir bariyer olduğu görülmektedir [6].

Parabolik güneş kolektörlerinde çalışma akışkanı olarak nanoakışkanların kullanılması üzerine birçok deneysel ve çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Rehan ve diğerleri, parabolik güneş kolektöründe Al_2O_3/H_2O ve Fe_2O_3/H_2O nanoakışkanları kullanarak deneysel olarak gerçekleştirdiği çalışmada, nanoakışkan % 0,2, % 0,25 ve %0,30 kütle oranında, 1 l/dak, 1,5 l/dak ve 2 l/dak hacimsel debide kullanmıştır. Sonuç olarak 2 l/dak hacimsel debide suya göre Al_2O_3/H_2O nanoakışkanından maksimum %13 ve Fe_2O_3/H_2O nanoakışkanından ise maksimum %11 verimlilik artışı gerçekleştirmişlerdir [7]. Subramania ve diğerleri, TiO_2 ve deiyonize su ($TiO_2/DI-H_2O$) nanoakışkanı kullanarak, bir parabolik güneş kolektöründe ASHRAE 93(2010) standardına uygun olarak deneysel gerçekleştirdikleri çalışmalarında sonuç olarak, temel akışkan olan suya göre ısı taşınım katsayısını %22,76 ve ısı verimi %8,66 arttırmışlardır [8]. Coccia ve diğerleri, Fe_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , ZnO , Al_2O_3 ve Au nanoparçacıkları ile su kullanarak gerçekleştirdiği çalışmada, temel akışkan olan suya göre performans artışının çok düşük olduğu ve nanoparçacıkların konsantrasyonunun artırılması suya göre hiçbir avantajın ortaya çıkarmadığı sonucuna ulaşmışlardır [9]. Kasaeian ve diğerleri, mineral yağ ve karbon nanotüp kullanarak parabolik güneş kolektöründe gerçekleştirdikleri çalışmada, % 0,2 ve % 0,3 nanoparçacık konsantrasyonunda ısı verimlilik artışının sırası ile %4-5 ve % 5-7 olduğunu yayınlamışlardır [10].

Deneysel çalışmaların yanısıra, birçok teorik modelleme ve simülasyon çalışması da gerçekleştirilmiştir. Bellos ve diğerleri, CuO nanoparçacığı ile ısı yağ ve erimiş tuz (%60 $NaNO_3$ ve %40 KNO_3) kullanarak akış simülasyonunda (CFD) gerçekleştirdikleri çalışmada, sonuç olarak temel akışkanlara göre ısı yağ bazlı nanoakışkanın ısı verimini %0,76 ve erimiş tuz bazlı nanoakışkanın ise % 0,26 arttırmışlardır. Ayrıca CuO/yağ ve CuO/erimiş tuz nanoakışkanlarının Nusselt sayısındaki artış ise sırası ile %40 ve %13 olarak hesaplamışlardır [11]. Wang ve diğerleri, parabolik güneş kolektöründe Al_2O_3 ve sentetik yağ kullanarak hazırladıkları çalışmada, nanoakışkanın ısı veriminin sentetik yağa göre %1,2 daha yüksek olduğunu hesaplamışlardır [12]. Mwesigye and Mayer Ag, Cu ve Al_2O_3 nanoparçacıkları ile Therminol VP-1 temel akışkanı karışımı olan nanoakışkanları parabolik güneş kolektöründe kullanarak yaptıkları çalışmada, ısı verimlerinin sırası ile %13,9, %12,5 ve %7,2 arttığını yayınlamışlardır [12]. Ayrıca [6] ve [14] referansları, nanoakışkanların parabolik güneş kolektörlerinde kullanılması üzerine yapılan literatürdeki çalışmaları derlemişlerdir.

2. NANOAKIŞKANIN HAZIRLANMASI

Nanoakışkanlar, temel akışkanların içerisine 100 nm çapından daha küçük parçacıkların (nanoçubuklar, nanotüpler, nanolifler, nanoteller vs.) karıştırılması ile oluşmaktadır. Metal parçacıklar; Cu, Al, Fe, Au, ve Ag, metal olmayanlar; Al_2O_3 , CuO, Fe_3O_4 , TiO_2 ve SiC ve karbon nanotüpler, nanoakışkan üretimi için kullanılacak ısı iletkenlikleri yüksek olan nanoparçacıklardır [15].

Nanoparçacıklar az miktarda olsalar bile (tercihen hacimce <% 1), temel akışkanlarda homojen bir şekilde dağıldıklarında, temel akışkanların termal özelliklerinde önemli ölçüde gelişmeler sağlanabilir [16].

Çalışma kapsamında parabolik güneş kolektöründe kullanılan nanoakışkanın temel akışkanı, ağırlıkça %60 NaNO₃ ve %40 KNO₃ olan erimiş tuz ve nanoparçacığı ise Al₂O₃ (Alümina) olarak seçilmiştir. Erimiş tuzun maksimum çalışma sıcaklığı 600 °C ve donma noktası 220 °C 'dir ve akışkanlar çalışma kapsamında 250°C ve 580 °C arasında kullanılmıştır. Çalışma akışkanı olarak erimiş tuz kullanılması, yüksek termal kapasite ve düşük maliyet gibi belirgin avantajlara sahiptir ancak yüksek erime sıcaklığına sahiptir bu yüzden kullanılırken bazı karmaşık donma karşıtı önlemlerin alınması gereklidir [1]. Erimiş tuzun termofiziksel özellikleri çalışma akışkanının sıcaklığına bağlı olarak (1) ile (4) arasındaki denklemlerle hesaplanabilir [17,18].

$$\rho_{ak} = 2,1060 - 6,6795 \times 10^{-4} T_{ak} \quad (1)$$

$$c_{p,ak} = 1,5404 - 3,092 \times 10^{-5} T_{ak} \quad (2)$$

$$k_{ak} = 0,3804 + 3,452 \times 10^{-4} T_{ak} \quad (3)$$

$$\mu_{ak} = 22,714 - 0,12 T_{ak} + 2,281 \times 10^{-4} T_{ak}^2 - 1,474 \times 10^{-7} T_{ak}^3 \quad (4)$$

Al₂O₃ nanoparçacığının termofiziksel özellikleri (5-7) denklemleri kullanılarak n_p indisi ile gösterilmiştir. Nanoparçacığın yoğunluğu Denklem (5), özgül ısı Denklem (6) ve ısı iletkenlik katsayısı Denklem (7) ile gösterilmiştir [5,19].

$$\rho_{np} = 3850 \text{ kg / m}^3 \quad (5)$$

$$c_{np} = \left[1,046 + 1,74 \cdot 10^{-4} (T_{ak} + 273,15) - 2,79 \cdot 10^{-4} (T_{ak} + 273,15)^2 \right] * 1000 \quad (6)$$

$$k_{np} = 5,5 + 34,5 e^{(-0,0033 T_{ak})} \quad (7)$$

Al₂O₃/erimiş tuz nanoakışkanının termofiziksel özellikleri, erimiş tuzun ve Al₂O₃ nanoparçacığının termofiziksel özelliklerine ve ayrıca nanoparçacığın temel akışkanın (erimiş tuzun) içerisindeki konsantrasyonuna bağlıdır. Nanoakışkanın termofiziksel özellikleri $etkin$ indisi gösterilmiştir. Nanoakışkanın etkin yoğunluğu Denklem (8) ile gösterilmiştir. Denklem (8) içerisinde yer alan ϕ nanoparçacığın hacimsel konsantrasyonunu göstermektedir [20].

$$\rho_{etkin} = (1 - \phi) \rho_{ak} + \phi \rho_{np} \quad (8)$$

Nanoakışkanın etkin özgül ısı Denklem (9) ile hesaplanır [21].

$$c_{p,etkin} = (1 - \phi) c_{p,ak} + \phi c_{p,np} \quad (9)$$

Denklem (10) ile nanoakışkanın etkin ısı iletkenlik katsayısı hesaplanmaktadır [22]. Denklem içerisinde yer alan nano tabaka kalınlığının nano parçacıkların çapına oranı $\beta=0,1$ değerindedir [21].

$$k_{etkin} = \left[\frac{k_{np} + 2k_{ak} - 2(1-\beta)^3 \phi(k_{ak} - k_{np})}{k_{np} + 2k_{ak} + (1+\beta)^3 \phi(k_{ak} - k_{np})} \right] \quad (10)$$

Nanoakışkanın etkin dinamik viskozitesi Denklem (11) ile elde edilebilir [23,24].

$$\mu_{etkin} = (1 + 2,5\phi) \mu_{ak} \quad (11)$$

3. ENERJİ MODELLEMESİ

Enerji modellemesi, bir enerji dengesine dayanmaktadır. Bu enerji dengesi, güneşten gelen direkt ışınımı, optik kayıpları (parabolik yansıtıcıdaki, alıcı borudaki ve cam örtüdeki), ısı kayıplarını (alıcı borudaki ve cam örtüdeki) ve çalışma akışkanının kazandığı enerji miktarını içermektedir [25]. Çalışma kapsamında enerji modellemesi optik ve ısı modelleme olarak iki ayrı başlıkta gösterilecektir.

3.1. Optik Model

Parabolik güneş kolektörünün açıklık alanına gelen güneş ışınım miktarı Denklem (12) ile hesaplanmaktadır. Güneşten gelen ışınımın alıcı boru tarafından absorblama miktarı Denklem (13) ile gösterilmiştir. Denklem (14) ile parabolik güneş kolektörünün optik verimi hesaplanabilir [26]. Optik verim, yansıtıcının yansıtma oranına (ρ_{yans}), camın geçirgenliğine (τ_{cam}), alıcı borunun absorblama miktarına (α_b), kesişme faktörüne (γ_{kol}) ve geliş açısı niteleyicisine $K(\theta)$ bağlıdır. Kesişme faktörü, Tablo 1 ile gösterilen 6 farklı hatadan oluşmaktadır. Direkt ışınım, parabolik güneş kolektörü açıklık alanına dik açı ile gelmediği zaman optik kayıplar artmaktadır. Bu kayıplar, teorik olarak ölçülemediği için deneysel veriler kullanılmaktadır bu yüzden geliş açısı niteleyicisi bir fonksiyon halinde optik verim denklemine eklenmektedir. Çalışma kapsamında kullanılan LS-2 kolektörünün geliş açısı niteleyicisi fonksiyonu Denklem (15) ile gösterilmektedir [27]. Optik kayıplar, parabolik güneş kolektörüne gelen direkt güneş ışınımının yaklaşık % 25'ini oluşturduğu için önemli bir değişkendir [28]. Optik kayıplar çalışmaya kapsamında %24,6 olarak hesaplanmıştır.

$$Q_g = A_d I_d \quad (12)$$

$$Q_{abs} = Q_g \eta_{opt} \quad (13)$$

$$\eta_{opt} = \rho_{yans} \tau_{cam} \alpha_b \gamma_{kol} K(\theta) \quad (14)$$

$$K(\theta) = \frac{1}{\cos \theta} (\cos \theta + 0,000884\theta - 0,00005369\theta^2) \quad (15)$$

Tablo 1. Kesişme faktörünü oluşturan değişkenler [27].

Optik Özellikler	Değişkenler
Gölgeleme	γ_1
Güneşi izleme hataları	γ_2
Toplayıcı aynanın geometrik doğruluğu	γ_3
Parabolik yansıtıcı temizliği	γ_4
Isı toplama ekipmanlarının kirliliği	γ_5
Diğer faktörler	γ_6

3.2. Isıl Model

Parabolik güneş kolektörünün ısıl performansı, güneşten kolektöre gelen ışınımın, çalışma akışkanına aktardığı miktar ile ilgilidir. Çalışma kapsamında, ısıl model oluşturulurken aşağıda maddeler halinde belirtilen kabuller kullanılmıştır [29].

- Model, tüm sıcaklıkların, ısı akışlarının ve termodinamik özelliklerin alıcının çevresi etrafında aynı (üniform) olduğunu varsaymaktadır. Gerçekte, güneş ışınımı alıcının alt kısmına yansıdığı için alıcı etrafındaki ısı akışları ve sıcaklıkları aynı değildir [30].
- Isı aktarımı tek boyutludur, yani ısı aktarımı alıcıya sadece radyal yönde gerçekleşir. Bir boyutlu enerji modeli, 100m'den kısa alıcı boru uzunlukları için doğru sonuç vermektedir.
- Bazı malzemelerin termofiziksel ve optik özellikleri sıcaklıktan bağımsızdır. (Sıcaklığa bağlı olan özellikler çalışma kapsamında denklemler ile gösterilmiştir.)
- Destek dirseklerinden kaynaklanan ısı kayıpları ihmal edilmiştir.
- Cam örtü küçük bir dışbükey gri nesne ve gökyüzü ise siyah cisim olarak kabul edilmektedir [31].
- Toz ve kirlerin etkileri ihmal edilebilir.

Isıl model, alıcı boruda enerji dengesinin kurulması ile ilgilidir. Denklem (16) ile hesaplanabilen alıcı borunun güneş ışınımından elde ettiği enerji, kayıp ısı ile yararlı ısının toplamına eşittir.

$$Q_{abs} = Q_{kayıp} + Q_{yararlı} \quad (16)$$

Denklem (16) içerisinde yer alan yararlı ısı, alıcı boru dışı sıcaklığına, (T_{bd}) ve hava sıcaklığına, (T_{hava}) bağlı olarak Denklem (17) ile hesaplanabilir [13]. Ayrıca yararlı ısı, çalışma akışkanının giriş sıcaklığının ($T_{giriş}$) ve hava sıcaklığının (T_{hava}) bilinmesi ile Denklem (18) ile de hesaplanabilir.

$$Q_{yararlı} = Q_{abs} - A_{bd}U_L(T_{bd} - T_{hava}) \quad (17)$$

$$Q_{yararlı} = F_R \left[Q_{abs} - A_{bd}U_L(T_{giren} - T_{hava}) \right] \quad (18)$$

Isı kaybolma faktörü (F_R), Denklem (19) ile ve Kolektör verim faktörü (F') Denklem (20) ile hesaplanır.

$$F_R = \frac{\dot{m}c_p}{A_{bd}U_L} \left[1 - \exp\left(-\frac{A_{bd}U_L F'}{\dot{m}c_{p,ak}}\right) \right] \quad (19)$$

$$F' = \frac{1/U_L}{\frac{1}{U_L} + \frac{D_{bd}}{h_{ak}D_{bi}} + \left(\frac{D_{bd}}{2k_b} \ln \frac{D_{bd}}{D_{bi}}\right)} \quad (20)$$

Kolektörün kayıp katsayısı (U_L) Denklem (21) ile elde edilir [32]

$$U_L = \frac{Q_{kayıp}}{A_{bd}(T_{bd} - T_{hava})} \quad (21)$$

Denklem (20) içerisinde yer alan ısı taşınım katsayısı Denklem (22) ile gösterilmiştir. Akışkanın tüm termofiziksel özellikleri ortalama akışkan sıcaklığına ($(T_{giriş} + T_{çıkış})/2$) göre hesaplanmalıdır.

$$h_{ak} = \frac{Nu_{ak}k_{ak}}{D_{bi}} \quad (22)$$

Nusselt sayısı Denklem (23) le hesaplanmaktadır. Denklem (23) türbülanslı akış durumunda $Re > 2300$ ise Denklem geçerlidir [29]. Ayrıca, başka bir yaklaşım ile Denklem (24) kullanılarak da Nu sayısı hesaplanabilmektedir. Denklem (24) $Re > 10000$ ve $0,7 \leq Pr \leq 160$ şartını sağlıyorsa geçerlidir [33]. Denklem (23) ve Denklem (24) içerisinde yer alan Reynolds sayısı ve Prandtl sayısı Denklem (25) ve Denklem (26) ile hesaplanmaktadır [26]. Eğer $Re < 2300$ ise Nu sayısı, sabit 4,36 değerini almaktadır [30].

$$Nu_{ak} = \frac{f_b / 8 (Re_{ak} - 1000) Pr_{ak}}{1 + 12,7 \sqrt{f_b / 8} (Pr_{ak}^{2/3} - 1)} \quad (23)$$

$$Nu_{ak} = 0,023 Re_{ak}^{0,8} Pr_{ak}^{0,4} \quad (24)$$

$$Re_{ak} = \frac{4\dot{m}}{\pi D_{bi} \mu_{ak}} \quad (25)$$

$$Pr_{ak} = \frac{\mu_{ak} c_{p,ak}}{k_{ak}} \quad (26)$$

Alıcı boru içerisindeki çalışma akışkanının basınç düşümü Denklem (27) ile hesaplanmaktadır. Ayrıca, boru içerisindeki sürtünme faktörü Re sayısına bağlı olarak Denklem (28) ile elde edilebilir [26]

$$\Delta P = f_b \frac{L}{D_{bi}} \left(\frac{1}{2} \rho_{ak} v_{ak}^2 \right) \quad (27)$$

$$f_b = \frac{1}{(0,79 \ln(Re_{ak}) - 1,64)^2} \quad (28)$$

Denklem (16) ve Denklem (21) içerisinde yer alan ısı kaybı ($Q_{kayıp}$) Denklem (29), (30) ve (31) ile hesaplanmaktadır. Denklem (29) ile alıcı borunun dış yüzeyi ile camın iç yüzeyinde gerçekleşen ısı kaybı, Denklem (30) ile cam duvarlar arasında oluşan iletim ile ısı kaybı ve Denklem (31) ile camın dış yüzeyi ile atmosfer arasında oluşan ısı kaybı gösterilmiştir.

Tüm ısı kayıpları birbirine eşittir ve bu eşitlik parabolik güneş kolektörünün ısı modelini oluşturulurken hesaplamalarda kullanılmaktadır [32]. Hesaplamalarda, eğer alıcı boru ile cam boru arası vakumlu ise, bu bölgede gerçekleşen taşınım ile ısı kaybı, hesaplamalarda ihmal edilebilir ve bu bölgedeki ısı kaybı Denklem (29) ile gösterildiği gibi ısı kaybı sadece ışınım ile gerçekleşir [26].

$$Q_{kayıp,b-c} = \frac{\sigma \pi D_{bd} L (T_{bd}^4 - T_{ci}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{bd}} + \left(\frac{(1 - \varepsilon_{bd}) D_{bd}}{\varepsilon_{bd} D_{ci}} \right)} \quad (29)$$

$$Q_{kayıp-c} = \frac{2\pi k_c L (T_{ci} - T_{cd})}{\ln(D_{cd} / D_{ci})} \quad (30)$$

$$Q_{kayıp,c-hava} = h_{c-hava} \pi D_{cd} L (T_{cd} - T_{hava}) + \sigma \pi \varepsilon_{cd} D_{cd} L (T_{cd}^4 - T_{gökyüzü}^4) \quad (31)$$

Denklem (29) içerisinde yer alan, çalışma kapsamında kullanılan cermet seçici kaplamasına ait yayılım katsayısının (ε_{bd}) değeri boru dış sıcaklığına bağlı olarak Denklem (32) ile hesaplanmaktadır [31].

$$\varepsilon_{bd} = 2.249 \times 10^{-7} T_{bd}^2 + 1,039 \times 10^{-4} T_{bd} + 5,599 \times 10^{-2} \quad (32)$$

Denklem (31) ile gösterilen, cam dış yüzeyi ile hava arasındaki ısı taşınım katsayısı, Denklem (33) ile hesaplanmaktadır. Denklem (33) içerisindeki ısı iletim katsayısı (k_{c-hava}), $(T_{cd} - T_{hava})/2$ sıcaklığı baz alınarak hesaplanmaktadır.

$$h_{c-hava} = \frac{k_{c-hava}}{D_{cd}} Nu_{cd} \quad (33)$$

Cam dış yüzeyi ile hava arasındaki ısı taşınım katsayısının içerisinde yer alan Nusselt sayısı eğer ortam rüzgarlı ise Denklem (34) ile hesaplanmaktadır.

$$Nu_{Dcd} = C Re_{Dcd}^m Pr_{hava}^n \left(\frac{Pr_{hava}}{Pr_{cd}} \right)^{1/4} \quad (34)$$

Denklem (34)'nin içerisindeki $Pr_{hava} \leq 10$ ise $n=0,37$ ise ve $Pr_{hava} > 10$ ise $n=0,36$ olmaktadır. C ve m sabitleri için Tablo 2 içerisindeki değerler kullanılır. Hava akışkanına ait, Pr_{hava} , T_{hava} sıcaklığına göre hesaplanırken Pr_{cd} , T_{cd} sıcaklığına göre hesaplanmaktadır.

Tablo 2. Nu sayısının belirlenmesi için gerekli olan C ve m sabitlerinin değerleri [27].

Re_{Dcd}	C	m
1-40	0,75	0,4
40-1000	0,51	0,5
1000-200000	0,26	0,6
200000-1000000	0,076	0,7

Denklem (31) içerisinde yer alan gökyüzü sıcaklığı Denklem (35) kullanılarak hesaplanabilir. Gökyüzünün yayılım değeri ($\varepsilon_{gökyüzü}$) Denklem (36) ile gösterilmiştir ve çığ noktası sıcaklığına ($T_{\zeta n}$) bağlıdır [29]. Ayrıca, gökyüzü sıcaklığı basitçe hava sıcaklığının 8 °C düşüğü olarak da hesaplanabilir [30].

$$T_{gökyüzü} = \varepsilon_{gökyüzü}^{1/4} T_{hava} \quad (35)$$

$$\varepsilon_{gökyüzü} = 0,711 + 0,56 \left(\frac{T_{\zeta n}}{100} \right) + 0,73 \left(\frac{T_{\zeta n}}{100} \right)^2 \quad (36)$$

Kolektörün ısıl verimi Denklem (37) ile hesaplanmaktadır. Isıl verim, yararlı ısı ile güneşten gelen toplam ışıının oranıdır.

$$\eta_{isıl} = \frac{Q_{yararlı}}{Q_g} \quad (37)$$

4. MODELİN GEÇERLİLİĞİNİN KONTROL EDİLMESİ

Oluşturulan modelin geçerliliğinin kontrol edilebilmesi için Sandia Ulusal Laboratuvarında deneyi gerçekleştirilen LS-2 kolektörünün deneysel verileri kullanılmıştır. LS-2 kolektörünün optik ve geometrik verileri Tablo 3 ile gösterilmiştir [34,35]. LS-2 kolektörünün alıcı boru ile cam boru arasında kalan alan vakumludur [34]. Kolektörde kullanılan çalışma akışkanı Syltherm 800'dür ve termofiziksel özellikleri [36] referansı ile elde edilmiştir. Alıcı boruda kullanılan malzemenin iletkenlik katsayısı (k_b) 54 W/mK ve cam örtü iletkenlik katsayısı (k_c) 0,78 W/mk'dir [27,34].

Tablo 3. LS-2 kolektörünün özellikleri [34,35].

Optik Özellikler			
İsim	Sembol	Değeri	Birimi
Geliş açısı	θ	0	°
Alıcı borunun absorblaması	α_b	0,96	-
Cam örtünün geçirgenliği	τ_c	0,95	-
Kolektör yansıcısının yansıtma oranı	ρ_{yans}	0,935	-
Gölgeleme	γ_1	0,974	-
Güneşi izleme hataları	γ_2	0,994	-
Toplayıcı aynanın geometrik doğruluğu	γ_3	0,98	-
Parabolik yansıtıcı temizliği	γ_4	0,98	-
Isı toplama ekipmanlarının kirliliği	γ_5	0,99	-
Diğer faktörler	γ_6	0,96	-
Fiziksel Özellikler			
Genişlik	W	5	m
Uzunluk	L	7,8	m
Açıklık Alanı	A_a	39	m ²
Alıcı boru iç çapı	D_{bi}	0,066	m
Alıcı boru dış çapı	D_{bd}	0,07	m
Cam iç çapı	D_{ci}	0,109	m
Cam dış çapı	D_{cd}	0,115	m

Çalışma kapsamında oluşturulan teorik model ile LS-2 kolektörünün deneysel verilerinin karşılaştırılması Tablo 4 ile gösterilmiştir. Tablo 4 içerisinde direk ışınım, rüzgar hızı, akışkan debisi ve akışkanın giriş sıcaklığı giriş verileri olarak gösterilirken, akışkanın çıkış sıcaklığı ve ısı verim çıkış verileri olarak tanımlanmıştır.

Tablo 4. Deneysel veriler ile modelin verilerinin karşılaştırılması [34].

No.	Direk Işınım (W/m ²)	Rüzgar Hızı (m/s)	T_{hava} (°C)	Debi (l/dak)	T_{giris} (°C)	$T_{çikis}$ (°C)			η_{isil} (%)		
						Deney	Model	%Sapma	Deney	Model	%Sapma
1	933,7	2,6	21,2	47,7	102,2	124	124,11	0,089	72,51	72,11	0,55
2	968,2	3,7	22,4	47,8	151	173,3	173,69	0,23	70,9	71,79	1,26
3	982,3	2,5	24,3	49,1	197,5	219,5	220	0,22	70,17	71,22	1,5
4	909,5	3,3	26,2	54,7	250,7	269,4	269,55	0,056	70,25	70,18	0,1
5	937	1	28,8	55,5	297,8	316,9	317,18	0,09	67,98	68,75	1,13
6	880,6	2,9	27,5	55,6	299	317,2	317,12	0,025	68,92	68,52	0,58
7	903,2	4,2	31,1	56,3	355,9	374	374,5	0,13	63,82	65,75	3,02
8	920,9	2,6	29,5	56,8	379,5	398	398,63	0,16	62,34	64,40	3,30

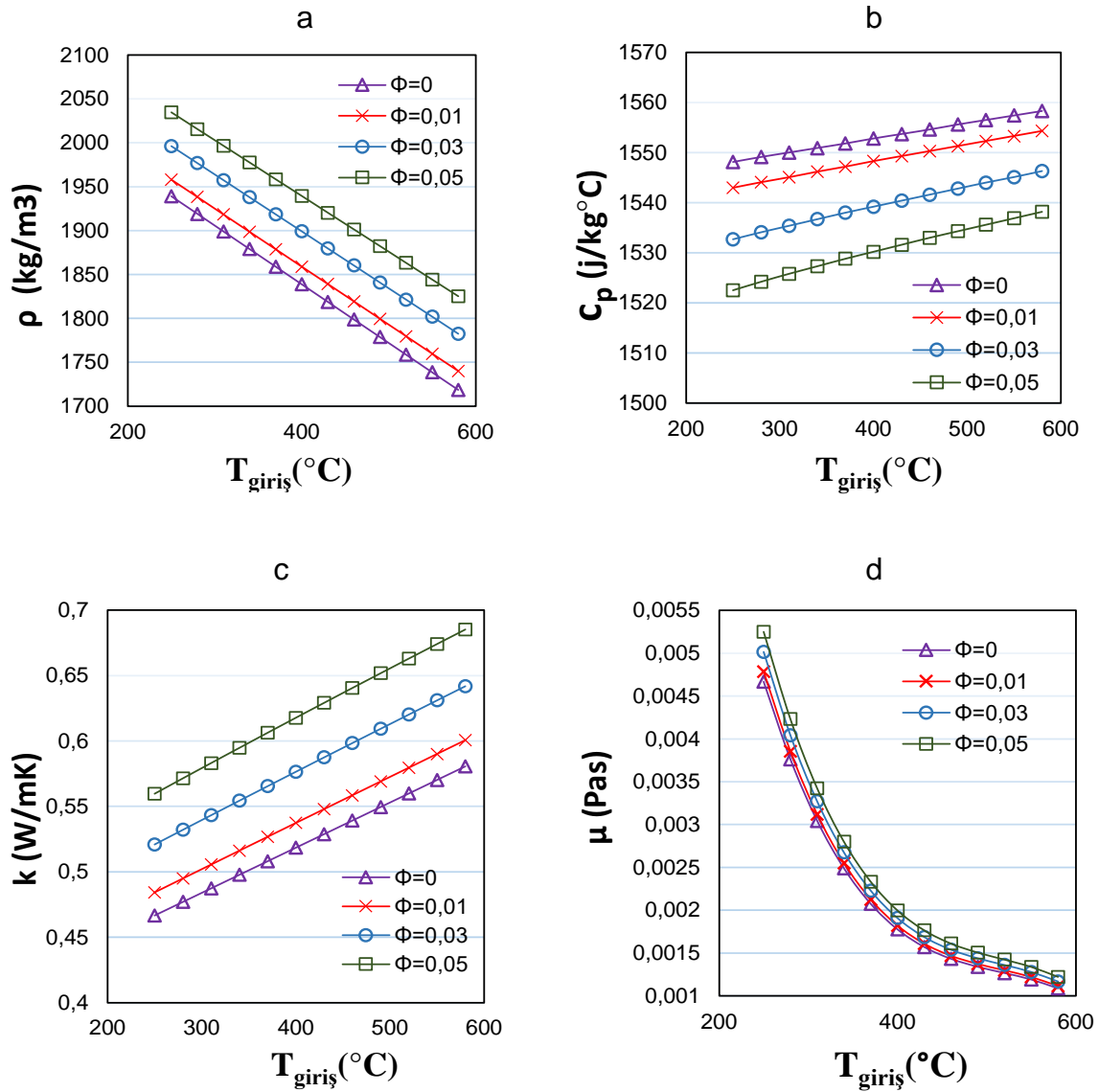
Tablo 4 ile gösterilen karşılaştırma sonucunda, akışkanın çıkış sıcaklıklarının maksimum sapma değeri 0,23% iken minimum 0,025% olmaktadır. Isıl verim değerlerinde ise maksimum ve minimum sırası ile 3,3% ve 0,1% olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre modelimiz geçerli kabul edilmektedir.

5. AKIŞKANLARIN GRAFİK ÜZERİNDE İNCELENMESİ VE KIYASLANMASI

Çalışma kapsamında parabolik güneş kolektöründe çalışma akışkanı olarak ağırlıkça %60 sodyum nitrat (NaNO_3) ve ağırlıkça %40 potasyum nitrat (KNO_3) karışımı olan erimiş tuz ve hacimsel konsantrasyonu %1 ile %5 arasında değişen Al_2O_3 nano parçacıklarının süspansiyonundan oluşan nanoakışkan kullanılmıştır ve termofiziksel özellikleri Bölüm 2 ile gösterilmiştir. Al_2O_3 /erimiş tuz nanoakışkanının erimiş tuza göre ısı özelliklerinin incelemesi için LS-2 kolektörü kullanılmış ve optik ve geometrik özellikleri Tablo 3 ile gösterilmiştir. Hesaplamalarda sabit ortam verileri; direk ışınım 980 W/m^2 , rüzgar hızı $2,2 \text{ m/s}$ ve hava sıcaklığı $21 \text{ }^\circ\text{C}$ olarak kabul edilmiştir. Ayrıca, alıcı boru ile cam boru arasında vakum olduğu kabul edilerek yapılmıştır.

5.1. Nanoakışkanın termofiziksel özelliklerinin incelenmesi

Al_2O_3 /erimiş tuz nanoakışkanının %0 (sadece erimiş tuz), %1, %3 ve %5 hacimsel konsantrasyonundaki, yoğunluğu; Şekil 1a, özgül ısı; Şekil 1b, ısı iletkenlik katsayısı; Şekil 1c ve dinamik viskozitesi; Şekil 1d ile gösterilmiştir.



Şekil 1. Nanoakışkanın değişik hacimsel konsantrasyonlarında termofiziksel özellikleri.

Şekil 1a ile görülebileceği gibi nanoakışkanın hacimsel konsantrasyonu arttıkça yoğunluğunda artmaktadır. Çünkü nanoparçacığın yoğunluk değeri giriş sıcaklığına göre 1939-1718,6 kg/m³ değerleri arasında değişirken, nanoakışkanın 3850 kg/m³ değerindedir.

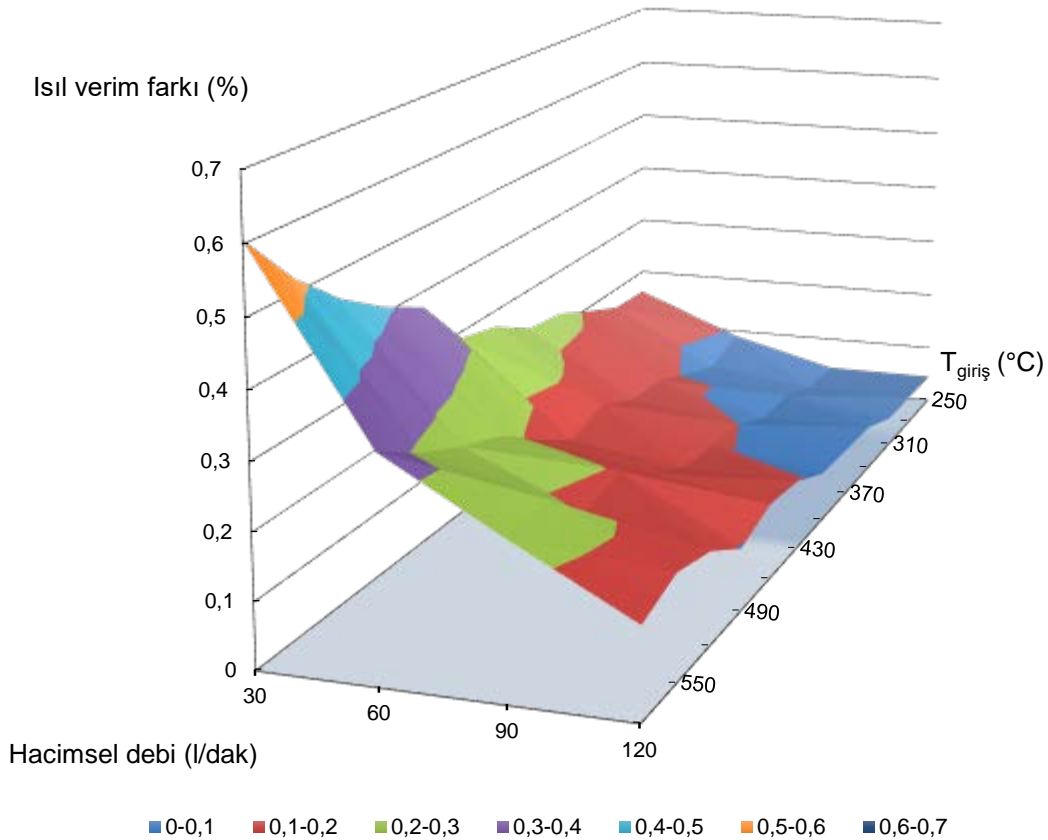
Nanoparçacığın hacimsel konsantrasyonu, erimiş tuzun içine arttığında, nanoakışkanın özgül ısı değerinin düştüğü Şekil 1b ile görülebilmektedir. Şekil 1c incelendiğinde nanoakışkanın içerisindeki nanoparçacık derişimi arttıkça özgül ısı düşmektedir. Al₂O₃ nanoparçacığının özgül ısı değeri 250-580 °C sıcaklıkları arasında 1035,1-1156,1 J/kg°C arasında değişirken 1548,1-1558,3 J/kg°C değerleri arasında değişmektedir.

Şekil 1c incelendiğinde nanoakışkan içerisinde nanoparçacığın derişimi arttıkça, nanoakışkanın ısı iletim katsayısı artmaktadır ve akışkanın ısıl performans iyileşmektedir. Çünkü Al₂O₃ nanoparçacığının ısı iletim katsayısı çalışma sıcaklıkları arasında, 20,62-10,58 W/mK değişirken erimiş tuzun 0,47-0,58 W/mK arasında değişmektedir.

Nanoparçacığın, nanoakışkan içerisindeki hacimsel konsantrasyonu arttıkça, dinamik viskozitenin değerinin arttığı Şekil 1d ile gösterilmiştir.

5.2 Nanoakışkanın Enerji Performansının incelenmesi

Şekil 2 ile sade erimiş tuz ($\Phi=0,00$) ve $\Phi=0,05$ derişimli nanoakışkanın, farklı hacimsel debilerine ve giriş sıcaklığına göre ısıl verim artış miktarı gösterilmiştir. Şekil 2 içerisinde çalışma sıcaklığı 250-580 °C ve hacimsel debi 30-120 l/dak arasındaki değerleri göstermektedir. Şekil 2 içerisindeki ısıl verim farkı, nanoakışkanın ısıl veriminin, erimiş tuza göre artış miktarını göstermektedir. Örnek olarak 60 l/dak debi ve 580 °C sıcaklığındaki erimiş tuzun ısıl verimi %47,95 iken $\Phi=0,05$ nanoparçacık derişimli nanoakışkanın ısıl verimi %48,11 olmaktadır. Böylelikle ısıl verim artış farkı %0,33 olmaktadır.

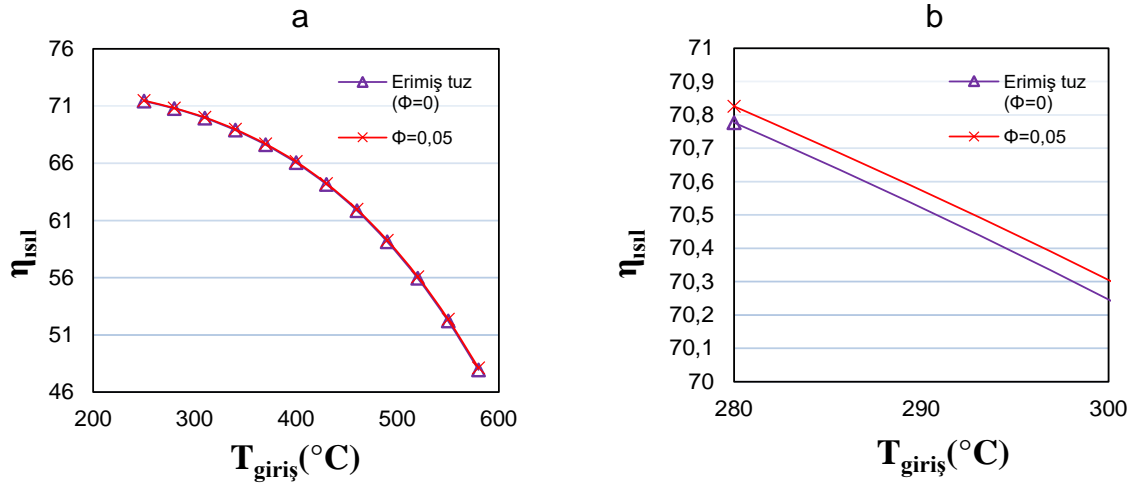


Şekil 2. Farklı hacimsel debilerde ve giriş sıcaklıklarında ısıl verim artışı grafiği

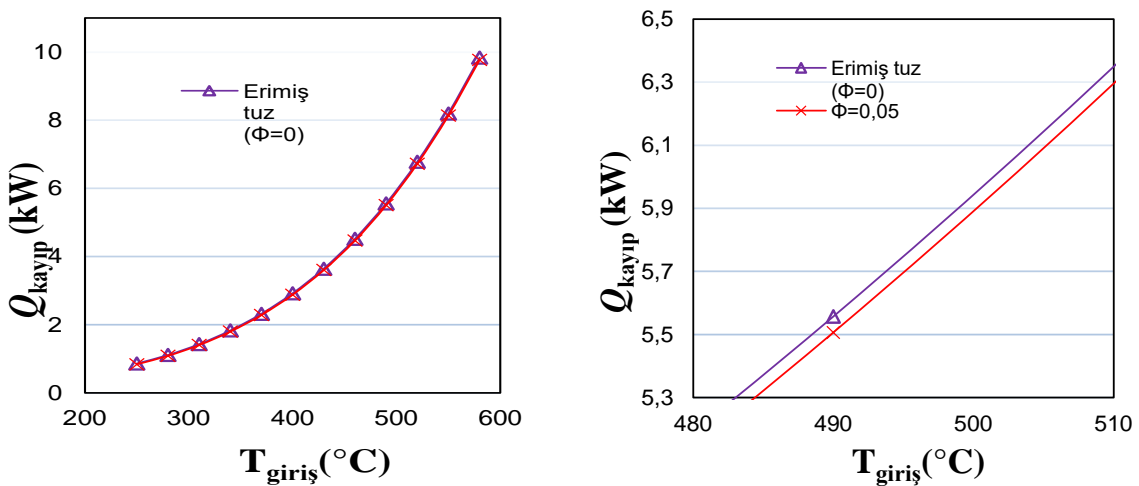
Şekil 2 incelendiğinde ısı verim farkı, genellikle çalışma akışkanının sıcaklığı arttıkça artmakta ve hacimsel debi arttıkça düşmektedir. Böylelikle belirlenen sıcaklıklar arasında ve debiler arasında, erimiş tuz (%) ile %5 nanoparçacık derişimli nanoakışkanın minimum ısı verim farkı 250 °C sıcaklıkta ve 120 l/dak hacimsel debide, %0,045 olurken, maksimum ısı verim farkı ise 580 °C sıcaklıkta ve 30 l/dak hacimsel debide %0,6 olmaktadır.

Çalışma kapsamında erimiş tuz ile nanoakışkanın enerji performansı analizinde, verilerin daha uygun olarak incelenebilmesi için hacimsel debi 60 l/dak olarak seçilmiştir. Tüm grafiklerde nanoakışkanın nanoparçacık hacimsel konsantrasyonu %5 olarak kullanılmıştır.

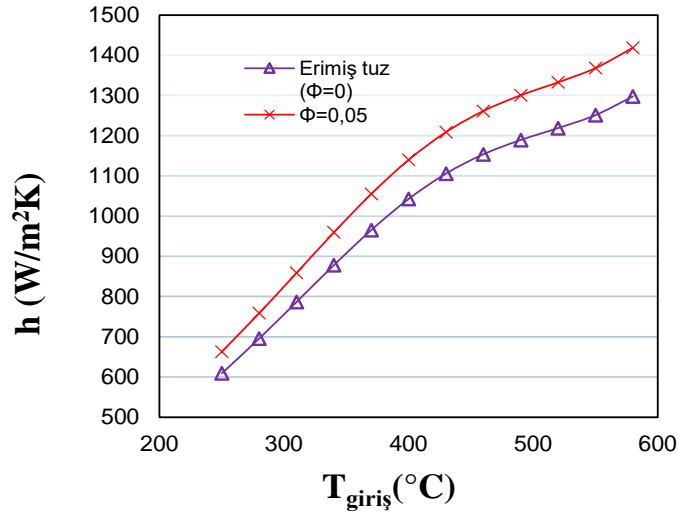
Şekil 3 ile çalışma akışkanlarının giriş sıcaklıklarına göre ısı verimleri gösterilmiştir. Şekil 3b ile gösterildiği gibi nanoakışkan ile erimiş tuz arasındaki ısı verim farkı düşüktür. Bu fark maksimum 580 °C sıcaklıkta %0,33 olmaktadır. Akışkanların giriş sıcaklığına göre toplam kaybolan ısıları Şekil 4 ile gösterilmiştir. Nanoakışkanın erimiş tuza göre maksimum ve minimum ısı kaybı miktarının azalma miktarı sırası ile 250 °C'de %2,36 ve 580°C'de ise %0,63'tür.



Şekil 3. Çalışma akışkanlarının giriş sıcaklıklarına göre ısı verimleri

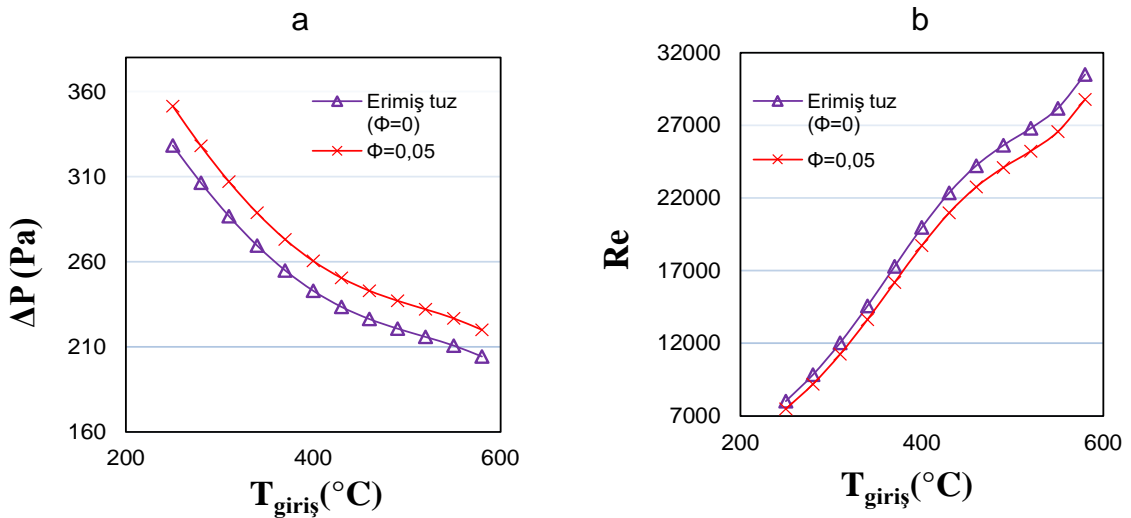


Şekil 4. Çalışma akışkanlarının giriş sıcaklıklarına göre kayıp ısıları



Şekil 5. Çalışma akışkanlarının giriş sıcaklarına göre ısı taşınım katsayısının değeri

Şekil 5 ile görüldüğü gibi %5 konsantrasyonlu nanoakışkanın ısı taşınım katsayısı erimiş tuza göre yüksek çıkmaktadır. Çalışma akışkanının giriş sıcaklığı yükseldikçe nanoakışkanın ısı taşınım katsayısı erimiş tuzun ısı taşınım katsayısına göre artış miktarında artmaktadır. Bu sonuçlara göre, ısı taşınım katsayısını maksimum artış miktarı 550 °C sıcaklıkta %9,38 olmaktadır.



Şekil 6. Çalışma akışkanlarının giriş sıcaklarına göre basınç düşümü (a) ve Re sayısı değerleri (b)

Şekil 6a ile akışkanların basınç kayıpları sıcaklığa bağlı olarak gösterilmiştir. Nanoakışkanın basınç kaybı erimiş tuza göre %7,08-%7,7 oranları arasında daha yüksek olduğu hesaplanmıştır. Akışkanın yoğunluğu arttıkça Re sayısı artar ancak aynı oranda dinamik viskozitesi arttıkça Re sayısı azalır. Re sayısı düştükçe, sürtünme faktörünün değerinin artması ile birlikte basınç düşümü de artar. Şekil 6b ile nanoakışkanın Re sayısını daha düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca Şekil 1a ile akışkan içerisinde nanoparçacık miktarı arttıkça nanoakışkanın yoğunluğu artmaktadır. Basınç düşümü yoğunluğun artması ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Bu nedenle nanoakışkanın basınç düşümü miktarı erimiş tuza göre daha yüksek değerdedir.

SONUÇ

Çalışma kapsamında, LS-2 kolektörünün optik ve geometrik özellikleri kullanılarak ağırlıkça %60 sodyum nitrat (NaNO_3) ve ağırlıkça %40 potasyum nitrat (KNO_3) karışımı olan erimiş tuz ile Al_2O_3 /erimiş tuz nanoakışkanının enerji performansı incelenmiştir. Çalışma akışkanlarının enerji performansları, aynı ortam şartlarında, kolektör tipinde ve hacimsel debide karşılaştırılmıştır. Bölüm 5.1 ile erimiş tuzun içerisine %1, %3 ve %5 hacimsel konsantrasyondaki Al_2O_3 nanoparçacığı karıştırılarak oluşan nanoakışkanın termofiziksel özellikleri gösterilmiştir. Bölüm 5.2 ile erimiş tuz ve %5 derişimli nanoakışkanın, farklı hacimsel debilerindeki ve giriş sıcaklıklarındaki, ısı verim artış miktarı gösterilmiştir. Böylelikle nanoakışkanın, erimiş tuza göre ısı verim artışı, hem debi hem de sıcaklık yönünden incelenmiştir. Nanoakışkanın erimiş tuza göre ısı taşınım katsayısının artış miktarı ve basınç düşme miktarı yine Bölüm 5.2’de gösterilmiştir. Sonuç olarak elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Şekil 1 ile Şekil 3 gösterildiği gibi, nanoakışkanın içerisindeki nanoparçacığın konsantrasyonu arttıkça temel akışkanın termofiziksel özellikleri iyileşmekte ve kolektörün ısı performansı artmaktadır.
- %5 nanoparçacık derişimli nanoakışkan ile erimiş tuz (%0) arasındaki ısı verim farkı, genellikle hacimsel debi arttıkça düşmekte ve çalışma akışkanının giriş sıcaklığı arttıkça artmaktadır. Belirlenen hacimsel debi ve giriş sıcaklığı dahilinde, maksimum ısı verim farkı; 580 °C sıcaklıkta ve 30 l/dak hacimsel debide %0,6 olmaktadır. (Şekil 2)
- Erimiş tuza göre nanoakışkanın ısı taşınım katsayısının maksimum artış miktarı %9,38 olmaktadır.
- Nanoakışkanın erimiş tuza göre basınç düşümü %7,08-%7,7 arasında daha yüksektir.

Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar incelendiğinde, çalışma akışkanı olarak nanoakışkanın kullanılması durumunda erimiş tuza göre enerji performans artışının düşük olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, parabolik güneş kolektörlerinde nanoakışkanların kullanımına karar verilmesi, nanoparçacıkların maliyeti ile temel akışkana göre ısı verim performans artışının kıyaslanmasına (maliyet analizine) ve nanoakışkanın, alıcı boru içerisindeki uzun süreli kullanımında oluşabilecek olası mekanik problemlerin incelenmesine bağlı olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] WANG, Y., Liu, Q., Lei, J., Jin, H., "A three-dimensional simulation of a parabolic trough solar collector system using molten salt as heat transfer fluid." Applied Thermal Engineering, 2014, 70: 462-476.
- [2] Kalogirou, S. A., "Solar energy engineering: processes and systems", 2014, Academic Press.
- [3] JARAMILLO, O. A., Borunda, M., Velazquez, K.M., Robles, B. "Parabolic trough solar collector for low enthalpy processes: an analysis of the efficiency enhancement by using twisted tape inserts", Renewable energy, 2016, 93: 125-141.
- [4] BELLOS, E., Tzivanidis, E., Antonopoulos, K. A., "A detailed working fluid investigation for solar parabolic trough collectors", Applied Thermal Engineering, 2016.
- [5] SOKHANSEFAT, T., Kasaeian, A. B., Kowsary, F., "Heat transfer enhancement in parabolic trough collector tube using Al_2O_3 /synthetic oil nanofluid. Renewable and Sustainable Energy Reviews", 2014, 33: 636-644.
- [6] YILMAZ, İ. H., Mwesigye, A., "Modeling, simulation and performance analysis of parabolic trough solar collectors: A comprehensive review", Applied energy, 2018, 225: 135-174.
- [7] REHAN, M. A., Ali, M., Shikh, N. A., Khalil, M. S., Chaudhary, G. Q., Rashid, T. U., SHEHRYAR, M., "Experimental performance analysis of low concentration ratio solar parabolic trough collectors with nanofluids in winter conditions", Renewable Energy, 2018, 118: 742-751
- [8] SUBRAMANI, J., Nagarajan, P.K., Mahian, O., Sathyamurthy, R., "Efficiency and heat transfer improvements in a parabolic trough solar collector using TiO_2 nanofluids under turbulent flow regime", Renewable Energy, 2018, 119: 19-31.



- [9] COCCIA, G., Di Nicola, G., Colla, L., Fedele, L., Scattolini, M., “Adoption of nanofluids in low-enthalpy parabolic trough solar collectors: numerical simulation of the yearly yield”, *Energy Conversion and Management*, 118, 306-319.
- [10] KASAEIAN, A., Daviran, S., Azarian, R. D., Rashidi, A., “Performance evaluation and nanofluid using capability study of a solar parabolic trough collector”, *Energy conversion and management*, 89, 368-375.
- [11] BELLOS, E., Tzivanidis, C., Tsimpoukis, D., “Thermal, hydraulic and exergetic evaluation of a parabolic trough collector operating with thermal oil and molten salt based nanofluids”, *Energy Conversion and Management*, 2018, 156: 388-402
- [12] WANG, Y., Xu, j., Liu, Q., Chen, Y., Liu, H., “Performance analysis of a parabolic trough solar collector using Al₂O₃/synthetic oil nanofluid. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 107: 469-478.
- [13] MWESIGYE, A., Meyer, J. P., “Optimal thermal and thermodynamic performance of a solar parabolic trough receiver with different nanofluids and at different concentration ratios”, *Applied Energy*, 2017, 193: 393-413.
- [14] BELLOS, E., Zafar, S., Tzivanidis, C., “The use of nanofluids in solar concentrating technologies: a comprehensive review”, *Journal of cleaner production*, 2018, 196: 84-99.
- [15] ARSLAN, F. M., Günerhan, H., “Enerji Uygulamalarında Kullanılan Nanoakışkanların Isıl Özellikleri”, 13. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 2017.
- [16] DAS, S. K., Choi, S. S., Yu, W., Pradeep, T., “Nanofluids: science and technology”. John Wiley & Sons, 2007.
- [17] BONK, A., Sau, S., Uranga, N., Hernaiz, M., Bauer, T., “Advanced heat transfer fluids for direct molten salt line-focusing CSP plants” *Progress in Energy and Combustion Science*, 2018, 67: 69-87.
- [18] BAUER, T., Pflieger N., Breidenbach, N., Eck, M., Laing, D., S.Kaesche, S. “Material aspects of Solar Salt for sensible heat storage” *Applied energy*, 2013, 111: 1114-1119.
- [19] AUERKARI, P., “Mechanical and physical properties of engineering alumina ceramics” Espoo: Technical Research Centre of Finland, 1996.
- [20] SOKHANSEFAT, T., Kasaeian, A. B., “Numerical study of heat transfer enhancement by using Al₂O₃/synthetic oil nanofluid in a parabolic trough collector tube”, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2012, 69: 1154-1159.
- [21] ZADEH, P. M., P., Sokhansefat, T., A.B., Kasaeian, A. B., Kowsary, F., Akbarzadeh A., “Hybrid optimization algorithm for thermal analysis in a solar parabolic trough collector based on nanofluid”, *Energy*, 2015, 82: 857-864.
- [22] YU, W. Choi, S. U. S. “The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model” *Journal of nanoparticle research*, 2003, 5.1-2: 167-171.
- [23] FERRARO, V., Settino J., Cucumo M. A., Kaliakatsos, D., “Parabolic trough system operating with nanofluids: comparison with the conventional working fluids and influence on the system performance” *Energy Procedia*, 2016, 101: 782-789.
- [24] KASAIEAN, A., , Sameti M., Daneshazarian, R., Noori, Z., Adamian A., Ming, T., “Heat transfer network for a parabolic trough collector as a heat collecting element using nanofluid” *Renewable Energy*, 2018, 123: 439-449.
- [25] HACHICHA, A. A., Rodríguez, I., Capdevila, R., Oliva, A., “Heat transfer analysis and numerical simulation of a parabolic trough solar collector”, *Applied energy*, 2013, 111: 581-592.
- [26] B BELLOS, E., Tzivanidis, C., “A detailed exergetic analysis of parabolic trough collectors”, *Energy Conversion and Management*, 2017, 149: 275-292.
- [27] BEHAR, O., Khellaf, A., Mohammedi, K., “A novel parabolic trough solar collector model–Validation with experimental data and comparison to Engineering Equation Solver (EES)”, *Energy Conversion and Management*, 2015, 106: 268-281.
- [28] LOVEGROVE, K., Stein, W., “Concentrating solar power technology: principles, developments and applications”. Elsevier, 2012.
- [29] COCCIA, G., DI Nicola, G., Hidalgo, A., “Parabolic trough collector prototypes for low-temperature process heat”, Springer, 2016.
- [30] KALOGIROU, S. A., “A detailed thermal model of a parabolic trough collector receiver”, *Energy*, 2012, 48.1: 298-306.



- [31] FORRISTALL, R., “Heat transfer analysis and modeling of a parabolic trough solar receiver implemented in engineering equation solver”, National Renewable Energy Lab., Golden, CO.(US), 2003.
- [32] DUFFIE, J. A. Beckman, W. A., “Solar engineering of thermal processes. John Wiley & Sons”, 2013.
- [33] ÇENGEL, Y.A., “Heat transfer a practical approach”, 2002, Second edition.
- [34] DUDLEY, V. E., Kolb, G. J., Mancini, T. R., Matthews C. W. Test results: SEGS LS-2 solar collector. Nasa Sti/recon Technical Report N, 1994, 96.
- [35] ARSLAN, M., “Parabolik güneş kolektörlerinde enerji ve ekserji analizi”, Ege üniversitesi fen bilimleri enstitüsü, yüksek lisans tezi, 2019.
- [36] SYLTHERM 800 Heat Transfer Fluid <https://www.loikitsdistribution.com/files/syltherm-800-product-brochure.pdf>

ÖZGEÇMİŞ

F. Mertkan ARSLAN

2009 yılında Türkiye Eğitim Derneği (TED) Aliğa Lisesini bitirdi. 2015 yılında Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2016 yılı eylül ayında Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisansa başladı ve 2019 Ocak ayında bitirdi.

Hüseyin GÜNERHAN

1983 yılında İzmir Atatürk Lisesini bitirdi. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünü 1990 yılında, Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü Enerji Teknolojisi Anabilim Dalında yaptığı yüksek lisans öğrenimini 1992 yılında ve Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Güneş Enerjisi Anabilim Dalında yaptığı doktora öğrenimini 1999 yılında tamamladı. 1991-2001 yılları arasında, Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü Enerji Teknolojisi Anabilim Dalında öğretim elemanı görevi ve araştırma görevlisi unvanı ile çalıştı. 2001-2012 yılları arasında, Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Termodinamik Anabilim Dalında öğretim üyesi görevi ve yardımcı doçent doktor unvanı ile çalıştı. 2012-2018 yılları arasında ise, aynı bölüm ve aynı anabilim dalında öğretim üyesi görevi ve doçent doktor unvanı ile çalıştı. 2018 yılından itibaren aynı bölüm ve aynı anabilim dalında profesör doktor olarak çalışmaya devam etmektedir. Çalışma alanlarını, ısı transferi, termodinamik, ısı enerji depolama, ısı pompaları ve yeni enerji kaynakları oluşturmaktadır.

**Simgeler ve Kısaltmalar**

c_p	özgül ısı (J/kg °C)
D	çap (m)
f	boru içi sürtünme faktörü (-)
F'	Kolektör verim faktörü
F_R	Isı kaybolma faktörü
h	taşıyım ile ısı transferi (W/m ² °C)
I_d	direk ışınım (W/m ²)
k	ısı iletkenlik (W/m °C)
K	geliş açısı niteleyicisi (-)
L	uzunluk (m)
m	kütleli debi (kg/s)
Nu	Nusselt sayısı (-)
Pr	Prandtl sayısı (-)
Re	Reynolds sayısı (-)
T	sıcaklık (K)
v	akış hızı (m/s)
U_L	kayıp katsayısı (W/m ² °C ²)
Q	ısı akımı (W)
W	genişlik (m)

Yunan alfabesi

α	Absorblama katsayısı (-)
ΔP	Basınç kaybı (Pa)
ε	Işınım yayma katsayısı (-)
η	verimlilik (-)
γ	kesişme faktörü (-)
θ	olay açısı (°)
μ	dinamik viskozite (Pa s)
Φ	Nanoparçacığın hacimsel konsantrasyonu (-)
ρ	yağunluk (kg/m ³)
σ	stefan Boltzmann katsayısı (5.67 x 10 ⁸ W/m ² K ⁴)
τ	Işınım geçirgenlik oranı (-)

indisler

a	açıklık
ak	akışkan
abs	absorber
b	boru
bd	boru dışı
bi	boru içi
c	cam
cd	cam dışı
ci	cam içi
cd	cam dışı
çn	çığ noktası
g	güneş
kol	kollektör
np	Nanoakışkan parçacık
opt	optik
yans	yansıtıcı