



**Bu bir MMO
yayıdır**

MMO bu yayındaki ifadelerden, fikirlerden, toplantıda çıkan sonuçlardan, teknik bilgi ve basım hatalarından sorumlu değildir.

NANOAKIŞKAN İÇEREN TEK FAZLI MİNİ DOĞAL TAŞINIM DÖNGÜLERİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

ZİYA HAKTAN KARADENİZ
İZMİR KATİP ÇELEBİ ÜNİVERSİTESİ

ALPASLAN TURGUT
DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ

NANOAKIŞKAN İÇEREN TEK FAZLI MİNİ DOĞAL TAŞINIM DÖNGÜLERİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Ziya Haktan KARADENİZ
Alpaslan TURGUT

ÖZET

Bu çalışma kapsamında, Tek Fazlı mini Doğal Taşınım Döngülerinin (TFmDTD'nin) farklı çalışma koşulları altındaki başarımı bilgisayar benzetimleri kullanılarak incelenmiştir. TFmDTD'nin düşey ile yaptığı açının (0, 30, 60, 75°), kullanılan nanoakışkanın tanecik oranının (saf su, %1, %2, %3 Al₂O₃ katkısı) ve ısıtıcı gücünün (10, 20, 30, 40, 50W) başarımına etkisi incelenmiştir. Önceki aşamalarda yapılan 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 başarım ölçütleri (döngüdeki en yüksek sıcaklık, ısıtıcının iki ucu arasındaki sıcaklık farkı ve etkinlik) kullanılarak sayısal çalışmanın farklı başarım ölçütleri ile yapılacak incelemeler için güçlü ve zayıf yönleri ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Nanoakışkan, Tek fazlı akış, Doğal taşınım.

ABSTRACT

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

Key Words: Nanofluid, Single phase flow, Natural convection.

1. GİRİŞ

Doğal taşınım döngüleri (DTD) sıcak ortamdan 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 kullanılmaktadırlar [1].

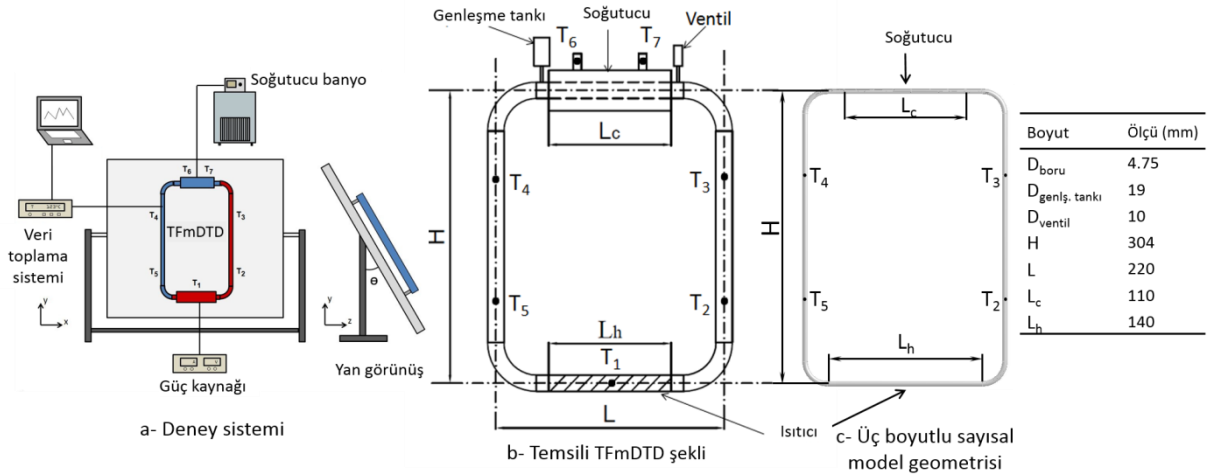
Son yıllarda elektronik aletlere yönelik yoğun talep nedeniyle, küçük iletişim cihazları ve bilgisayarlar açısından cihaz sayısında büyük bir sıçrama yaşandı. Hızlı rekabet ortamı nedeniyle bu cihazların ısı yönetimi (cihaz içerisinde oluşan atık ısının cihazın çalışma şartlarını etkilemeyecek şekilde 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 olmak 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 ark. [2] 4 mm çapında bakır boru kullanarak oluşturulan dikdörtgen şekilli TFmDTD için; içerisinde saf su kullanarak, 0°C sabit ısı kuyusu sıcaklığı şartı için, 2,5-25W aralığında ısıtıcı güçleri ve 0-75° aralığında eğim açıları için yapılan deneylerinden 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 ısıl yönetimi sorunlarını çözmek için etkili bir araç olabileceği sonucuna varmışlardır. Kısa bir süre önce Wang ve ark. [3] Misale ve ark. [2] tarafından sunulan deneysel çalışmadaki geometri ve sınır şartlarına sadık kalarak zamana bağlı sayısal bir çalışma yapmışlar ve sonuçlarını deneysel çalışma sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Sayısal ve deneysel çalışma sonuçlarının iyi bir uyum gösterdiğini belirterek, oluşturulan sayısal benzetim modelinin TFmDTD'lerinin ısıl 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 ve nanoakışkan terimi ilk kez Choi [4] tarafından kullanılmıştır. O günden itibaren nanoakışkanlar ile ilgili yayınlar üstel şekilde artmıştır [5]. Misale ve ark. [6] önceki çalışmalarında oluşturdukları deney sistemini kullanarak nanoakışkan kullanımının TFmDTD'lerinin ısıl-akış başarımına etkisini araştırmışlardır. Deneyleri önce saf su sonrasında Al_2O_3 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 azda olsa artırdığını söylemişlerdir. Bu sonuçlardan farklı olarak, kısa süre önce yapılan bir çalışmada, Turgut ve ark. [7, 8] 0° eğim açısı ve 20°C ısı kuyusu sıcaklığı için 10-50W ısıtıcı gücü aralığında TFmDTD'lerin ısıl başarımının iyileştirdiği sonucuna varmışlardır.

Nanoakışkanlar için literatürde bulunan birçok kafa karıştırıcı sonucun yanında [8] TFmDTD'ler için de birbiri ile uyumsuz sonuçların görülmesi şaşırtıcı olmamakla birlikte araştırılması gereken bir sorundur. Bu noktada, sistemin ve olayın fiziğinin 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 ve 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 ark. [7] tarafından yapılan deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlarla, bu çalışmadan elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak, bilgisayar benzetimlerinin farklı fiziksel koşullarda TFmDTD'lerin çalışma koşullarını modellemekteki başarısı incelenmiştir.

2. SAYISAL ÇALIŞMA

Turgut ve ark. [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.



Şekil 1. TFmDTD deneyleri için kullanılan sistemin bileşenleri (a), TFmDTD temsili geometrisi (b) ve bu geometriye uygun hazırlanmış üç boyutlu sayısal model ile ölçüleri.

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 ısıtıcı (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, ısıl genleşme 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 termodinamik 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 genleşme 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 ark.[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 ayrıntılar Karadeniz ve ark.'ın [14] çalışmasında verilmiştir. Bilgisayar benzetimlerinde kullanılan sayısal modelin ağ yapısında 348087 eleman bulunmaktadır. Ağ yapısından bağımsızlık çalışması da Karadeniz ve ark.'ın [14] çalışmasında bulunabilir. Farklı Θ açılarını ayarlamak için yerçekimi ivmesinin yönü değiştirilmiştir.

3. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

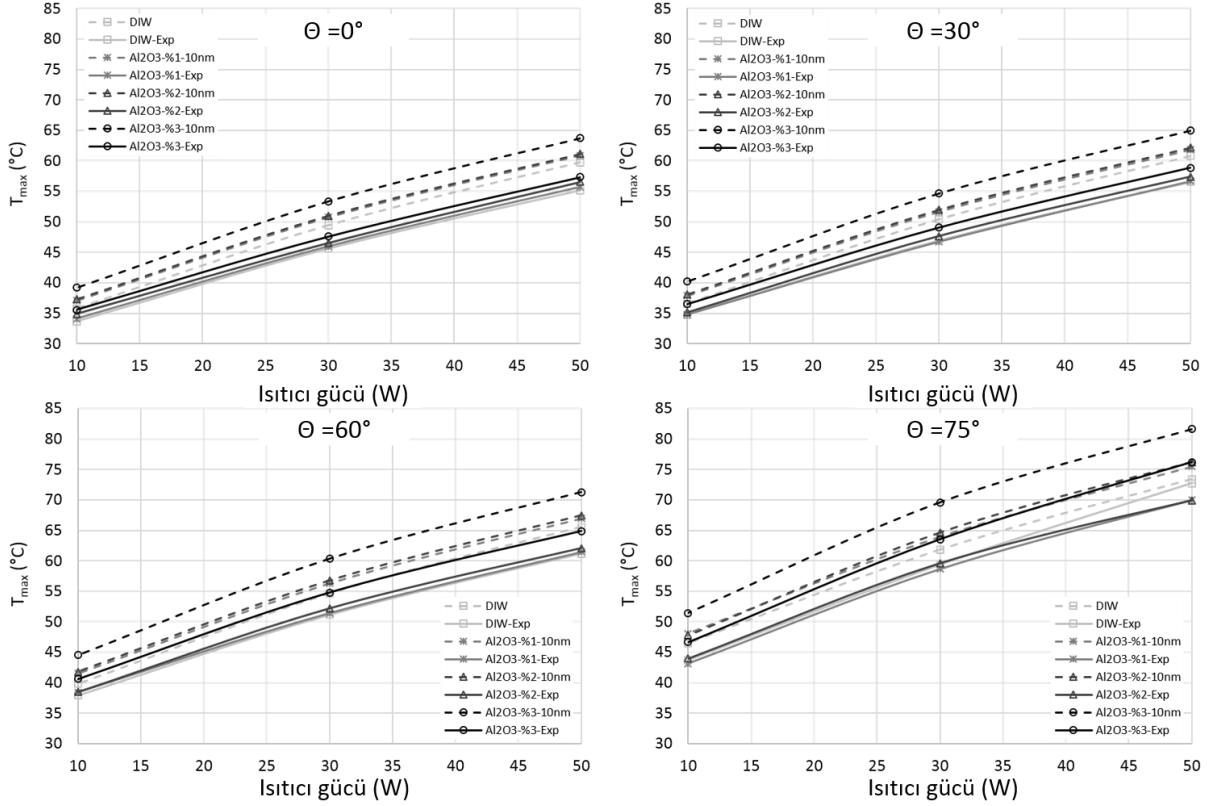
Sayısal çalışmadan elde edilen, T_{max} (döngüdeki en yüksek sıcaklık), ΔT_{heater} (ısıtıcının iki ucu arasındaki sıcaklık farkı) ve etkinlik (gerçekleşen ısı aktarımının olası en yüksek ısı aktarımına oranı temsil etmektedir) değerleri, deneylerden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Etkinlik 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 kıyaslanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 2'de T_{max} değerlerinin saf su (DIW) 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 açılarda 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 edilenden 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 farklılığının modellenmeyen ısı kayıplarından kaynaklandığı 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_{max} 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_{max} 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. 30W'dan büyük güçlerde ısıtıcı

bölgesinde kaynama başladığından, T_{max} değerinin beklenenden daha yüksek çıktığı görülmektedir. Sayısal çalışmada kaynama modellenmediğinden T_{max} 'ın hızlı değişimi yakalanamamıştır.



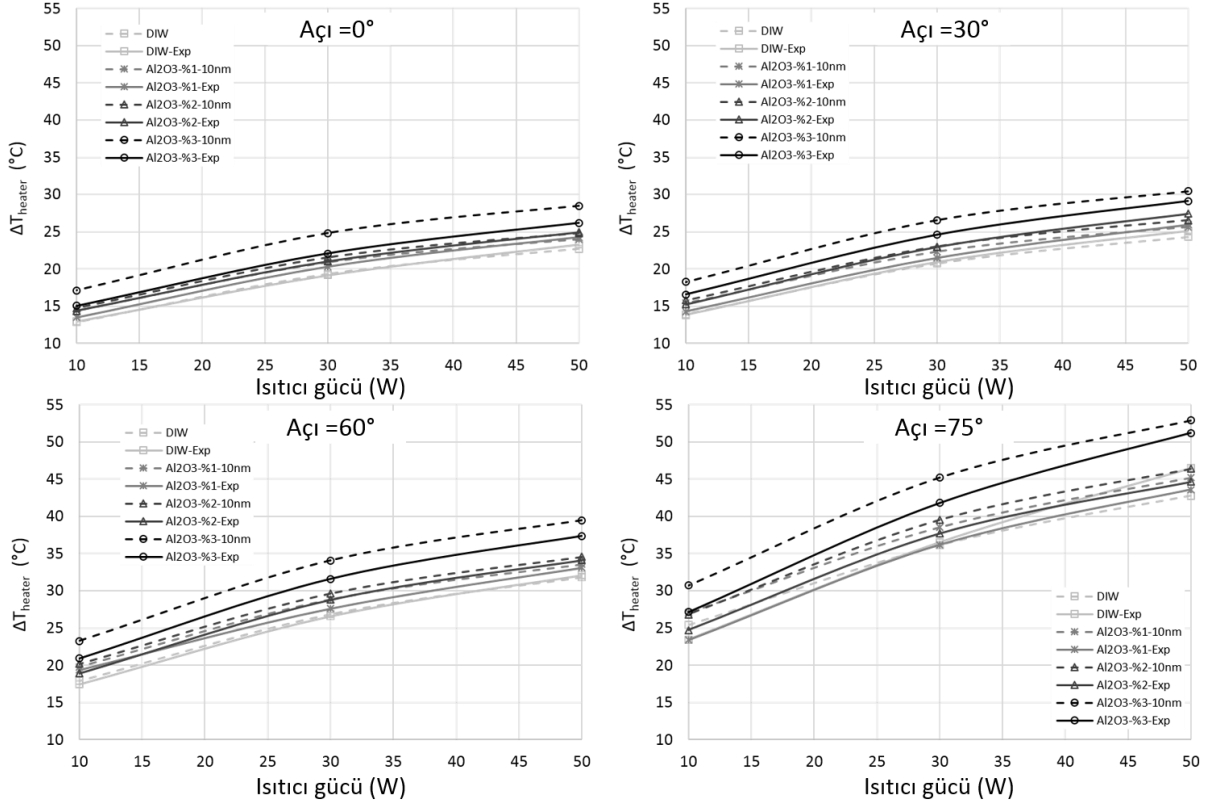
Şekil 2. Döngü içerisindeki en yüksek sıcaklığın (T_{max}) ısıtıcı gücü, parçacık katkı miktarı ve sistemin yatıklığına (Θ) göre değişimi (sayısal ve deneysel çalışma)

Isıtıcının iki ucu arasındaki sıcaklık farkı (ΔT_{heater}) 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 ΔT_{heater} değerini kullanmak sayısal çalışmanın farklı durumlardaki değişimleri yansıtmada başarısını artırmaktadır.

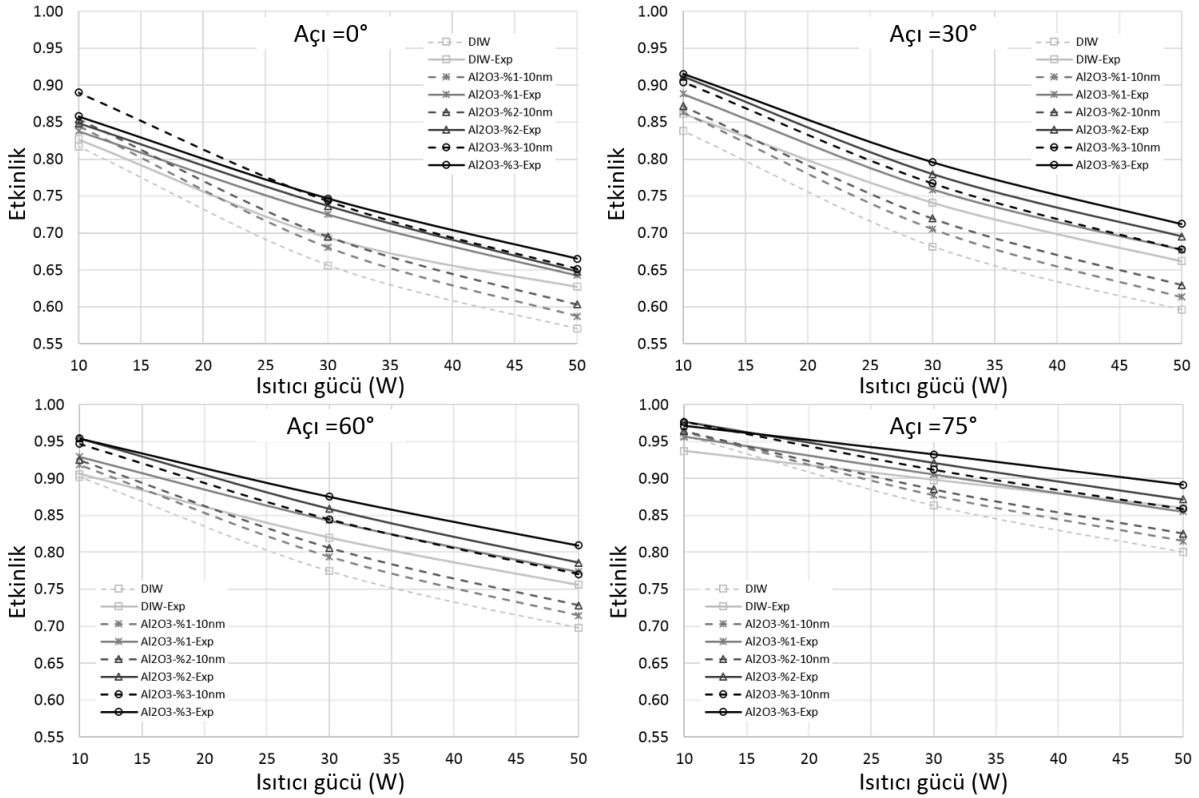
Başarımlar ölçütü olarak etkinlik tanımı kullanıldığında ise (Şekil 4), tüm açı, tanecik katkı miktarı ve ısıtıcı gücü değerleri için (kaynama olan durumlar hariç) sayısal çalışmada deneysel çalışmadan daha düşük sonuçlar elde edilmiştir. Yine de incelenen tüm parametreler için oldukça yakın sonuçlar 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 Al₂O₃ katkısı) ve ısıtıcı gücü (10, 20, 30, 40, 50W) gibi farklı çalışma koşulları altındaki başarımlar bilgisayar benzetimleri kullanılarak incelenmiştir. 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.



Şekil 3. Isıtıcının iki ucu arasındaki sıcaklık farkının (ΔT_{heater}) ısıtıcı gücü, parçacık katkı miktarı ve sistemin yatkınlığına (Θ) göre değişimi (sayısal ve deneysel çalışma)



Şekil 4. Etkinliğin ısıtıcı gücü, parçacık katkı miktarı ve sistemin yatkınlığına (Θ) göre değişimi (sayısal ve deneysel çalışma)

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.

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.

KAYNAKLAR

- [1] Basu D. N., Bhattacharyya S., Das P. K., "Development of a Unified Model for the Steady-State Operation of Single-Phase Natural Circulation Loops", Int. J. Heat Mass Tran., 62, 452–462, 2013.
- [2] Misale M., Garibaldi P., Passos J.C., Bitencourt G. G., "Experiments in a Single-Phase Natural Circulation Mini-Loop", Exp. Therm. Fluid Sci., 31, 1111–1120, 2007.
- [3] Wang J. Y., Chuang T.J., Ferng Y.M., "CFD Investigating Flow and Heat Transfer Characteristics in a Natural Circulation Loop", Ann. Nucl. Energy, 58, 65–71, 2013.
- [4] Choi S. U. S., "Enhancing Thermal Conductivity of Fluids With Nanoparticles, in: Siginer, D. A., Wang, H. P. (Eds.), Developments and Applications of Non-Newtonian Flows", ASME, FED-Vol. 231, 99–105, 1995.
- [5] [Buschmann](#) M. H., "Nanofluids in Thermosyphons and Heat Pipes: Overview of Recent Experiments and Modelling Approaches", Int. J. of Therm. Sci., 72, 1–17, 2013.
- [6] Misale M., Devia F., Garibaldi P., "Experiments with Al₂O₃ Nanofluid in a Single Phase Natural Circulation Mini-Loop: Preliminary results", Appl. Therm. Engineering, 40, 64-70, 2012.
- [7] Turgut A., Doganay S., "Thermal Performance of a Single Phase Natural Circulation Mini Loop Working with Nanofluid", High Temperatures-High Pressures, 43 (4), 311-320, 2014.
- [8] Doğanay, Serkan & Turgut Alpaslan. "Enhanced effectiveness of nanofluid based natural circulation mini loop." Applied Thermal Engineering 75, 669–676, 2015.
- [9] Ehsan B. H., Saleemi M., Nikkam N., Khodabandeh R., Toprak M. S., Muhammed M., Palm B., "Accurate Basis of Comparison for Convective Heat Transfer in Nanofluids", Int. Commun. Heat Mass, 52, 1-7, 2014.
- [10] Basu D. N., S. Bhattacharyya, & P. K. Das., "Performance Comparison of Rectangular and Toroidal Natural Circulation Loops Under Steady and Transient Conditions", Int. J. of Therm. Sci., 57, 142-151, 2012.
- [11] Basu D. N., S. Bhattacharyya, & P. K. Das., "Influence of Geometry and Operating Parameters on the Stability Response of Single-Phase Natural Circulation Loop", Int. J. Heat Mass Tran., 58, 322-334, 2013.
- [12] Devia F., & Misale M., "Analysis of the Effects of Heat Sink Temperature on Single-Phase Natural Circulations Behaviour", Int. J. of Therm. Sci., 59, 195-202, 2012.



- [13] Pilkhwal D. S., Ambrosini W., Forgione N., Vijayan P. K., Saha D., & Ferreri J. C., “Analysis of the Unstable Behaviour of a Single-Phase Natural Circulation Loop with One-Dimensional and Computational Fluid-Dynamic Models”, Ann. Nucl. Energy, 34, 339-355, 2007.
- [14] Karadeniz Z. H., Doğanay S., Turgut A., “Numerical Study On Nanofluid Based Single Phase Natural Circulation Mini Loops”, Proceedings of CONV-14: Int. Symp. on Convective Heat and Mass Transfer, 2014.
- [15] Zhou, S. Q., & Ni, R., “Measurement of the specific heat capacity of water-based Al₂O₃ nanofluid”, Applied Physics Letters, 92, 093123 - 093123-3, 2008.
- [16] Yu, W., France, D. M., Choi, S. U. S., & Routbort, J. L., “Review and Assessment of Nanofluid Technology For Transportation and Other Applications”, Heat Transfer Engineering, 29, 432-460, 2007.
- [17] Bourantas G. C., Skouras E. D., Loukopoulos V.C., & Burganos V.N., “[Heat transfer and natural convection of nanofluids in porous media](#)”, European Journal of Mechanics B/Fluids, 43, 45–56, 2014.
- [18] Elçioğlu E. B., “Experimental and Theoretical Investigations on Alumina-Water Nanofluid Viscosity with Statistical Analysis”, M.Sc Thesis, METU Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, 2013.

ÖZGEÇMİŞ

Ziya Haktan KARADENİZ

1980 yılında İzmir’de doğan Ziya Haktan KARADENİZ; 2002 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden, 2005 ve 2011 yıllarında ise sırasıyla aynı Üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Yüksek Lisans ve Doktora Programlarından mezun olmuştur. 2002-2013 yılları arasında Dokuz Eylül Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü’nde Araştırma görevlisi olarak çalışmıştır. 2013 yılından beri İzmir Katip Çelebi Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü’nde Yrd. Doç. Dr. olarak görev yapmaktadır.

Alpaslan TURGUT

1975 yılında İzmir’de doğan Alpaslan TURGUT; 1999 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden, 2004 ve 2010 yıllarında ise sırasıyla aynı Üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Enerji Yüksek Lisans ve Doktora Programlarından mezun olmuştur. 2002-2011 yılları arasında Dokuz Eylül Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü’nde Araştırma görevlisi olarak çalışmıştır. 2011 yılından beri aynı kurumda Yrd. Doç. Dr. olarak görev yapmaktadır.