

## İçerisinde Dik Bölmeler Bulunan Trapez bir Kanalda Bölme Yüksekliğinin Akış ve Isı Transferine Etkisinin İncelenmesi

Selma AKÇAY<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Çankırı Karatekin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 18100 Çankırı  
(ORCID: [0000-0003-2654-0702](https://orcid.org/0000-0003-2654-0702))



**Keywords:** Trapez kanal, Dik bölme, Nanoakışkan, Isı transferi, Sayısal çalışma.

### Öz

Bu çalışmada, üst duvarında dik bölmeler olan, alt duvarı trapez şeklinde bir kanalda, bölme yüksekliğinin akış ve ısı transferine etkisini nanoakışkan ve taban akışkan için sayısal olarak incelenmiştir. Nanoakışkan olarak  $TiO_2$  nanopartiküllerin su içerisinde süspansiyonu kullanılmış ve partikül hacim oranı,  $\phi=1\%$  sabit kalmıştır. Sayısal çalışma, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) tabanlı FLUENT 15.0 programı ile gerçekleştirilmiştir. Kanalın üst yüzeyi adyabatiktir ve alt trapez yüzeyi sabit sıcaklıkta ( $T_w=360K$ ) korunmuştur. İki farklı bölme yüksekliği ( $t=H/2$  ve  $t=2H/3$ ) kullanılarak  $200 \leq Re \leq 1200$  Reynolds sayıları için nanoakışkanın ve taban akışkanın Nusselt sayısı (Nu), sürtünme faktörü (f) ve termo-hidrolik performansı (THP) hesaplanmıştır, ayrıca çalışma bölmesiz kanal akışı ile de karşılaştırılmıştır. Kanalda, farklı parametrelerde hız ve sıcaklık görüntüleri elde edilmiştir. Sayısal sonuçlar, trapez bir kanalda bölmelerin yüksekliğine ve nanoakışkana bağlı olarak ısı transferinin önemli ölçüde iyileştiğini, ancak sürtünmenin de bir miktar arttığını göstermiştir. En yüksek THP, bölmesiz kanalda taban akışkana göre,  $TiO_2$ -su nanoakışkanda  $Re=400$  ve  $t=2H/3$  bölme yüksekliğinde 1,95 olarak elde edilmiştir.

## Investigation of Effects of Baffle Heights on Flow and Heat Transfer in a Trapezoidal Channel with Vertical Baffles

**Keywords:** Trapezoidal channel, Vertical baffle, Nanofluid, Heat transfer, Numerical study.

### Abstract

In this study, the effects of baffle heights on the flow and heat transfer in a trapezoidal channel with vertical baffles on the upper wall and trapezoidal shaped the lower wall were numerically investigated for nanofluid and base fluid. The suspension of  $TiO_2$  nanoparticles in water was used as nanofluid and the particle volume fraction was kept constant at  $\phi = 1\%$ . Numerical study was realized with Computational Fluid Dynamics (CFD) based FLUENT 15.0 program. The upper surface of the channel was adiabatic and the lower trapezoidal surface was kept at a constant temperature ( $T_w = 360K$ ). Nusselt number (Nu), friction factor (f) and thermo-hydraulic performance (THP) of nanofluid and base fluid were calculated for  $200 \leq Re \leq 1200$  Reynolds numbers using two different baffle heights ( $t = H/2$  and  $t = 2H/3$ ) and also the study was compared to channel flow without baffles. The velocity and temperature contours were obtained in different parameters in the channel. The numerical results showed that in a trapezoidal channel, the heat transfer improved significantly depending on the height of the baffles and nanofluid, but the friction also increased slightly. The highest THP was obtained as 1.95 in the  $TiO_2$ -su nanofluid flow at  $Re = 400$  and  $t = 2H/3$  baffle height in the channel without baffles according to the base fluid.

\*Sorumlu yazar: [selmaakcay@karatekin.edu.tr](mailto:selmaakcay@karatekin.edu.tr)

Geliş Tarihi: 07.12.2021, Kabul Tarihi: 01.06.2022

## 1. Giriş

Son yıllarda, termal cihazların etkinliğini düşürmeden ısı transfer hızını artırmak için pek çok araştırma yapılmaktadır. Bu çalışmalarda, pasif ve aktif ısı transferi iyileştirme yöntemlerinden yararlanılmaktadır. Aktif yöntemlerin harici bir güç gerektirmesi ve hareketli mekanik parçalar içermesi nedeniyle, daha ekonomik ve güvenli olan pasif yöntemlere olan ilgi artmıştır. Pasif yöntemler, hem maliyet hem de enerji tasarrufu sağladığı için oldukça avantajlıdır. [1-3]. Yüzey alanını artırmayı hedefleyen çeşitli dalgalı yüzey geometrileri, oldukça yaygın kullanılan pasif yöntemlerin başında gelmektedir. Bu konuda, farklı dalgalı geometriye sahip kanalların akış ve ısı transfer davranışları incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda, dalgalı yüzeylerin kendi kendine akış salınımı meydana getirmesi ve yüzey alanını artırması nedeniyle bir miktar basınç düşüşü ile birlikte ısı transferini oldukça artırdığı bildirilmiştir [4-9].

Isı transfer performansını daha fazla iyileştirmek için birden fazla pasif yöntem birlikte kullanılmaktadır. Bunun için kanal yüzeylerine pin-fin, bölme ilavesi, bükülmüş bantlar, kanatçıklar ve girdap üreteçleri gibi uygulamalarla ısı performans artırılması hedeflenmiştir. Türbülantör etkisi gösteren bu uygulamaların, akış karışımını iyileştirerek ısı transferini artırdığı bildirilmektedir. Bu nedenle, pasif yöntemler, ısı değiştiricileri, buharlaştırıcılar, kondansatörler, gaz türbini kanadı soğutma kanalları, nükleer reaktörler, güneş hava ısıtıcıları gibi pek çok mühendislik uygulamalarında tercih edilmektedir [10-29]. Sriromreun vd. [30] dikdörtgen bir kanalda Z tipi saptırma türbülantörlerinin ısı performans üzerindeki etkilerini deneysel ve sayısal olarak analiz etmişler ve düz kanallarla karşılaştırıldığında Z bölmelerin ısı performans üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermişlerdir. Turgut ve Kızıllırmak [31] bir kanal içerisinde farklı eğim açılarında ( $30^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$ ) sahip bölmelerin akış ve ısı transferini türbülantlı akış için sayısal olarak incelemişler ve en yüksek ısı performansın  $\alpha=150^\circ$  de elde edildiğini bulmuşlardır. Promvong vd. [32] deneysel çalışmalarında, eğimli at nalı bölmelerinin kullanıldığı bir kanalda, ısı transfer iyileşmesinin düz kanallara kıyasla yaklaşık %92-208 oranında arttığını bunun yanında sürtünme faktörünün ise 1.76-6.37 kat arttığını bildirmişlerdir. Kumar vd. [33] çoklu V-tipi bölmeler kullanarak güneş hava kanalının ısı transfer davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Sahel vd. [34] yaptıkları sayısal bir çalışma ile dikdörtgen bir kanalda kullanılan farklı bölme tasarımının ısı transferini %65 oranında iyileştirdiğini

bildirmişlerdir. Alnak [35] farklı açılarda yerleştirilmiş dikdörtgen bölmelere sahip çapraz oluklu üçgen kanallarda ısı transferi ve basınç düşüşünü k-ε türbülant modeli kullanarak analiz etmiştir. Çalışmanın sonucunda,  $Re = 6000$  için  $90^\circ$  dikdörtgen bölmeli oluklu kanalın Nusselt sayısı,  $60^\circ$  değerinden %52,8 daha yüksek olduğunu, ayrıca  $Re = 1000$  için basınç düşüşü değeri  $90^\circ$  bölme açısına göre  $60^\circ$  dikdörtgen bölme açısına sahip kanal için %65,97 daha düşük olduğunu göstermiştir. Karabulut [36] alt duvarı üçgen şeklinde dalgalı, üst duvarı düz ve üçgen bölmeler içeren bir kanalda bölme yüksekliği ve bölme açılarının ısı transfer performansına etkilerini k-ε türbülant modeli ile analiz etmiştir. Çalışma sonucunda  $60^\circ$  bölme açısında Nusselt sayısının daha yüksek ve basınç düşüşünün ise daha düşük olduğunu belirtmiştir. Olfian vd. [37] güneş hava ısıtıcı kanalının alt ve üst duvarlarına yerleştirilmiş farklı açılarda dikdörtgen ve V-şeklinde bölmelerin termal etkinliğini sayısal olarak analiz etmişler ve en yüksek etkinliğin, yüksek Reynolds sayısında ( $Re=2000$ )  $90^\circ$  açıda dikdörtgen bölmelerin olduğu durum için elde edildiğini bildirmişlerdir. Saha [38] dikdörtgen bir mikro kanalda düz ve elmas şeklinde olan iki farklı bölme geometrisinde hava akışının ısı transfer karakteristiğini  $10000 \leq Re \leq 50000$  aralığında sayısal olarak incelemiş ve elmas şeklinde bölmeler bulunan kanalda ısı transferinin, sürtünme faktörünün ve ortalama Nusselt sayısının daha yüksek olduğunu bildirmiştir. El Habet vd. [39] dikdörtgen bir kanalda sıralı ve kademeli yerleştirilmiş delikli bölmelerin termo-hidrolik performansını türbülantlı akış şartları için deneysel ve sayısal olarak incelemişler ve sonuçta düz kanala göre yaklaşık %410 ısı transferinde iyileşme sağlandığını ve sıralı bölme durumunda daha yüksek basınç kaybı olduğunu ve en yüksek termal etkinlik oranının kademeli katı bölmelerin olduğu durumda elde edildiğini bildirmişlerdir. Salhi vd. [40] dairesel kesitli düz bir boru içerisine dikdörtgen ve üçgen kesitli uzunlamasına yerleştirilmiş bölmelerin akış ve ısı transferini k-ε türbülant modeli ile incelemişler ve sonuçta dikdörtgen kesitli bölmelerin ısı transferi açısından üçgen kesitli bölmelerden daha iyi olduğunu göstermişlerdir. Bidari vd. [41] ısı değiştiricilerinde ısı transfer performansını iyileştirmek için kullanılan farklı tipteki vorteks üreteçlerin etkilerini inceleyen bir derleme çalışması sunmuşlardır. Phu vd. [42] farklı açılarda ve mesafelerde bölmelerin bulunduğu hava kollektörlerinde akış ve ısı transfer davranışını standart k-ε türbülant modelinde iki boyutlu olarak

incelemişler ve en yüksek termal etkinliğin  $90^\circ$  bölme açısında elde edildiğini bildirmişlerdir.

Endüstri uygulamalarında yaygın olarak kullanılan su, etilen glikol gibi sıvılar, düşük termal özelliklere sahiptir. Bu tür geleneksel soğutma sıvılarının termo-fiziksel özelliklerini iyileştirmek için yüksek ısı iletkenliğe sahip nano boyutlu katı parçacıkların temel akışkana ilave edilmektedir. Yapılan araştırmalarda, nanoakışkanlar ile diğer pasif teknikler birlikte kullanılmış ve akışkanın ısı taşınım katsayısının oldukça arttığı bildirilmiştir [43-51]. Heshmati vd. [52] farklı nanoakışkanlar ( $Al_2O_3$ , CuO, ZnO ve  $SiO_2$ ) için değişen partikül hacim oranlarında ( $0 \leq \phi \leq 0.04$ ) farklı geometrilerdeki oluklu bölme ile geriye dönük bir basamak üzerinde  $50 \leq Re \leq 400$  için karışık taşınım ısı transferini sayısal olarak incelemişlerdir. Sonuçta, yüksek partikül hacim oranları ve küçük nanopartikül çapına sahip nanoakışkanların ısı transferini önemli ölçüde iyileştirdiğini, ancak eğimli bölmelerin yüksek basınç düşüşüne yol açtığını bildirmişlerdir. Ajeel vd. [53] kavisli oluklu bir kanalda L şekilli bölmelerin varlığında ZnO-su nanoakışkanın akış ve ısı transferi özelliklerini türbülans akış rejiminde sayısal olarak incelemişler ve bölmelerin varlığına bağlı olarak akışta girdap oluşumunun artan türbülans etkileri ile ısı transferini arttırdığını bildirmişlerdir. Phu vd. [54] farklı eğim açılına, yüksekliğine ve mesafelerine sahip bölmeler içeren güneş kolektör kanallarında Cu-su nanoakışkanın termohidrolik davranışını sonlu hacim metodu ile araştırmışlardır. Isı transferi ve basınç düşüşünün bölme parametrelerinden oldukça etkilendiğini ve en düşük termohidrolik performansın  $30^\circ$  bölme açısında elde edildiğini bildirmişlerdir. Manca vd. [55] yüzeylerine ısı akısı uygulanmış bir kanalda, farklı yiv yüksekliklerinde, %0 ila %4 nanopartikül hacim oranlarında  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanın türbülanslı akışta ısı transferini araştırmışlardır. Çalışmalarının sonucunda, Reynolds sayısı ve partikül hacim oranı arttıkça ısı transferinin iyileştiğini ve pompalama gücünün de arttığını bildirmişlerdir. Menni vd. [56] ısı değiştiricilerinin termal performansını iyileştirmek amacıyla yaptıkları çalışmada, kanal içinde farklı açılarda bölmeler kullanarak nanoakışkanların kombine etkisini dinamik ve ısı davranışlarını türbülanslı akış şartlarında incelemişler ve en yüksek termal iyileşme faktörünün, yüksek Reynolds sayısında dik bölmelerin kullanıldığı durumda elde edildiğini belirtmişlerdir.

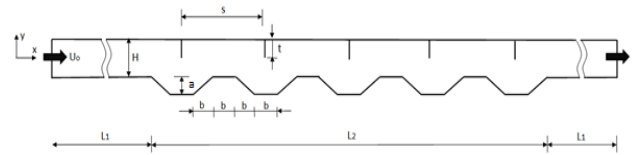
Literatür çalışmasından da anlaşıldığı üzere, farklı geometrilere sahip dalgalı kanallarda, ilave edilen bölmelerin farklı düzenlemelerinde ısı transferine etkisini inceleyen pek çok araştırma bulunmaktadır. Bu çalışmaların temel amacı yüksek

ısı transferi elde ederken basınç düşüşünün de düşük olmasını sağlamaktır. Çok değişik dalgalı kanal geometrisinin bulunması, kanala ilave edilen bölmelerin geometrisi, bölme açısı, akış türü, akışkan yapısı, akışkan sıcaklığı, nanoakışkan parametreleri gibi incelenen parametrelerin oldukça fazla olması, en iyi parametreleri bulma yönünde araştırmaları genişletmiştir. Literatürde üst yüzeyi düz ve bölmeler ilave edilmiş, alt yüzeyi trapez şeklinde dalgalı bir kanal geometrisinin kullanılmadığı tespit edilmiş ve bu geometride bölme yüksekliğinin ve nanoakışkanların akış ve ısı transfer davranışlarını inceleyen herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle bu çalışmada, üst duvarı düz ve içerisine dik bölmeler ilave edilmiş, alt yüzeyi trapez şeklinde dalgalı olan bir kanalda farklı bölme yüksekliğinin ve  $TiO_2$ -su nanoakışkanın ısı transferi ve sürtünme faktörü üzerindeki etkisi laminer akış şartlarında sayısal olarak incelenmiştir.

## 2. Materyal ve Metod

### 2.1. Sayısal Model ve Kullanılan Eşitlikler

Şekil 1'de, çalışmada kullanılan kanalın geometrisi verilmiştir. Kanalın yüksekliği (H), 19 mm, trapez şeklinde dalgalı kanal uzunluğu  $L_2=12H$ , iki bölme arasındaki mesafe  $S=2H$  olarak alınmıştır. Kanal girişinde ve çıkışında,  $L_1=12H$  uzunluğunda ısıtılmamış düz bir bölüm vardır. Kanalın alt yüzeyi toplam 6 adet trapez bölümü içermektedir. Trapez kanalı oluşturan her bir kısmın uzunluğu  $b=H/2$  ve trapez kısmın yüksekliği  $a=H/3$  olarak alınmıştır. İki farklı bölme yüksekliği  $t=H/2$  ve  $t=2H/3$  kullanılmıştır. Bölmeler kanalın üst yüzeyine dik olarak yerleştirilmiş ve sayısal modeldeki diğer geometrik parametreler sabit tutulmuştur. Çözümler, Reynolds sayısının belirli bir aralığı ( $200 \leq Re \leq 1200$ ) için uygulanmıştır.



Şekil 2. Sayısal modelin geometrisi

Kanal içindeki akışkanın sıkıştırılmaz, tek fazlı ve Newtoniyen tip olduğu düşünülmüştür. Akış, daimi, iki boyutlu ve laminer akış şartlarında incelenmiştir. Akışkan olarak,  $TiO_2$  nanopartiküllerin sudaki homojen süspansiyonu kullanılmıştır. Işınımla ısı transferi, yerçekimi ve viskoz terimler ihmal

edilmiştir. Bu kabullere göre kullanılan eşitlikler aşağıda verilmiştir.  
Süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0 \quad (1)$$

Momentum denklemi:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \nabla^2 u_j = 0 \quad (2)$$

Enerji denklemi:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{1}{PrRe} \nabla^2 T = 0 \quad (3)$$

Çalışmada geometrik parametreler dışında kullanılan diğer parametreler, akışkan hızı (Reynolds sayısı,  $Re$ ), partikül hacim oranı ( $\varphi$ ), yüzey sürtünme faktörü ( $f$ ), Nusselt sayısı ( $Nu$ ) ve Termo-hidrolik performans (THP) olarak belirlenmiştir. Bu parametrelere ait eşitlikler aşağıda verilmiştir.  
Reynolds sayısı ( $Re$ ):

$$Re = \frac{\rho u D_h}{\mu} \quad (4)$$

Yerel Nusselt sayısı ( $Nu_x$ ):

$$Nu_x = \frac{h D_h}{k_f} \quad (5)$$

$$q'' = h \Delta T_{lm} \quad (6)$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_i - T_o)}{\ln\left(\frac{T_w - T_i}{T_w - T_o}\right)} \quad (7)$$

Ortalama Nusselt sayısı ( $Nu$ ):

$$Nu = \frac{1}{L} \int_0^L Nu_x dx \quad (8)$$

Burada,  $\rho$  akışkan yoğunluğunu,  $\mu$  dinamik viskoziteyi,  $D_h$  hidrolik yarıçapı,  $k_f$  ise akışkanın ısı iletkenlik katsayısını temsil etmektedir.  $u$  akışkanın ortalama hızını,  $h$  ısı taşınım katsayısını,  $q''$  ısı akısını,  $L$  toplam kanal uzunluğunu ve  $\Delta T_{lm}$  ise logaritmik sıcaklık farkını göstermektedir.  $T_i$ ,  $T_o$  ve  $T_w$  sırasıyla akışkanın kanala giriş sıcaklığını, akışkanın kanal

çıkışındaki ortalama sıcaklığını ve kanalın trapez dalgalı yüzeylerinin sıcaklığını ifade etmektedir.  
Isı transfer performansı ( $\eta$ ):

$$\eta = \frac{Nu_n}{Nu_o} \quad (9)$$

Burada,  $Nu_n$  nanoakışkan için hesaplanan Nusselt sayısını,  $Nu_o$  ise taban akışkan için hesaplanan Nusselt sayısını göstermektedir.

Kanal içerisindeki bölmelerin varlığı nedeniyle ve nanopartiküllere bağlı olarak kanalda önemli basınç düşüşü meydana gelmektedir. Nanoakışkanların viskozitesinin taban akışkana göre yüksek olması nedeniyle ısı transfer iyileştirme çalışmalarında sürtünme faktörüyle birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

Sürtünme faktörü ( $f$ ):

$$f = \frac{2\Delta P D_h}{\rho u^2 L} \quad (10)$$

Burada,  $\Delta P$  kanal giriş ve çıkışındaki basınç farkıdır. Sürtünme faktörüne bağlı olarak boyutsuz sürtünme katsayısı ( $\Gamma$ ) tariflenmiştir.

$$\Gamma = f_n / f_o \quad (11)$$

Burada,  $f_n$  nanoakışkan için hesaplanan sürtünme faktörünü,  $f_o$  ise taban akışkan için hesaplanan sürtünme faktörünü göstermektedir. Isı transfer performansı ve boyutsuz sürtünme faktörüne bağlı olarak termo-hidrolik performans (THP) tanımlanmıştır.

$$THP = \frac{(Nu_n / Nu_o)}{(f_n / f_o)^{1/3}} \quad (12)$$

**Table 1.** TiO<sub>2</sub> nanopartikülün ve suyun termo-fiziksel özellikleri [59]

	Yoğunluk $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Özgül ısı C [J/kgK]	Isıl iletkenlik k [W/mK]	Dinamik viskozite $\mu$ [kg/ms]
Su	997.1	4179	0.613	0.001004
TiO <sub>2</sub>	4250	686.2	8.9538	-

Nanoakışkan olarak TiO<sub>2</sub>-su süspansiyonu kullanılmış olup nanopartikül hacim oranı ( $\varphi=1\%$ ) sabit tutulmuştur. Nanopartiküllerin temel akışkan içine homojen bir şekilde dağıldığı kabul edilmiş ve nanoakışkanların termo-fiziksel özelliklerinden yoğunluk Eşitlik (13) ve özgül ısı Eşitlik (14) ile [57],

ısı iletkenlik Eşitlik (15) ile viskozite Eşitlik (16) ile [58] hesaplanmıştır. Temel akışkan olarak su kullanılmıştır. TiO<sub>2</sub> nanopartikülün ve suyun termofiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir [59].

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_{bf} + \varphi\rho_{pt} \quad (13)$$

$$C_{nf} = (1 - \varphi)C_{bf} + \varphi C_{pt} \quad (14)$$

$$k_{nf} = k_{bf} \frac{[k_{pt} + 2k_{bf} - 2\varphi(k_{bf} - k_{pt})]}{[k_{pt} + 2k_{bf} + \varphi(k_{bf} - k_{pt})]} \quad (15)$$

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} [123\varphi^2 + 7.3\varphi + 1] \quad (16)$$

## 2.2. Sayısal Prosedür

Problemin çözümü için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) tabanlı, FLUENT 15.0 [60] programı kullanılmıştır. Denklemlerin ayrıştırılmasında sonlu hacim yaklaşımı uygulanmıştır. Bu eşitlikler, SIMPLE algoritması kullanılarak çözülmüş ve taşınım ile yayılım terimleri ikinci dereceden ileri fark şeması kullanılarak ayrıştırılmıştır. Yakınsama kriteri olarak süreklilik ve momentum eşitliklerinde  $10^{-4}$ , enerji eşitliği için  $10^{-6}$  alınmıştır.

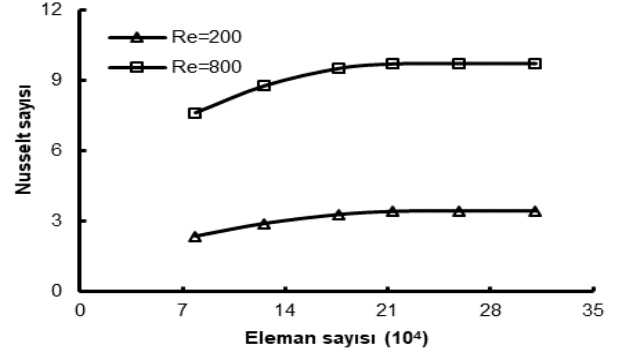
Akışkanın kanala  $T_1=293K$  sıcaklığında girdiği kabul edilmiştir. Kanal girişinde, "hız giriş" sınır şartı, çıkışında ise "dışa akış" sınır şartı tariflenmiştir. Bölmelerin bulunduğu kanalın üst yüzeyleri adyabatik olarak kabul edilmiş, trapez alt yüzeyler ise 360K eş sıcaklığında korunmuştur. Kanalın giriş ve çıkışındaki düz bölümler ile dik bölmeler için kaymaz ve adyabatik duvar sınır şartı uygulanmıştır.

**Tablo 2.** Hücre sayısı ile Nusselt sayısının yüzde değişimi (bölmelerin olmadığı durum için)

Hücre sayısı	Nusselt sayısı (Nu)			
	Re = 200	Değişim (%)	Re = 800	Değişim (%)
78504	2.345	-	7.612	-
125564	2.893	23.36	8.785	15.41
176432	3.274	13.17	9.538	8.57
213664	3.408	4.09	9.731	2.02
258323	3.425	0.50	9.745	0.14
310544	3.427	0.06	9.748	0.03

Sayısal modelin çizimi ve hücelere bölme işlemi Gambit yazılımı ile yapılmıştır. Hücreler, tri/pave ağ yapısı ile oluşturulmuş ve hücre mesafe aralığı 0.3 olarak alınmıştır. Çözümlerin ağ

yapısından bağımsız olduğunu belirlemek için farklı hücre sayılarında çözümler tekrarlanmış ve her bir çözüm için Nusselt sayıları hesaplanmıştır. Bu hesaplamalara göre 213664 hücre sayısından sonra Nusselt sayıları arasındaki farkın %2'den daha küçük olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, 213664 eleman sayısı sayısal modele uyarlanmıştır. Hücre eleman sayısı ile Nusselt sayısının yüzde olarak değişimi Tablo 2'de, eleman sayısı ile Nu değişimi ise Şekil 2 ile gösterilmiştir.



**Şekil 2.** Eleman sayısı ile Nusselt sayısının değişimi (bölmelerin olmadığı durum için)

## 3. Bulgular ve Tartışma

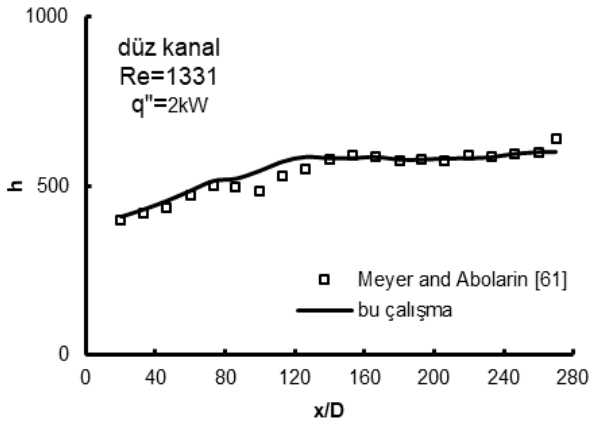
Sayısal çalışmanın geçerliliğini belirlemek için, yapılan çözümler Meyer ve Abolarin [61] tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

**Tablo 3.** Bu çalışmada ve Ref. [61]'de  $x/D$  mesafesi ile  $h$ , ısı taşınım katsayısının ( $W/m^2K$ ) değişimi

$x/D$	$h$ , ısı transfer katsayısı, Ref. [61]	$h$ , ısı transfer katsayısı, Bu çalışma	% fark
20	402	407	1,2285
33	421	429	1,8648
46	435	454	4,1850
60	472	485	2,6804
73	504	514	1,9455
86	495	521	4,9904
100	485	545	11,0092
113	532	572	6,9930
126	552	586	5,8020
140	580	582	0,3436
153	591	582	-1,5464
166	585	586	0,1706
180	575	578	0,5190
193	581	578	-0,5190
206	576	581	0,8606
220	590	582	-1,3746
233	585	585	0,0000
246	595	595	0,0000
260	600	600	0,0000
270	640	601	-6,4892

Bunun için,  $D_h=19\text{mm}$  çapında ve yüzeylerine  $q'' = 2\text{kW}$  sabit ısı akışı uygulanmış düz bir kanalda  $Re=1331$  değeri için kanal boyunca  $x/D$  mesafeleri ile  $h$ , ısı taşınım katsayıları hesaplanmıştır. Literatüre ait deneysel sonuçlar ile bu çalışmaya ait sayısal sonuçlar, Tablo 3'te verilmiş olup, her iki çalışma sonuçları arasındaki uyum Şekil 3'te gösterilmiştir.

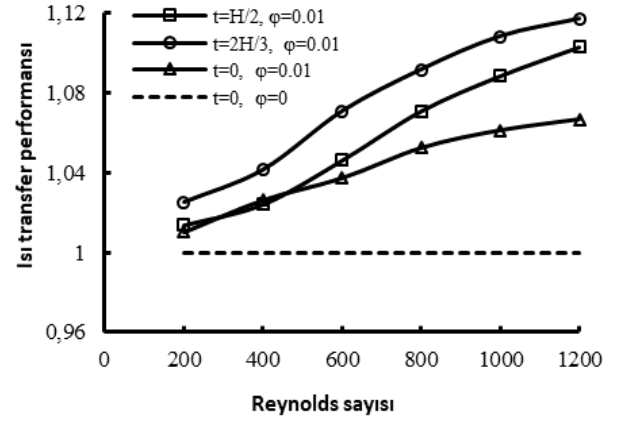
Bu bölümde, içerisinde dik bölmeler bulunan bir kanalda nanoakışkanın akış ve ısı transfer mekanizması üzerindeki etkileri farklı parametreler için incelenmiştir. Nanopartikül hacim oranı  $\phi=0.01$  olarak sabit tutulmuş ve Reynolds sayısı ( $Re$ ) değiştirilmiştir. Kanal içerisinde iki farklı bölme yüksekliği ile bölmelerin olmadığı durumda hem nanoakışkan akışı hem de taban akışkan için Nusselt sayısı, boyutsuz sürtünme faktörü ve termo-hidrolik performans değerleri hesaplanmıştır.



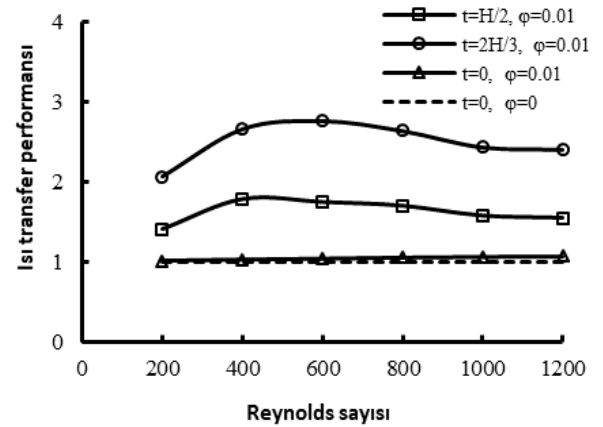
Şekil 3. Sayısal çözümün geçerliliği

Şekil 4a'da bölmesiz ve iki farklı bölme yüksekliğine sahip kanal için  $\text{TiO}_2$ -su nanoakışkanın taban akışkana göre  $Re$  ile ısı transfer performansının değişimi verilmiştir. Bölmesiz kanal ve taban akışkan akışı ( $t=0$  ve  $\phi=0$ ) referans olarak gösterilmiştir. Her durum aynı geometrideki taban akışkan ile oranlanarak ısı transfer performansı hesaplanmıştır. Burada bölmeli kanaldaki nanoakışkan akışının, bölmeli kanaldaki taban akışkana göre ısı transferi incelenmiştir. Şekil 4a'dan  $Re$  arttıkça ısı transfer performansının da arttığı görülmektedir. Düşük  $Re$ 'de ( $Re \leq 500$ ) bölmesiz kanal ve  $t=H/2$  bölme yüksekliğindeki kanal için birbirine yakın ısı transfer performansı elde edilirken en yüksek ısı transfer performansı  $Re=1200$  için  $t=2H/3$  bölme yüksekliğinde yaklaşık 1,12 olarak elde edilmiştir. Şekil 4b'de bölmesiz ve iki farklı bölme yüksekliğine sahip kanal için  $\text{TiO}_2$  nanoakışkanın bölmesiz kanal için taban akışkana göre  $Re$  ile ısı transfer performansının değişimi verilmiştir. Bölmesiz kanal ve taban akışkan akışı ( $t=0$  ve  $\phi=0$ ) referans olarak gösterilmiştir. Her durum için bölmesiz kanaldaki

taban akışkan akışı ile oranlanarak ısı transfer performansı hesaplanmıştır. Burada hem nanoakışkan akışının ve hem de bölmelerin varlığının ısı transferine etkileri araştırılmıştır. Şekil 4b'den  $Re$  arttıkça ısı transfer performansının yaklaşık  $Re=600$ 'e kadar arttığı, daha sonra hafif bir azalma eğilimi gösterdiği görülmektedir. Kanal içinde bölmelerin varlığı, bölmesiz duruma göre ısı transferini oldukça iyileştirdiği, bölme yüksekliği arttıkça ısı transfer performansının da arttığı gözlenmektedir. En yüksek ısı transfer performansı  $Re=400$  için  $t=2H/3$  bölme yüksekliğinde yaklaşık 2,66 olarak elde edilmiştir. Şekil 4a ve 4b'den ısı transfer iyileşmesinde nanoakışkandan ziyade bölmelerin varlığının daha etkili olduğu tespit edilmiştir.



a



b

Şekil 4. Nonakışkanların ısı transfer performansı, a) Bölmeli kanalda taban akışkan referans alındığında, b) Bölmesiz kanalda taban akışkan referans alındığında

Şekil 5a'da bölmesiz ve iki farklı bölme yüksekliğine sahip kanal için  $\text{TiO}_2$ -su nanoakışkanın, taban akışkana göre Reynolds sayısı ile boyutsuz sürtünme faktörünün değişimi verilmiştir. Bölmesiz kanal ve taban akışkan akışı ( $t=0$  ve  $\phi=0$ ) referans

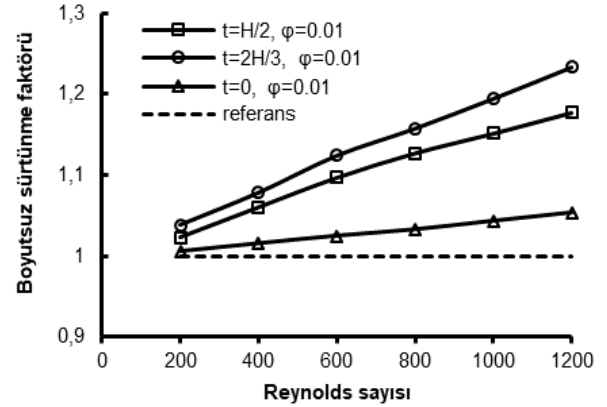
olarak gösterilmiştir. Her durum, bölmesiz kanalda taban akışkan ile oranlanarak sürtünme faktörü hesaplanmıştır. Burada nanoakışkan akışının boyutsuz sürtünme faktörüne etkileri incelenmiştir. Şekil 4a'dan Reynolds sayısı arttıkça sürtünme faktörünün de arttığı görülmektedir. En yüksek boyutsuz sürtünme faktörü  $Re=1200$  için  $t=2H/3$  bölme yüksekliğinde yaklaşık 1.26 olarak elde edilmiştir.

Şekil 5b'de bölmesiz ve iki farklı bölme yüksekliğine sahip kanal için  $TiO_2$ -su nanoakışkanın bölmesiz kanal için taban akışkana göre Reynolds sayısı ile sürtünme faktörünün değişimi verilmiştir. Her durum, bölmesiz kanaldaki taban akışkan akışı ile oranlanarak boyutsuz sürtünme faktörü hesaplanmıştır. Burada hem nanoakışkan akışının ve hem de bölmelerin sürtünme faktörüne olan etkileri araştırılmıştır.

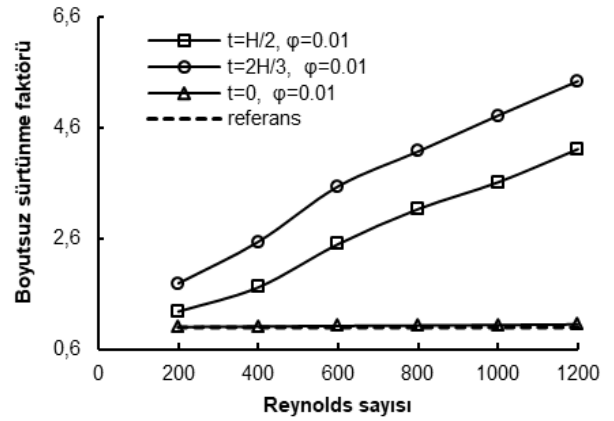
Şekil 5b'den Reynolds sayısı ve bölme yüksekliği arttıkça sürtünme faktörünün arttığı görülmektedir. Kanal içinde bölmeler ve nanoakışkan, bölmesiz duruma göre sürtünme değerini oldukça artırmaktadır. En yüksek sürtünme faktörü  $Re=1200$  için  $t=2H/3$  bölme yüksekliğinde yaklaşık 5,43 olarak elde edilmiştir. Şekil 5a ve 5b'den nanoakışkanın sürtünme faktörünü kabul edilebilir bir miktarda artırdığı, kanal içerisindeki bölmelerin ise çok daha fazla basınç düşüşüne neden olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 6a'da bölmesiz ve iki farklı bölme yüksekliğine sahip kanal için  $TiO_2$ -su nanoakışkanın taban akışkana göre Reynolds sayısı ile THP değişimi gösterilmiştir. Bölmesiz kanal ve taban akışkan akışı ( $t=0$  ve  $\varphi=0$ ) referans olarak alınmıştır. Her durum aynı geometrideki taban akışkan ile oranlanarak THP elde edilmiştir. Burada nanoakışkan akışının THP'a etkileri araştırılmıştır. Şekil 6a'dan Reynolds sayısı arttıkça THP değerinin de arttığı görülmektedir. Bütün THP değerleri referans değerinin üzerinde elde edilmiştir. Bu da kanal içerisindeki sürtünmeye rağmen ısı transferinin önemli derecede iyileştiğini göstermektedir. Bölmesiz kanalda nanoakışkan akışında ( $t=0$  ve  $\varphi=0.01$ ) THP eğrisi, en yüksek bölme uzunluğundaki nanoakışkan akışında ( $t=2H/3$  ve  $\varphi=0.01$ ) elde edilen THP eğrisi ile oldukça benzer olduğu görülmüştür. Bunun nedeni  $t=0$  ve  $\varphi=0.01$  durumuna göre  $t=2H/3$  ve  $\varphi=0.01$  durumu için kanal içerisindeki basınç düşüşünün çok daha yüksek olmasıdır. Şekil 6b'de bölmesiz ve iki farklı bölme yüksekliğine sahip kanal için  $TiO_2$ -su nanoakışkanın bölmesiz kanal için taban akışkana göre Reynolds sayısı ile THP değişimi verilmiştir. Her durum için bölmesiz kanaldaki taban akışkan akışı ile oranlanarak THP değerleri elde edilmiştir. Burada

hem nanoakışkan akışının ve hem de bölmelerin, THP'a etkileri araştırılmıştır.



a



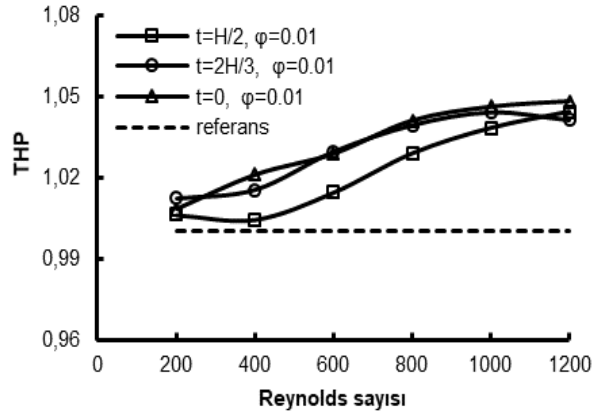
b

Şekil 5. Nanoakışkanların sürtünme faktörü,

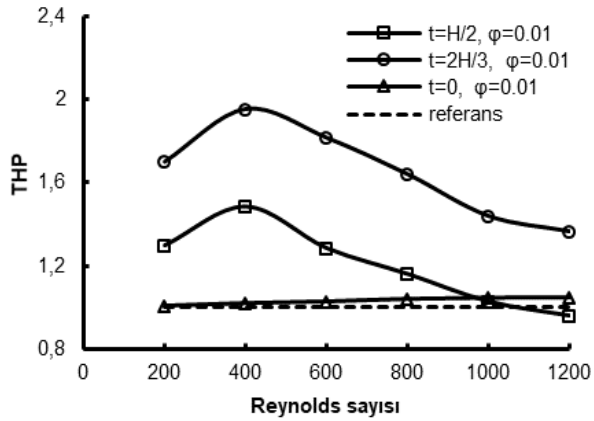
- a) Bölmeli kanalda taban akışkan referans alındığında,  
b) Bölmesiz kanalda taban akışkan referans alındığında

Şekil 6b'den  $Re=400$  değerine kadar, bölme yüksekliği arttıkça THP değeri artmaktadır.  $Re=400$  değerinden sonra her iki bölme yüksekliği için THP eğrisi hızlı bir şekilde düşmektedir.  $Re \geq 1000$  değerinden sonra  $t=H/2$  bölme yüksekliğinde THP eğrisi referans değerinin altına düşmektedir. En yüksek THP,  $Re=400$  ve  $t=2H/3$  bölme yüksekliğinde yaklaşık 1,95 olarak elde edilmiştir. Trapez kanalda nanoakışkanların ve bölmelerin varlığı, THP değerini bölmesiz kanaldaki taban akışkana göre oldukça artırmaktadır.

Trapez kanaldaki akış ve ısı transfer mekanizmasına farklı yükseklikteki bölmelerin etkilerini gözlemleyebilmek için çeşitli parametrelerde, kanalda hız ve sıcaklık dağılımları elde edilmiştir.



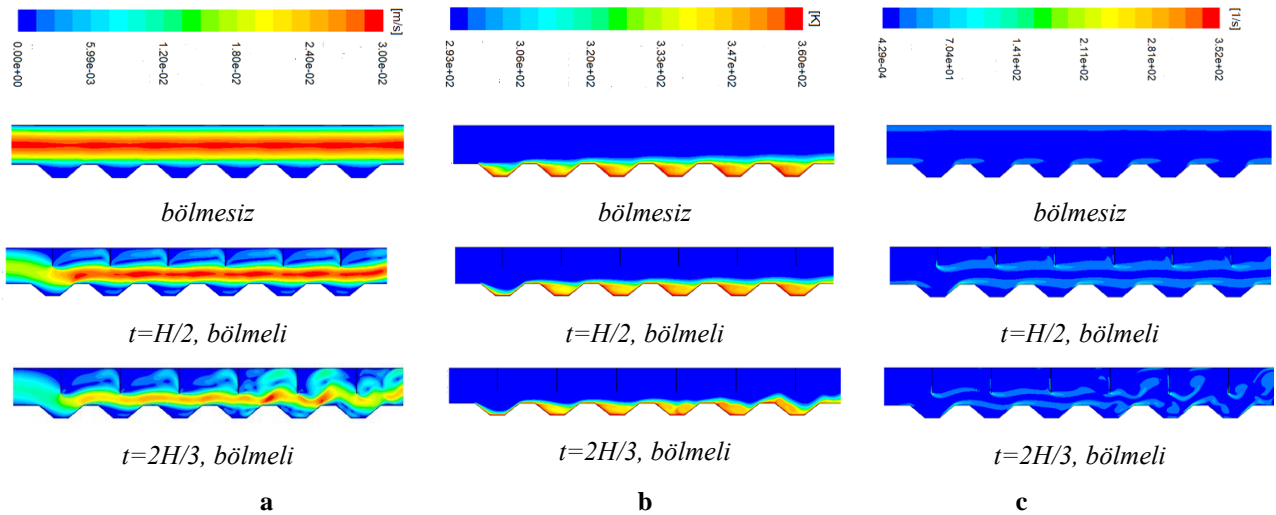
a



b

Şekil 6. Taban akışkana göre nanoakışkanların THP, a) Bölmeli kanalda, b) Bölmesiz kanalda

Şekil 7 ile  $Re=400$  ve taban akışkan için bölmesiz ve iki farklı bölme yüksekliğinde hız görüntüleri (a), sıcaklık dağılımları (b) ve vorteks yapıları (c) gösterilmiştir. Şekil 7a'dan kanal içerisindeki bölmelerin trapez şeklindeki bir kanalda akış yapısını önemli derecede etkilediği gözlenmektedir. Trapez bir kanalda bölmelerin varlığı, akış salınımlarına neden olmaktadır. Bölmelerin yüksekliği arttıkça akış salınımları da artmaktadır. Ayrıca her bölme arasında ikincil akış döngülerinin oluştuğu ve bu döngülerin bölme yüksekliğine bağlı olarak arttığı görülmektedir. İkincil akış yapıları, akış karışımında önemli bir etkiye sahiptir. Akış karışımı ne kadar homojen olursa ısı transfer hızı da o derece artacaktır. Kanal içerisindeki bölmeler laminar alt tabakayı kırarak ısı direnci azaltmaya yardımcı olmaktadır. Her bölmeden sonra bu durum periyodik olarak tekrar ettiği için akışın homojen bir şekilde karışımını sağlamaktadır. Kanal yüzeyine yakın sıcak akışkanın daha soğuk akışkan ile teması, ısı transfer performansını da iyileştirecektir. Şekil 7b'de bölme yüksekliğinin sıcaklık dağılımı üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Yüksek sıcaklığa sahip trapez yüzeylerde, bölme yüksekliği arttıkça yüzey sıcaklığının azaldığı görülmektedir. Şekil 7c'de ise bölmesiz ve farklı bölme yükseklikleri için kanal içerisinde oluşan vorteks yapıları verilmiştir. Bölme yüksekliği arttıkça akış içerisinde kopmalar meydana geldiği ve girdap yapılarının arttığı görülmektedir.



Şekil 7.  $Re=400$ 'de taban akışkan için bölmesiz,  $t=H/2$  ve  $t=2H/3$  bölmeli trapez oluklu kanal görüntüleri, a) hız görüntüleri, b) sıcaklık dağılımları, c) vorteks yapıları



#### 4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, içerisinde dik bölmeler bulunan trapez bir kanalda farklı bölme yüksekliğinin  $TiO_2$ -su nanoakışkan ve taban akışkan akışında ısı transferine etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Akış ve ısı transferi üzerinde, bölme yüksekliğinin, nanoakışkanın ve Reynolds sayısının etkileri analiz edilmiştir.

Sayısal çalışmada elde edilen önemli sonuçlar aşağıda listelenmiştir:

- Akış yapısının ve sıcaklık alanlarının, kanal geometrisinden, nanoakışkandan ve Reynolds sayısından oldukça etkilendiği gösterilmiştir.
- Bölme yüksekliği arttıkça kanal içinde akış salınımları ve ikincil akış döngülerinin arttığı gözlemlenmiştir.
- Re ve bölme yüksekliğinin artmasıyla ısı transfer performansının önemli derecede arttığı, ancak sürtünme faktörünün de arttığı görülmüştür.
- Bölmesiz kanalda taban akışkana göre, en yüksek ısı transfer performansı  $Re=400$

değeri ve  $t=2H/3$  bölme yüksekliği için nanoakışkan akışında yaklaşık 2.66 olarak elde edilmiştir.

- En yüksek sürtünme faktörü  $Re=1200$  ve  $t=2H/3$  bölme yüksekliği için nanoakışkan akışında yaklaşık 5.43 bulunmuştur.
- En iyi termo-hidrolik performans  $Re=400$  ve  $t=2H/3$  bölme yüksekliği için nanoakışkan akışında yaklaşık 1,95 olarak elde edilmiştir.

Öneriler: Kanal içerisindeki bölmelerin açısı, bölmeler arası mesafeler, akışkan hızı ve kanal geometrisi değiştirilerek farklı nanoakışkanlar ve değişen partikül hacim oranları için yeni çalışmalar yapılabilir ve bu parametrelerin akış ve ısı transferine etkileri araştırılabilir. Ayrıca, yapılan sayısal çalışma sonuçları, ileride yapılacak deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılabilir.

#### Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur

#### Kaynaklar

- [1] Y. G. Lei, Y. L. He, R. Li, and Y. F. Gao, "Effects of baffle inclination angle on flow and heat transfer of a heat exchanger with helical baffles," *Chem. Eng. Process*, vol. 47, no. 12, pp. 2336–2345, November 2008. doi: 10.1016/j.cep.2008.01.012
- [2] O. Keklikcioglu and V. Ozceyhan, "Thermohydraulic performance evaluation for horizontal tube by using combination of modified coiled wire inserts and graphene nanoplatelet-water nanofluids," *Int. Commun. Heat and Mass Transfer*, vol. 123, Art. no. 105206, April 2021. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105206
- [3] U. Akdag, S. Akçay, and D. Demiral, "Heat transfer enhancement with laminar pulsating nanofluid flow in a wavy channel," *Int. Commun. Heat and Mass Transfer*, vol. 59, pp. 17–23, December 2014. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.10.008
- [4] S. Skullong, P. Promvong, C. Thianpong, and M. Pimsarn, "Thermal performance in solar air heater channel with combined wavy-groove and perforated-delta wing vortex generators," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 100, pp. 611–620, May 2016. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.01.107
- [5] U. Akdag, S. Akçay, and D. Demiral, "Heat transfer enhancement with nanofluids under laminar pulsating flow in a trapezoidal-corrugated channel," *Progress in Computational Fluid Dynamics, An International Journal*, vol. 17, no. 5, pp. 302-312, September 2017.
- [6] R. Kumar, V. Goel, and A. Kumar, "Investigation of heat transfer augmentation and friction factor in triangular duct solar air heater due to forward facing chamfered rectangular ribs: A CFD based analysis," *Renew Energy*, vol. 115, pp. 824–835, January 2018. doi: 10.1016/j.renene.2017.09.010
- [7] M. E. Nakhchi, "Experimental optimization of geometrical parameters on heat transfer and pressure drop inside sinusoidal wavy channels," *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 9, pp. 121–31, March 2019. doi: 10.1016/j.tsep.2018.11.006
- [8] A. Kaood and M. A. Hassan, "Thermo-hydraulic performance of nanofluids flow in various internally corrugated tubes," *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, vol. 154, Art. no. 08043, August 2020. doi: 10.1016/j.cep.2020.108043

- [9] Z. Li and Y. Gao, “Numerical study of turbulent flow and heat transfer in cross corrugated triangular ducts with delta-shaped baffles,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 108, pp. 658–670, May 2017. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.12.054
- [10] R. Karwa and B. K. Maheshwari, “Heat transfer and friction in an asymmetrically heated rectangular duct with half and fully perforated baffles at different pitches,” *Int. Commun. Heat and Mass Transfer*, vol. 36, pp. 264–268, March 2009. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2008.11.005
- [11] S. Sripattanapipat and P. Promvonge, “Numerical analysis of laminar heat transfer in a channel with diamond-shaped baffles,” *Int. Commun. Heat and Mass Transfer*, vol. 36, no. 1, pp. 32-38, January 2009. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2008.09.008
- [12] S. Kwankaomeng and P. Promvonge, “Numerical prediction on laminar heat transfer in square duct with 30° angled baffle on one wall,” *Int. Commun. Heat and Mass Transfer*, vol. 37, pp. 857-866, August 2010. doi:10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.05.005
- [13] K. Nanan, N. Piriyaungrod, C. Thianpong, K. Wongcharee, S. Eiamsa-ard, “Numerical and experimental investigations of heat transfer enhancement in circular tubes with transverse twisted-baffles,” *Heat Mass Transfer*, vol. 52, pp. 2177–2192, October 2016. doi:10.1007/s00231-015-1728-7
- [14] O. Keklikcioglu and V. Ozceyhan, “Experimental investigation on heat transfer enhancement of a tube with coiled-wire inserts installed with a separation from the tube wall,” *Int. Commun. Heat and Mass Transfer*, vol. 78, pp. 88-94, November 2016. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.08.024
- [15] P. Sriromreun, “Numerical study on heat transfer enhancement in a rectangular duct with incline shaped baffles,” *Chem. Eng. Trans.*, vol. 57, pp. 1243–1248, 2017. doi: 10.3303/CET1757208
- [16] F. Menasria, M. Zedairia, and A. Moumami, “Numerical study of thermohydraulic performance of solar air heater duct equipped with novel continuous rectangular baffles with high aspect ratio,” *Energy*, vol. 133, pp. 593-608, August 2017. doi: 10.1016/j.energy.2017.05.002
- [17] S. Akçay and U. Akdag, “Parametric investigation of effect on heat transfer of pulsating flow of nanofluids in a tube using circular rings,” *Pamukkale University, Journal of Engineering Sciences*, vol. 24, no. 4, pp. 597-604, 2018. doi: 10.5505/pajes.2017.70120
- [18] S. Z. Tang, F. L. Wang, Y. L. He, Y. Yu and Z. X. Tong, “parametric optimization of H-type finned tube with longitudinal vortex generators by response surface model and genetic algorithm,” *Appl. Energy*, vol. 239, pp. 908–918, April 2019. doi: 10.1016/j.apenergy.2019.01.122
- [19] J. A. Modi and M. K. Rathod, “Comparative study of heat transfer enhancement and pressure drop for fin-and-circular tube compact heat exchangers with sinusoidal wavy and elliptical curved rectangular winglet vortex generator,” *Int. J. Heat and Mass Transfer*, vol. 141, pp. 310-326, October 2019. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.06.088
- [20] N. T. Luan and N. M. Phu, “Thermohydraulic correlations and exergy analysis of a solar air heater duct with inclined baffles,” *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 21, Art. no. 100672, October 2020. doi: 10.1016/j.csite.2020.100672
- [21] C. E. Bensaci et al., “Numerical and experimental study of the heat transfer and hydraulic performance of solar air heaters with different baffle positions,” *Renew Energy*, vol. 155, pp. 1231–1244, August 2020. doi: 10.1016/j.renene.2020.04.017
- [22] D. Wang et al., “Evaluation of the performance of an improved solar air heater with “S” shaped ribs with gap,” *Sol. Energy*, vol. 195, pp. 89–101, January 2020. doi: 10.1016/j.solener.2019.11.034
- [23] P. Promvonge, P. Promthaisong, and S. Skullong, “Experimental and numerical heat transfer study of turbulent tube flow through discrete V-winglets,” *Int. J. Heat and Mass Transfer*, vol. 151, Art. no. 119351, April 2020. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119351
- [24] P. Promvonge and S. Skullong, “Thermo-hydraulic performance in heat exchanger tube with V-shaped winglet vortex generator,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 164, Art. no. 114424, January 2020. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114424
- [25] Z. Sun, K. Zhang, W. Li, Q. Chen, and N. Zheng, “Investigations of the turbulent thermal-hydraulic performance in circular heat exchanger tubes with multiple rectangular winglet vortex generators,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 168, Art. no. 114838, March 2020. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114838
- [26] M. E. Nakhchi, M. Hatami, and M. Rahmati, “Experimental investigation of performance improvement of double-pipe heat exchangers with novel perforated elliptic turbulators,” *Int. J. Thermal Science*, vol. 168, Art. no. 107057, October 2021. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2021.107057

- [27] H. Xiao, P. Liu, Z. Liu, and W. Liu, "Performance analyses in parabolic trough collectors by inserting novel inclined curved-twisted baffles," *Renewable Energy*, vol. 165, pp. 14-27, March 2021. doi: 10.1016/j.renene.2020.11.068
- [28] S. W. Chang and T.H. Cheng, "Thermal performance of channel flow with detached and attached pin-fins of hybrid shapes under inlet flow pulsation," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, vol. 164, Art. no. 120554, January 2021. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120554
- [29] G. Surendhar, G. Srinivasan, P. Muthukumar, and S. Senthilmurugan, "Performance analysis of arc rib fin embedded in a solar air heater," *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 23, Art. no. 100891, June 2021. doi: 10.1016/j.tsep.2021.100891
- [30] P. Sriromreun, C. Thianpong, and P. Promvong, "Experimental and numerical study on heat transfer enhancement in a channel with Z-shaped baffles," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 39, no. 7, pp. 945-952, August 2012. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.05.016
- [31] O. Turgut and E. Kızıllırmak, "Effects of Reynolds number, baffle angle, and baffle distance on 3-D turbulent flow and heat transfer in a circular pipe," *Thermal Science*, vol. 19, no. 5, pp. 1633-1648, 2015. doi:10.2298/TSCII21011045T
- [32] P. Promvong, S. Tamna, M. Pimsarn, and C. Thianpong, "Thermal characterization in a circular tube fitted with inclined horseshoe baffles," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 75, pp. 1147-1155, January 2015. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.10.045
- [33] R. Kumar, A. Kumar, R. Chauhan, and M. Sethi, "Heat transfer enhancement in solar air channel with broken multiple V-type baffle," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 8, pp. 187-197, September 2016. doi: 10.1016/j.csite.2016.07.001
- [34] D. Sahel, H. Ameer, R. Benzeguir, and Y. Kamla, "Enhancement of heat transfer in a rectangular channel with perforated baffles," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 101, pp. 156-164, May 2016. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.02.136
- [35] D. E. Alnak, "Thermohydraulic performance study of different square baffle angles in cross-corrugated channel," *Journal of Energy Storage*, vol. 28, Art. no. 101295, April 2020. doi: 10.1016/j.est.2020.101295
- [36] K. Karabulut, "Heat Transfer and pressure drop evaluation of different triangular baffle placement angles in cross-corrugated triangular channels," *Thermal Science*, vol. 24, no. 1A, pp. 355-365, 2020. doi:10.2298/TSCII90813466K
- [37] H. Olfian, A. Z. Sheshpoli, and S. S. M. Ajarostaghi, "Numerical evaluation of the thermal performance of a solar air heater equipped with two different types of baffles," *Heat Transfer*, vol. 49, pp. 1149-1169, May 2020. doi:10.1002/htj.21656
- [38] S. Saha, "Numerical study of air-flow phenomena through a baffled rectangular micro-channel," *Journal of Modeling and Optimization*, vol. 13, no. 2, pp. 51-57, 2021. doi:10.32732/jmo.2021.13.2.51
- [39] M. A. El Habet, S. A. Ahmed, and M. A. Saleh "Thermal/hydraulic characteristics of a rectangular channel with inline/staggered perforated baffles," *Int. Comm. Heat Mass Transf.*, vol. 128, Art. no. 105591, Nov. 2021. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105591
- [40] J. E. Salhi, T. Zarrouk, and N. Salhi, "numerical study of the thermo-energy of a tubular heat exchanger with longitudinal baffles," *Materials Today: Proceedings*, vol. 45, no. 8, pp. 7306-7313, 2021. doi: 10.1016/j.matpr.2020.12.1213
- [41] M. V. Bidari, P. B. Nagaraj, and G. Lalagi, "Influence of different types of vortex generators (VGs) to enhance heat transfer performance in heat exchangers: A Review," *Int. J. Ambient Energy*, Oct. 2021, doi.org/10.1080/01430750.2021.1980740.
- [42] N. M. Phu, P. B. Thao, and N.V. Hap, "Effective efficiency assessment of a solar air heater having baffles spaced with different successive ratios," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 28, Art. no 101486, Dec. 2021. doi: 10.1016/j.csite.2021.101486
- [43] M. Chandrasekar, S. Suresh, and A. C. Bose, "Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid in a circular pipe under laminar flow with wire coil inserts," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 34, no. 2, pp. 122-30, Feb. 2010. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2009.10.001
- [44] G. Humnic and A. Humnic, "Heat transfer and flow characteristics of conventional fluids and nanofluids in curved tubes: A Review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 58, pp. 1327-1347, May 2016. doi: 10.1016/j.rser.2015.12.230

- [45] H. Fazeli, S. Madani, and P. R. Mashaei, “Nanofluid forced convection in entrance region of a baffled channel considering nanoparticle migration,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 106, pp. 293–306, August 2016. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.06.010
- [46] S. Akçay, “Numerical analysis of heat transfer improvement for pulsating flow in a periodic corrugated channel with discrete V-type winglets,” *Int. Commun. Heat and Mass Transfer*, vol. 134, Art. no. 105991, May 2022. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.105991
- [47] C. Qi, Y. L. Wan, C. Y. Li, D. T. Han, and Z. H. Rao, “Experimental and numerical research on the flow and heat transfer characteristics of TiO<sub>2</sub>-water nanofluids in a corrugated tube,” *Int. J. Heat and Mass Transfer*, vol. 115, pp. 1072–1084, Dec. 2017. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.08.098
- [48] S. Akçay, “Numerical analysis of hydraulic and thermal performance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluid in a zigzag channel with central winglets,” *Gazi University Journal of Science*, vol. 36, no.2, 2023, (in press), DOI: 10.35378/gujs.1012201.
- [49] S. Rashidi, M. Eskandarian, O. Mahian, and S. Poncet, “Combination of nanofluid and inserts for heat transfer enhancement, gaps and challenges,” *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 135, pp. 437–460, January 2019. doi:10.1007/s10973-018-7070-9
- [50] S. Mei, C. Qi, T. Luo, X. Zhai, and Y. Yan, “Effects of magnetic field on thermo-hydraulic performance of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-water nanofluids in a corrugated tube,” *Int. J. Heat and Mass Transfer*, vol. 128, pp. 24–45, January 2019. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.08.071
- [51] S. H. H. Karouei, S.S.M. Ajarostaghi, M.G. Bandpy, and S.R.H. Fard, “Laminar heat transfer and fluid flow of two various hybrid nanofluids in a helical double pipe heat exchanger equipped with an innovative curved conical turbulator,” *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 143, pp. 1455–1466, January 2021. doi:10.1007/s10973-020-09425-0
- [52] A. Heshmati, H. A. Mohammed, and A. N. Darus, “Mixed convection heat transfer of nanofluids over backward facing step having a slotted baffle,” *Applied Mathematics and Computation*, vol. 240, pp. 368–386, August 2014. doi.org/10.1016/j.amc.2014.04.058
- [53] R. K. Ajeel, K. Sopian, and R. Zulkifli, “Thermal-hydraulic performance and design parameters in a curved-corrugated channel with L-shaped baffles and nanofluid,” *Journal of Energy Storage*, vol. 34, Art. no. 101996, Feb. 2021. doi: 10.1016/j.est.2020.101996
- [54] N. M. Phu, P.B. Thao, and D.C. Truyen, “Heat and fluid flow characteristics of nanofluid in a channel baffled opposite to the heated wall,” *CFD Letters*, vol. 13, no. 1, pp. 33-44, January 2021. doi:10.37934/cfdl.13.1.3344
- [55] O. Manca, S. Nardini, and D. Ricci, “A Numerical study of nanofluid forced convection in ribbed channels,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 37, pp. 280-297, May 2012. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2011.11.030
- [56] Menni et al., “Enhancement of the turbulent convective heat transfer in channels through the baffling technique and oil/multiwalled carbon nanotube nanofluids,” *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, vol. 79, no. 4, pp. 311-351, Published online: 08 Dec 2020. doi.org/10.1080/10407782.2020.1842846
- [57] B. Pak and Y. I. Cho, “Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles,” *Exp. Heat Transfer*, vol. 11, no. 2, pp. 151–170, 1998. doi:10.1080/08916159808946559
- [58] S. Kakac and A. Pramuanjaroenkij, “Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids,” *Int. J. Heat and Mass Transfer*, vol. 52, pp. 3187–3196, June 2009. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.02.006
- [59] E. Abu-Nada, Z. Masoud, and A. Hijazi, “Natural convection heat transfer enhancement in horizontal concentric annuli using nanofluids,” *Int. Commun. Heat and Mass Transfer*, vol. 35, no. 5, pp. 657-665, May 2008. doi:10.1016/j.icheatmasstransfer.2007.11.004
- [60] ANSYS Inc. *ANSYS Fluent User Guide & Theory Guide- Release 15.0*. USA, 2015.
- [61] J. P. Meyer and S. M. Abolarin, “Heat transfer and pressure drop in the transitional flow regime for a smooth circular tube with twisted tape inserts and a square-edged inlet,” *Int. J. Heat and Mass Transfer*, vol. 117, pp. 11-29, Feb. 2018. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.09.103