



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>

Isı transferi akışkanı olarak eriyik tuz kullanılan bir gövde boru tipi ısı değiştiricisinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı ile analizi

*Analysis with computational fluid dynamics software of a shell-and-tube heat exchanger using molten salt as heat transfer fluid*

Yazar(lar) (Author(s)): Mustafa SÖYLER<sup>1</sup>, Mustafa AKTAŞ<sup>2</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0003-4767-5825

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0003-1187-5120

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Söyler M. ve Aktaş M., “Isı transferi akışkanı olarak eriyik tuz kullanılan bir gövde boru tipi ısı değiştiricisinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı ile analizi”, *Politeknik Dergisi*, 21(1): 13-17, (2018).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.389249

# Isı Transferi Akışkanı Olarak Eriyik Tuz Kullanılan Bir Gövde Boru Tipi Isı Değiştiricisinin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Programı ile Analizi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Mustafa SÖYLER<sup>1\*</sup>, Mustafa AKTAŞ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Müh. Bölümü, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Müh. Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 31.10.2016 ; Kabul/Accepted : 05.12.2016)

## ÖZ

Bu çalışmada eriyik tuz kullanılan bir gövde borulu ısı değiştiricisinin ısı transfer performansı bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) programıyla analiz edilmiştir. Bu çalışma literatürde yapılan bir deneyi doğrulamak için gerçekleştirilmiştir. Ticari bir HAD programı olan ANSYS Fluent 14.5 sürümü bu çalışmada kullanılmıştır. Eriyik tuz ısı değiştiricisine farklı sıcaklık aralıklarında (360 °C – 400 °C) ve farklı debilerde (0,48 – 1,87 m<sup>3</sup>/h) girmektedir. Elde edilen sayısal sonuçlar ile literatürden seçilen çalışmadaki deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır ve iyi bir uyum sağlandığı görülmüştür. Bu çalışmada geliştirilen sayısal HAD modeli ileriki çalışmalarda kullanılabilir.

**Anahtar Kelimeler:** Eriyik tuz, HAD, ısı değiştiricisi.

## Analysis with Computational Fluid Dynamics Software of a Shell-and-Tube Heat Exchanger Using Molten Salt as Heat Transfer Fluid

### ABSTRACT

In this present study, heat transfer performance of a shell and tube heat exchanger used molten salt is analyzed by a computational fluid dynamic (CFD) programming. The model is prepared regard as a literature study that includes experimental results for validation. ANSYS 14.5 numerical package software is used in the solution of cases. The special heat transfer fluid, molten salt is used as fluid material that has been used between 360 °C – 400 °C and 0,48 – 1,87 m<sup>3</sup>/h. The numerical results are compared with experimental results in literature and a good conformity has been achieved with considering limited numerical errors. In this study may be used in future studies developed numerical CFD models.

**Keywords:** Molten salt, CFD, heat exchanger

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yoğunlaştırılmış güneş santralleri (YGS) temiz ve yenilenebilir enerji için çok büyük bir potansiyeldir [1]. Birçok farklı çalışma akışkanı YGS sistemlerinde kullanılmaktadır [2-4]. Uygun ısı transfer akışkanı ve ısı depolama sistemlerini seçmek YGS teknolojisinin gelecekteki başarısı için anahtar rol oynamaktadır. Eriyik tuzun YGS'nde depolama ve ısı transferi akışkanı olarak kullanılma sebepleri; geniş çalışma sıcaklığı aralığı, düşük buharlaşma basıncı (<1 atm), büyük ısı kapasitesi, yüksek termal iletkenlik, düşük viskozite, iyi kimyasal kararlılık ve düşük fiyatıdır [5-8].

Isı transferi akışkanı direkt olarak türbinde elektrik üretiminde kullanılabilir ya da çoğunlukla bir ısı değiştiriciyle birlikte buhar üretmek için kullanılabilir [9,10]. Isı transferi akışkanı YGS sistemlerinin verimliliği ve performansı açısından en önemli unsurdur.

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : mustafasoyler@osmaniye.edu.tr

Isı transferi akışkanı olarak kullanılan eriyik tuz direkt olarak buhar üretmek için kullanılacağı gibi güneşin olmadığı durumlarda ise enerjiyi uzun süre depolayabilir [11-14].

Zorlanmış ısı transferi, ısı değiştiricilerin birçok tipinde kullanılmaktadır. Birçok araştırmacı farklı çalışma akışkanları ile birlikte geçiş ve türbülanslı bölgenin ısı transferini araştırmışlardır. Sieder ve Tate borudaki akışkanın ısı transferini ve basınç düşüşünü deneysel olarak bulmuş ve önemli bir ısı transferi bağıntısı geliştirmiştir [15]. Gnielinski, Sieder ve Tate' nin deneysel sonuçlarını kullanarak türbülanslı borudaki ısı transferi için yeni bir ısı transferi bağıntısı üretmiştir [16]. Petukhov türbülanslı borudaki akışkanın farklı fiziksel özelliklerinde ısı transferini ve sürtünmeyi çalışmıştır [17]. Birçok literatürde eriyik tuzlu sistemlerin ısı depolama karakteristikleri incelenmiştir [18, 19]. Ancak eriyik tuzun ısı transfer akışkanı olarak ısı transferinin incelenmesi azdır. Hoffman ve ark. LiF-NaF-KF ve NaNO<sub>2</sub>-KNO<sub>3</sub>-NaNO<sub>3</sub> karışık eriyik tuzların ısı

transferini deneysel olarak incelemişlerdir ve farklı eriyik tuzların ısı transfer katsayısını üretmişlerdir [20-21].

Isı değiştiricileri, farklı sıcaklıklardaki iki veya daha fazla arasında oluşan ısı enerjisini sağlayan cihazlardır. Güç üretimi, proses, elektronik, iklimlendirme, soğutma ve uzay uygulamaları gibi geniş kullanım alanlarına sahiptir. Çok fazla ısı değiştiricisi tipleri mevcut olmakla birlikte, bunlardan gövde boru tipi ısı değiştiricisi diğerlerine göre daha fazla kullanım alanına sahiptir. Basit boru sistemine sahip ve küçük ısı transferi alanlı ısı değiştiricilerinden, çok büyük ısı transferi alanlı ve kompleks yüzeyli yoğunlaştırıcı ve buharlaştırıcılara kadar çok çeşitli cihaz şekilleri bulunmaktadır. Gövde boru tipi ısı değiştiricileri bu iki geniş mesafe arasında yer alır [22].

Bu çalışmada, literatürden seçilen ve deneysel çalışması yapılmış [23] küçük bir gövde boru tipi ısı değiştiricisi bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) programıyla modellenmiştir. Ticari bir HAD programı olan ANSYS Fluent 14.5 sürümü bu çalışmada kullanılmıştır. Alınan sonuçlara göre uygun mesh ve türbülans modeli bulunmuştur. HAD programından elde edilen sayısal sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

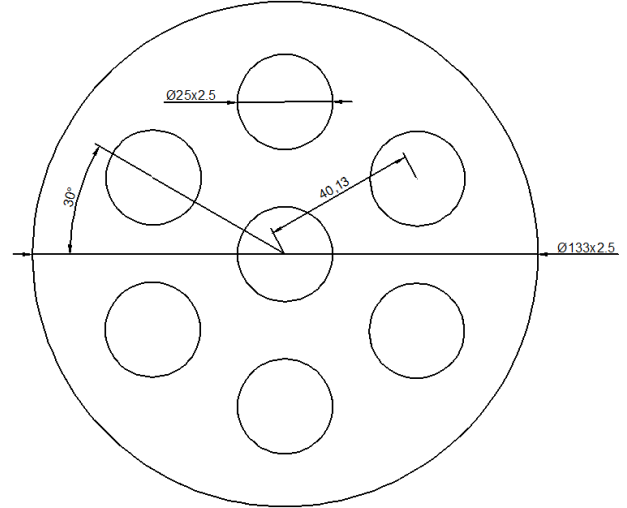
## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Bu çalışmada deneysel çalışması yapılan bir gövde boru tipi ısı değiştiricisinin HAD ile analizi yapılmıştır.

### 2.1. Sistem Tanıtımı (System Description)

Gövde boru tipi ısı değiştiricisi paslanmaz çelikten yapılmıştır. Yüksek sıcaklıktaki eriyik tuz hiçbir saptırma olmadan boru demetinin dışında akmaktadır ve ön ısıtma yapılan su ise boru demetinin içinden akmaktadır. Isı değiştiricinin uzunluğu 650 mm olup gövde iç çapı 133 mm' dir. Isı değiştiricisinde 7 adet boru bulunmaktadır ve boruların çapları 25 mm olup 2.5 mm cidar kalınlığına sahiptir [23]. Isı değiştiricisinin temel geometrik özellikleri Şekil 1' de görülmektedir.

Isı kaybını en aza indirmek için 100 mm kalınlığında yalıtım malzemesi kullanılmıştır. Burada su boruların içinden geçerek soğutma görevini üstlenmektedir be eriyik tuz boru demetinin dışından akmaktadır. Suyun basıncı 1 atm' dir ve sıcaklığı yaklaşık kaynama noktasına eşittir. Bu çalışmada ternary nitrat tuzu ( $KNO_3$ -



Şekil 1. Isı değiştiricisinin geometrisi (Geometry of heat exchanger) [23].

$NaNO_2$ - $NaNO_3$ ) ısı transfer akışkanı olarak kullanılmaktadır ve çalışma sıcaklığı aralığı 200-500 °C arasındadır. Eriyik tuzun çalışma sıcaklığı aralığında uygulanabilecek termal özellikleri veren deneysel bağıntılar Çizelge 1' de verilmektedir.

Çizelge 1' de eriyik tuzun termal özelliklerini veren ifadede  $T$  ile ifade edilen sıcaklık Celcius derecedir.

### 2.2. Veri Analizi (Data Analysis)

Boru demetinin dışındaki eriyik tuzun bulunduğu gövde kısmının ıslak çevresi ve karakteristik uzunluğuna bağlı hidrolik çap hesabı Eşitlik 1.1, 1.2 ve 1.3 ile hesaplanır.

$$S = \frac{\pi}{4} (D^2 - n \cdot d^2) \quad (1.1)$$

$$P = \pi (D + n \cdot d) \quad (1.2)$$

$$D_e = \frac{4S}{P} = \frac{D^2 - nd^2}{D + nd} \quad (1.3)$$

Burada  $D$  gövdenin iç çapını  $d$  borunun dış çapını ifade etmektedir  $n$  ise boru sayısıdır.

Boru yüzeyindeki ısı akısı:

$$q'' = \frac{\rho c_p (T_g - T_c) \dot{V}}{n \cdot \pi d \cdot l} \quad (2)$$

Çizelge 1. Eriyik tuzun termal özelliklerini veren deneysel bağıntılar (Experimental correlations that the thermal properties of molten salt) [21]

|                                       |   |
|---------------------------------------|---|
| Yoğunluk, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | $2085 - 0.74T$                                |
| Dinamik Viskosite, $\mu$ (g/ms)       | $31.6 - 0.195T + 0.00042T^2 - 0.000000313T^3$ |
| Isı İletim Katsayısı, $k$ (W/mK)      | $0.697 - 0.000461T$                           |
| $C_p$ , (J/kgK)                       | $1549 - 0.15T$                                |

Burada  $T_g$  ve  $T_c$  eriyik tuzun giriş ve çıkışındaki sıcaklıklardır ve  $\dot{V}$  ise debidir.

Eriyik tuzun Reynolds sayısı:

$$Re = \frac{\rho D_e \dot{V}}{\mu S} \quad (3)$$

Boru yüzeyindeki eriyik tuzun Nu sayısı:

$$Nu = \frac{D_e q''}{k (T_w - T_f)} \quad (4)$$

Burada  $T_f$  eriyik tuzun giriş ve çıkış sıcaklıklarının ve  $T_w$  ise boru demetinin yüzey sıcaklığının ortalamasıdır.

Deneyde kullanılan ölçüm aletlerinden doğan belirsizliklerin, alınan ve hesaplanan verilere etkileri belirsizlik analizi yöntemiyle hesaplanarak bulunmuştur [23]. Belirsizlik analizi sonuçlarına göre ısı transferi katsayısı ve ısı akısının deneysel belirsizliği % 6.26, Nusselt sayısının ise % 8.56' dır.

### 2.3. Korunum Denklemleri (Governing Equations)

Boru içi akışlarda süreklilik denklemi Eşitlik 5.1'deki gibidir.

Süreklilik Denklemi:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0 \quad (5.1)$$

Momentum Denklemi:

x – momentum

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + X \quad (5.2)$$

y – momentum

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + Y \quad (5.3)$$

z – momentum

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + Z \quad (5.4)$$

Enerji Denklemi:

$$\dot{Q}_{kh} - \dot{m}_i e_{fi} = \frac{dE_{kh}}{dt} + \dot{m}_c e_{fc} + \dot{W}_{kh} \quad (5.5)$$

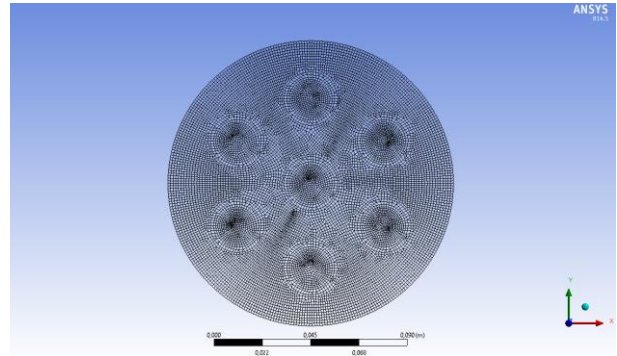
Eşitlik 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 ve 5.5'te kapalı formları verilen denklemlerde p basınç,  $\rho$  yoğunluk, u, v ve w hız bileşenleri, t zaman, X, Y ve Z birim kütleye etkiyen kuvvetin x, y ve z eksenlerine paralel bileşenleridir. Ayrıca enerji denkleminde  $\dot{Q}_{kh}$  kontrol hacmine birim zamanda giren ısı,  $\dot{m}_i e_{fi}$  kontrol hacmine birim zamanda giren kütlelerin akış enerjisi,  $\dot{m}_c e_{fc}$  kontrol hacminden birim zamanda çıkan kütlelerin akış enerjisi,  $dE_{kh}/dt$  kontrol hacmi sınırları içerisindeki enerjinin birim zamanda değişim hızı ve  $\dot{W}_{kh}$  birim zamanda yapılan iştir [24].

### 2.4. Sınır Şartları (Boundary Conditions)

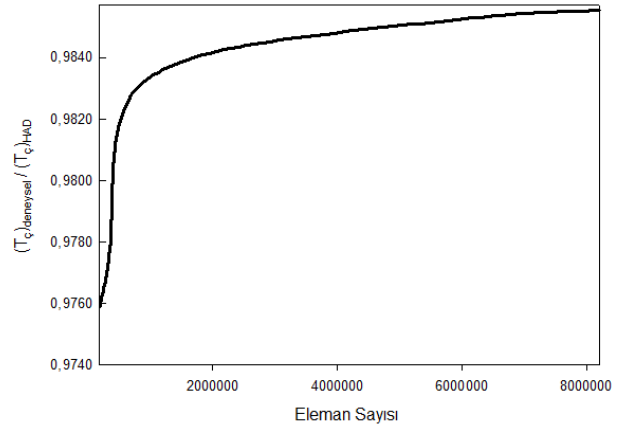
Eriyik tuz ısı değiştiricisine 360 °C – 400 °C sıcaklıkları arasında ve 0,48 – 1,87 m<sup>3</sup>/h debileri arasında giriş yapmakta, su ise 1 atm ve 99 °C sıcaklığında ısı değiştiricisine giriş yapmaktadır. Akış aynı yönlü ve paraleldir. Isı değiştiricinin yalıtımı mükemmel olduğu varsayılarak adyabatik bir sistem olarak ele alınmıştır.

### 2.5. Sayısal Ağ Seçimi (Mesh Selection)

Bu çalışmada 6 farklı sayısal modelde işlem yapılmıştır ve sırasıyla bu modeller 186418, 372320, 738500, 6744164, 7768432, 8692146 eleman sayısına sahiptir. Eriyik tuzun çıkış sıcaklığı referans noktası alınarak deneysel sonuçlarla oranlanmıştır. Seçilecek en uygun eleman sayısı 6 744 164' dır çünkü bu noktadan sonra sıcaklık değişimi kayda değer bir artış göstermemektedir ve aynı zamanda eleman sayısı arttıkça sayısal analizin süresini oldukça arttırmaktadır. Modelin sayısal ağ görüntüsü Şekil 2' de gösterilmiştir. Eleman sayısının deneysel ve sayısal sonuçlara oranını gösteren grafik Şekil 3' de görülmektedir.



Şekil 2. Seçilen modelin sayısal ağ görüntüsü (Mesh view of selected numerical model)



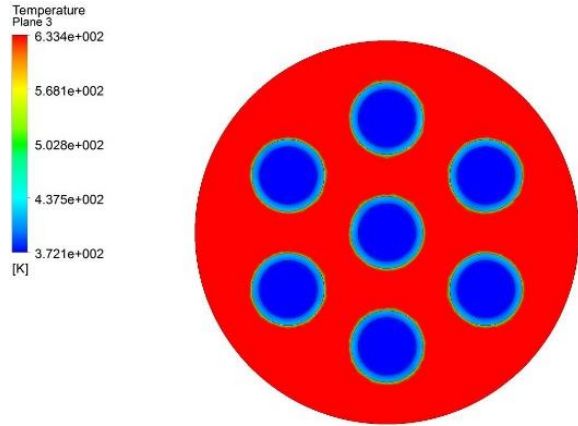
Şekil 3. Eriyik tuzun çıkış sıcaklığı için  $(T_c)_{deneysel}/(T_c)_{HAD}$  değerinin farklı eleman sayılarından bağımsızlığının gösterimi (Mesh independent illustration of molten salt outlet temperature for  $(T_c)_{exp}/(T_c)_{CFD}$ )

### 2.6. Türbülans Modeli (Turbulence Model)

Eriyik tuz çok düşük debilerde akmaktadır ve laminer bir akış sergilemektedir. Diğer akışkan olan su ise türbülanslı bölgede akmaktadır. Su için kullanılan türbülans modeli standart k-ε modelidir. Literatürde genellikle kullanılan model olan standart k-ε modeli bu çalışmada da kullanılmıştır. Diğer türbülans modelleri denenmiş ancak en iyi sonucu k-ε modeli vermiştir.

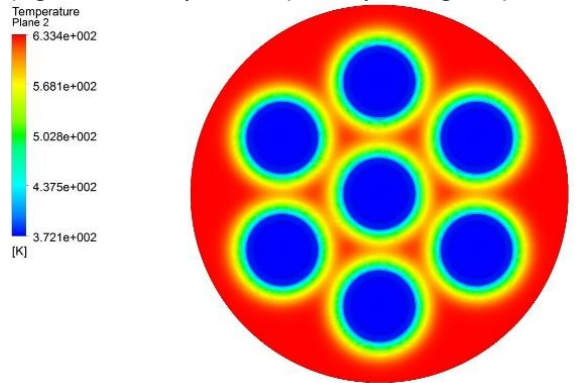
### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULT AND DISCUSSION)

Bu çalışmada geliştirdiğimiz sayısal metotla deneysel sonuçlar uyumlu çıkmıştır. Bu da çalışmanın güvenilirliğini ortaya koymuştur. Isı değiştiricisinin giriş ve çıkış sıcaklık dağılımları Şekil 4 ve Şekil 5’ de gösterilmektedir.

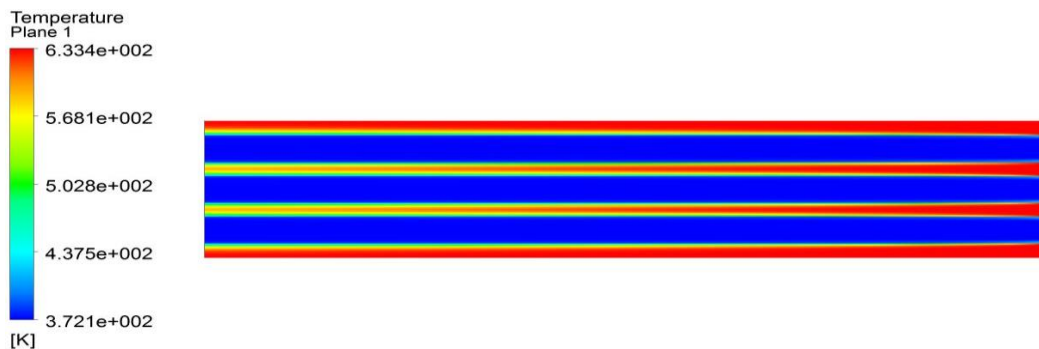


Şekil 4. Isı değiştiricisinin giriş sıcaklık dağılımı (Inlet temperature distribution of the heat exchanger)

Isı değiştiricisinin sıcaklık dağılımı aksel olarak alınan kesit ile Şekil 6’da gösterilmektedir. HAD programından alınan sonuçlar deneysel belirsizlik analizde göz önünde bulundurularak gösterilmiştir. Sayısal sonuçlar büyük çoğunlukla deneysel sonuçlarla uyum sağlamıştır.



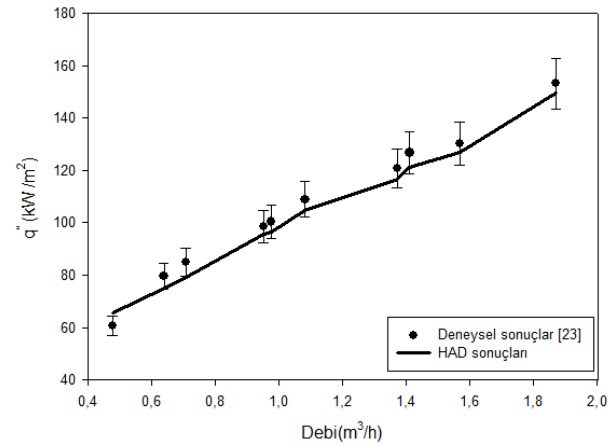
Şekil 5. Isı değiştiricisinin çıkış sıcaklık dağılımı (Outlet temperature distribution of the heat exchanger)



Şekil 6. Isı değiştiricisinin aksinden alınan görüntü (Images from the axis of the heat exchanger)

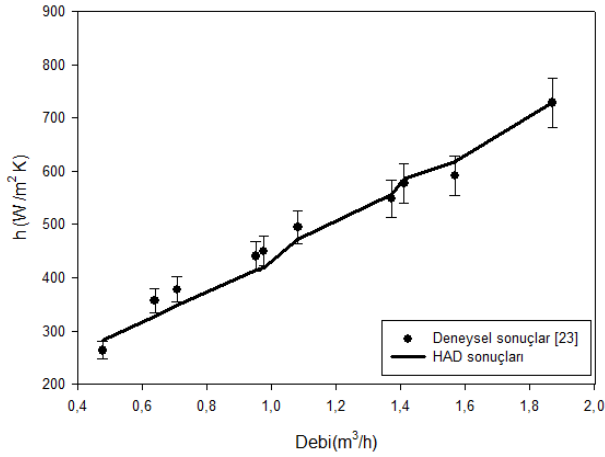
Eriyik tuzun ısı akısının farklı debilerde  $\dot{V}=0.48-1.87$  m<sup>3</sup>/h ve sıcaklıklarda  $T_f=360-400$  °C değişimini gösteren grafik Şekil 7’ de verilmiştir. Bu grafikte deneysel sonuçlarla sayısal sonuçlar karşılaştırılmış olup iyi bir uyum görülmektedir.

Sayısal sonuçlarla deneysel sonuçlar arasındaki minimum sapma % 2.37, maksimum sapma ise % 7.48’dir bu sapmalar ise deneysel hatalar içinde kalmaktadır. Eriyik tuzun ısı transfer katsayısının farklı debilerde  $\dot{V}=0.48-1.87$  m<sup>3</sup>/h ve sıcaklıklarda  $T_f=360-400$  °C değişimini gösteren grafik Şekil 8’ de verilmiştir. Bu grafikte de görüldüğü üzere sayısal sonuçlar deneysel sonuçlarla iyi bir uyum sağlamaktadır. Sayısal sonuçlarla deneysel sonuçlar arasındaki minimum sapma % 0.26, maksimum sapma ise % 8.58’dir bu sapmalar ise deneysel hatalar içinde kalmaktadır.

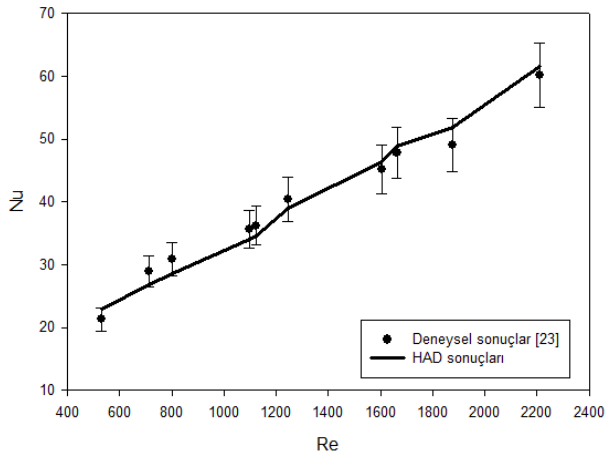


Şekil 7. Farklı debi ve sıcaklıklarda eriyik tuzun ısı akısının değişimi (Variation of different volumetric flow rate and temperature of the molten salt heat flux)

Eriyik tuzun Nusselt sayısının farklı Reynolds sayılarında ve sıcaklıklarda ( $T_f=360-400$  °C) değişimini gösteren grafik Şekil 9’ de verilmiştir. Bu grafikte de görüldüğü üzere sayısal sonuçlar deneysel sonuçlarla iyi bir uyum sağlamaktadır. Sayısal sonuçlarla deneysel sonuçlar arasındaki minimum sapma % 2.30, maksimum sapma ise % 8.10’dur ve bu sapmalar ise deneysel hatalar içinde kalmaktadır.



**Şekil 8.** Farklı debi ve sıcaklıklarda eriyik tuzun ısı transfer katsayısının değişimi (Variation of different volumetric flow rate and temperature of the molten heat transfer coefficient)



**Şekil 9.** Eriyik tuzun Nusselt sayısı değişimi (Molten salt Nusselt's number changes)

Isı transferi için deneysel veriler genellikle makul bir duyarlılıkla basit bir üst kanunu bağıntısı biçiminde verilir [25]:

$$Nu = C Re^m Pr^n \quad (6)$$

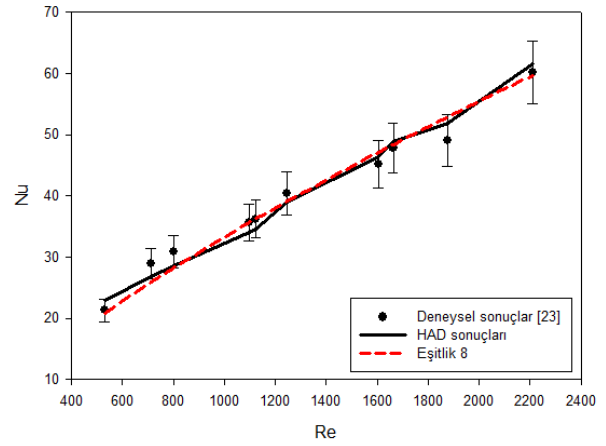
Burada m ve n sabit üstlerdir (genellikle 0 ile 1 arasında) ve C sabitinin değeri geometriye bağlıdır [24]. Eşitlik 6 verilen bağıntıda  $Pr^n$  ifadesini sabit almak şartıyla  $C_1 = C Pr^n$  bağıntısı tarif edilerek;

$$Nu = C_1 Re^m \quad (7)$$

Eşitlik 7 elde edilir. Eldeki HAD verilerini kullanarak bu bağıntıda bulunan katsayılar  $C_1=0.21$  ve  $m=0.74$  olarak bulunmuştur ve buradan Eşitlik 8' deki gibi bir bağıntı elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar, HAD sonuçları ve elde edilen Eşitlik 8' deki bağıntı şekil 10' da gösterilmektedir.

$$Nu = 0.21 Re^{0.74} \quad (8)$$

Elde edilen bu bağıntı pratik olarak ön hesaplamalarda kullanılabilir.



**Şekil 10.** Elde edilen bağıntının (eşitlik 8) deneysel ve HAD sonuçlarıyla karşılaştırılması (The resulting correlation (equation 8) compared with experimental and CFD results)

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Yapılan bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Bunlar;

- Literatürden alınan deneysel verilerle [23] farklı sıcaklık (360-400 °C) ve farklı debi (0.48-1.87 m³/h) değerlerine bağlı olarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizleri çözüm için kullanılmıştır.
- Deneysel sonuçlarla HAD analizleri arasındaki uyum çok iyi çıkmıştır. Bu nedenle yapılan bu çalışmada sayısal analiz doğrulanmıştır.
- Deneysel sonuçlarda elde edilen ısı akısı ve ısı transfer katsayısı değerleri HAD analizi sonuçları ile karşılaştırılmış ve maksimum % 8.58 sapma hesaplanmıştır. Deneyde elde edilen belirsizlikler kullanılarak karşılaştırma yapıldığında sonuçların gayet uyumlu olduğu görülmüştür.
- HAD analizinden elde edilen Nusselt sayısı deneysel sonuçlar ile kıyaslandığında % 8.10' luk bir sahiptir ve bu değer deneysel sapmalar (belirsizlik analizinde hesaplanan %8.56) göz önünde bulundurulduğunda sonuçların deneysel sapmaların içinde olduğu çıkmaktadır.
- Bu çalışmada aynı zamanda HAD analizlerinin sonuçları göz önünde bulundurularak Nusselt sayısı için bir bağıntı elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar ve HAD analizlerinin sonuçları ile bu bağıntı karşılaştırılmış ve gayet uyumlu çıkmıştır.
- Genel bir sonuç olarak, HAD programı kullanılarak ve deneylerle desteklenerek gövde boru tipi ısı değiştiricinin tasarım süresi hızlandırılabilir ve nihai tasarım kalitesini arttırabiliriz. Yakın gelecekte, bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler çok daha büyük gövde boru tipi ısı değiştiricileri tasarımlarını mümkün kılacaktır.



**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] Wei X., Peng Q., Ding J., Yang X., Yang J.P., Long B., “Theoretical study on thermal stability of molten salt for solar thermal power”, *Appl. Therm. Eng.*, 54: 140–144, (2013).
- [2] Pacio J., Singer C., Wetzell T., Uhlig R., “Thermodynamic evaluation of liquid metals as heat transfer fluids in concentrated solar power plants”, *Appl. Therm. Eng.*, 60: 295-302, (2013).
- [3] Rovira A., Montes M.J., Varela F., Gil M., “Comparison of heat transfer fluid and direct steam generation technologies for integrated solar combined cycles”, *Appl. Therm. Eng.*, 52: 264-274 (2013).
- [4] Mussard M., Nydal, O.J., “Comparison of oil and aluminum-based heat storage charged with a small-scale solar parabolic trough”, *Appl. Therm. Eng.*, 58: 146-154, (2013).
- [5] Kearney D., Kelly B., Herrmann U., “Engineering aspects of a molten salt heat transfer fluid in a trough solar field”, *Energy*, 29: 861–864, (2004).
- [6] Sohal M.S., Sabharwall P., Calderoni P., “Conceptual Design of Forced Convection Molten Salt Heat Transfer Testing Loop”, *INL/EXT-10-19908*, 6–10, (2010).
- [7] Olivares R.I., “The thermal stability of molten nitrite/nitrates salt for solar thermal energy storage in different atmospheres”, *Sol. Energy*, 86: 2576–2583, (2012).
- [8] Wang Y.J., . Liu Q.B, Lei L.J., Jin H.G., “A three-dimensional simulation of a parabolic trough solar collector system using molten salt as heat transfer fluid”, *Appl. Therm. Eng.*, 70: 462–476 (2014).
- [9] Cordaro J.G., Rubin N.C., Bradshaw R.W., “Multicomponent molten salt mixtures based on nitrate/nitrite anions”, *J Sol Energy Eng-Trans ASME*, 133: 011014, (2011).
- [10] Barlev D, Vidu R, Stroeve P., “Innovation in concentrated solar power”, *Sol Energy Mater Sol Cells*, 95: 2703–25, (2011).
- [11] Ruegamer T., Kamp H., Kuckelkorn T., Schiel W., Weinrebe G., Nava P., Riffelmann K.J., “Molten Salt for Parabolic Trough Applications: System Simulation and Scale Effects”, *Energy Procedia*, 00: 000–000, (2013).
- [12] Zhang H.L., Baeyens J., Degreve J., Caceres G., “Concentrated solar power plants: review and design methodology”, *Renew Sustain Energy Rev.*, 22: 466–81 (2013).
- [13] Pacheco J.E., Showalter S.K., Kolb W.J., “Development of a Molten-Salt Thermocline Thermal Storage System for Parabolic Trough Plants”, *J. Sol. Energy Eng.*, 124(2): 153-159, (2002).
- [14] Zalba B., Marin J.M., Cabeza L. F., Mehling H., “Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications”, *Applied Thermal Eng.*, 23: 251–283,(2003).
- [15] Sieder E.N., Tate G.E., “Heat transfer and pressure drop of liquids in tubes”, *Ind. Eng. Chem.*, 28: 1429-1435, (1936).
- [16] Gnielinski V., “New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow”, *Int. Chem. Eng.*, 16: 359-367, (1976).
- [17] Petukhov B.S., “Heat transfer and friction in turbulent pipe flow with variable physical properties”, *Advances in Heat Transfer*, 6: 503-565, (1970).
- [18] Y. Zhen, S.V. Garimella, “Thermal analysis of solar thermal energy storage in a molten-salt thermocline”, *Sol. Energy*, 88: 974-985, (2011).
- [19] Xu C., Wang Z.F., He Y.L., Li X., Bai F.W., “Sensitivity analysis of the numerical study on the thermal performance of a packed-bed molten salt thermocline thermal storage system”, *Appl. Energy*, 92: 65-75, (2011).
- [20] Hoffman H.W., Lones J., “Fused Salt Heat Transfer, Part II: Forced Convection Heat Transfer in Circular Tubes Containing NaF–KF–LiF Eutectic”, *ORNL-1777*, (1955).
- [21] Hoffman H.W., Cohen S.I., “Fused Salt Heat Transfer, Part III: Forced Convection Heat Transfer in Circular Tubes Containing the Salt Mixture NaNO<sub>2</sub>–KNO<sub>3</sub>–NaNO<sub>3</sub>”, *ORNL-2433*, (1960).
- [22] Kakaç S., Liu H., “*Heat Exchangers Selection, Rating and Thermal Design*”, Second edition, CRC Press, USA, (2002).
- [23] He, S., Lu, J., Ding, J., Yu, T., Yuan, Y. “Convective heat transfer of molten salt outside the tube bundle of heat exchanger”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 59: 9-14, (2014).
- [24] White, F.M.. “*Akışkanlar Mekaniği*”, (çev. K. Kırkköprü, E. Ayder) Literatür Yayınevi (Eserin orijinali 1979’da yayımlandı), Birinci Baskı, Türkiye, (2004).
- [25] Bergman T.L., Incropera F. P., DeWitt D.P., Lavine A.S. “*Fundamentals of Heat and Mass Transfer*”, Seventh edition, Wiley, USA, (2011).