

NANOAKIŞKAN İÇEREN TEK FAZLI MİNİ DOĞAL TAŞINIM DÖNGÜLERİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ*

Ziya Haktan Karadeniz**

Yrd. Doç. Dr.,
İzmir Katip Çelebi Üniversitesi,
Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi,
Makina Mühendisliği Bölümü, İzmir
zhaktan.karadeniz@ikc.edu.tr

Alpaslan Turgut

Yrd. Doç. Dr.,
Dokuz Eylül Üniversitesi,
Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi,
Makina Mühendisliği Bölümü, İzmir
alpaslan.turgut@deu.edu.tr

ÖZ

Bu çalışma kapsamında, Tek Fazlı mini Doğal Taşınım Döngülerinin (TFmDTD) farklı çalışma koşulları altındaki başarımı bilgisayar benzetimleri kullanılarak incelenmiştir. TFmDTD'nin eğim açısının (0, 30, 60, 75°), kullanılan nanoakışkanın tanecik oranının (saf su, %1, %2, %3 Al₂O₃ katkısı) ve ısıtıcı gücünün (10, 20, 30, 40, 50 W) başarımına etkisi incelenmiştir. Yapılan önceki deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlarla, bu çalışmadan elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak, bilgisayar benzetimlerinin farklı fiziksel koşullarda TFmDTD'lerin çalışma koşullarını modellemekteki başarısı tartışılmıştır. Karşılaştırmada, farklı başarımlar ölçütleri (döngüdeki en yüksek sıcaklık, ısıtıcının iki ucu arasındaki sıcaklık farkı ve etkinlik) kullanılarak sayısal çalışmanın güçlü ve zayıf yönleri ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Nanoakışkan, tek fazlı akış, doğal taşınım, TFmDTD

NUMERICAL INVESTIGATION OF SINGLE PHASE NATURAL CIRCULATION MINI LOOPS

ABSTRACT

In this study, performance of Single Phase Natural Circulation mini Loops (SPNCmL) under different operating conditions is investigated by computer simulations. Effect of inclination angle (0, 30, 60, 75°), nanofluids' filler content (distilled water, 1%, 2%, 3% Al₂O₃), and heater power (10, 20, 30, 40, 50 W) on the SPNCmL performance was investigated. The success of the numerical study were discussed by comparing the results with the previous experimental data. Maximum temperature, temperature difference between the two sides of the heater, and effectiveness were used for comparison to understand the pros and cons of these criteria for new designs.

Keywords: Nanofluid, single phase flow, natural convection, SPNCmL

** İletişim Yazarı

Geliş tarihi : 09.06.2015
Kabul tarihi : 25.06.2015

* 8-11 Nisan 2015 tarihlerinde Makina Mühendisleri Odası tarafından İzmir'de düzenlenen 12. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi'nde sunulan bildiri, dergimiz için yazarlarınca makale olarak yeniden düzenlenmiştir.

Karadeniz, Z. H., Turgut, A. 2015. "Nanoakışkan İçeren Tek Fazlı Mini Doğal Taşınım Döngülerinin Sayısal Olarak İncelenmesi," Mühendis ve Makina, cilt 56, sayı 666, s. 46-52.

1. GİRİŞ

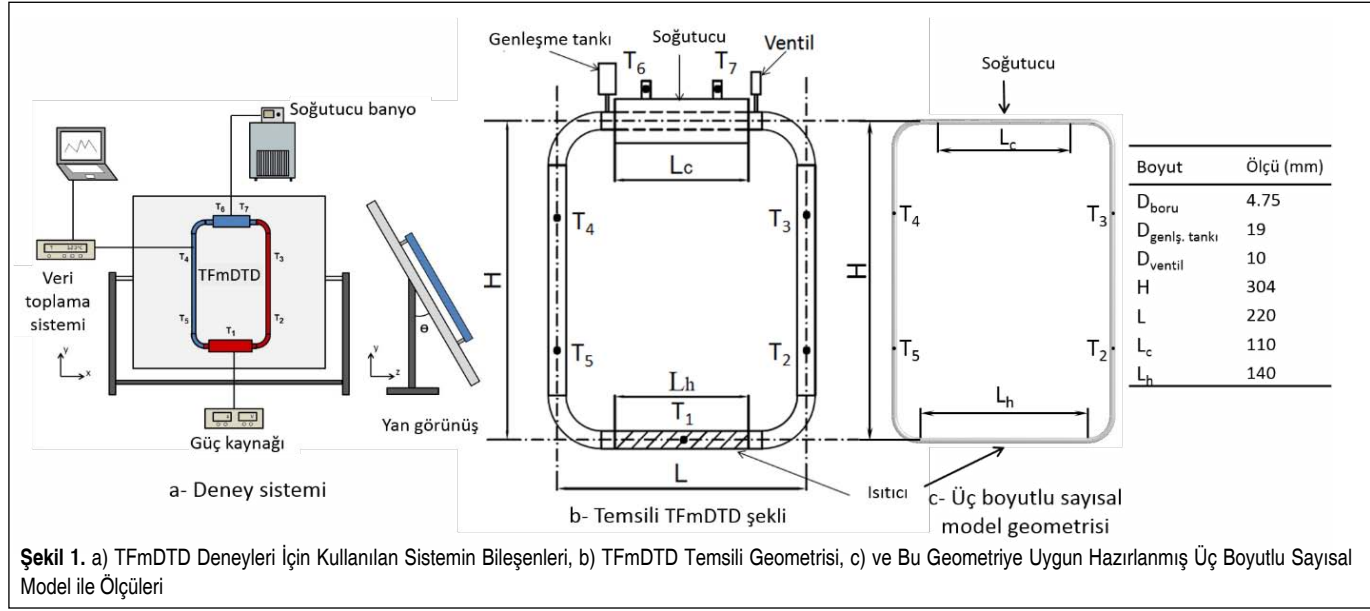
Doğal taşınım döngüleri (DTD), sıcak ortamdaki soğuk ortama doğal taşınım ile ısı aktarabilen pasif sistemlerdir. Herhangi bir hareketli mekanik parçaları yoktur. Sistemin çalışmasını, ısı olarak uyarılan bölgelerde oluşan yoğunluk farkından kaynaklanan kaldırma kuvveti sağlar. DTD'ler tek fazlı (TFDTD) veya iki fazlı (İFDTD) olarak adlandırılabilir. TFDTD'lerde yoğunluk farkı sadece sıcaklık farkı nedeniyle oluşurken, İFDTD'lerde sıcaklık farkı ile birlikte hal değişimi de yoğunluk farkına neden olur. TFDTD'ler İFDTD'lere göre daha kolay kontrol edilebilir olmaları nedeniyle tercih edilirler ve daha güvenli ve sağlam olarak bilinirler. Bu nedenle, nükleer santraller, güneş enerjili su ısıtıcılar, türbin kanatlarının soğutulması ve elektronik devrelerin soğutulması gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [1].

Son yıllarda elektronik aletlere yönelik yoğun talep nedeniyle, küçük iletişim cihazları ve bilgisayarlar açısından cihaz sayısında büyük bir sıçrama yaşanmıştır. Hızlı rekabet ortamı nedeniyle, bu cihazların ısı yönetimi (cihaz içerisinde oluşan atık ısının cihazın çalışma şartlarını etkilemeyecek şekilde uzaklaştırılması) konusunun önemi de hızla artmaktadır. Yukarıda bahsedilen, büyük ölçekli sistemlerde kullanımı yaygınlaşan TFDTD'ler üzerine çokça çalışma yapılmasına rağmen, daha küçük sistemlerde kullanımı mümkün olan tek fazlı mini doğal taşınım döngüleri (TFmDTD) üzerine az sayıda çalışma olduğu görülmektedir. TFmDTD'lerde, birkaç milimetre mertebesinde çapa sahip dairesel kesitli borular farklı şekillerde kapalı geometriler oluşturacak biçimde birleştirilirler. TFDTD'lerinde ise boru çapları onlarca santimetre mertebesinde olabilir. Bu farklılık, temelde akış koşullarının değişmesi üzere (Geniş çaplar için temelde geometri ve sıcaklık farkına bağlı olarak, çoğunlukla çalkantılı doğal taşınım akışları görülürken, boru kesiti daraldıkça akışın tabakalı olma ihtimali artar.), ısı aktarımı özelliklerinin değişmesi ve bunlara bağlı olarak sistem başarımının değişmesi gibi sonuçlar doğurur. Bu nedenle, TFDTD'ler üzerine yapılan çalışmaların TFmDTD'ler için yeniden değerlendirilmesi gerekmektedir. Misale ve arkadaşları [2], 4 mm çapında bakır boru kullanarak oluşturulan dikdörtgen şekilli TFmDTD için; içerisinde saf su kullanarak, 0°C sabit ısı kuyusu sıcaklığı şartı için 2,5-25 W aralığında ısıtıcı güçleri ve 0-75° aralığında eğim açıları için yapılan deneylerden elde edilen sonuçları sunmuşlardır. Bu deneysel çalışma ile en iyi ısıl başarımın 25 W ve 0° açı için elde edildiğini belirtmişler ve TFmDTD'lerin elektronik teknolojisindeki ısı yönetimi sorunlarını çözmek için etkili bir araç olabileceği sonucuna varmışlardır. Kısa bir süre önce Wang ve arkadaşları [3], Misale ve arkadaşları [2] tarafından sunulan deneysel çalışmadaki geometri ve sınır şartlarına sadık kalarak zamana bağlı sayısal bir çalışma yapmışlar ve bunun sonuçlarını deneysel çalışma sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Sayısal ve deneysel çalışma sonuçlarının

iyi bir uyum gösterdiğini belirterek, oluşturulan sayısal benzetim modelinin TFmDTD'lerinin ısı ve akış özelliklerini kabul edilebilir ölçüde belirleyebildiğini vurgulamışlardır.

Son yirmi yıldır, nanoakışkan adı verilen yeni nesil akışkanlar üzerinde oldukça yoğun şekilde çalışılmaktadır. Nanoakışkanlar, temel akışkan ve nano taneciklerden oluşan koloidal karışımlardır. Nanoakışkan terimi de ilk kez Choi [4] tarafından kullanılmıştır. O günden itibaren, nanoakışkanlar ile ilgili yayınlar üstel şekilde artmıştır [5]. Misale ve arkadaşları [6], önceki çalışmalarında oluşturdukları deney sistemini kullanarak nanoakışkan kullanımının TFmDTD'lerinin ısı-akış başarımına etkisini araştırmışlardır. Deneyleri, önce saf su, sonrasında ise Al₂O₃ nano tanecikler ve saf suyun farklı derişimlere sahip karışımlarından elde edilen nanoakışkanları kullanarak yapmışlardır. Isıtıcı gücü 10-50 W, eğim açısı 0-75° aralığında farklı değerler için ve ısı kuyusu sıcaklığı 10°C ve 20°C için deneyler yapılmıştır. Sonuç olarak, 75° eğim açısı dışında, çalışma sıvısının nanoakışkan ve saf su olduğu durumlar için TFmDTD'nin ısıl başarımının değişmediği, 75° eğim açısı içinse nanoakışkan kullanımının başarımı az da olsa artırdığını belirtmişlerdir. Bu sonuçlardan farklı olarak, kısa süre önce yapılan bir çalışmada, Turgut ve arkadaşları [7, 8], farklı eğim açıları ve 20°C ısı kuyusu sıcaklığı için 10-50 W ısıtıcı gücü aralığında TFmDTD'lerin ısıl başarımının nanoakışkan kullanımı ile iyileştiği sonucuna varmışlardır.

Nanoakışkanlar için literatürde bulunan birçok kafa karıştırıcı sonucun yanında [9], TFmDTD'ler için de birbiri ile uyumsuz sonuçların görülmesi şaşırtıcı olmamakla birlikte, araştırılması gereken bir sorundur. Bu noktada, sistemin ve olayın fiziksel karmaşıklığı nedeniyle, kuramsal yaklaşımlar ile elde edilen analitik çözümlerin olmaması, yapılan deneysel sonuçların değerlendirilmesi ve doğrulanmasında sayısal benzetim yöntemlerinin etkili bir araç olacağı sonucunu doğurmaktadır. Farklı nanoakışkanlar da dahil olmak üzere, çeşitli çalışma sıvıları ve sınır şartları kullanılarak oluşturulan TFDTD'ler üzerine yapılmış sayısal benzetim çalışmaları bulunmakla birlikte [3, 10-13], TFmDTD'lerde nanoakışkan kullanımı konusunda yapılan tek sayısal benzetim çalışması, Karadeniz ve ark. tarafından [14] sunulmuştur. Nanoakışkanlar termodinamik özelliklerinin sıcaklıkla değişiminin etkisi ayrıntılı olarak sayısal modele dahil edilerek deneysel çalışma sonuçlarına paralellik gösteren ve ayrıntılı incelemelerde kullanılacak bir sayısal model önerilmiştir. Bu çalışma kapsamında, önceki çalışmanın devamı olarak, TFmDTD'nün düşey ile yaptığı açının (0, 30, 60, 75°) başarımına etkisi incelenmiştir. Turgut ve arkadaşları [7, 8] tarafından yapılan deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlarla, bu çalışmadan elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak, bilgisayar benzetimlerinin farklı fiziksel koşullarda TFmDTD'lerin çalışma koşullarını modellemedeki başarısı incelenmiştir.



2. SAYISAL ÇALIŞMA

Turgut ve arkadaşları [8] tarafından kullanılan mevcut deney düzeneğinde (Şekil 1), ısıtıcı gücü, ısı kuyusu sıcaklığı, TFmDTD'nin düşey eksenle yaptığı açı ve çalışma akışkanı tipi parametre olarak incelenebilmektedir. Sistemde boyutsal değişiklik yapmak mümkün olmadığından geometrinin TFmDTD üzerindeki etkisi incelenememektedir. Deneysel olarak farklı nanoakışkanların incelenmesi oldukça zahmetli bir süreçtir. Ticari olarak satılan nanoakışkanların yüksek fiyatları ve laboratuvar ortamında nanoakışkan üretiminin zorlukları nedeniyle, deney düzeneğinde kullanılabilen çalışma akışkanı tipleri de sınırlı kalmaktadır. Ayrıca mevcut deneysel yöntem, sadece belli noktalardan sıcaklık ölçümü yapılmasına imkân sağlamaktadır ve bu sıcaklık ölçümleri üzerinden başarımlar belirlenmektedir. Debi, ısı akısı, boru içerisindeki hız ve sıcaklık dağılımlarının incelenmesi mümkün değildir.

Yukarıda bahsedilen zorluklar nedeniyle, bilgisayar ortamında yapılan benzetim çalışmalarının TFmDTD'lerinin başarımlarının belirlenmesinde uygun ve verimli bir araç olacağı görülmektedir. Bu şekilde, kısa zamanda birçok parametrenin karşılaştırmalı olarak incelenmesi mümkün olabilmektedir. Ayrıca literatürde yer alan farklı nanoakışkanlara ait karakterizasyon verileri kullanılarak bu nanoakışkanların TFmDTD'lerinde kullanımı incelenebilecektir.

Oluşturulan sayısal model, sistemin sadece akışkan tarafını kapsamaktadır. Isıtıcı ve soğutucu kısımlar sınır şartı olarak sayısal modele dahil edilmiştir. Soğutucu kısmın sıcaklığı deneysel çalışmada soğutucu banyo kullanılarak sabitlendiği için, sayısal modelde soğutucunun akışkan ile temas ettiği yüzeye sabit sıcaklık sınır şartı uygulanmıştır. Isıtıcı tarafında, deneysel çalışmada farklı güçlerde ısı üretebilen elektrikli ısı-

tıcı (direnç) kullanılmıştır. Sayısal modelde bu etki, yüzeyde sabit ısı akısı sınır şartı olarak sayısal modelin ilgili yüzeyine uygulanmıştır. Deneysel çalışmada tüm deney sistemi uygun şekilde yalıtılmış olduğundan, sayısal modelin tüm diğer yüzeyleri de yalıtılmış kabul edilmiştir. Laminer doğal taşınım akışını modellemek için Boussinesq yaklaşımı yerine tam doğal taşınım modeli kullanılmıştır. Ayrıca, viskozite, ısı genişleme katsayısı ve ısı iletim katsayısı da sıcaklığa bağlı değişken olarak tanımlanmış, böylece sıcaklıkla harekete geçen doğal taşınım döngüsünün gerçeğe en yakın şekilde modellenmesi sağlanmıştır. Etkin özgül ısı (C_e) değeri incelenen tüm akışkanlar için Denklem 1 [15] kullanılarak hesaplanmış ve ortalama döngü sıcaklığında sabit olarak kabul edilmiştir. Akışkan olarak saf suyun kullanıldığı durum için suyun termofiziksel özelliklerinin sıcaklıkla değişimi tablolardan alınmıştır. Akışkan olarak Al_2O_3 - saf su nanoakışkanlar için literatürde verilen modellerden elde edilen etkin yoğunluk (ρ_e) ve etkin ısıl genişleme katsayısı (β_e) değerleri, sırasıyla Denklem 2 [16] ve 3 [17] kullanılarak hesaplanmıştır. Isı iletim katsayısı ve viskozitenin sıcaklıkla değişimini sayısal modelde uygulamak için, sırasıyla Turgut ve arkadaşları [7], ve Elçioğlu'nun [18] ölçüm sonuçları kullanılmıştır.

$$C_e = \frac{\phi_p(\rho C)_p + (1 - \phi_p)(\rho C)_f}{\phi_p \rho_p + (1 - \phi_p)\rho_f} \quad (1)$$

$$\rho_e = (1 - \phi_p)\rho_f + \phi_p \rho_p \quad (2)$$

$$(\rho\beta)_e = (1 - \phi_p)(\rho\beta)_f + \phi_p(\rho\beta)_p \quad (3)$$

Bu denklemlerde ϕ , katkı oranıdır ve f , akışkanı; p ise parçacığı temsil etmektedir. Termofiziksel özelliklerin sıcaklıkla değişimi ve sayısal modelle bütünleştirilmesi ile ilgili ayrıntı-

lar Karadeniz ve arkadaşlarının [14] çalışmasında verilmiştir. Bilgisayar benzetimlerinde kullanılan sayısal modelin ağ yapısında 348087 eleman bulunmaktadır. Ağ yapısından bağımsızlık çalışması da Karadeniz ve arkadaşlarının [14] çalışmasında bulunabilir. Farklı açıları (Θ) ayarlamak için yerçekimi ivmesinin yönü değiştirilmiştir.

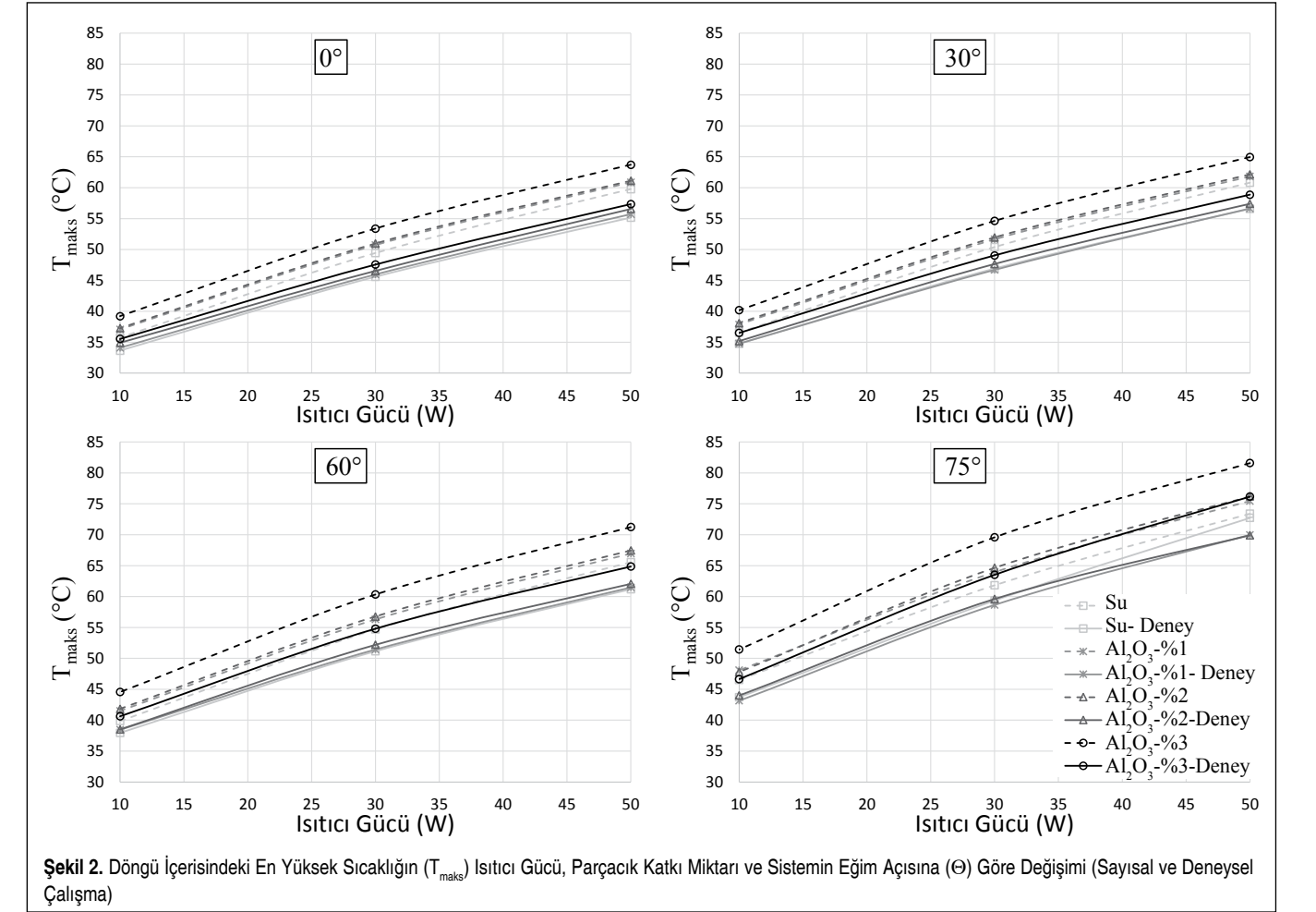
3. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Sayısal çalışmadan elde edilen T_{maks} (döngüdeki en yüksek sıcaklık), $\Delta T_{ısıtıcı}$ (ısıtıcının iki ucu arasındaki sıcaklık farkı) ve etkinlik (Gerçekleşen ısı aktarımının olası en yüksek ısı aktarımına oranını temsil etmektedir.) değerleri, deneylerden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Etkinlik değeri $T_2 > T_5$ durumu için;

$$\epsilon = \frac{T_2 - T_5}{T_2 - T_6} \quad (4)$$

şeklinde hesaplanır. Bu ölçütler, DTD'lerin başarımlarının incelenmesinde ve farklı sistemlerin birbirleri ile kıyaslan-

masında yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 2'de T_{maks} değerlerinin saf su ve hacimce %1, %2 ve %3 Al_2O_3 içeren saf su nanoakışkanlar için farklı ısıtıcı güçleriyle değişiminin hem deneysel hem de sayısal sonuçları farklı açısal konumlar için verilmiştir. Dikey yerleşim için ($\Theta=0^\circ$) döngü içerisindeki en yüksek sıcaklık $35^\circ C$ ile $65^\circ C$ aralığında değişmektedir. Sayısal çalışmada, incelenen tüm aralık ve akışkanlar için döngüdeki en yüksek sıcaklığı deneysel çalışmada elde edilen daha yüksek bulunmuştur. Sayısal çalışmada ısıtıcı yüzeyinde üretilen ısının tamamı akışkan ortama geçmektedir. Ancak gerçek çalışma koşullarında bir miktar ısı çevre ortama aktarılmaktadır. Bu nedenle, sayısal çalışmanın farklılığına modellenmeyen ısı kayıplarından kaynaklandığını düşünülmektedir. Şekil 2'de, dikey yerleşim için ($\Theta=0^\circ$), ayrıca sayısal çalışma ile deneysel çalışma arasındaki farkın parçacık miktarıyla birlikte daha fazla arttığı görülmüştür. Sayısal çalışmada özellikle %2'den %3'e artan parçacık oranında hızlı bir yükseliş göze çarpmaktadır. Benzer bir değişim, sıcaklıkla değişimi ölçülerek bulunan viskozite ve ısı iletim katsayısı değerlerinde de görülmüştür [14]. Sayısal çalışmayı etkileyebilecek diğer tüm parametreler (geometri, ağ yapı, sınır şartları, çözüm yöntemi ve diğer kabuller) aynı olduğundan ve diğer



özelliklerde bu tip bir sıçrama görülmediğinden, sayısal çalışmada görülen %2'den %3'e artan parçacık oranındaki hızlı yükselişin ölçüm verilerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bahsedilen farklılıklara rağmen, artan parçacık miktarı ve ısıtıcı gücü ile T_{maks} değerindeki artışın, sayısal çalışmada oldukça iyi yansıtılabildiği görülmektedir.

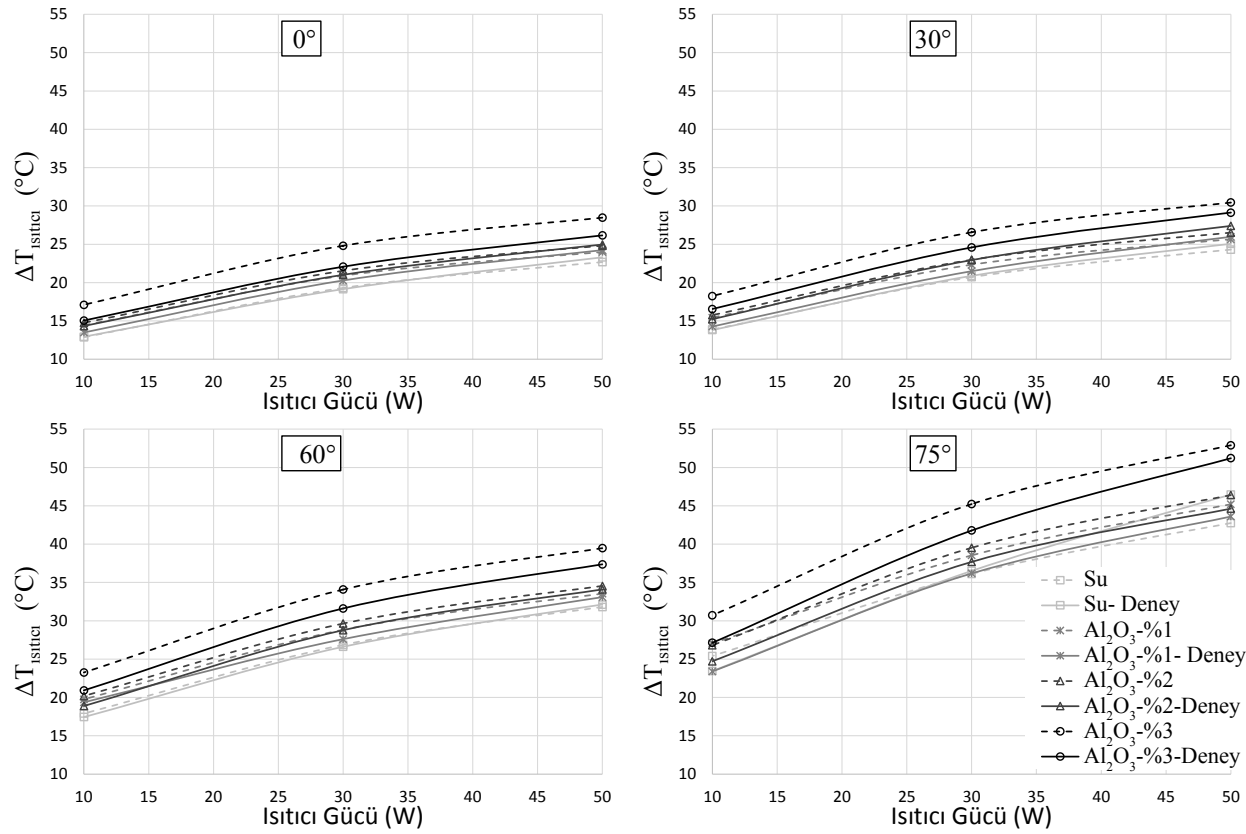
$\Theta=30^\circ$ ve $\Theta=60^\circ$ için de sayısal çalışma deneysel çalışmadan elde edilen bulguları yansıtmaktadır; açı arttıkça, her durumda döngü içerisindeki en yüksek sıcaklık artmaktadır ($\Theta=0^\circ-30^\circ$ geçişinde artış çok az). Ancak Θ arttıkça, %2'den %3'e artan parçacık oranında T_{maks} değerindeki artış, deneysel çalışma için de düşük parçacık oranlarına göre daha yüksektir. Bunun yanında, yukarıda bahsedilen viskozite ve ısı iletim katsayısı ölçümlerinden kaynaklandığı düşünülen farklılıklar sayısal çalışma sonuçlarında halen görülmektedir ve aynı durumdaki artışlar deneysel çalışmaya göre daha yüksektir. $\Theta=75^\circ$ için de benzer şeyler söylenebilir. Bu açı değeri için daha da çarpıcı olan durum, yüksek ısıtıcı güçlerinde deneysel çalışma sonuçlarında saf su için görülen farklılıktır. 30 W'dan büyük güçlerde ısıtıcı bölgesinde kaynama başladığından, T_{maks} değerinin beklenenden daha yüksek çıktığı görülmektedir. Sayısal çalışmada kaynama modellenmediğinden T_{maks} 'ın hızlı değişimi yakalanamamıştır.

Isıtıcının iki ucu arasındaki sıcaklık farkı ($\Delta T_{ısıtıcı}$) üzerinden bakıldığında da (Şekil 3) açı arttıkça, her durumda döngü içerisindeki en yüksek sıcaklığın arttığı görülmektedir. Saf su için $\Theta=75^\circ$ değerindeki kaynama bölgesi dışında deneysel ve sayısal çalışma sonuçlarının neredeyse çakıştığı görülmektedir. Tanecik oranı arttıkça, sonuçlar arasındaki sapma artsa da başarımlar ölçütü olarak $\Delta T_{ısıtıcı}$ değerini kullanmak, sayısal çalışmanın farklı durumlardaki değişimleri yansıtmaya başarısını artırmaktadır.

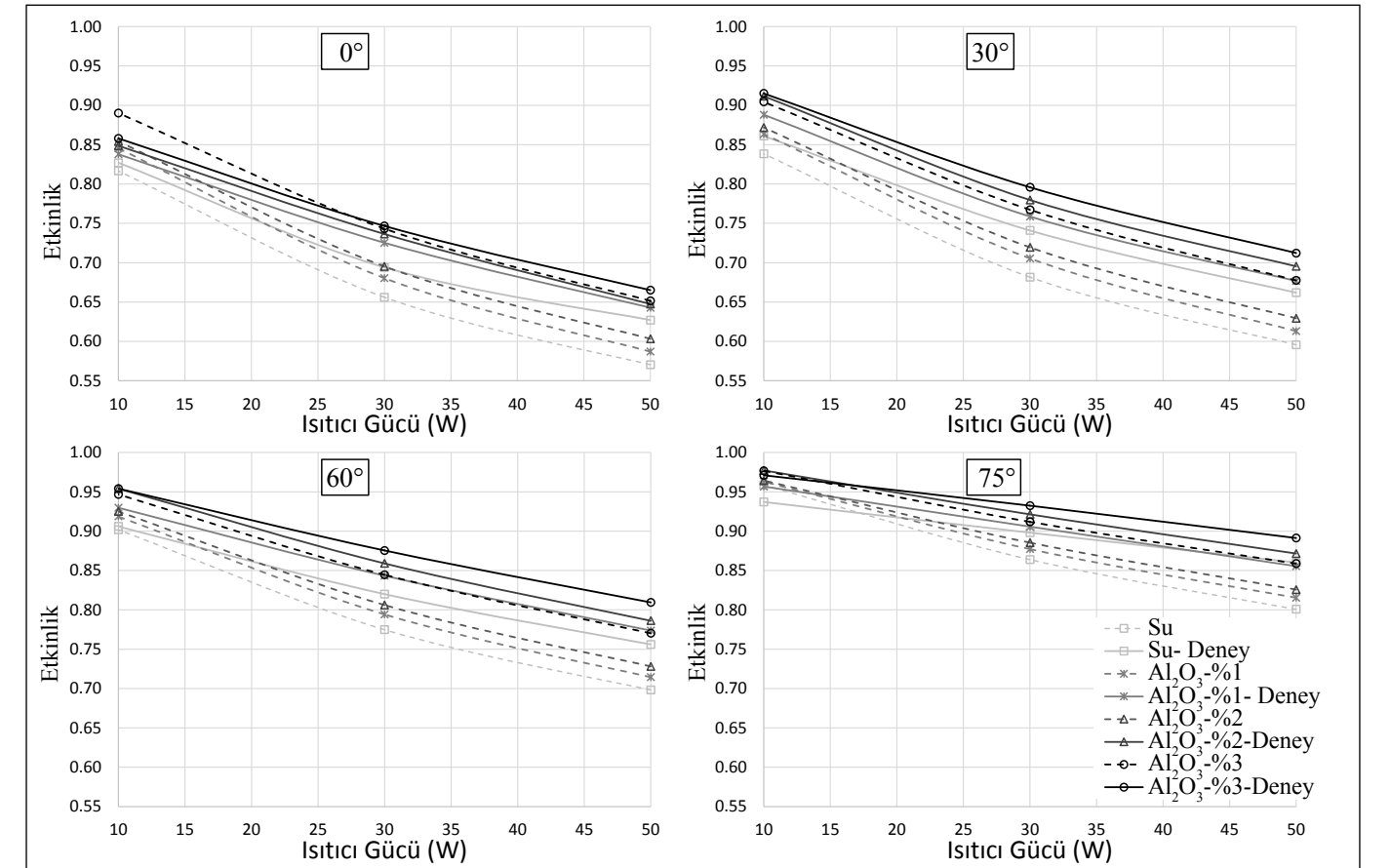
Başarımlar ölçütü olarak etkinlik tanımı kullanıldığında ise (Şekil 4), tüm açı, tanecik katkı miktarı ve ısıtıcı gücü değerleri için (kaynama olan durumlar hariç) sayısal çalışmada deneysel çalışmadan daha düşük sonuçlar elde edilmiştir. Yine de incelenen tüm parametreler için oldukça yakın sonuçlar elde edildiği söylenebilir.

4. SONUÇ

Tek Fazlı mini Doğal Taşınım Döngülerinin (TFmDTD'nin) düşey ile yaptığı açı ($0, 30, 60, 75^\circ$), kullanılan nanoakışkanın tanecik oranı (saf su, %1, %2, %3 Al_2O_3 katkısı) ve ısıtıcı gücü (10, 20, 30, 40, 50 W) gibi, farklı çalışma koşulları altındaki başarımları bilgisayar benzetimleri kullanılarak incelenmiştir.



Şekil 3. Isıtıcının İki Ucu Arasındaki Sıcaklık Farkının ($\Delta T_{ısıtıcı}$) Isıtıcı Gücü, Parçacık Katkı Miktarı ve Sistemin Yatıklığına (Θ) Göre Değişimi (Sayısal ve Deneysel Çalışma)



Şekil 4. Etkinliğin Isıtıcı Gücü, Parçacık Katkı Miktarı ve Sistemin Yatıklığına (Θ) Göre Değişimi (Sayısal ve Deneysel Çalışma)

Ayrıca farklı başarımlar ölçütlerinin kullanıldığı durumlarda, sayısal çalışma ile deneysel çalışma arasındaki farklılıklar irdelenerek tasarım aşamasında kullanılacak bu ölçütlerin güçlü ve zayıf yönleri ortaya konmuştur.

Deneysel çalışmadan bir miktar sapma gösterse de sayısal çalışma sonuçları TFmDTD'lerin farklı çalışma koşulları altındaki davranışlarını modellemede etkili bir araçtır. Bu nedenle, yapılması zahmetli ve pahalı deneyler yerine, bilgisayar ortamında birçok parametrenin hızlıca incelenmesi mümkündür. Ayrıca sayısal çalışma ile sadece yerel ortalama sıcaklık değil, istenilen tüm bölgelerdeki sıcaklık ve hız dağılımı da kolaylıkla belirlenebileceği için ayrıntılı incelemelerin de yapılması mümkün olacaktır. Böylece hem nanoakışkanların hem de TFmDTD'lerin öncelikle elektronik cihaz soğutma alanında olmak üzere, uygulama alanlarının oluşturulması ve yaygınlaştırılması sağlanabilir. Ayrıca bu çalışma gibi sayısal ve deneysel çalışmanın birlikte yürütüldüğü melez yöntemler, nanoakışkanlar hakkında devam eden tartışmalara, uygulama alanı ve literatürdeki malzeme karakterizasyonu ile ilgili çelişkili noktaların aydınlatılması yönünde katkı sağlamaktadır.

SEMBOLLER

C özgül ısı ($kJ/kg^\circ C$)

T sıcaklık ($^\circ C$)

Alt İndisler

e etkin

p parçacık

f akışkan

Yunan Harfleri

ρ yoğunluk (kg/m^3)

Φ hacimsel katkı oranı

β ısı genleşme katsayısı ($1/K$)

ϵ etkinlik

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, İzmir Katip Çelebi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 2014-1-MÜH-19 numaralı proje ve Dokuz Eylül Üniversitesi Rektörlüğü tarafından 2013.KB.FEN.016 numaralı Bilimsel Araştırma Projesi ile desteklenmiştir. Desteklerini esirgemeyen bu iki üniversitemize teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

1. **Basu, D. N., Bhattacharyya, S., Das, P. K.** 2013. "Development of a Unified Model for the Steady-State Operation of Single-Phase Natural Circulation Loops," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 62, p. 452-462.
2. **Misale, M., Garibaldi, P., Passos, J. C., Bitencourt, G. G.** 2007. "Experiments in a Single-Phase Natural Circulation Mini-Loop," *Experimental Thermal and Fluid Sciences*, vol. 31, p. 1111-1120.
3. **Wang, J. Y., Chuang, T. J., Ferng, Y. M.** 2013. "CFD Investigating Flow and Heat Transfer Characteristics in a Natural Circulation Loop," *Annals of Nuclear Energy*, vol. 58, p. 65-71.
4. **Choi, S. U. S.** 1995. "Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles," In *Developments and Applications of Non-Newtonian Flows*, Ed. Siginer, D. A., Wang, H. P., ASME, FED, vol. 231, p. 99-105.
5. **Buschmann, M. H.** 2013. "Nanofluids in Thermosyphons and Heat Pipes: Overview of Recent Experiments and Modelling Approaches," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 72, p. 1-17.
6. **Misale, M., Devia, F., Garibaldi, P.** 2012. "Experiments with Al₂O₃ Nanofluid in a Single Phase Natural Circulation Mini-Loop: Preliminary results," *Applied Thermal Engineering*, vol. 40, p. 64-70.
7. **Turgut, A., Doganay, S.** 2014. "Thermal Performance of a Single Phase Natural Circulation Mini Loop Working with Nanofluid," *High Temperatures-High Pressures*, vol. 43 (4), p. 311-320.
8. **Doğanay, S., Turgut, A.** 2015. "Enhanced Effectiveness of Nanofluid Based Natural Circulation Mini Loop," *Applied Thermal Engineering*, vol. 75, p. 669-676.
9. **Ehsan, B. H., Saleemi, M., Nikkam, N., Khodabandeh, R., Toprak, M. S., Muhammed, M., Palm, B.** 2014. "Accurate Basis of Comparison for Convective Heat Transfer in Nanofluids," *International Communications on Heat and Mass Transfer*, vol. 52, p. 1-7.
10. **Basu, D. N., S. Bhattacharyya, Das. P. K.** 2012. "Performance Comparison of Rectangular and Toroidal Natural Circulation Loops Under Steady and Transient Conditions," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 57, p. 142-151.
11. **Basu, D. N., S. Bhattacharyya, P. K. Das.** 2013. "Influence of Geometry and Operating Parameters on the Stability Response of Single-Phase Natural Circulation Loop," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 58, p. 322-334.
12. **Devia, F., Misale, M.** 2012. "Analysis of the Effects of Heat Sink Temperature on Single-Phase Natural Circulations Behaviour," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 59, p. 195-202.
13. **Pilkhwai, D. S., Ambrosini, W., Forgiione, N., Vijayan, P. K., Saha, D., Ferreri, J. C.** 2007. "Analysis of the Unstable Behaviour of a Single-Phase Natural Circulation Loop with One-Dimensional and Computational Fluid-Dynamic Models," *Annals of Nuclear Energy*, vol. 34, p. 339-355.
14. **Karadeniz, Z. H., Doğanay, S., Turgut, A.** 2014. "Numerical Study on Nanofluid Based Single Phase Natural Circulation Mini Loops," *Convective Heat and Mass Transfer, CONV-14*, 8-13 June 2014, İzmir.
15. **Zhou, S. Q., Ni, R.** 2008. "Measurement of the Specific Heat Capacity of Water-Based Al₂O₃ Nanofluid," *Applied Physics Letters*, vol. 92.
16. **Yu, W., France, D. M., Choi, S. U. S., Routbort, J. L.** 2007. "Review and Assessment of Nanofluid Technology for Transportation and Other Applications," *Heat Transfer Engineering*, vol. 29, p. 432-460.
17. **Bourantas, G. C., Skouras, E. D., Loukopoulos, V. C., Burganos, V. N.** 2014. "Heat Transfer and Natural Convection of Nanofluids in Porous Media," *European Journal of Mechanics B/Fluids*, vol. 43, p. 45-56.
18. **Elçioğlu, E. B.** 2013. "Experimental and Theoretical Investigations on Alumina-Water Nanofluid Viscosity with Statistical Analysis," *Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.