



EĞİK KARE KAPALI BİR BÖLGE İÇİNDEKİ SU BAZLI NANOAKIŞKANLARIN DOĞAL TAŞINIMLA ISI TRANSFERİ

Elif BÜYÜK ÖĞÜT

Kocaeli Üniversitesi, Gebze Meslek Yüksekokulu, Teknik Programlar Bölümü,
41420 Gebze, Kocaelie, elif.ogut@kocaeli.edu.tr

(Geliş Tarihi: 02. 03. 2009, Kabul Tarihi: 04. 08. 2009)

Özet: Bu çalışmada, komşu duvarları farklı şekilde ısıtılmış, diğer duvarların yalıtılmış olduğu eğik kare kapalı bir bölge içindeki su bazlı nanoakışkanların daimi, laminer doğal taşınım akışı nümerik olarak incelenmiştir. Boussinesq yaklaşımı altındaki yönetici denklemler polinoma dayalı diferansiyel kuadratur (PDQ) yöntemi kullanılarak nümerik olarak çözülmüştür. Hesaplamalarda yönetici parametrelerden Rayleigh sayısı 10^4 - 10^6 aralığında alınmış olup, kapalı bölgenin eğim açısı ise $0^\circ \leq \phi \leq 120^\circ$ olarak seçilmiştir. Çalışmada katı partiküllerin hacim fraksiyonunun $0 \leq \phi \leq 0.20$ aralığındaki değerleri göz önüne alınmıştır. Sıvı tabaka kalınlığının orijinal partikül yarıçapına oranı 0.1'dir. Nanopartikül olarak Cu, Ag ve Al_2O_3 seçilmiştir. Sonuçlar Rayleigh sayısı, eğim açısı ve katı hacim fraksiyonunun akış ve ısı transferi üzerinde önemli etkilere sahip olduğunu göstermektedir. Nanopartiküllerin hacimsel fraksiyonunun artırılmasıyla ısı transferinde önemli artışlar söz konusu olmaktadır. Rayleigh sayısının artmasıyla sirkülasyon şiddetlenmekte ve ısı transferi miktarının artmasına sebep olmaktadır. Kapalı bölgenin eğim açısı da ısı transfer miktarını önemli oranlarda etkilemektedir.

Anahtar Kelimeler: Doğal taşınım, Nanoakışkan, Eğik kare kapalı bölge, PDQ metod.

HEAT TRANSFER OF WATER-BASED NANOFLUIDS WITH NATURAL CONVECTION IN A INCLINED SQUARE ENCLOSURE

Abstract: Steady, laminar natural convection flow of water-based nanofluids in an inclined square enclosure where adjacent walls heated differently, while other walls are adiabatic is investigated numerically in this study. The governing equations based Boussinesq approach are solved numerically using the polynomial differential quadrature (PDQ) method. In calculations, Rayleigh number is chosen as 10^4 - 10^6 , inclination angle $0^\circ \leq \phi \leq 120^\circ$. Where values in the interval of $0 \leq \phi \leq 0.20$ for volume fraction of solid particles are considered. Rate of liquid layer thickness to radius of original solid particle is 0.1. Three types of nanoparticles, Cu, Ag, Al_2O_3 are taken into consideration. The results show that the Rayleigh number, inclined angle and solid volume fraction has significant effects on flow and heat transfer. As the nanoparticle volume fraction is increased, heat transfer enhances considerable amount. With an increase in the Rayleigh number, convection intensity increases, and therefore, heat transfer shows an increasing trend. Inclined angle of enclosure also affects heat transfer quantity significantly.

Keywords: Natural convection, Nanofluid, Inclined square enclosure, PDQ method.

SEMBOLLER

c_p	sabit basınçtaki özgül ısı
g	yerçekimi ivmesi
Gr	Grashof sayısı
k	ısı iletim katsayısı
L	kapalı bölgenin uzunluğu
Nu	Nusselt sayısı
p	basınç
Pr	Prandtl sayısı
Ra	Rayleigh sayısı
T	sıcaklık
u	x yönündeki hız bileşeni
v	y yönündeki hız bileşeni
x	yatay yöndeki koordinat
y	düşey yöndeki koordinat

Greek semboller

α	ısı yayılım katsayısı
η	sıvı tabaka kalınlığının orijinal partikül yarıçapına oranı
β	ısı genleşme katsayısı
ξ	yüzeye dik dışa doğru koordinat
μ	mutlak viskozite
ν	kinematik viskozite
ρ	yoğunluk
ϕ	katı hacim fraksiyonu
φ	kapalı bölgenin eğim açısı
ψ	boyutsuz akım fonksiyonu
ω	girdap

Üst indisler

* boyutlu değişken

Alt indisler

c soğuk
eff efektif
h sıcak
f akışkan
nf nanoakışkan

GİRİŞ

Isı transfer akışkanları olarak genellikle su, yağ ve etilen glikol gibi akışkanlar kullanılmaktadır. Mühendislikte kullanılan pek çok elektronik cihazların performansının yükseltilmesi ve boyutlarının küçültülmesinde bu akışkanların düşük ısı transfer performansına sahip olmaları temel engeli oluşturmaktadır. Bu engeller yüksek ısı iletkenliğine sahip ısı transfer akışkanlarının geliştirilmesi için nanoakışkanlar konusunda çalışmayı gerekli kılmıştır. Isı transfer akışkanlarının ısı transfer karakteristiklerinin artırılması için kullanılan tekniklerden birisi de akışkan içerisine ısı iletkenlikleri akışkanlara göre daha yüksek olan katı partiküllerin ilave edilmesidir (Lee vd, 1999). Günümüze kadar bu tür sıvı ve katı partiküllerden oluşan süspansiyonlar da milimetre büyüklüğünde katı partiküllerin kullanımı söz konusuydu. Son zamanlarda yapılan çalışmalar sonucunda içerisinde 10-50 nanometre büyüklükte katı partiküllerin söz konusu olduğu yeni bir süspansiyon tipi olan nanoakışkanların keşfi ile ısı transfer akışkanları konusuna eğilim başlanmıştır. Bunun en önemli nedeni çok küçük nanopartikül konsantrasyonlarında dahi nanoakışkanların şaşırtıcı mertebede yüksek termal iletkenlik değerlerine sahip olmasıdır (Choi, 1995; Eastman vd., 2001, Das vd., 2003).

Nanoakışkan basitçe sıvı-katı karışımını ifade etmekten daha öte bir şeydir. Bazı özel karakteristikleri eş dağılılı süspansiyon olması, stabil olması, katı partiküllerin düşük deredece yığılma göstermesi ve kimyasal değişimin olmaması sayılabilir. Nanoakışkanların ısı transfer karakterini belirlemede en önemli parametre ısı iletim katsayısı olup, Koblinski vd. (2002) nanoakışkanlarda söz konusu olan ısı iletkenlik katsayısındaki önemli artışın, katı partiküllerin Brownian hareketine, sıvı katı ortak yüzeyinde söz konusu olan moleküler seviyedeki sıvı tabakalaşması, ısı transfer mekanizmasının doğası ve nanopartikül yığılmaları etkisi gibi faktörlere bağlı olduğunu ifade etmiştir. Nanopartikül olarak genellikle bakır, gümüş, bakır oksit, titanyum oksit ve alüminyum oksit kullanılmaktadır.

Nanoakışkanların ısı iletkenlik katsayılarını ifade etmek üzere önerilmiş sofistike teoriler söz konusu değildir. Bu nedenle bir kısım araştırmacı tarafından iki fazlı karışımlara ait ısı iletkenlik katsayısı için önerilen değişik modellerin kullanılması yoluna gidilmiştir. Bu modellerden en çok bilinenleri Hamilton ve Crosser (1962), Wasp (1977), Maxwell-Garnett (1904),

Bruggeman (1935) ve Wang vd. (2003) tarafından önerilen modellerdir. Nanoakışkanların ısı iletkenlik katsayılarını ifade etmede bu klasik modellerin başarısız olduğu görülmüştür. Deneysel sonuçlar daima bu modellerden daha yüksek ısı iletkenlik katsayıları üretmişlerdir. Nanoakışkanların ısı iletkenlik katsayılarını ifade etmek üzere alternatif bir model Yu and Choi (2003) tarafından önerilmiştir. Yui ve Choi (2003) nanoakışkanlarda katı sıvı yüzeyinde oluşan sıvı tabakanın sıvı ve katı arasında bir termal köprü görevini gördüğünü ifade etmiş ve ısı iletkenlik katsayısındaki önemli artışları bu etkiye bağlamıştır. Yu ve Choi (2003) model sonuçlarını nanoakışkanlar için yapılmış pek çok deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlar ve modellerinin nanoakışkanların ısı iletkenlik katsayısını ifade etmede oldukça başarılı olduğunu görmüşlerdir.

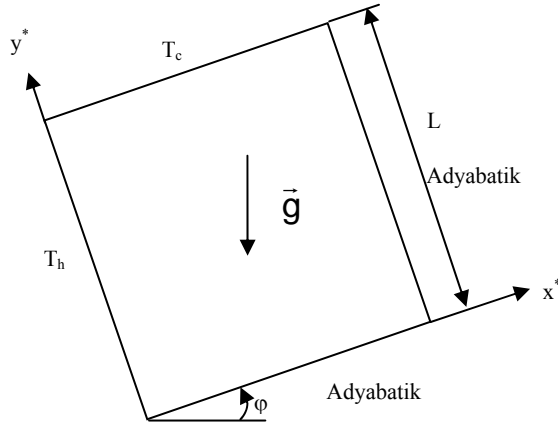
Son yıllarda literatürde kapalı ortam içindeki nanoakışkanlara ait doğal taşınım ısı transferi üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Khanafer vd. (2003) dikey dikdörtgen kapalı bir ortamdaki su bazlı bakır nanoakışkanların, doğal konveksiyonla ısı transferini nümerik olarak incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, herhangi bir Grashof sayısında, su içindeki bakır nanopartiküllerin hacim fraksiyonu arttıkça ısı transferinde de artış söz konusu olmaktadır. Jou and Tzeng (2006) tarafından yeniden, Khanafer vd. (2003)'nin yapmış oldukları çalışmaya benzer çalışmada, nanoakışkan kullanımının ortalama Nusselt sayısında önemli artışlara neden olduğu görülmüştür. Santra vd. (2008) de benzer bir çalışma yapmışlardır. Santra vd. (2008) çalışmalarında ısı iletkenlik katsayısı için farklı iki model kullanmışlar ve kullandıkları modellerden Bruggemann modelinin (1935) Maxwell-Garnett modeline (1904) göre daha yüksek ortalama ısı transfer katsayıları ürettiğini görmüşlerdir. Diğer bir çalışmada Hwang vd. (2007), alüminyum bazlı nanoakışkanın alttan ısıtılmış dikdörtgen bir kapalı ortamda doğal konveksiyonunu incelemişler ve nanopartikül çapının artmasıyla ortalama Nusselt sayısında önemli düşüşler söz konusu olduğunu görmüşlerdir. Ho vd. (2008) kare kapalı bir ortam içindeki laminer doğal konveksiyon üzerinde alüminyum su bazlı nanoakışkanın efektif ısı iletkenliği ve efektif dinamik viskozitesindeki kararsızlıklar üzerine modeller formüle etmişlerdir. Oztop ve Abu-Nada (2008) sol duvarı kısmen ısıtılan ve sağ duvarı soğutulan, diğer duvarları adyabatik tutulan dikdörtgen bir kavite içindeki çeşitli nanoparçacıklarla oluşturulan nanoakışkanın doğal konveksiyonunu nümerik olarak incelemişlerdir. Isıtıcı uzunluğu arttıkça ısı transferinin arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca nanoakışkan kullanımıyla ısı transferinin arttığını ve yüksek boyut oranından ziyade düşük boyut oranında bu etkinin daha belirgin olduğunu görmüşlerdir. Son zamanlarda ise Ogut (2009), yan duvardan sabit ısı akısıyla kısmen ısıtılmış, eğik kare bir kapalı ortam içindeki farklı nanoparçacık ile oluşturulan su bazlı nanoakışkanların, doğal konveksiyonunu incelemiştir. Elde edilen sonuçlara göre, Rayleigh sayısı ve parçacık hacim fraksiyonu arttıkça, ortalama ısı transferi miktarının arttığını ve ısıtıcı uzunluğu arttıkça ısı transfer miktarının düştüğünü gözlemlemiştir. Ayrıca

ısıtıcı uzunluğu arttıkça, ortalama ısı transfer oranı, küçük eğim açıları için azalmaya başlamakta olduğunu belirtmektedir.

Diğer çalışmalarda, genellikle karşılıklı duvarların ısıtılması söz konusu iken, bu çalışmada komşu duvarların farklı şekilde ısıtılmış olduğu eğik kare kapalı bir ortam ele alınmıştır. Bu çalışmayla, su bazlı nanopartiküllerin doğal konveksiyonundaki hız ve sıcaklık alanları nümerik olarak elde edilmiş ve yönetici parametrelerden nanopartikül konsantrasyonu, kapalı bölgenin eğim açısı ve Rayleigh sayısının bu alanlar üzerindeki etkileri saptanmıştır.

ANALİZLER

Analizlerde incelenen geometri ve koordinat sistemi şematik olarak Şekil 1’de verilmiştir. Kenar uzunlukları L olan eğik kare kapalı bölge, her biri eş sıcaklıkta olan, komşu duvarlarından sol yan duvar T_h sıcaklığında, üst duvar ise T_c sıcaklığındadır. Diğer duvarları ise adyabatiktir. Nanoparçacık ve akışkanın aynı hızla aktığı ve termodinamik dengede olduğu kabul edilmiştir. φ ise kapalı bölgenin eğim açısıdır.



Şekil 1. İncelenen geometri ve sınır şartları.

Yönetici denklemler, içerisinde nanoakışkanın bulunduğu kapalı bir ortamda iki boyutlu, daimi, laminar doğal konveksiyon akışı için Boussinesq yaklaşımı kullanılarak boyutlu şekilde aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

Süreklilik denklemleri,

$$\frac{\partial u^*}{\partial x^*} + \frac{\partial v^*}{\partial y^*} = 0 \quad (1)$$

x- momentum denklemleri,

$$\left(u^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial u^*}{\partial y^*} \right) = -\frac{1}{\rho_{nf,0}} \frac{\partial p^*}{\partial x^*} + \frac{\mu_{eff}}{\rho_{nf,0}} \left(\frac{\partial^2 u^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 u^*}{\partial y^{*2}} \right) + \frac{1}{\rho_{nf,0}} (\rho\beta)_{nf} g \sin\varphi (T - T_c) \quad (2)$$

y- momentum denklemleri,

$$\left(u^* \frac{\partial v^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial v^*}{\partial y^*} \right) = -\frac{1}{\rho_{nf,0}} \frac{\partial p^*}{\partial y^*} + \frac{\mu_{eff}}{\rho_{nf,0}} \left(\frac{\partial^2 v^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 v^*}{\partial y^{*2}} \right) + \frac{1}{\rho_{nf,0}} (\rho\beta)_{nf} g \cos\varphi (T - T_c) \quad (3)$$

Enerji denklemleri,

$$\left(u^* \frac{\partial T}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial T}{\partial y^*} \right) = \alpha_{nf} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^{*2}} \right) \quad (4)$$

burada α_{nf} nanoakışkanın termal difüzyon katsayısı olup

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{eff}}{(\rho c_p)_{nf,0}} \text{ şeklinde tanımlıdır.}$$

Yönetici denklemleri boyutsuzlaştırmak için aşağıdaki boyutsuz değişkenler kullanılmıştır:

$$x = \frac{x^*}{L}, \quad y = \frac{y^*}{L}, \quad u = \frac{u^*}{\alpha_f / L}, \quad v = \frac{v^*}{\alpha_f / L}, \quad p = \frac{L^2}{\rho_{f0} \alpha_f^2} p^*, \quad \theta = \frac{T^* - T_c}{T_H - T_c} \quad (5)$$

Burada u^* ve v^* sırasıyla x^* ve y^* yönlerindeki boyutlu hız bileşenlerini, p^* boyutlu basıncı, T^* boyutlu sıcaklık, ρ_{f0} , T_c sıcaklığındaki akışkanın yoğunluğunu ve α_f akışkanın ısı difüzyon katsayısını göstermektedir.

Boyutsuz akım fonksiyonu ve girdap fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır;

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v = -\frac{\partial \psi}{\partial x}, \quad \omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (6)$$

İçerisinde nanoakışkanın bulunduğu kapalı bir ortamda iki boyutlu, daimi, laminar doğal konveksiyon akışı için, boyutsuz değişkenler cinsinden yönetici denklemler, Boussinesq yaklaşımı altında aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

Akım fonksiyonu denklemleri:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\omega \quad (7)$$

Girdap transport denklemleri:

$$u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} = \frac{\nu_{eff}}{\nu_f} Pr \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) + \frac{\beta_{nf}}{\beta_f} Ra Pr \left[\cos\varphi \frac{\partial \theta}{\partial x} - \sin\varphi \frac{\partial \theta}{\partial y} \right] \quad (8)$$

Enerji denklemleri:

$$u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{\alpha_{nf}}{\alpha_f} \left[\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right] \quad (9)$$

Prandtl ve Rayleigh sayıları aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$\text{Pr} = \frac{\gamma_f}{\alpha_f}, \quad \text{Ra} = \frac{g\beta_f L^3 \Delta T}{\gamma_f \alpha_f} \quad (10)$$

burada g yerçekimi ivmesi, β ısı genleşme katsayısı, γ kinematik viskozitedir. ΔT ise kapalı bölgenin eş sıcaklıktaki komşu duvarları arasındaki sıcaklık farkını göstermektedir.

Nanoakışkanın efektif mutlak viskozitesi iki fazlı karışımlar için önerilmiş modeller kullanılarak ifade edilmektedir. Bu çalışmada küçük küresel katı partiküller içeren süspansiyonlar için Brinkman (1952) tarafından önerilen aşağıdaki model kullanılmıştır:

$$\mu_{\text{eff}} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}} \quad (11)$$

Nanoakışkanın referans sıcaklıktaki efektif yoğunluğu:

$$\rho_{\text{nf},o} = (1-\phi)\rho_{f,o} + \phi\rho_{s,o} \quad (12)$$

nanoakışkanın ısı kapasitesi ve Boussinesq terimi,

$$(\rho c_p)_{\text{nf}} = (1-\phi)\rho_f c_{p,f} + \phi\rho_s c_{p,s} \quad (13)$$

$$(\rho\beta)_{\text{nf}} = (1-\phi)\rho_f \beta_f + \phi\rho_s \beta_s \quad (14)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Xuan ve Roetzel, 2000). Burada ϕ katı partiküllerin hacim fraksiyonu olup ve nf , f ve s alt indisleri ise sırasıyla nanoakışkan, sıvı ve katı partikülleri temsil etmektedir. Nanoakışkanın ısı iletim katsayısı için ise Yu ve Choi (2003) tarafından önerilen aşağıdaki model kullanılmıştır.

$$\frac{k_{\text{eff}}}{k_f} = \frac{k_s + 2k_f + 2(k_s - k_f)(1+\eta)^3 \phi}{k_s + 2k_f - (k_s - k_f)(1+\eta)^3 \phi} \quad (15)$$

burada η sıvı tabaka kalınlığının orijinal partikül yarıçapına oranıdır. Bu çalışmada $\eta=0.1$ alınmıştır.

Yönetici denklemler için kullanılan sınır şartları:

$$\psi(x,0) = 0, \quad \left. \frac{\partial \theta}{\partial y} \right|_{x,0} = 0, \quad \psi(x,1) = 0, \quad \theta(x,1) = 0 \quad (16)$$

$$\psi(0,y) = 0, \quad \theta(0,y) = 1, \quad \psi(1,y) = 0, \quad \left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_{1,y} = 0 \quad (17)$$

Katı bir sınırdaki girdabın değeri için hiçbir fiziksel sınır şart yoktur, ancak bu ifade akım fonksiyonu denkleminde çıkarılabilir.

$$\omega|_{\xi=0} = -\frac{\partial^2 \psi}{\partial \xi^2} \Big|_{\xi=0}, \quad (18)$$

burada ξ yüzeye dik dış doğru koordinattır.

Nanoakışkanın yerel Nusselt sayısı ısıtılmış duvar için aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\text{Nu} = -\frac{k_{\text{eff}}}{k_f} \left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (19)$$

Kapalı bölgenin ısıtılmış duvar boyunca ortalama Nusselt sayısı, yerel Nusselt sayısının integrasyonu ile elde edilir.

$$\text{Nu}_a = \int_0^1 \text{Nu} dy. \quad (20)$$

NÜMERİK YÖNTEM

Boyutsuz yönetici denklemler akım fonksiyonu, girdap ve sıcaklık için polinoma dayalı diferansiyel kuadratur (PDQ) yöntemi kullanılarak ayrıklaştırılmıştır. Yeter yaklaşıklıkta sonuçlar elde etmek için diğer yöntemlere kıyasla daha az sayıda düğüm noktası kullanan diferansiyel kuadratur yöntemi; fizik ve mühendislikte karşılaşılan başlangıç değeri ve sınır değer problemleri için farklı bir yaklaşım ortaya koymuştur.

PDQ metodunda (Shu, 2000; Bellman vd., 1972; Shu, 1992; Shu ve Richards, 1992; Kahveci, 2007a, 2007b, 2007c) düğüm noktalarının seçiminde sıkça kullanılan ve önerilen, eşit aralıklı olmayan Chebyshev–Gauss–Lobatto düğüm nokta dağılımları kullanılmaktadır ve aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$x_i = \frac{1}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{i}{n} \pi\right) \right], \quad i = 0, 1, 2, \dots, n$$

$$y_j = \frac{1}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{j}{m} \pi\right) \right], \quad j = 0, 1, 2, \dots, m \quad (21)$$

Yukarıdaki denklem ile tanımlı grid sisteminin kullanılmasının nedeni hız ve sıcaklık gradyanlarının daha büyük olduğu sınırlara yakın bölgelerde daha çok ağ noktası içermesidir. Burada n ve m , sırasıyla, x ve y yönlerinde seçilen düğüm noktalarının toplam sayısıdır. Akım fonksiyonu, girdap ve sıcaklık için 31×31 sayıda ağ noktası kullanılarak çözüm elde edilmiştir. İteratif bir yaklaşımla sonuçların elde edildiği bu çalışmada akım fonksiyonu, girdap ve sıcaklık oranı için yakınsama kriteri olarak 10^{-5} alınmıştır. Hesaplama sonuçları successive over-relaxation (SOR) iterasyon metodu kullanılarak elde edilmiştir.

Nümerik çalışmadaki kodun doğruluğunu test etmek için, Khanafer vd. (2003)'nin incelemiş olduğu, karşılıklı duvarları farklı şekilde ısıtılmış olan kapalı bir dikdörtgen ortam içindeki, su bazlı bakır nanoakışkanın doğal konveksiyonla ısı transferi sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Tablo 1' de verilen sonuçlardan da görüldüğü gibi mevcut çalışmanın ortalama Nusselt değerlerinin karşılaştırma yapılan Khanafer vd. (2003)'nin sonuçları arasında iyi bir uygunluk vardır.

Tablo 1: Karşılıklı duvarların farklı şekilde ısıtıldığı bir kapalı ortam içindeki su bazlı bakır nanoakışkan için ortalama Nusselt sayısının karşılaştırılması.

	Gr/φ	0	0.04	0.08	0.12	0.16	0.20
Mevcut	10^3	1.93	2.07	2.21	2.34	2.48	2.63
Khanafer vd.(2003)	10^3	1.96	2.11	2.25	2.36	2.57	2.75
Mevcut	10^4	4.07	4.40	4.72	4.87	5.32	5.62
Khanafer vd. 2003)	10^4	4.07	4.36	4.68	5.00	5.32	5.68

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu problemde ele alınan nümerik çalışma aralıkları Rayleigh sayısı için 10^4 - 10^6 aralığında, kapalı bölgenin eğim açısı ise $0^\circ \leq \phi \leq 120^\circ$ olarak seçilmiştir. Katı partiküllerin hacimsel fraksiyonu için $0 \leq \phi \leq 0.20$ aralığındaki değerler alınmıştır. Sıvı tabaka kalınlığının orijinal partikül yarıçapına oranı ise 0.1 alınmıştır. Baz akışkan su için $Pr=6.2$ dir. Nanopartikül olarak Ag, Cu ve Al_2O_3 seçilmiştir. Akışkan ve katı partiküllerin termofiziksel özellikleri Tablo 2’ de verilmiştir.

Tablo 2. Termofiziksel özellikler.

Özellik	Su	Ag	Cu	Al_2O_3
ρ (kg/m ³)	997.1	10500	8933	3970
C_p (J/kgK)	4179	235	385	765
k (W/mK)	0.613	429	400	40
$\alpha \times 10^7$ (m ² /s)	1.47	1738.6	1163.1	131.7
$\beta_T \times 10^6$ (1/K)	210	54	51	24

Şekil 2’ de eğim açısının sıfır olduğu durum için Cu bazlı nanoakışkanların akım çizgileri ve eş sıcaklık eğrileri verilmektedir. Diğer katı partiküllerle oluşturulan nanoakışkanlarında hemen hemen benzer davranışlar sergilemesinden dolayı, Cu parçacıklarla oluşturulan nanoakışkanın grafikleri gösterilmektedir. Akım çizgileri $Ra=10^4$ değerinde, akış alanının merkezine yerleşmiş saat ibresi yönünde dönen hücre görünümündedir. $Ra=10^6$ da ise akış alanının merkezinde iki hücre belirmiştir. Katı parçacık hacim fraksiyonu arttıkça ısı transfer miktarı artmaktadır. Rayleigh sayısı arttıkça, eş sıcaklıklı duvarlarda ısıl sınır tabakalar oluşmaktadır.

Farklı eğim açıları için Cu bazlı nanoakışkanların akım çizgileri ve eş sıcaklık eğrileri $Ra=10^5$ için Şekil 3’de verilmektedir. Akım çizgileri küçük eğim açılarında kapalı bölgenin merkezine yerleşmiş saat ibresi yönünde dönen tek bir hücre görünümündedir. Ancak 60° lik eğim açısında nanopartikül hacim fraksiyonu % 20 olduğunda ve büyük eğim açıları olan 90° ve yukarısında ise, sıcak duvarın alt kısma yer değiştirmesi yüzünden akım çizgileri saat ibresinin tersi yönünde dönmekte ve merkezdeki hücrenin eliptik formu bozularak uzamaktadır. Eş sıcaklık eğrileri ise küçük eğim açılarında, eğim açısının olmadığı duruma benzer davranış sergilemekte iken, büyük eğim açılarında farklı davranmaktadır. Eş sıcaklık eğrileri, sıcak duvara doğru aşağı doğru yayılmaktadır.

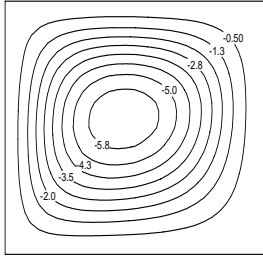
Şekil 4’ de ise baz akışkan ($\phi=0.0$) ile farklı nanopartiküllerle oluşturulan nanoakışkanın ($\phi=0.10$) $\phi=0^\circ$ daki düşey duvar boyunca yerel Nusselt sayısının değişimi verilmektedir. Buna göre sıcak duvar boyunca yukarı doğru gidildikçe, yerel Nusselt sayısının değeri azalmaktadır ancak sıcak ve soğuk duvarın kesiştiği noktada maksimuma çıkmaktadır. Rayleigh sayısı arttıkça, sirkülasyon artışıyla yerel Nu değeri artmaktadır. Yerel Nusselt sayısının değeri, ısı iletim

katsayısı yüksek olan katı partiküllerle oluşturulan nanoakışkanlarda daha yüksektir. Yerel Nu sayısı, nanoakışkan ile baz akışkan arasında kıyaslama yapılıncaya nanoakışkanda daha yüksektir. Özellikle yüksek Rayleigh sayılarındaki bu fark daha belirgin olarak görülmektedir.

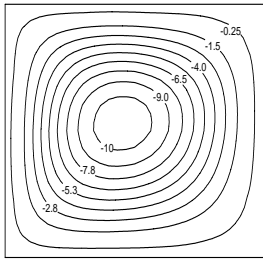
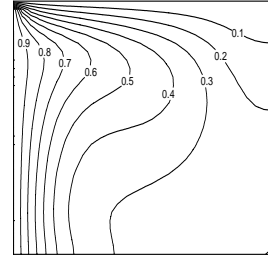
Şekil 5’ de ise $Ra=10^5$ ve $\phi=0.10$ ‘daki farklı eğim açıları için Cu bazlı nanoakışkanın, sıcak duvar boyunca yerel Nusselt sayısının değişimi verilmektedir. Yerel Nusselt sayısının değeri sıcak duvar boyunca uç noktaya doğru gidildikçe, eğim açısının $\phi=0^\circ$ ve $\phi=30^\circ$ olması halinde, giderek azalmakta ve nihayet sıcak ve soğuk duvarın kesiştiği noktada maksimuma ulaşmaktadır. Sol yan duvar boyunca ısınan akışkan tanecikleri alt kısımdan yukarı doğru gidildikçe üst kısımlarda duvardan uzaklaşmaktadır. Bu da eş sıcaklık eğrilerinin soğuk duvara doğru genişlemesine neden olmaktadır. Yerel Nusselt sayısının değeri de bundan dolayı duvar boyunca uç kısma doğru gidildikçe azalmaktadır. Eş sıcaklık eğrilerinin birbirine yakın olduğu kısımlarda enerji aktarımı daha fazla olmaktadır. Yerel Nusselt sayısının bu değişimleri, eş sıcaklık eğrilerinin davranışlarından görülmektedir. Yerel Nusselt sayısının $\phi=60^\circ$ ve daha büyük açılarındaki değişiminde ise, eş sıcaklık eğrilerinin farklı bir davranış sergilemesinden dolayı, duvar boyunca uç kısma doğru gidildikçe bir artış görülmektedir.

Ortalama Nusselt sayısının, eğim açısının sıfır olması durumu için, çeşitli nanoakışkanlar için farklı Rayleigh sayısı ve katı hacim fraksiyonu ile değişimi Tablo 3’de verilmektedir. Tablo 3’den de görüldüğü gibi nanopartiküllerin hacimsel fraksiyonunun artırılmasıyla ısı transferinde önemli artışlar söz konusu olmaktadır. Ortalama Nusselt sayısı, düşük Rayleigh sayılarında, zayıf konveksiyondan dolayı, katı hacim fraksiyonundaki artışla önemli bir değişiklik olmamaktadır. Ancak yüksek Rayleigh sayılarında, katı hacim fraksiyonundaki artışla, ısı transferinde önemli bir artış gözlenmektedir. Isı transfer miktarı, saf akışkanla kıyaslandığında nanoakışkanlarda daha yüksektir, bunun sebebi de yüksek ısıl iletkenliğe sahip nanopartiküllerdir. Ortalama Nusselt sayısının değeri, yüksekten düşüğe doğru Ag, Cu ve Al_2O_3 ile oluşturulan nanoakışkanlar için sıralanmaktadır. Rayleigh sayısının artmasıyla, yüksek kaldırma kuvvetlerinin bir sonucu olarak, sirkülasyon şiddetlenmekte ve ısı transferi miktarının artmasına sebep olmaktadır.

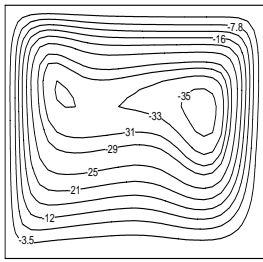
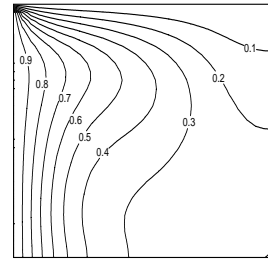
Ortalama Nusselt sayısının, çeşitli nanoakışkanlar için farklı eğim açıları ve katı hacim fraksiyonu ile değişimi Tablo 4’de verilmektedir. Eğim açısının artmasıyla, ortalama Nusselt sayısı azalırken, $\phi=60^\circ$ den sonra artmaktadır. Yani ortalama Nusselt sayısı, eğim açısının $\phi=60^\circ$ değerinde minimum değer almaktadır. Katı hacim fraksiyonundaki artış da, ortalama Nusselt sayısının eğim açısıyla değişimini, önemli derecede etkilemektedir.



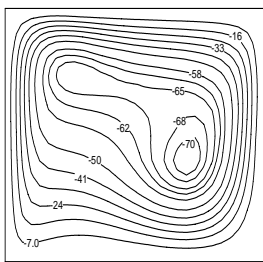
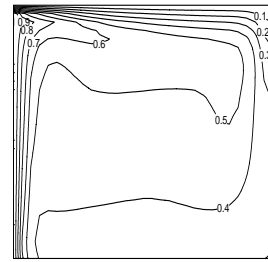
$Ra=10^4, \phi=0.0$



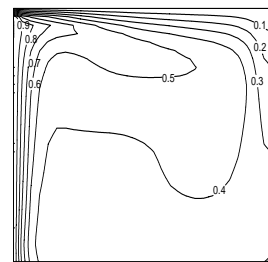
$Ra=10^4, \phi=0.20$



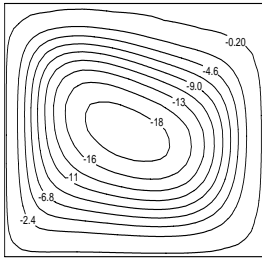
$Ra=10^6, \phi=0.0$



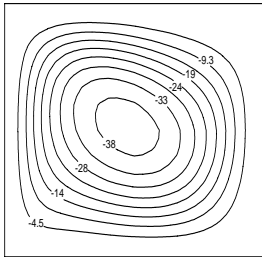
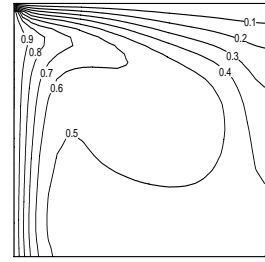
$Ra=10^6, \phi=0.20$



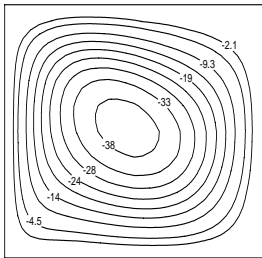
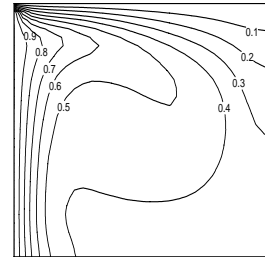
Şekil 2. $\varphi=0^\circ$ için Cu bazlı nanoakışkanın akım çizgileri ve eş sıcaklık eğrileri.



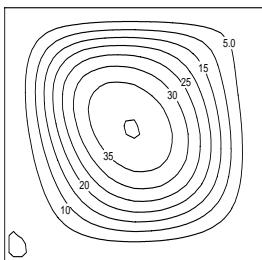
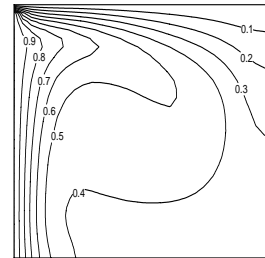
$\varphi=30^\circ, \phi=0.0$



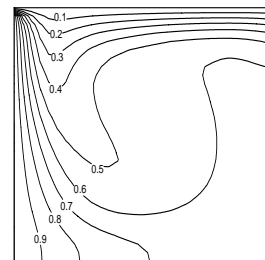
$\varphi=30^\circ, \phi=0.20$

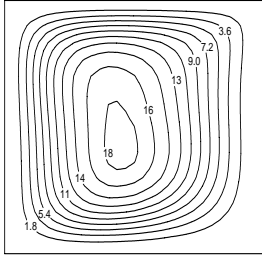


$\varphi=60^\circ, \phi=0.0$

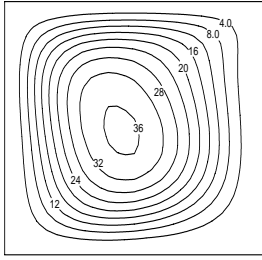
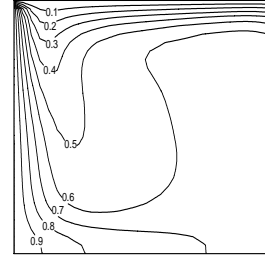


$\varphi=60^\circ, \phi=0.20$

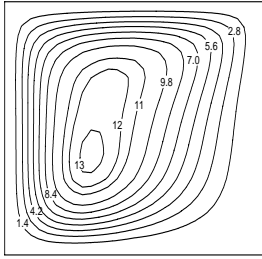
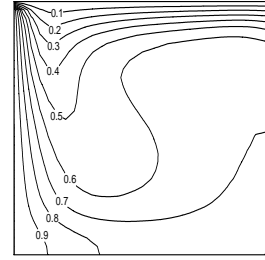




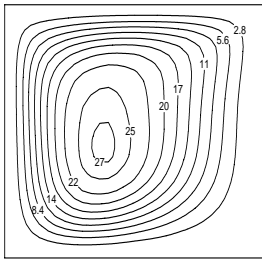
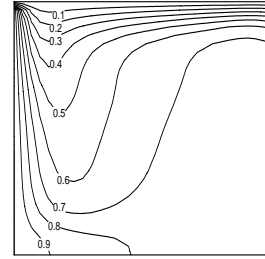
$$\varphi=90^\circ, \phi=0.0$$



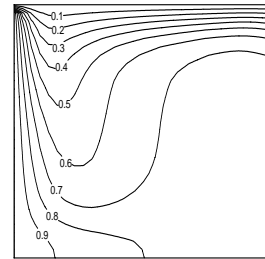
$$\varphi=90^\circ, \phi=0.20$$



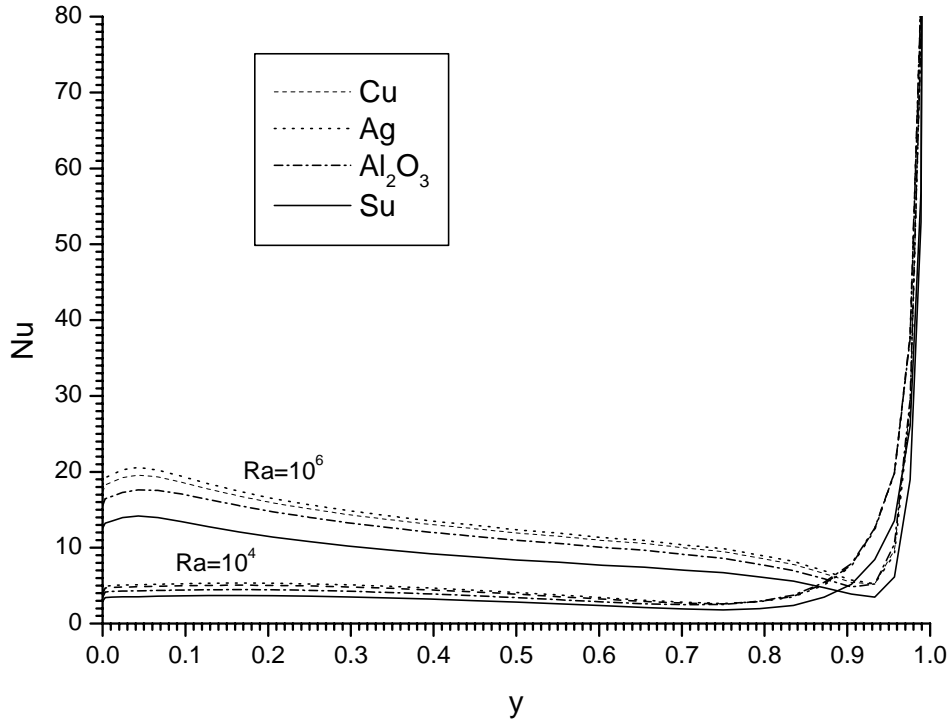
$$\varphi=120^\circ, \phi=0.0$$



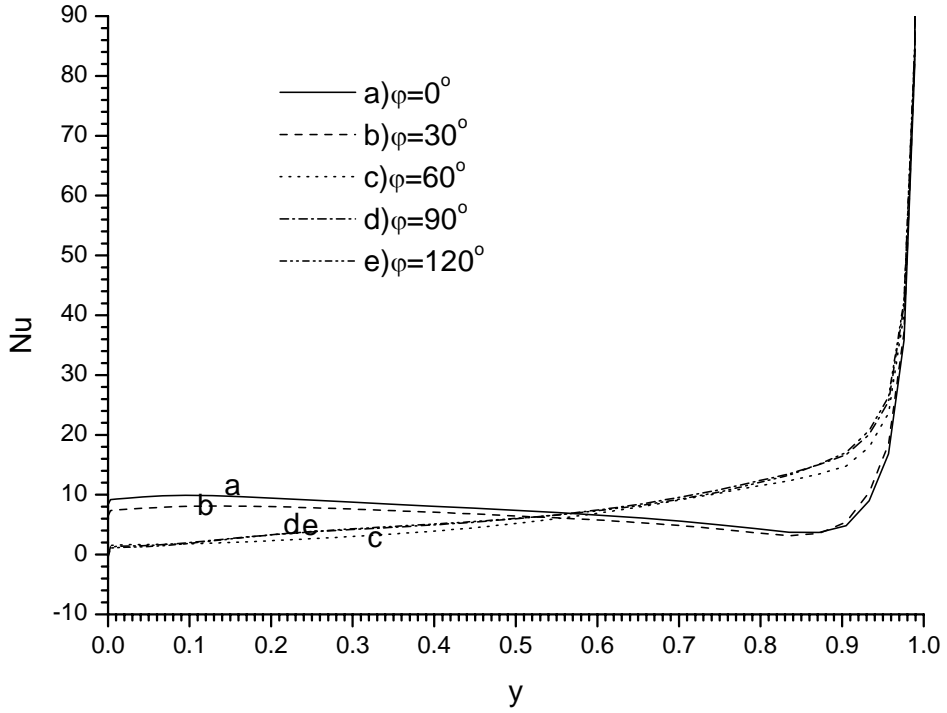
$$\varphi=120^\circ, \phi=0.20$$



Şekil 3. $Ra=10^5$ ve farklı eğim açıları için Cu bazlı nanoakışkanın akım çizgileri ve eş sıcaklık eğrileri.



Şekil 4. Baz akışkan ($\phi=0.0$) ile farklı nanopartiküllerle oluşturulan nanoakışkanın ($\phi=0.10$) $\varphi=0^\circ$ daki düşey duvar boyunca yerel Nusselt sayısının değişimi.



Şekil 5. $Ra=10^5$, $\phi=0.10$ ve farklı eğim açıları için Cu bazlı nanoakışkanın düşey duvar boyunca yerel Nusselt sayısının değişimi.

Tablo 3. Eğim açısının sıfır olması ($\phi=0^\circ$) durumu için Ortalama Nusselt sayısı.

Parçacık	$\phi \backslash Ra$	10^4	10^5	10^6
Cu	0.00	5.748	7.657	10.855
	0.05	6.933	9.213	13.080
	0.10	8.212	10.865	15.426
	0.15	9.620	12.658	17.909
	0.20	11.199	14.639	20.566
Ag	0.00	5.748	7.657	10.855
	0.05	7.006	9.332	13.288
	0.10	8.363	11.111	15.865
	0.15	9.861	13.050	18.617
	0.20	11.547	15.203	21.585
Al ₂ O ₃	0.00	5.748	7.657	10.855
	0.05	6.739	8.923	12.584
	0.10	7.828	10.299	14.436
	0.15	9.038	11.809	16.435
	0.20	10.408	13.490	18.615

Tablo 4. Farklı eğim açıları için $Ra=10^5$ deki Ortalama Nusselt sayısı.

Parçacık	$\phi \backslash \phi$	30°	60°	90°	120°
Cu	0.00	6.792	6.789	7.650	7.683
	0.05	8.337	8.332	9.206	9.233
	0.10	10.026	10.019	10.857	10.855
	0.15	11.861	11.854	12.648	12.595
	0.20	13.875	13.867	14.628	14.508
Ag	0.00	6.792	6.789	7.650	7.683
	0.05	8.412	8.407	9.325	9.368
	0.10	10.205	10.198	11.102	11.129
	0.15	12.170	12.163	13.039	13.023
	0.20	14.342	14.333	15.191	15.111
Al ₂ O ₃	0.00	6.792	6.789	7.650	7.683
	0.05	8.093	8.089	8.917	8.918
	0.10	9.499	9.496	10.292	10.252
	0.15	11.038	11.032	11.801	11.715
	0.20	12.741	12.734	13.481	13.343

SONUÇLAR

Bu çalışmada, komşu duvarları farklı şekilde ısıtılmış olan eğik kare bir kapalı ortam içindeki su bazlı nanoakışkanların, doğal konveksiyonu nümerik olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, Rayleigh sayısı, kapalı bölgenin eğim açısı ve katı hacim fraksiyonunun akış ve ısı transferi üzerinde önemli etkilere sahip olduğu görülmektedir. Isı transfer miktarı, saf akışkanla nanoakışkan arasında kıyaslandığında, yüksek ısı iletkenliğe sahip nanopartiküllerin ilave edilmesinden dolayı nanoakışkanlarda daha yüksektir. Rayleigh sayısının artmasıyla, sirkülasyon şiddetlenmekte ve ısı transferi miktarının artmasına sebep olmaktadır. Isı transfer miktarını etkilemekte

eğim açısı da etkindir. Eğim açısının $\phi=60^\circ$ değerinde ortalama Nusselt sayısı minimum değer almaktadır.

KAYNAKLAR

Bellman, R.E., Kashef B.G. and Casti, J., Differential Quadrature: a Technique for the Rapid Solution of Nonlinear Partial Differential Equations, *J. Comput. Phys.*, 10, 40-52, 1972.

Brinkman, H.C., The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solutions, *J. Chem. Phys.*, 20, 571-581, 1952.

Bruggeman, D.A.G., Berechnung Verschiedener Physikalischer Konstanten von Heterogenen Substanzen, I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus Isotropen Substanzen, *Annalen der Physik. Leipzig* 24, 636-679, 1935.

Choi, S.U.S. Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles, *Develop. Appl. Non Newtonian Flows*, 99-106, 1995.

Das, S.K., Putra, N. Thiesen, P. Roetzel, W., Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for Nanofluids, *ASME J. Heat Transfer* 125, 567-574, 2003.

Eastman, J.A., Choi, S.U.S., Yu, W., Thompson, L.J., Anomalously increased effective thermal conductivity of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles, *Appl. Phys. Lett.* 78, 718-720, 2001.

Hamilton, R.L. and Crosser, O.K., Thermal Conductivity of Heterogeneous Two-Component Systems, *I & EC Fundamentals*, 1, 182-191, 1962.

Ho, C.J., Chen, M.W., Li, Z.W., Numerical simulation of natural convection of nanofluid in a square enclosure: Effects due to uncertainties of viscosity and thermal conductivity, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51, 4506-4516, 2008.

Hwang, K. S., Lee, J.H. and Jang, S.P., Buoyancy-driven Heat Transfer of Water-based Al₂O₃ Nanofluids in a Rectangular Cavity, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50, 4003-4010, 2007.

Jou, R.Y. and Tzeng, S.C., Numerical Research of Nature Convective Heat Transfer Enhancement Filled with Nanofluids in Rectangular Enclosures, *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, 33, 727-736, 2006.

Kahveci, K., Numerical simulation of natural convection in a partitioned enclosure using PDQ method, *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow* 17(4), 439-456, 2007a.

Kahveci, K., Natural convection in a partitioned vertical enclosure heated with a uniform heat flux, *ASME Journal of Heat Transfer* 129, 717-726, 2007b.

Kahveci, K. A differential quadrature solution of natural convection in an enclosure with a finite thickness partition, *Numerical Heat Transfer Part A: Applications* 51(10), 979-1002, 2007c.

Keblinski, P., Phillpot, S.R., Choi, S.U.S. and Eastman, J.A., Mechanisms of Heat Flow in Suspensions of Nano-sized Particles (nanofluids), *Int. J. Heat Mass Transfer*, 45, 855–863, 2002.

Khanafar, K., Vafai K. and Lightstone, M., Buoyancy-Driven Heat Transfer Enhancement in a Two-Dimensional Enclosure Utilizing Nanofluids, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 46, 3639–3653, 2003.

Lee, S., Choi, S.U.S., Li, S., Eastman, J.A., Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles, *ASME J. Heat Transfer* 121, 280–289, 1999.

Maxwell-Garnett, J.C., Colours in Metal Glasses and in Metallic Films, *Philos. Trans. Roy. Soc. A* 203, 385–420, 1904.

Ogut E. B., Natural convection of water-based nanofluids in an inclined enclosure with a heat source, *International Journal of Thermal Sciences*, doi:10.1016/j.ijthermalsci.2009.03.014, 2009.

Oztop, H. F., Abu-Nada, E., Numerical study of natural convection in partially heated rectangular enclosures filled with nanofluids, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 29, 1326-1336, 2008.

Santra, A.K., Sen, S. and Chakraborty, N., Study of Heat Transfer Augmentation in a Differentially Heated Square Cavity using Copper–water Nanofluid, *International Journal of Thermal Sciences*, 47, 1113-1122, 2008.

Shu, C., Generalized differential-integral quadrature and application to the simulation of incompressible viscous flows including parallel computation, PhD thesis, University of Glasgow, 1992.

Shu, C. *Differential Quadrature and its Application in Engineering*, Springer and Verlag, 2000.

Shu, C. and Richards, B.E., Application of Generalized Differential Quadrature to Solve Two-Dimension Incompressible Navier-Stokes Equations, *Int. J. Numer. Methods Fluids*, 15, 791-798, 1992.

Wang, B.X., Zhou L.P. and Peng, X.F., A Fractal Model for Predicting the Effective Thermal Conductivity of Liquid with Suspension of Nanoparticles, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 46, 2665–2672, 2003.

Wasp, F.J., *Solid–Liquid Flow Slurry Pipeline Transportation*, Trans. Tech. Publ., Berlin, 1977.

Xuan Y. and Roetzel W., Conceptions for Heat Transfer Correlation of Nanofluids, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 43, 3701–3707, 2000.

Yu, W. and Choi, S.U.S., The Role of Interfacial Layer in the Enhanced Thermal Conductivity of Nanofluids: A Renovated Maxwell Model, *J. Nanoparticles Res.*, 5, 167–171, 2003.



ELİF BÜYÜK ÖĞÜT

1977 yılında Artvin-Borçka’da doğdu. 1997 yılında Trakya Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü’nden lisans, 1999 yılında ise Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı’ndan yüksek lisans ve 2006 yılında ise, doktora derecelerini aldı. 1998- 2007 yılları arasında Trakya Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü’nde araştırma görevlisi olarak çalıştı. 2007 yılından itibaren ise Kocaeli Üniversitesi Gebze Meslek Yüksekokulu Teknik Programlar Bölümünde Yrd. Doç. olarak görevini sürdürmektedir. Doğal ve karışık konveksiyonla ısı transferi, nanoakışkan, nümerik metodlar, magnetik alan konularında çalışmalar yürütmektedir.