



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**MİKROKANALLARDA NANOAKIŞKANLAR
İÇİN LAMİNER AKIŞTA GEÇİCİ REJİM
BİRLEŞİK ISI TRANSFERİ PROBLEMİ**

İlker GÖKTEPELİ

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Ocak-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

İlker GÖKTEPELİ tarafından hazırlanan “Mikrokanallarda Nanoakışkanlar İçin Laminer Akışta Geçici Rejim Birleşik Isı Transferi Problemi” adlı tez çalışması 19/01/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Dilek Nur ÖZEN

.....

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Şükrü Ulaş ATMACA

.....

Üye

Prof. Dr. Rafet YAPICI

.....

Üye

Doç. Dr. Ali ATEŞ

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Sercan DOĞAN

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Konya Teknik Üniversitesi Öğretim Üyesi Yetiştirme Programı (ÖYP) tarafından 2018-ÖYP-046 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İlker GÖKTEPELİ

Tarih: 29.10.2023

ÖZET

DOKTORA TEZİ

MİKROKANALLARDA NANOAKIŞKANLAR İÇİN LAMİNER AKIŞTA GEÇİCİ REJİM BİRLEŞİK ISI TRANSFERİ PROBLEMİ

İlker GÖKTEPELİ

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Şükrü Ulaş ATMACA

2024, 175 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Şükrü Ulaş ATMACA

Prof. Dr. Rafet YAPICI

Doç. Dr. Ali ATEŞ

Doç. Dr. Dilek Nur ÖZEN

Dr. Öğr. Üyesi Sercan DOĞAN

Mevcut tez çalışması kapsamında mikrokandaki laminer akışta nanoakışkanların ısı performans etkisi geçici rejim problemiyle sayısal olarak ele alınmıştır. Temel akışkan olarak suya farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinde ($\phi = \% 1, \% 4$ ve $\% 7$), ayrı ayrı olmak üzere Al_2O_3 , CuO ve TiO_2 nanoparçacıkların eklendiği durumlar ara yüzey ısı akısı, ara yüzey sıcaklığı, yığık sıcaklık ve radyal sıcaklık gibi ısı transferi karakteristikleri bakımından karşılaştırılmıştır. Bu bağlamda her bir nanoparçacık için açık literatürdeki iki farklı termofiziksel özellik modeli de kıyaslanmıştır. Buna göre sayısal çözüme Peclet sayısının ($Pe = 1, 5, 20$ ve 50), cidar kalınlık oranının ($d' = 0.02, 0.1, 0.2, 0.3, 0.6, 1$ ve 1.4), ısı yayılım katsayısı oranının ($\alpha_{w-nf} = 0.1, 1$ ve 10), ısı iletim katsayısı oranının ($k_{w-nf} = 0.1, 1$ ve 10) ve Brinkman sayısının ($Br = -0.2, -0.1, 0, 0.1$ ve 0.2) etkisi değerlendirilmiştir. Eksenel iletimin düşük Peclet sayılarında daha etkili olduğu ve $Pe \geq 20$ için bu değer ısı transferini önemli ölçüde etkilemediği gözlemlenmiştir. Cidar kalınlık oranındaki artışın ve ısı iletim katsayısı oranındaki azalışın ısı transferini azaltıcı yönde etkilediği görülmüştür. Isıl yayılım katsayısı oranının değişimi parametrik anlamda oldukça etkisiz kalmıştır. Viskoz yitim tesirini gösteren Brinkman sayısının sıfırdan farklı olduğu değerlerde ısı transferi yönü önemli ölçüde değişmiştir. Belirtilen parametrelerin değeri yükseldikçe sürekli rejime ulaşma süresi düşme eğilimi göstermiştir. Burada temel akışkan su için belirtilen durumlar nanoakışkanlar için de geçerlidir. Nanoakışkan için hacimsel konsantrasyon değerinin artışı ile ısı transferi de artmıştır. Nanoparçacık etkisi açısından sırasıyla CuO , Al_2O_3 ve TiO_2 , sabit hacimsel konsantrasyon değerinde daha fazla ısı performans artışını sağlamıştır. Her bir nanoparçacık için karşılaştırılan termofiziksel özellik modellerine göre birbirine en yakın sonucu Al_2O_3 nanoparçacığına ait modeller sunmuştur. Ancak diğer nanoparçacıklar için birer modelin bu anlamda yetersiz kaldığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Brinkman sayısı, ısı transferi, laminer akış, mikrokand, nanoakışkan, Nusselt sayısı, Peclet sayısı, su.

ABSTRACT

PhD THESIS

TRANSIENT CONJUGATE HEAT TRANSFER PROBLEM OF LAMINAR FLOW FOR NANOFLUIDS IN MICROCHANNELS

Ilker GOKTEPELI

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Mechanical Engineering**

Advisor: Asst. Prof. Dr. Sukru Ulas ATMACA

2024, 175 Pages

Jury

Asst. Prof. Dr. Sukru Ulas ATMACA

Prof. Dr. Rafet YAPICI

Assoc. Prof. Dr. Ali ATES

Assoc. Prof. Dr. Dilek Nur OZEN

Asst. Prof. Dr. Sercan DOGAN

The transient regime problem for the effect of nanofluids on thermal performance in a microchannel of laminar flow has been considered within the scope of the current thesis study. The situations where Al_2O_3 , CuO and TiO_2 nanoparticles added separately to water as base fluid at different volumetric concentration values ($\phi = 1\%$, 4% and 7%) have been compared in terms of heat transfer characteristics such as interfacial heat flux, interfacial temperature, bulk temperature and radial temperature. In this manner, two different thermophysical property models of open literature have been contrasted for each nanoparticle. Accordingly, the effects of Peclet number ($Pe = 1, 5, 20$ and 50), wall thickness ratio ($d' = 0.02, 0.1, 0.2, 0.3, 0.6, 1$ and 1.4), thermal diffusivity ratio ($\alpha_{w-nf} = 0.1, 1$ and 10), thermal conductivity ratio ($k_{w-nf} = 0.1, 1$ and 10) and Brinkman number ($Br = -0.2, -0.1, 0, 0.1$ and 0.2) on the numerical solution have been evaluated. It has been observed that axial conduction is more effective at low Peclet numbers, and for $Pe \geq 20$, this value does not significantly affect heat transfer. It has been seen that the increase in the wall thickness ratio and the decrease in the thermal conductivity ratio have a decreasing effect on heat transfer. The change for the thermal diffusivity ratio was quite ineffective parametrically. At values where the Brinkman number, showing the effect of viscous dissipation, is not equal to zero, the direction of heat transfer has been significantly changed. As the values of these parameters increased, the required time for steady state has tended to decrease. The conditions stated for the base fluid water are also valid for those of nanofluids. Heat transfer have also been enhanced by increasing the volumetric concentration for the nanofluid. In terms of nanoparticle effect, more thermal performance has been obtained at constant volumetric concentration via CuO , Al_2O_3 and TiO_2 , respectively. According to the thermophysical models compared for each nanoparticle, the models for nanoparticle of Al_2O_3 have presented the closest results to each other. However, it has been observed that one model for other nanoparticles is inadequate in this manner.

Keywords: Brinkman number, heat transfer, laminar flow, microchannel, nanofluid, Nusselt number, Peclet number, water.

ÖNSÖZ

Lisansüstü eğitimim kapsamındaki yüksek lisans ve doktora aşamaları boyunca danışmanlığımı üstlenerek bana her zaman yol gösteren, doktora süresince de sabırla ve özverili bir şekilde ilgilenen saygıdeğer hocam Dr. Öğr. Üyesi Şükrü Ulaş ATMACA'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tez izleme komitesindeki sayın hocalarım Prof. Dr. Rafet YAPICI'ya ve Doç. Dr. Ali ATEŞ'e teşekkür ederim. Jürideki sayın hocalarım Doç. Dr. Dilek Nur ÖZEN'e ve Dr. Öğr. Üyesi Sercan DOĞAN'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Tez çalışmasını 2018-ÖYP-046 kodlu proje ile destekleyen Konya Teknik Üniversitesi bünyesindeki Öğretim Üyesi Yetiştirme Programı (ÖYP) Koordinatörlüğü'ne de teşekkür ederim.

Destekleri dolayısıyla sayın hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Muharrem Hilmi AKSOY'a, Dr. Öğr. Üyesi Sercan YAĞMUR'a ve Arş. Gör. Murat İSPİR'e teşekkür ederim.

Yaşamımda hep yanımda olan ve her konudaki desteğini benden esirgemeyen sevgili anneme, babama ve kardeşime içtenlikle teşekkürlerimi sunarım. Hayatın her anında olduğu gibi doktora süresince de beni her zaman destekleyen, bu hususta anlayış ve sabır gösteren sevgili eşime ve canım kızıma çok teşekkür ederim.

İlker GÖKTEPELİ
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	9
3.1. Enerji Denklemi	10
3.2. Isı Transferi Terimleri.....	11
3.3. Başlangıç ve Sınır Şartları	11
3.3.1. Cidar bölgesi için başlangıç ve sınır şartları	11
3.3.2. Nanoakışkan bölgesi için başlangıç ve sınır şartları	12
3.4. Denklemlerin Boyutsuzlaştırılması.....	13
3.4.1. Cidar bölgesi için boyutsuz enerji denklemi.....	13
3.4.2. Nanoakışkan bölgesi için boyutsuz enerji denklemi.....	14
3.5. Isı Transferi Terimlerinin Boyutsuzlaştırılması.....	15
3.6. Başlangıç ve Sınır Şartlarının Boyutsuzlaştırılması	15
3.6.1. Cidar bölgesi için boyutsuz başlangıç ve sınır şartları	15
3.6.2. Nanoakışkan bölgesi için boyutsuz başlangıç ve sınır şartları	16
3.7. Denklem Ayırıklaştırılması.....	17
3.7.1. Cidar bölgesi için enerji denkleminin ayırıklaştırılması.....	17
3.7.2. Nanoakışkan bölgesi için enerji denkleminin ayırıklaştırılması	19
3.8. Başlangıç ve Sınır Şartlarının Ayırıklaştırılması	22
3.8.1. Cidar bölgesi için başlangıç ve sınır şartlarının ayırıklaştırılması.....	22
3.8.2. Nanoakışkan bölgesi için başlangıç ve sınır şartlarının ayırıklaştırılması.....	24
3.9. Termofiziksel Özellik Modelleri	25
3.10. Çözümün Parametrelerden Bağımsız Hale Getirilmesi	27
3.11. Çözüm İşlemi	29
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	31
4.1. Temel Akışkan Olan Su İçin Elde Edilen Sonuçlar.....	31
4.2. Nanoakışkanlar İçin Elde Edilen Sonuçlar	65
4.2.1. Su- Al_2O_3 nanoakışkanının etkisi.....	75
4.2.2. Su-CuO nanoakışkanının etkisi	102
4.2.3. Su- TiO_2 nanoakışkanının etkisi.....	130
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	158

5.1 Sonuçlar	158
5.2 neriler	159
KAYNAKLAR	160



SİMGELER VE KISALTMALAR

A	Ayrıklaştırılmış denklemdeki katsayı
Al ₂ O ₃	Alüminyum oksit
Br	Brinkman sayısı ($= \mu_{nf} u_m^2 k_{nf}^{-1} (T_1 - T_0)^{-1}$)
C _p	Özgül ısı [$J kg^{-1} °C^{-1}$]
CuO	Bakır oksit
d	Cidar kalınlığı [m]
D	Çap [m]
f	Ağırlık faktörü
h	Isı taşınım katsayısı [$W m^{-2} °C^{-1}$]
k	Isı iletim katsayısı [$W m^{-1} °C^{-1}$]
N, E, W, S	Kuzey, doğu, batı, güney
Nu	Nusselt sayısı ($= h D k^{-1}$)
P	Genel düğüm noktası
Pe	Peclet sayısı ($= 2 u_m r_{wi} \alpha_{nf}^{-1}$)
Pr	Prandtl sayısı ($= \nu_{nf} \alpha_{nf}^{-1}$)
q	Isı akısı [$W m^{-2}$]
r	Yarıçap [m]
Re	Reynolds sayısı ($= Pe Pr^{-1}$)
S	Kaynak terimi
t	Zaman [s]
T	Sıcaklık [$°C$]
TiO ₂	Titanyum oksit
u, v, w	Hız bileşeni [$m s^{-1}$]
x, r, θ	Koordinat
α	Isıl yayılım katsayısı ($= k \rho^{-1} C_p^{-1}$), [$m^2 s^{-1}$]
ρ	Yoğunluk [$kg m^{-3}$]
μ	Dinamik viskozite [$kg m^{-1} s^{-1}$]
ν	Kinematik viskozite [$m^2 s^{-1}$]
ϕ	Hacimsel konsantrasyon, viskoz yitim
θ	Boyutsuz sıcaklık

1. GİRİŞ

Enerji kaynaklarının sınırlı olması sebebiyle ısı sistemler açısından ısı transferinin artışı birçok endüstriyel uygulama için önemli bir konu durumundadır. Elektronik, haberleşme ve bilişim teknolojileri gibi alanlarda son birkaç yıllık dilimde ilgi çekici gelişmeler görülmüştür. Bu gelişmenin artarak sürme eğilimi göstereceği tahmin edilmektedir. Örnek olması açısından hibrit elektrikli araçlar, uzay teknolojileri, mikro işlemciler önemli araştırma sahalarında bulunmaktadır. Ancak verilen örnekler için ısının kontrolü oldukça zorlayıcı niteliktedir. Dolayısıyla bu ya da benzeri alanlarda kullanılacak akışkanların yüksek performanslı ve kompakt düzeyde olması istenmektedir. Isı transferi miktarının artırılması için kullanılan geleneksel ya da yeni sayılabilecek enerji kaynaklarının daha verimli şekilde kullanılabilmesi önemlidir (Ganvir ve ark., 2017). Bu anlamda minikanal veya mikrokanal uygulamaları ile mevcut boyutlardaki kanallara kıyasla ısı performans noktasında iyileştirme sağlanabilmektedir. Geleneksel yapıdaki kanallardan farklılaştırmak üzere minikanallar ve mikrokanallar çap değerlerine göre sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırmaya göre minikanallarda çap aralığı $200 \mu\text{m} < D \leq 3 \text{ mm}$ iken mikrokanallarda ise çap değerleri $10 \mu\text{m} < D \leq 200 \mu\text{m}$ arasında değişme göstermektedir. Geçiş mikrokanalda bu aralık $1 \mu\text{m} \leq D \leq 10 \mu\text{m}$ olmaktadır (Kandlikar ve ark., 2005).

Birleşik ısı transferi aynı anda iki farklı ortamda meydana gelen ısı transferi olayıdır. Nükleer enerji reaktörleri, içten yanmalı motorlar, elektronik parçaların soğutma işlemleri gibi örneklerde birleşik ısı transferi durumu geçerlilik göstermekte olup, benzer şekilde gaz türbinlerinin iç soğutması, ısı değiştiricileri, termoeleman tasarımı, metallerin ve alaşımların ısı işlemleri de mevcut konuya verilebilecek örnekler arasındadır (John ve ark., 2019). Ayrıca çalışma ya da durdurma gibi işletim şartlarında meydana gelen değişimlerin birleşik ısı transferinin geçerli olduğu sistemlerdeki ısı transferinin geçici rejim durumunda göz önünde bulundurulması gerekmektedir (Canlı, 2020). Cidardaki iletimle ısı transferinde sabit yüzey sıcaklığı ve sabit yüzey ısı akısı uygulamada en çok rastlanan sınır koşulları olarak gözlemlenmektedir. Akışkan bölgesinde de taşınım ile ısı transferi, problemin özelliklerine bağlı olarak farklı türlerde gerçekleşebilmektedir. Boru içerisindeki akışlarda cidar kalınlığı çok ince olarak tarif edilirse, akışkan ile temastaki cidar bölgesinin sıcaklığı, borunun dış yüzey sıcaklığı ile aynı olarak kabul edilmektedir. Ancak sistemdeki cidar kalınlığı çok ince değilse, bir başka deyişle kalın cidar kabulü varsa çok ince cidarlı borulardaki durum geçerli olmamaktadır. Mikrokanal olarak tarif

edilen borular için de bu varsayım doğruluk arz etmemektedir (Şen, 2016). Mikrokanallarda kalınlık oranı için en az 0.08 (Zhang ve ark., 2010) ve 0.17 (Cole ve Çetin, 2017) değerleri mevcuttur. Belirtilen durum aynı zamanda cidar malzemesinin ısı iletim katsayısının düşük olduğu hallerde de geçerlidir. Dolayısı bu iki durumda birleşik ısı transferinin ele alınması gereklilik arz etmektedir (Altun, 2013; Atmaca, 2013).

Mikrokanal uygulamaları ile ısı kontrol ve daha küçük boyutlara getirilen cihazlardan ısı transferi daha etkili bir hale gelmektedir. Küçük pasajlar vasıtasıyla yüzey alanının hacme oranının artırılması mümkün olmaktadır ve bu durum da ısı transferi artışını sağlamaktadır. Özellikle boyut ve ağırlık kısıtlarının ısı transferi ekipmanının tasarımını belirlediği düşünüldüğünde, mikrokanal uygulamaları oldukça önemli bir konu olarak ele alınmaktadır (Kandlikar, 2012).

Bu sebeple yüzey alanını genişletmek üzere kullanılan kanatçıkların veya mikrokanalların bu anlamda belirli sınırlara eriştiği de bir gerçektir. Bundan dolayıdır ki akışkanların ısı özelliklerini geliştirme potansiyelindeki yeni teknikler, araştırmacıların yoğun bir şekilde ilgisini çekmektedir. Örnek vermek gerekirse su, etilen glikol ve mineral yağlar gibi geleneksel akışkanlar oldukça düşük ısı özelliklerine sahiptir. Bahsedilen geleneksel akışkanların ısı transferi performansının iyileştirilmesi için bir yol, küçük katı parçacıkların bu akışkanlara ilave edilmesidir (Ganvir ve ark., 2017). Araştırmacılar bu yaklaşımla, mikro veya daha küçük ölçekteki katı parçacıkları ilave ederek, temel akışkanın ısı özelliklerini artırmak üzerine çalışmalar yapmışlardır (Wang ve Mujumdar, 2007). Özellikle nanoteknoloji ve ilgili üretim alanlarındaki gelişmeler sonrasında nano boyuttaki parçacıkların imal edilmesi daha mümkün hale gelmiştir. Çapı 100 nm'den daha küçük olan nanoparçacıkların geleneksel akışkanlara ilave edilmesiyle ortaya çıkan nanoakışkan tanımlaması ilk kez Choi ve Eastman (1995) tarafından yapılmıştır. Nanoakışkan kullanılmasının temel amacı en düşük konsantrasyonla, ısı iletkenlik açısından en yüksek iyileştirilmenin sağlanmasıdır (Ganvir ve ark., 2017). Çünkü ilave edilen katı maddelerin ısı iletkenliği akışkanların değerine nazaran daha yüksektir (Wang ve Mujumdar, 2007). Böylelikle nanoakışkanın moleküler zincir davranışı sebebiyle, temel akışkanda nanoparçacıkların düzgün bir şekilde dağılmasıyla daha yüksek ısı iletimi, tıkanma olmaksızın mikrokanalın soğutulması, aşınma ihtimalinin azaltılması sağlanabilmekte olup; ilave olarak pompalama gücü yardımıyla ısı iletiminde ve karışımın kararlılığında artış elde edilebilmektedir (Ganvir ve ark., 2017).

Isıtma ve soğutma kavramları mevcut durumda güç santralleri, üretim süreçleri, ulaşım ve elektronik gibi endüstriyel alanlar için önemli teknik konulardandır. Geleneksel anlamda ısı transfer hızının artırılması, bu uygulama alanları için amaçlanmaktadır. Bu hedefe yönelik olarak belirli yöntemler önde gelmektedir. Örnek vermek gerekirse yüzey alanının artırılması, ısıtılan bölgenin titreşime maruz bırakılması, enjeksiyonun ya da vakumun kullanılması, elektriksel veya manyetik alanın uygulanması ilgili metotlardan bazılarıdır (Heris ve ark., 2007). Ayrıca taşınımın ısı transferinin artışı akış geometrisini ve sınır koşullarını değiştirerek pasif uygulamalarla sağlanabilir (Wang ve Mujumdar, 2007). Ancak ısı transferinde beklenen artışın gözlemlenebilmesi adına belirtilen uygulamalar bazen yetersiz kalabilmektedir. Bu durumun önüne geçebilmek üzere, katı parçacıkların mevcut akışkanlara ilave edilmesi ile ısı özelliklerinde iyileştirme gerçekleştirilebilmektedir (Heris ve ark., 2007).

Bu tez çalışması kapsamında mikrokanal içerisindeki birleşik ısı transferi problemi ele alınmıştır. Temel akışkan olarak suya Al_2O_3 , CuO ve TiO_2 nanoparçacıklarının ayrı ayrı ilavesinin laminar akıştaki ısı transferine etkisi geçici rejimde belirlenmiştir. Buradan ısı transferinin iyileştirilmesi adına ilave edilecek nanoparçacıkların etkisi farklı durumlar göz önünde bulundurularak incelenmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Mevcut konuyu kapsayacak şekilde literatürde yer alan çalışmalar incelenmiştir. Buna göre ilgili hususta birçok derleme çalışması yapılmıştır. Murshed ve ark. (2008) derleme çalışmasında mikrokanallarda optimum nanoparçacık ilavesinin tıkanmayı azalttığını vurgulamışlardır. Kamyar ve ark. (2012) ısı transferinde nanoakışkan modellerini derlemişlerdir. Vajjha ve Das (2012) boyutsuz sayıların termofiziksel özellikler için nanoparçacık bazında etkisini ele almışlardır. Sheikholeslami ve Ganji (2016) analitik ve sayısal yaklaşımlara yer vermişlerdir. Sharma ve ark. (2020) mikrokanal çalışmalarını derlemişlerdir. Ghasemiasl ve ark. (2023) ısı taşınımının olduğu boruları içeren çalışmaları sunmuşlardır.

Ele alınan konuda deneysel çalışmalar mevcuttur. Pak ve Cho (1998) su- Al_2O_3 ve su- TiO_2 nanoakışkanlarıyla yaptıkları deneysel çalışmada $10000 < Re < 100000$ için dinamik viskozite değerinin % 10 hacimsel oranı için artırıldığını gözlemlemişlerdir. Xuan ve Li (2003) hacimsel oran arttıkça, ısı transferinin iyileştiğini gözlemlemişlerdir. Lee ve Mudawar (2007) mikrokanaldaki suya eklenen Al_2O_3 nanoparçacıklarının ısı taşınım katsayısını (h) laminar akışta daha fazla artırdığını belirtmişlerdir. Nguyen ve ark. (2007) su-CuO nanoakışkanı için dinamik viskozitenin su- Al_2O_3 nanoakışkanına ait değere göre daha fazla artırıldığını ifade etmişlerdir. Williams ve ark. (2008) su- Al_2O_3 ve su- ZrO_2 nanoakışkanlarını farklı akış hızlarında ve farklı konsantrasyonlarda incelemişlerdir. Duangthongsuk ve Wongwises (2009) su- TiO_2 nanoakışkanı için ısı iletim katsayısının ve dinamik viskozitenin hacimsel oranla artışı saptamışlardır. Kolade ve ark. (2009) % 2 hacimsel konsantrasyonda eklenen Al_2O_3 ile etkin ısıl iletkenlikte % 6 iyileştirme $500 \leq Re \leq 1600$ aralığında sağlamışlardır. Mintsu ve ark. (2009) su- Al_2O_3 ve su-CuO nanoakışkanları için hacimsel oranının artışı sonucunda etkin ısı iletim katsayısı değerlerinin artışı gözlemlemişlerdir. Zhu ve ark. (2009) suya Al_2O_3 ekleyerek, ısı iletim katsayısı için % 10.1'e varan artışı yakalamışlardır. Chandrasekar ve ark. (2010) suya hacimce % 0.33 ila % 5 aralığında ve 43 nm çapında Al_2O_3 ilave etmişlerdir. Ho ve ark. (2010) su- Al_2O_3 nanoakışkanı vasıtasıyla ısı transferinin artırıldığını vurgulamışlardır. Teng ve ark. (2010) suya % 0.5 ila % 2 hacimsel konsantrasyonlarda Al_2O_3 ekleyerek, düşük nanoparçacık boyutunda yüksek konsantrasyon değerlerini önermişlerdir. Zhang ve ark. (2013) suya % 0 ila % 0.77 hacimsel oran aralığında Al_2O_3 ekleyerek, en yüksek % 10.6 ısı transferi artışı sağlamışlardır. Rimbault ve ark. (2014) su-CuO nanoakışkanı için $0.24 \leq \phi \leq 4.5$

aralığında optimum koşulları belirlemişlerdir. Vinodhan ve ark. (2016) su-CuO nanoakışkanı için ısı iletim katsayısındaki artışın dinamik viskozitedeki artışa kıyasla daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Topuz ve ark. (2018) suya % 0 ila % 1 hacimsel oranlarında $500 \leq Re \leq 4000$ için Al_2O_3 , TiO_2 ve SiO_2 ekleyerek en yüksek % 15.3 ısı transferi artışı sağlamışlardır. Karimzadehkhoei ve ark. (2019) suya ilave edilen Al_2O_3 nanoparçacığının ısı gelişmiş bölgede daha etkili olduğunu bildirmişlerdir. Lodhi ve ark. (2020) suya % $1 \leq \phi \leq 3$ aralığında Al_2O_3 ilave ederek $300 \leq Re \leq 1000$ için % 24.5'e varan ısı transferi artışını sağlamışlardır. Narendran ve ark. (2020) mikrokanal içerisindeki suya TiO_2 nanoparçacığının % $0 \leq \phi \leq 0.25$ aralığındaki ilavesinin eksenel ısı iletimine düşük akış hızlarındaki etkisini gözlemlemişlerdir.

Analitik ve sayısal çözüm içeren çalışmalar da mevcut hususta hazırlanmıştır. Mori ve ark. (1977) cidardaki ısı iletimi etkisinde sabit yüzey sıcaklığı tanımlanan borudaki birleşik ısı transferini ele almışlardır. Sparrow ve Faghri (1980) boru içerisindeki ısı transferini göz önüne almışlardır. Barozzi ve Pagliarini (1985) ısıtılan borudaki laminar akış için ısı transferine cidardaki ısı iletimi etkisini sonlu elemanlar yöntemiyle incelemişlerdir. Pagliarini (1988) kalın cidarlı borulardaki birleşik ısı transferine eksenel ısı iletiminin etkisine yönelik çalışma hazırlamıştır. Chou ve Lien (1991) çevresel ısı iletiminin birleşik ısı transferine etkisini ele almışlardır. Schutte ve ark. (1992) cidar kalınlık oranının, Peclet sayısının, ısı iletim katsayısı oranının ve ısı yayılım oranının Nusselt sayısını, ara yüzey sıcaklığını, yığık sıcaklık ile ara yüzey ısı akısı için dağılımları etkilediğini gözlemlemişlerdir. Yan (1993) zamana bağlı birleşik ısı transferi için cidar etkisinin önemli olduğunu göstermiştir. Bilir (1995) ısı iletimini içeren laminar akıştaki birleşik ısı transferini analiz ederek, en etkili parametrenin Peclet sayısı olduğunu ifade etmiştir. Xuan ve Roetzel (2000) nanoakışkanların karışımdan daha ziyade akışkan olduğuna dayanan yaklaşımları önermişlerdir. Koblinski ve ark. (2002) nanoparçacıklarda ısı taşınımının ve kümelenme etkisinde meydana gelen ani ısı taşınımının önemli etmenler olduğunu bildirmişlerdir. Da Silva Miranda ve Anand (2004) iki boyutlu bir kanalda ısı iletim oranı ve Reynolds sayısı arttıkça, ısı transferinin arttığını belirtmişlerdir. Maïga ve ark. (2004) su- Al_2O_3 ve etilen glikol- Al_2O_3 nanoakışkanlarıyla üniform ısı akısına maruz bırakılan boruda ısı transferinin artırıldığını görmüşlerdir. Roy ve ark. (2004) su- Al_2O_3 nanoakışkanı için % 10 hacimsel oranında ısı transferi açısından iki kat artışa ulaşmışlardır. Koo ve Kleinstreuer (2005) mikrokanallardaki laminar akışta suya eklenen CuO nanoküreleriyle önemli oranda ısı transferi artışının sağlanabileceğini sayısal çalışmada göstermişlerdir. Buongiorno (2006) nanoakışkanlar için mevcut

termofiziksel özellik modellerini değerlendirmiştir. Jeong ve Jeong (2006) mikrokanal içeren sayısal çalışma kapsamında Peclet sayısının azalışına ve Brinkman sayısının artışına bağlı olarak, Nusselt sayısının azaldığını görmüşlerdir. Arıcı ve Kaya (2007) laminer akışta Nusselt sayısının cidar iletimindeki adımlı değişimden ve kısmi ısıtma düzeninden etkilendiğini sayısal çalışmada ifade etmişlerdir. Çetin ve ark. (2008) mikrokanal içerisindeki seyrelme etkisini, viskoz yitim terimini ve akışkan bölgesindeki eksenel ısı iletimini göz önünde bulundurarak, Nusselt sayısının ve ısı giriş uzunluğunun artış gösterdiğini göstermişlerdir. Bianco ve ark. (2009) üniform ısı akısına maruz bırakılan boru içerisindeki su- Al_2O_3 nanoakışkanı için iki modelin sonuçları arasında ortalama ısı taşınım katsayısı bakımından maksimum farkı % 11 civarında bulmuşlardır. Izadi ve ark. (2009) su- Al_2O_3 nanoakışkanı için hız profilinin nanoparçacık hacimsel konsantrasyonuna göre değişmediğini ancak sıcaklık profilinin etkilendiğini gözlemlemişlerdir. Nonino ve ark. (2009) mikrokanal için cidardaki ısı iletiminin etkisini, sayısal bir çalışma kapsamında değerlendirmişlerdir. Lelea ve Cioabla (2010) viskoz yitim etkisinde mikrokanaldaki birleşik ısı transferi problemini modellemişlerdir. Corcione (2011) nanoakışkanlara ait ısı iletim katsayısı ve dinamik viskozite değerleri için literatürdeki deneysel verilerle elde edilen bağıntıları karşılaştırmıştır. Ebrahimnia-Bajestan ve ark. (2011) sabit ısı akısı uygulanan boruda % 0 ila % 6 için eklenen Al_2O_3 , CuO, karbon nanotüp (CNT) ve titanat nanotüp (TNT) nanoparçacıklarının konsantrasyonunun artırılmasıyla, ısı taşınım katsayısında iyileştirme sağlandığı vurgulamışlardır. Avcı ve ark. (2012) mikrokanaldaki birleşik ısı transferi problemini sayısal olarak ele alarak, viskoz yitimdeki artışın Nusselt sayısını azaltıcı yönde tesir ettiğini vurgulamışlardır. Mah ve ark. (2012) suya $Re < 2300$ aralığında % 0 ila % 8 hacimsel oran aralığında 60.4 nm çapında Al_2O_3 ilave etmişlerdir. Özerinç ve ark. (2012) laminer akışta taşınım ile ısı transferi için su- Al_2O_3 nanoakışkanın performansını sayısal olarak incelemişlerdir. Rahimi ve Mehryar (2012) dairesel kesitli bir mikrokanal için Nusselt sayısına eksenel ısı iletiminin etkisine yönelik sayısal bir çalışma hazırlamışlardır. Shalchi-Tabrizi ve Seyf (2012) gerçekleştirdikleri çalışmada suya % 0 ila % 4 konsantrasyon aralığında 29 - 47 nm çaplarında Al_2O_3 ilave etmişlerdir. Mirzaei ve Dehghan (2013) sabit ısı akısının etkisi altındaki su- Al_2O_3 nanoakışkanının laminer akıştaki ısı transferi problemini sayısal olarak incelemişlerdir. Sohel ve ark. (2013) su- Al_2O_3 , su- TiO_2 ve su-CuO nanoakışkanlarının kullanıldığı dairesel kesitli bir mikrokanalda su-CuO nanoakışkanının kullanılması ile en fazla ısı iyileşmenin sağlandığını saptamışlardır. Wang ve ark. (2013) mikrokanaldaki ısı transferi ve akış

karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla nanoakışkan için sayısal model geliştirmişlerdir. Adelaja ve ark. (2014) birleşik ısı transferinin analitik olarak çözümü üzerine çalışmışlardır. Lelea ve Laza (2014a) suya % 1 ila % 5 hacimsel oran aralığında, 13 - 47 nm çapında Al_2O_3 ilave etmişlerdir. Lelea ve Laza (2014b) farklı hacim konsantrasyonlar ve nanoparçacık çapları için suya ilave edilen Al_2O_3 , TiO_2 ve Cu nanoparçacıklarının mikrokandaki ısı transferine etkisini sayısal olarak ele almışlardır. Ting ve ark. (2014a) laminer akışta suya % 0 ila % 8 hacimsel oran aralığında 60 nm çapında Al_2O_3 ilave etmişlerdir. Benzer şekilde, Ting ve ark. (2014b) suya % 0 ila % 10 hacimsel oran aralığında Al_2O_3 ilave ederek, düşük Peclet sayılarında aksel ısı iletimine katkısını ifade etmişlerdir. Trinavee ve ark. (2016) suya % 1 ila % 4 aralığında Al_2O_3 ilave ederek termofiziksel özellikleri $500 \leq Re \leq 1900$ için karşılaştırmışlardır. Ambreen ve Kim (2017) sayısal çalışmada mikrokandaki suya $200 \leq Re \leq 2000$ için % 0.25, % 0.5 ve % 2 hacimsel oranlarında Al_2O_3 eklemiştir. Benzer şekilde aynı temel akışkana $900 \leq Re \leq 1500$ için % 0.24, % 0.6 ve % 1.18 hacimsel oranlarında ilave edilen TiO_2 nanoparçacıklarının etkisini de incelemiştir. Cole ve Çetin (2017) mikrokandaki aksel iletimin etkisini içeren çözümle cidar kalınlığının ve malzemesinin ısı değerlere tesirini belirlemiştir. Heshmatian ve Bahiraei (2017) suya 20 - 80 nm çapında ve % 1 ila % 4 hacimsel konsantrasyon aralığında TiO_2 ilave edilmesinin daha yüksek konsantrasyonlarda etkili olduğunu $Re = 2000$ için ifade etmişlerdir. Malvandi ve ark. (2017) suya % 0 ila % 4 hacimsel oran aralığında Al_2O_3 ilave etmişlerdir. Ramadan (2017) mikrokanda viskoz yitimin ve aksel ısı iletiminin etkisi için sıcaklık dağılımını ve Nusselt sayısının değişimini elde etmiştir. Alfaryjat ve ark. (2018) mikrokandaki suya Al_2O_3 , CuO, SiO_2 ve ZnO nanoparçacıklarını farklı çaplarda ilave ederek, % 4 hacimsel oranda Al_2O_3 nanoparçacığını önermişlerdir. Ambreen ve Kim (2018) sayısal çalışmada suya % 0.1 ve % 2 hacimsel oranlarında Al_2O_3 ve TiO_2 nanoparçacıklarını ayrı ayrı ekleyerek, mikrokandaki $1000 \leq Re \leq 2000$ aralığında en küçük nanoparçacık çapının daha uygun bulmuşlardır. Al Kumait ve ark. (2019) TiO_2 nanoparçacığını suya % 0 ila % 1 hacimsel oran aralığında ilave ederek, maksimum % 3 sapmayla sonuçları elde etmişlerdir. Ramadan ve ark. (2019) mikrokandaki aksel iletiminin, ısı girişi uzunluğunu artırdığını saptamışlardır. Dandoutiya ve Kumar (2022) TiO_2 nanoparçacığını içeren nanoakışkanların ısı iletim katsayısı modellerini karşılaştırmışlardır. Ismail ve ark. (2023) mikrokandaki ısı transferi için performansı optimize etmişlerdir.

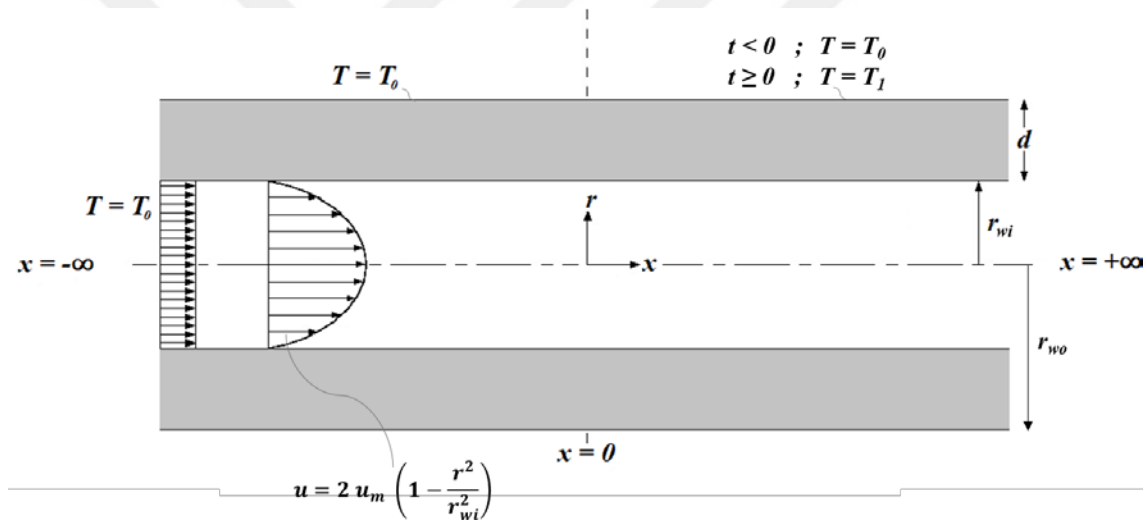
Ayrıca farklı geometrideki sistemler için de yapılmış çalışmalar mevcuttur. Khanafer ve ark. (2003) iki boyutlu kutu içerisinde nanoakışkan kullanımını araştırmışlardır. Maïga ve ark. (2005) diskler arasındaki radyal boşlukta nanoakışkanların ısı transferini sayısal olarak incelemişlerdir. Renksizbulut ve ark. (2006) dikdörtgen kesitli mikrokanalların gaz akışını ve ısı transferini içeren problemi sayısal olarak çözmüşlerdir. Li ve Kleinstreuer (2008) nanoakışkanların ikizkenar yamuk kesitli mikrokanaldaki ısı performansını belirlemişlerdir. Öztop ve Abu-Nada (2008) kavitedeki nanoakışkan etkisini incelemişlerdir. Char ve Tai (2010) eksenleri ortak iki mikrokanal arasındaki ısı transferini ele almışlardır. Mohammed ve ark. (2010) dikdörtgen kesitli mikrokanalda nanoakışkan etkisini araştırmışlardır. Farsad ve ark. (2011) mikrokanal ısı emiciyi nanoakışkanlar için simüle etmişlerdir. Azizi ve ark. (2015) ısı emici şeklindeki dikdörtgen kesitli mikrokanallarda, nanoparçacık ilavesiyle iyileştirme sağlamışlardır. Ege ve ark. (2021) yamuk kesitli mikrokanaldaki ısı transferini nanoakışkanlar için ele almışlardır. Loh ve ark. (2022) paralel plakalı mikrokanaldaki nanoakışkan etkisini sayısal anlamda incelemişlerdir.

Bu çalışmada literatüre katkı sunmak amacıyla Al_2O_3 , CuO ve TiO_2 nanoparçacıklarının % 1, % 4 ve % 7 hacimsel konsantrasyon değerlerinde suya ilave edilmesinin ısı performansına etkisi ele alınmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Başlangıç ve sınır şartları ile cidar ve nanoakışkan bölgeleri, Şekil 3.1’de sunulmuştur. Çalışmada temel akışkan olarak kullanılan suya ayrı ayrı durumlarda Al_2O_3 , CuO ve TiO_2 nanoparçacıkları $\phi = \% 1$, $\% 4$ ve $\% 7$ olarak farklı hacimsel oranlarda ilave edilmiştir.

Nanoakışkan akışı ve cidarı da içeren birleşik ısı transferi sonlu farklar yöntemi kullanılarak iki bölgeli olarak ele alınmıştır. Mikrokanal her iki yönde de sonsuz uzunluktadır. Üst akış bölgesinin uzağında akışkan mikrokanala üniform T_0 sıcaklığıyla girmekte olup, bu değer aynı zamanda başlangıç sıcaklığıdır. Üst akış bölgesi için cidarın dış yüzeyi T_0 sıcaklığında olup, alt akış bölgesi için ise cidarın dış yüzey sıcaklığı $t = 0$ ’da ani bir şekilde sabit olan T_1 değerine yükseltilmektedir.



Şekil 3.1. Cidar ve nanoakışkan bölgelerini temsil eden problem şematığı

Çalışmada göz önünde bulundurulmuş varsayımlar aşağıda belirtilmiştir:

- Zamana bağlı çözüm
- Sıkıştırılamaz akış
- Hidrodinamik olarak tam gelişmiş akış
- Isıl olarak gelişmekte olan akış
- Akışkanın termofiziksel özelliklerinin nanoparçacık ilavesiyle değişimi

Nanoakışkanın termofiziksel özellikleri için literatürdeki termofiziksel özellik modelleri kullanılmıştır ve bu içerik denklemlere entegre edilmiştir. Farklı Peclet sayıları, cidar kalınlık oranları, ısı iletim katsayısı oranları, ısı yayılım katsayısı oranları ve Brinkman sayısı değerleri için problem parametrik olarak çözülmüştür. Bu parametrelere ilave olarak farklı hacimsel konsantrasyonlarda üç farklı nanoparçacık kullanılmıştır. Her bir nanoparçacık için iki farklı termofiziksel özellik modeli grubu karşılaştırılmıştır.

3.1. Enerji Denklemi

Genel enerji denklemi Denklem (3.1)'de verilmiştir. Bu denklemdeki son terim olan viskoz yitim terimi (ϕ) ise Denklem (3.2)'de yer almaktadır. İlgili denklemlerde üç boyutlu silindirik koordinat sistemi ($x-r-\theta$) için tüm hız bileşenleri (u , v ve w) ve zaman terimi (t) gösterilmiştir. Termofiziksel özellikler de belirtilen bu denklemlerde mevcuttur.

$$\rho C_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{w}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + u \frac{\partial T}{\partial x} \right] = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(k \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \phi \quad (3.1)$$

$$\phi = 2\mu \left\{ \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + \left[\frac{1}{r} \left(\frac{\partial w}{\partial \theta} + v \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right\} + \mu \left\{ \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} + r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{w}{r} \right) \right)^2 \right\} \quad (3.2)$$

Cidar bölgesini temsilen “w” indisli terimleri içeren enerji denklemi gerekli varsayımlara göre Denklem (3.3)'te verilmiştir.

$$\rho_w C_{p_w} \frac{\partial T_w}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_w r \frac{\partial T_w}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_w \frac{\partial T_w}{\partial x} \right) \quad (3.3)$$

Benzer şekilde nanoakışkan bölgesi için “nf” indisli terimlerin yer aldığı enerji denklemi varsayımlar göz önünde bulundurularak Denklem (3.4)'te sunulmuştur. Ayrıca ısı iletim katsayısı terimi, etkin anlamına gelen “eff” indisine sahiptir. Hagen–Poiseuille hız profilini veren ifadeye de Denklem (3.5)'te yer verilmiştir.

$$\rho_{nf} C_{p_{nf}} \left[\frac{\partial T_{nf}}{\partial t} + u \frac{\partial T_{nf}}{\partial x} \right] = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_{eff} r \frac{\partial T_{nf}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{eff} \frac{\partial T_{nf}}{\partial x} \right) + \mu_{nf} \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 \quad (3.4)$$

$$u = 2 u_m \left(1 - \frac{r^2}{r_{wi}^2} \right) \quad (3.5)$$

3.2. Isı Transferi Terimleri

Cidar ve nanoakışkan bölgeleri için sıcaklık dağılımı belirlenmiştir. Buna göre ara yüzey ısı akısı, yığık sıcaklık ve Nusselt sayısı sırasıyla Denklem (3.6), Denklem (3.7) ve Denklem (3.8) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$q_{wi} = -k_{nf} \left(\frac{\partial T_{nf}}{\partial r} \right)_{r=r_{wi}} \quad (3.6)$$

$$T_b = \frac{1}{\pi r_{wi}^2 u_m} \int u T_{nf} 2\pi r dr \quad (3.7)$$

$$Nu = \frac{2 r_{wi} \left(\frac{\partial T_{nf}}{\partial r} \right)_{r=r_{wi}}}{(T_{wi} - T_b)} \quad (3.8)$$

3.3. Başlangıç ve Sınır Şartları

Cidar ve nanoakışkan bölgeleri için başlangıç ve sınır şartları sırasıyla Denklem (3.9) – Denklem (3.13) aralığı için sunulmuştur.

3.3.1. Cidar bölgesi için başlangıç ve sınır şartları

Cidar bölgesi için başlangıç ve sınır şartları verilmiştir.

- Başlangıç anında ($t = 0$)

$$T_w = T_0 \quad (3.9)$$

- Üst akış bölgesinin uzağında ($x = -\infty$)

$$T_w = T_0 \quad (3.10)$$

- Alt akış bölgesinin uzağında ($x = \infty$)

$$\frac{\partial T_w}{\partial x} = 0 \quad (3.11)$$

- Ara yüzeyde ($r = r_{wi}$)

$$T_w = T_{nf} \quad k_w \frac{\partial T_w}{\partial r} = k_{nf} \frac{\partial T_{nf}}{\partial r} \quad (3.12)$$

- Dış yüzeyde ($r = r_{wi} + d$)

$$T_w = T_1 \quad (3.13)$$

3.3.2. Nanoakışkan bölgesi için başlangıç ve sınır şartları

Benzer şekilde nanoakışkan bölgesi için de başlangıç ve sınır şartlarına Denklem (3.14) – Denklem (3.18) aralığında yer verilmiştir.

- Başlangıç anında ($t = 0$)

$$T_{nf} = T_0 \quad (3.14)$$

- Üst akış bölgesinin uzağında ($x = -\infty$)

$$T_{nf} = T_0 \quad (3.15)$$

- Alt akış bölgesinin uzağında ($x = \infty$)

$$\frac{\partial T_{nf}}{\partial x} = 0 \quad (3.16)$$

- Ara yüzeyde ($r = r_{wi}$)

$$T_{nf} = T_w \quad k_{nf} \frac{\partial T_{nf}}{\partial r} = k_w \frac{\partial T_w}{\partial r} \quad (3.17)$$

- Eksende ($r = 0$)

$$\frac{\partial T_{nf}}{\partial r} = 0 \quad (3.18)$$

3.4. Denklemlerin Boyutsuzlaştırılması

Cidar ve nanoakışkan bölgeleri için denklemlerin boyutsuzlaştırılmasında ilgili terimler kullanılmıştır. Eksenel koordinat, radyal koordinat, hız, zaman, sıcaklık, cidar kalınlığı, cidar-nanoakışkan ısı iletim katsayısı oranı, efektif ısı iletim katsayısı ve cidar-nanoakışkan ısı yayılım katsayısı oranı sırasıyla Denklem (3.19), Denklem (3.20), Denklem (3.21), Denklem (3.22), Denklem (3.23), Denklem (3.24), Denklem (3.25), Denklem (3.26), Denklem (3.27) ve Denklem (3.28)'de verilmiştir.

$$x' = \frac{x}{Pe r_{wi}} \quad (3.19)$$

$$r' = \frac{r}{r_{wi}} \quad (3.20)$$

$$u' = \frac{u}{u_m} = 2(1 - r'^2) \quad (3.21)$$

$$t' = \frac{t \alpha_{nf}}{r_{wi}^2} \quad (3.22)$$

$$\theta_w = \frac{T_w - T_0}{T_1 - T_0} \quad (3.23)$$

$$\theta_{nf} = \frac{T_{nf} - T_0}{T_1 - T_0} \quad (3.24)$$

$$d' = \frac{d}{r_{wi}} \quad (3.25)$$

$$k_{w-nf} = \frac{k_w}{k_{nf}} \quad (3.26)$$

$$k'_{eff} = \frac{k_{eff}}{k_{nf}} \quad (3.27)$$

$$\alpha_{w-nf} = \frac{\alpha_w}{\alpha_{nf}} \quad (3.28)$$

3.4.1. Cidar bölgesi için boyutsuz enerji denklemi

Cidar bölgesi için geçerli olan enerji denkleminin boyutsuz şekilde ifade edilebilmesi için sırasıyla işlem adımları Denklem (3.29), Denklem (3.30) ve Denklem (3.31)'deki gibi uygulanmıştır.

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} = \frac{\partial [\theta_w (T_1 - T_0) + T_0]}{\partial (t' r_{wi}^2 / \alpha_{nf})} = \frac{\alpha_{nf} (T_1 - T_0)}{r_{wi}^2} \frac{\partial \theta_w}{\partial t'} \quad (3.29)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_w r \frac{\partial T_w}{\partial r} \right) &= \frac{1}{(r' r_{wi})} \frac{\partial}{\partial (r' r_{wi})} \left(k_w (r' r_{wi}) \frac{\partial [\theta_w (T_1 - T_0) + T_0]}{\partial (r' r_{wi})} \right) \\ &= \left(\frac{T_1 - T_0}{r_{wi}^2} \right) \frac{1}{r'} \frac{\partial}{\partial r'} \left(k_w r' \frac{\partial \theta_w}{\partial r'} \right) \end{aligned} \quad (3.30)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_w \frac{\partial T_w}{\partial x} \right) = \frac{1}{\partial(x' Pe r_{wi})} \left(k_w \frac{\partial(\theta_w (T_1 - T_0) + T_0)}{\partial(x' Pe r_{wi})} \right) = \frac{(T_1 - T_0)}{Pe^2 r_{wi}^2} \frac{\partial}{\partial x'} \left(k_w \frac{\partial \theta_w}{\partial x'} \right) \quad (3.31)$$

Boyutsuz ifadeler sırasıyla kullanılarak öncesinde Denklem (3.32) ve nihai olarak Denklem (3.33) elde edilmiştir.

$$\rho_w C_{p_w} \left[\frac{\alpha_{nf} (T_1 - T_0)}{r_{wi}^2} \frac{\partial \theta_w}{\partial t'} \right] = \left(\frac{T_1 - T_0}{r_{wi}^2} \right) \frac{1}{r'} \frac{\partial}{\partial r'} \left(k_w r' \frac{\partial \theta_w}{\partial r'} \right) + \frac{(T_1 - T_0)}{Pe^2 r_{wi}^2} \frac{\partial}{\partial x'} \left(k_w \frac{\partial \theta_w}{\partial x'} \right) \quad (3.32)$$

$$\frac{r'}{\alpha_{w-nf}} \frac{\partial \theta_w}{\partial t'} = \frac{\partial}{\partial r'} \left(r' \frac{\partial \theta_w}{\partial r'} \right) + \frac{r'}{Pe^2} \frac{\partial}{\partial x'} \left(\frac{\partial \theta_w}{\partial x'} \right) \quad (3.33)$$

3.4.2. Nanoakışkan bölgesi için boyutsuz enerji denklemi

Nanoakışkan bölgesi için geçerli olan enerji denkleminin boyutsuz şekilde ifade edilebilmesi için sırasıyla işlem adımları Denklem (3.34), Denklem (3.35), Denklem (3.36), Denklem (3.37) ve Denklem (3.38)'deki gibi uygulanmıştır.

$$\frac{\partial T_{nf}}{\partial t} = \frac{\partial [\theta_{nf} (T_1 - T_0) + T_0]}{\partial (t' r_{wi}^2 / \alpha_{nf})} = \frac{\alpha_{nf} (T_1 - T_0)}{r_{wi}^2} \frac{\partial \theta_{nf}}{\partial t'} \quad (3.34)$$

$$\begin{aligned} u \frac{\partial T_{nf}}{\partial x} &= 2 u_m \left(1 - \frac{r^2}{r_{wi}^2} \right) \frac{\partial T_{nf}}{\partial x} = 2 u_m \left(1 - \frac{(r' r_{wi})^2}{r_{wi}^2} \right) \frac{\partial [\theta_{nf} (T_1 - T_0) + T_0]}{\partial (x' Pe r_{wi})} \\ &= 2 u_m \frac{(1 - r'^2)}{Pe r_{wi}} (T_1 - T_0) \frac{\partial \theta_{nf}}{\partial x'} \end{aligned} \quad (3.35)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_{eff} r \frac{\partial T_{nf}}{\partial r} \right) &= \frac{1}{(r' r_{wi})} \frac{\partial}{\partial (r' r_{wi})} \left(k_{eff} (r' r_{wi}) \frac{\partial [\theta_{nf} (T_1 - T_0) + T_0]}{\partial (r' r_{wi})} \right) \\ &= \left(\frac{T_1 - T_0}{r_{wi}^2} \right) \frac{1}{r'} \frac{\partial}{\partial r'} \left(k_{eff} r' \frac{\partial \theta_{nf}}{\partial r'} \right) \end{aligned} \quad (3.36)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{eff} \frac{\partial T_{nf}}{\partial x} \right) = \frac{1}{\partial(x' Pe r_{wi})} \left(k_{eff} \frac{\partial(\theta_{nf} (T_1 - T_0) + T_0)}{\partial(x' Pe r_{wi})} \right) = \frac{(T_1 - T_0)}{Pe^2 r_{wi}^2} \frac{\partial}{\partial x'} \left(k_{eff} \frac{\partial \theta_{nf}}{\partial x'} \right) \quad (3.37)$$

$$\mu_{nf} \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 = \mu_{nf} \left[\frac{\partial (u' u_m)}{\partial (r' r_{wi})} \right]^2 = \mu_{nf} \frac{u_m^2}{r_{wi}^2} \left(\frac{\partial u'}{\partial r'} \right)^2 \quad (3.38)$$

Boyutsuz ifadeler sırasıyla kullanılarak öncesinde Denklem (3.39) ve nihai olarak Denklem (3.40) elde edilmiştir.

$$\begin{aligned} \rho_{nf} C_{p_{nf}} \left[\frac{\alpha_{nf} (T_1 - T_0)}{r_{wi}^2} \frac{\partial \theta_{nf}}{\partial t'} + 2 u_m \frac{(1 - r'^2)}{Pe r_{wi}} (T_1 - T_0) \frac{\partial \theta_{nf}}{\partial x'} \right] \\ = \left(\frac{T_1 - T_0}{r_{wi}^2} \right) \frac{1}{r'} \frac{\partial}{\partial r'} \left(k_{eff} r' \frac{\partial \theta_{nf}}{\partial r'} \right) + \frac{(T_1 - T_0)}{Pe^2 r_{wi}^2} \frac{\partial}{\partial x'} \left(k_{eff} \frac{\partial \theta_{nf}}{\partial x'} \right) \\ + \mu_{nf} \frac{u_m^2}{r_{wi}^2} \left(\frac{\partial u'}{\partial r'} \right)^2 \end{aligned} \quad (3.39)$$

$$r' \frac{\partial \theta_{nf}}{\partial t'} + (r' - r'^3) \frac{\partial \theta_{nf}}{\partial x'} - \frac{r'}{Pe^2} \frac{\partial}{\partial x'} \left(k'_{eff} \frac{\partial \theta_{nf}}{\partial x'} \right) = \frac{\partial}{\partial r'} \left(k'_{eff} r' \frac{\partial \theta_{nf}}{\partial r'} \right) + 16 Br r'^3 \quad (3.40)$$

3.5. Isı Transferi Terimlerinin Boyutsuzlaştırılması

Isı transferi terimlerinin boyutsuzlaştırılması gerçekleştirilmiştir. Buna göre ara yüzey ısı akısı, yığık sıcaklık ve Nusselt sayısı için sırasıyla Denklem (3.41), Denklem (3.42) ve Denklem (3.43) verilmiştir.

$$q'_{wi} = - \left(\frac{\partial \theta_{nf}}{\partial r'} \right)_{r'=1} \quad (3.41)$$

$$\theta_b = 2 \int_0^1 u' \theta_{nf} r' dr \quad (3.42)$$

$$Nu = \frac{2 q'_{wi}}{(\theta_{wi} - \theta_b)} \quad (3.43)$$

3.6. Başlangıç ve Sınır Şartlarının Boyutsuzlaştırılması

İlgili cidar ve nanoakışkan bölgelerine yönelik olarak başlangıç ve sınır şartları sırasıyla boyutsuz hale getirilmiştir.

3.6.1. Cidar bölgesi için boyutsuz başlangıç ve sınır şartları

Boyutsuz olarak başlangıç ve sınır şartları açısından ilgili ifadeler Denklem (3.44) – Denklem (3.48) aralığında sunulmuştur.

- Başlangıç anı ($t' = 0$)

$$\theta_w = 0 \quad (3.44)$$

- Üst akış bölgesinin uzağı ($x' = -\infty$)

$$\theta_w = 0 \quad (3.45)$$

- Alt akış bölgesinin uzağı ($x' = \infty$)

$$\frac{\partial \theta_w}{\partial x'} = 0 \quad (3.46)$$

- Ara yüzey ($r' = 1$)

$$\theta_w = \theta_{nf} \quad \frac{\partial \theta_w}{\partial r'} = \frac{1}{k'_{w-nf}} \frac{\partial \theta_{nf}}{\partial r'} \quad (3.47)$$

- Dış yüzey ($r' = 1 + d'$)

$$\theta_w = 1 \quad (3.48)$$

3.6.2. Nanoakışkan bölgesi için boyutsuz başlangıç ve sınır şartları

Nanoakışkan bölgesi için ise başlangıç ve sınır şartları Denklem (3.49) – Denklem (3.53) için gösterilmiştir.

- Başlangıç anında ($t' = 0$)

$$\theta_{nf} = 0 \quad (3.49)$$

- Üst akış bölgesinin uzağında ($x' = -\infty$)

$$\theta_{nf} = 0 \quad (3.50)$$

- Alt akış bölgesinin uzağında ($x' = \infty$)

$$\frac{\partial \theta_{nf}}{\partial x'} = 0 \quad (3.51)$$

- Ara yüzeyde ($r' = 1$)

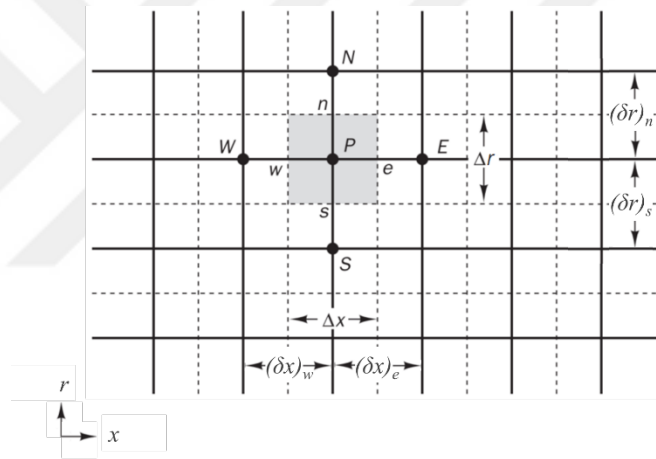
$$\theta_{nf} = \theta_w \quad \frac{1}{k'_{w-nf}} \frac{\partial \theta_{nf}}{\partial r'} = \frac{\partial \theta_w}{\partial r'} \quad (3.52)$$

- Eksende ($r' = 0$)

$$\frac{\partial \theta_{nf}}{\partial r'} = 0 \quad (3.53)$$

3.7. Denklem Ayrıklaştırılması

Silindirik koordinatlı ağ yapısında genel düğüm noktasını temsil eden P noktasının doğu (E), batı (W), kuzey (N) ve güney (S) komşu kontrol hacimlerinin merkezleri vardır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Silindirik koordinatlarda ağ yapısı

Ayrıca kontrol hacimlere ait yüzeyler için de benzer şekilde doğu (e), batı (w), kuzey (n) ve güney (s) olarak sınırlar tanımlanmıştır. Buna göre ayrıklaştırma yapılarak, ilgili bütün katsayılar belirlenmektedir.

3.7.1. Cidar bölgesi için enerji denkleminin ayrıklaştırılması

Cidar bölgesi için boyutsuz hale getirilen enerji denkleminin her bir terimi için ayrıklaştırma için sırasıyla Denklem (3.54), Denklem (3.55) ve Denklem (3.56)'da gösterildiği üzere yapılmıştır.

$$\int_w^e \int_s^n \int_{t'}^{t'+\Delta t'} \frac{r'}{\alpha_{w-nf}} \frac{\partial \theta_w}{\partial t'} dt' dr' dx' = \frac{r'_P}{\alpha_{w-nf}} (\theta_{wP}^1 - \theta_{wP}^0) (\Delta x')_P (\Delta r')_P \quad (3.54)$$

$$\begin{aligned} \int_{t'}^{t'+\Delta t'} \int_w^e \int_s^n \frac{\partial}{\partial r'} \left(r' \frac{\partial \theta_w}{\partial r'} \right) dr' dx' dt' &= \int_{t'}^{t'+\Delta t'} \int_w^e \int_s^n \left[r' \frac{\partial \theta_w}{\partial r'} \Big|_n - r' \frac{\partial \theta_w}{\partial r'} \Big|_s \right] dx' dt' \\ &= \int_{t'}^{t'+\Delta t'} \left[r'_n \frac{(\theta_w)_N - (\theta_w)_P}{(\delta r')_n} - r'_s \frac{(\theta_w)_P - (\theta_w)_S}{(\delta r')_s} \right] (\Delta x')_P dt' \\ &= f \left(r'_n \frac{(\theta_w)_N^1 - (\theta_w)_P^1}{(\delta r')_n} - r'_s \frac{(\theta_w)_P^1 - (\theta_w)_S^1}{(\delta r')_s} \right) (\Delta x')_P \Delta t' - (1 \\ &\quad - f) \left(r'_n \frac{(\theta_w)_N^0 - (\theta_w)_P^0}{(\delta r')_n} - r'_s \frac{(\theta_w)_P^0 - (\theta_w)_S^0}{(\delta r')_s} \right) (\Delta x')_P \Delta t' \end{aligned} \quad (3.55)$$

$$\begin{aligned} \int_{t'}^{t'+\Delta t'} \int_s^n \int_w^e \frac{r'}{Pe^2} \frac{\partial}{\partial x'} \left(\frac{\partial \theta_w}{\partial x'} \right) dx' dr' dt' &= \frac{r'_P}{Pe^2} \int_{t'}^{t'+\Delta t'} \int_s^n \int_w^e \left[\frac{\partial \theta_w}{\partial x'} \Big|_e - \frac{\partial \theta_w}{\partial x'} \Big|_w \right] dr' dt' \\ &= \frac{r'_P}{Pe^2} \int_{t'}^{t'+\Delta t'} \left[\frac{(\theta_w)_E - (\theta_w)_P}{(\delta x')_e} - \frac{(\theta_w)_P - (\theta_w)_W}{(\delta x')_w} \right] (\Delta r')_P dt' \\ &= \frac{r'_P}{Pe^2} \left[f \left(\frac{(\theta_w)_E^1 - (\theta_w)_P^1}{(\delta x')_e} - \frac{(\theta_w)_P^1 - (\theta_w)_W^1}{(\delta x')_w} \right) \right. \\ &\quad \left. - (1-f) \left(\frac{(\theta_w)_E^0 - (\theta_w)_P^0}{(\delta x')_e} - \frac{(\theta_w)_P^0 - (\theta_w)_W^0}{(\delta x')_w} \right) \right] (\Delta r')_P \Delta t' \end{aligned} \quad (3.56)$$

Burada ağırlık faktörü için $f = 1$ değeri alınarak, ilgili terimler birlikte sunulduğunda Denklem (3.57) elde edilmektedir.

$$\begin{aligned} \frac{r'_P}{\alpha_{w-nf}} (\theta_{wP} - \theta_{wP}^0) (\Delta x')_P (\Delta r')_P \\ = \left(r'_n \frac{(\theta_w)_N - (\theta_w)_P}{(\delta r')_n} - r'_s \frac{(\theta_w)_P - (\theta_w)_S}{(\delta r')_s} \right) (\Delta x')_P \Delta t' \\ + \frac{r'_P}{Pe^2} \left(\frac{(\theta_w)_E - (\theta_w)_P}{(\delta x')_e} - \frac{(\theta_w)_P - (\theta_w)_W}{(\delta x')_w} \right) (\Delta r')_P \Delta t' \end{aligned} \quad (3.57)$$

İlgili katsayılar Denklem (3.58), Denklem (3.59), Denklem (3.60), Denklem (3.61), Denklem (3.62), Denklem (3.63) ve Denklem (3.64)'te verildiği üzere en genel halde ifade edilmiştir.

$$A_P \theta_P = A_N \theta_N + A_S \theta_S + A_E \theta_E + A_W \theta_W + A_P^0 \theta_P^0 \quad (3.58)$$

$$A_N = \frac{r'_n \Delta x'_P}{\delta r'_n} \quad (3.59)$$

$$A_S = \frac{r'_s \Delta x'_P}{\delta r'_s} \quad (3.60)$$

$$A_E = \frac{r'_P \Delta r'_P}{Pe^2 \delta x'_e} \quad (3.61)$$

$$A_W = \frac{r'_P \Delta r'_P}{Pe^2 \delta x'_w} \quad (3.62)$$

$$A_P^0 = \frac{r'_P (\Delta x')_P (\Delta r')_P}{\alpha_{w-nf} \Delta t'} \quad (3.63)$$

$$A_P = A_N + A_S + A_E + A_W + A_P^0 \quad (3.64)$$

3.7.2. Nanoakışkan bölgesi için enerji denkleminin ayrıklaştırılması

Nanoakışkan bölgesi için boyutsuz hale getirilen enerji denkleminin her bir terimi için ayrıklaştırma işlemi öncesinde Denklem (3.65), Denklem (3.66), Denklem (3.67), Denklem (3.68) ve Denklem (3.69)'da gösterildiği üzere yeniden düzenleme yapılmıştır.

$$r' \frac{\partial \theta_{nf}}{\partial t'} + \frac{\partial}{\partial x'} \left[(r' - r'^3) \theta_{nf} - \frac{r' k'_{eff}}{Pe^2} \frac{\partial \theta_{nf}}{\partial x'} \right] = \frac{\partial}{\partial r'} \left(k'_{eff} r' \frac{\partial \theta_{nf}}{\partial r'} \right) + 16 Br r'^3 \quad (3.65)$$

$$r' \frac{\partial \theta_{nf}}{\partial t'} + \frac{\partial J'_x}{\partial x'} = \frac{\partial J'_r}{\partial r'} + S' \quad (3.66)$$

$$J'_x = (r' - r'^3) \theta_{nf} - \frac{r' k'_{eff}}{Pe^2} \frac{\partial \theta_{nf}}{\partial x'} \quad (3.67)$$

$$J'_r = k'_{eff} r' \frac{\partial \theta_{nf}}{\partial r'} \quad (3.68)$$

$$S' = 16 Br r'^3 \quad (3.69)$$

İşlem adımları Denklem (3.70) – Denklem (3.81) aralığı için eksene yönelik terimler için sürdürülmüştür.

$$\frac{dJ'_x}{dx'} = 0 \quad (3.70)$$

$$\frac{d}{dx} \left((r' - r'^3) \theta_{nf} - \frac{r' k'_{eff}}{Pe^2} \frac{\partial \theta_{nf}}{\partial x'} \right) = 0 \quad (3.71)$$

$$K = Pe^2 (1 - r'^2) / k'_{eff} \quad (3.72)$$

$$\frac{d^2 \theta_{nf}}{dx'^2} - K \frac{\partial \theta_{nf}}{\partial x'} = 0 \quad (3.73)$$

$$m^2 - K m = 0 \quad (3.74)$$

$$m_1 = 0 \text{ veya } m_2 = K \quad (3.75)$$

$$\theta_{nf} = A_1 e^{m_1 x'} + A_2 e^{m_2 x'} \quad (3.76)$$

$$\frac{\theta_{nf} - \theta_{nf,0}}{\theta_{nf,L} - \theta_{nf,0}} = \frac{\exp[K x'] - 1}{\exp[K L'] - 1} \quad (3.77)$$

$$\left(\frac{\partial \theta_{nf}}{\partial x'} \right)_e = \left((\theta_{nf})_E - (\theta_{nf})_P \right) \frac{Pe^2 (1 - r'^2)}{k'_{eff}} \frac{\exp[Pe^2 (1 - r'^2) \delta x'_e / k'_{eff}]}{\exp[Pe^2 (1 - r'^2) \delta x'_e / k'_{eff}] - 1} \quad (3.78)$$

$$J'_e = (r'_e - r'^3_e) (\theta_{nf})_e - \frac{k'_{eff} r'}{Pe^2} \left(\frac{\partial \theta_{nf}}{\partial x'} \right)_e \quad (3.79)$$

$$J'_e = (r'_e - r'^3_e) \left[(\theta_{nf})_p + \left((\theta_{nf})_E - (\theta_{nf})_p \right) \frac{\exp[Pe^2 (1 - r'^2) \delta x'_e / k'_{eff}] - 1}{\exp[Pe^2 (1 - r'^2) \delta x'_e / k'_{eff}] - 1} \right. \\ \left. - \frac{k'_{eff} r'}{Pe^2} \left[\left((\theta_{nf})_E \right. \right. \right. \quad (3.80)$$

$$\left. - (\theta_{nf})_p \right) \frac{Pe^2 (1 - r'^2)}{k'_{eff}} \frac{\exp[Pe^2 (1 - r'^2) \delta x'_e / k'_{eff}]}{\exp[Pe^2 (1 - r'^2) \delta x'_e / k'_{eff}] - 1} \left. \right] \\ J'_e = (r'_e - r'^3_e) \left[(\theta_{nf})_p + \frac{(\theta_{nf})_p - (\theta_{nf})_E}{\exp[Pe^2 (1 - r'^2) \delta x'_e / k'_{eff}] - 1} \right] \quad (3.81)$$

Elde edilen ifadeler Denklem (3.82), Denklem (3.83), Denklem (3.84) ve Denklem (3.85)'te gibi aksenal yöndeki diğer terimler adına sunulmuştur.

$$\left(\frac{\partial \theta_{nf}}{\partial x'} \right)_w = (\theta_{nf})_w - (\theta_{nf})_p \frac{Pe^2 (1 - r'^2)}{k'_{eff}} \frac{\exp[Pe^2 (1 - r'^2) \delta x'_w / k'_{eff}]}{\exp[Pe^2 (1 - r'^2) \delta x'_w / k'_{eff}] - 1} \quad (3.82)$$

$$J'_w = (r'_w - r'^3_w) (\theta_{nf})_w - \frac{k'_{eff} r'}{Pe^2} \left(\frac{\partial \theta_{nf}}{\partial x'} \right)_w \quad (3.83)$$

$$J'_w = (r'_w - r'^3_w) \left[(\theta_{nf})_p + (\theta_{nf})_w - (\theta_{nf})_p \frac{\exp[Pe^2 (1 - r'^2) \delta x'_w / k'_{eff}] - 1}{\exp[Pe^2 (1 - r'^2) \delta x'_w / k'_{eff}] - 1} \right. \\ \left. - \frac{k'_{eff} r'}{Pe^2} \left[\left((\theta_{nf})_w - (\theta_{nf})_p \right) \frac{Pe^2}{k'_{eff}} (1 \right. \right. \quad (3.84)$$

$$\left. - r'^2) \frac{\exp[Pe^2 (1 - r'^2) \delta x'_w / k'_{eff}]}{\exp[Pe^2 (1 - r'^2) \delta x'_w / k'_{eff}] - 1} \right. \left. \right] \\ J'_w = (r'_w - r'^3_w) \left[(\theta_{nf})_w + \frac{(\theta_{nf})_w - (\theta_{nf})_p}{\exp[Pe^2 (1 - r'^2) \delta x'_w / k'_{eff}] - 1} \right] \quad (3.85)$$

Önceki işlem adımlarında bulunan Denklem (3.81) ve Denklem (3.85) kullanılarak Denklem (3.86) elde edilmektedir.

$$J'_e - J'_w = (r'_p - r'^3_p) \left[\left((\theta_{nf})_p + \frac{(\theta_{nf})_p - (\theta_{nf})_E}{\exp[Pe^2 (1 - r'^2) \frac{\delta x'_e}{k'_{eff}}] - 1} \right) \right. \\ \left. - \left((\theta_{nf})_w + \frac{(\theta_{nf})_w - (\theta_{nf})_p}{\exp[Pe^2 (1 - r'^2) \frac{\delta x'_w}{k'_{eff}}] - 1} \right) \right] (\Delta r')_p (\Delta t') \quad (3.86)$$

Benzer işlem, zaman ifadesini içeren Denklem (3.87) için de uygulanmaktadır.

$$\int_w^e \int_s^t \int_{t'}^{t'+\Delta t'} r' \frac{\partial \theta_{nf}}{\partial t'} dt' dr' dx' = r'_p \left(\theta_{nf}_p^1 - \theta_{nf}_p^0 \right) (\Delta x')_p (\Delta r')_p \quad (3.87)$$

Radyal yöndeki terime ait olan Denklem (3.88) elde edilmektedir.

$$\begin{aligned}
\int_{t'}^{t'+\Delta t'} \int_w^e \int_s^n \frac{\partial J'_r}{\partial r'} dr' dx' dt' &= \int_{t'}^{t'+\Delta t'} \int_w^e \int_s^n \frac{\partial}{\partial r'} \left(k'_{eff} r' \frac{\partial \theta_{nf}}{\partial r'} \right) dr' dx' dt' \\
&= \int_{t'}^{t'+\Delta t'} \int_w^e \left(k'_{eff} r' \frac{\partial \theta_{nf}}{\partial r'} \Big|_n - k'_{eff} r' \frac{\partial \theta_{nf}}{\partial r'} \Big|_s \right) dx' dt' \\
&= \int_{t'}^{t'+\Delta t'} \left(k'_{eff_n} r'_n \frac{(\theta_{nf})_N - (\theta_{nf})_P}{(\delta r')_n} \right. \\
&\quad \left. - k'_{eff_s} r'_s \frac{(\theta_{nf})_P - (\theta_{nf})_S}{(\delta r')_s} \right) (\Delta x')_P dt' \\
&= f \left(k'_{eff_n} r'_n \frac{(\theta_{nf})_N - (\theta_{nf})_P}{(\delta r')_n} \right. \\
&\quad \left. - k'_{eff_s} r'_s \frac{(\theta_{nf})_P - (\theta_{nf})_S}{(\delta r')_s} \right) (\Delta x')_P \Delta t' - (1 \\
&\quad - f) \left(k'_{eff_n} r'_n \frac{(\theta_{nf})_N - (\theta_{nf})_P}{(\delta r')_n} \right. \\
&\quad \left. - k'_{eff_s} r'_s \frac{(\theta_{nf})_P - (\theta_{nf})_S}{(\delta r')_s} \right) (\Delta x')_P \Delta t'
\end{aligned} \tag{3.88}$$

Viskoz yitim terimi açısından Denklem (3.89) kullanılmaktadır.

$$\int_{t'}^{t'+\Delta t'} \int_w^e \int_s^n 16 Br r'^3 dr' dx' dt' = 16 Br r_p'^3 (\Delta r')_P (\Delta x')_P (\Delta t') \tag{3.89}$$

Burada da ağırlık faktörü için $f = 1$ değeri kullanılarak, ilgili terimler tümüyle gösterildiğinde Denklem (3.90) elde edilmektedir.

$$\begin{aligned}
&r_p' \left(\theta_{nf_p}^1 - \theta_{nf_p}^0 \right) (\Delta x')_P (\Delta r')_P \\
&\quad + (r'_p - r'^3_p) \left[\left((\theta_{nf})_P + \frac{(\theta_{nf})_P - (\theta_{nf})_E}{\exp \left[Pe^2 (1 - r'^2) \frac{\delta x'_e}{k'_{eff}} \right] - 1} \right) \right. \\
&\quad \left. - \left((\theta_{nf})_W + \frac{(\theta_{nf})_W - (\theta_{nf})_P}{\exp \left[Pe^2 (1 - r'^2) \frac{\delta x'_w}{k'_{eff}} \right] - 1} \right) \right] (\Delta r')_P (\Delta t') \\
&= \left(k'_{eff_n} r'_n \frac{(\theta_{nf})_N - (\theta_{nf})_P}{(\delta r')_n} \right. \\
&\quad \left. - k'_{eff_s} r'_s \frac{(\theta_{nf})_P - (\theta_{nf})_S}{(\delta r')_s} \right) (\Delta x')_P (\Delta t') \\
&\quad + 16 Br r_p'^3 (\Delta r')_P (\Delta x')_P (\Delta t')
\end{aligned} \tag{3.90}$$

Böylelikle radyal yönde merkezi fark yöntemiyle nanoakışkan bölgesi için ayrıklaştırılma yapılmıştır. Eksenel yönde ise üstel (kesin) yöntem kullanılarak, nanoakışkan bölgesi için ilgili katsayılar Denklem (3.91), Denklem (3.92), Denklem (3.93), Denklem (3.94), Denklem (3.95), Denklem (3.96), Denklem (3.97) ve Denklem (3.98)'de verildiği üzere en genel halde ifade edilmiştir.

$$A_P \theta_P = A_N \theta_N + A_S \theta_S + A_E \theta_E + A_W \theta_W + A_P^0 \theta_P^0 + D \quad (3.91)$$

$$A_N = \frac{r'_n k'_{eff} \Delta x'_P}{\delta r'_n} \quad (3.92)$$

$$A_S = \frac{r'_s k'_{eff} \Delta x'_P}{\delta r'_s} \quad (3.93)$$

$$A_E = \frac{(r'_p - r'_p{}^3) \Delta r'_P}{\exp \left[Pe^2 (1 - r'_p{}^2) \frac{\delta x'_e}{k'_{eff}} \right] - 1} \quad (3.94)$$

$$A_W = \frac{(r'_p - r'_p{}^3) \left(\exp \left[Pe^2 (1 - r'_p{}^2) \frac{\delta x'_w}{k'_{eff}} \right] \right) \Delta r'_P}{\exp \left[Pe^2 (1 - r'_p{}^2) \frac{\delta x'_w}{k'_{eff}} \right] - 1} \quad (3.95)$$

$$A_P^0 = \frac{r'_P (\Delta x'_P) (\Delta r'_P)}{\Delta t'} \quad (3.96)$$

$$D = 16 Br r_P{}^3 (\Delta r'_P) (\Delta x'_P) \quad (3.97)$$

$$A_P = A_N + A_S + A_E + A_W + A_P^0 \quad (3.98)$$

3.8. Başlangıç ve Sınır Şartlarının Ayrıklaştırılması

Başlangıç ve sınır şartı olarak sıcaklık teriminin belirtilmediği durumlara ait düğüm noktaları için ayrıklaştırılmış ifadeler elde edilmiştir.

3.8.1. Cidar bölgesi için başlangıç ve sınır şartlarının ayrıklaştırılması

Cidar bölgesi için başlangıç ve sınır şartlarının ayrıklaştırılması gerçekleştirilmiştir. Buna göre, Denklem (3.99)'da belirtilen durum için ilgili katsayılar Denklem (3.100), Denklem (3.101), Denklem (3.102), Denklem (3.103), Denklem (3.104), Denklem (3.105) ve Denklem (3.106) ile elde edilmiştir.

$$r' = 1 \text{ için } k_{w-nf} \frac{\partial \theta_w}{\partial r'} = \frac{\partial \theta_{nf}}{\partial r'} \quad (3.99)$$

$$A_P \theta_P = A_N \theta_N + A_S \theta_S + A_E \theta_E + A_W \theta_W + A_P^0 \theta_P^0 \quad (3.100)$$

$$A_N = \frac{r'_n \Delta x'_P}{\delta r'_n} \quad (3.101)$$

$$A_S = \frac{r'_s \Delta x'_P}{k_{w-nf} \delta r'_s} \quad (3.102)$$

$$A_E = \frac{r'_P \Delta r'_P}{Pe^2 \delta x'_e} \quad (3.103)$$

$$A_W = \frac{r'_P \Delta r'_P}{Pe^2 \delta x'_W} \quad (3.104)$$

$$A_P^0 = \frac{r'_P (\Delta x')_P (\Delta r')_P}{\alpha_{w-nf} \Delta t'} \quad (3.105)$$

$$A_P = A_N + A_S + A_E + A_W + A_P^0 \quad (3.106)$$

Benzer şekilde, Denklem (3.107)'de geçerli olan durumda belirtilen katsayılar Denklem (3.108), Denklem (3.109), Denklem (3.110), Denklem (3.111), Denklem (3.112), Denklem (3.113) ve Denklem (3.114) için elde edilmiştir.

$$x' = \infty \text{ için } \frac{\partial \theta_w}{\partial x'} = 0 \quad (3.107)$$

$$A_P \theta_P = A_N \theta_N + A_S \theta_S + A_E \theta_E + A_W \theta_W + A_P^0 \theta_P^0 \quad (3.108)$$

$$A_N = \frac{r'_n \Delta x'_P}{\delta r'_n} \quad (3.109)$$

$$A_S = \frac{r'_s \Delta x'_P}{\delta r'_s} \quad (3.110)$$

$$A_E = 0 \quad (3.111)$$

$$A_W = \frac{2 r'_P \Delta r'_P}{Pe^2 \delta x'_W} \quad (3.112)$$

$$A_P^0 = \frac{r'_P (\Delta x')_P (\Delta r')_P}{\alpha_{w-nf} \Delta t'} \quad (3.113)$$

$$A_P = A_N + A_S + A_E + A_W + A_P^0 \quad (3.114)$$

Diğer bir durum olarak, Denklem (3.115) ile verilen durum için aynı biçimde ilgili katsayılar Denklem (3.116), Denklem (3.117), Denklem (3.118), Denklem (3.119), Denklem (3.120), Denklem (3.121) ve Denklem (3.122) kullanılarak elde edilmiştir.

$$x' = \infty \text{ ve } r' = 1 \text{ için } \frac{\partial \theta_w}{\partial x'} = 0 \quad (3.115)$$

$$A_P \theta_P = A_N \theta_N + A_S \theta_S + A_E \theta_E + A_W \theta_W + A_P^0 \theta_P^0 \quad (3.116)$$

$$A_N = \frac{r'_n \Delta x'_P}{\delta r'_n} \quad (3.117)$$

$$A_S = \frac{r'_s \Delta x'_P}{k'_{w-nf} \delta r'_s} \quad (3.118)$$

$$A_E = 0 \quad (3.119)$$

$$A_W = \frac{2 r'_P \Delta r'_P}{Pe^2 \delta x'_W} \quad (3.120)$$

$$A_P^0 = \frac{r'_P (\Delta x')_P (\Delta r')_P}{\alpha_{w-nf} \Delta t'} \quad (3.121)$$

$$A_P = A_N + A_S + A_E + A_W + A_P^0 \quad (3.122)$$

3.8.2. Nanoakışkan bölgesi için başlangıç ve sınır şartlarının ayrıklaştırılması

Nanoakışkan bölgesi için başlangıç ve sınır şartlarının ayrıklaştırılması gerçekleştirilmiştir. Buna göre, Denklem (3.123)'te belirtilen durum için ilgili katsayılar Denklem (3.124), Denklem (3.125), Denklem (3.126), Denklem (3.127), Denklem (3.128), Denklem (3.129), Denklem (3.130) ve Denklem (3.131) ile elde edilmiştir.

$$r' = 0 \text{ için } \frac{\partial \theta_{nf}}{\partial r'} = 0 \quad (3.123)$$

$$A_P \theta_P = A_N \theta_N + A_S \theta_S + A_E \theta_E + A_W \theta_W + A_P^0 \theta_P^0 + D \quad (3.124)$$

$$A_N = \frac{2 r'_n k'_{eff} \Delta x'_P}{\delta r'_n} \quad (3.125)$$

$$A_S = 0 \quad (3.126)$$

$$A_E = \frac{(r'_p - r'_p{}^3) \Delta r'_P}{\exp \left[Pe^2 (1 - r'_p{}^2) \frac{\delta x'_e}{k'_{eff}} \right] - 1} \quad (3.127)$$

$$A_W = \frac{(r'_p - r'_p{}^3) \left(\exp \left[Pe^2 (1 - r'_p{}^2) \frac{\delta x'_w}{k'_{eff}} \right] \right) \Delta r'_P}{\exp \left[Pe^2 (1 - r'_p{}^2) \frac{\delta x'_w}{k'_{eff}} \right] - 1} \quad (3.128)$$

$$A_P^0 = \frac{r'_P (\Delta x'_P) (\Delta r'_P)}{\Delta t'} \quad (3.129)$$

$$D = 16 Br r_P'^3 (\Delta r'_P) (\Delta x'_P) \quad (3.130)$$

$$A_P = A_N + A_S + A_E + A_W + A_P^0 \quad (3.131)$$

Benzer şekilde, , Denklem (3.132)'de geçerli olan durumda belirtilen katsayılar Denklem (3.133), Denklem (3.134), Denklem (3.135), Denklem (3.136), Denklem (3.137), Denklem (3.138), Denklem (3.139) ve Denklem (3.140) vasıtasıyla elde edilmiştir.

$$x' = \infty \text{ için } \frac{\partial \theta_{nf}}{\partial x'} = 0 \quad (3.132)$$

$$A_P \theta_P = A_N \theta_N + A_S \theta_S + A_E \theta_E + A_W \theta_W + A_P^0 \theta_P^0 + D \quad (3.133)$$

$$A_N = \frac{r'_n k'_{eff} \Delta x'_P}{\delta r'_n} \quad (3.134)$$

$$A_S = \frac{r'_s k'_{eff} \Delta x'_P}{\delta r'_s} \quad (3.135)$$

$$A_E = 0 \quad (3.136)$$

$$A_W = \frac{(r'_p - r'_p{}^3) \left(\exp \left[Pe^2 (1 - r'_p{}^2) \frac{\delta x'_w}{k'_{eff}} \right] + 1 \right) \Delta r'_P}{\exp \left[Pe^2 (1 - r'_p{}^2) \frac{\delta x'_w}{k'_{eff}} \right] - 1} \quad (3.137)$$

$$A_P^0 = \frac{r'_P (\Delta x'_P) (\Delta r'_P)}{\Delta t'} \quad (3.138)$$

$$D = 16 Br r_P'^3 (\Delta r'_P) (\Delta x'_P) \quad (3.139)$$

$$A_P = A_N + A_S + A_E + A_W + A_P^0 \quad (3.140)$$

Diğer bir durum olarak, Denklem (3.141) ile verilen durum için aynı biçimde ilgili katsayılar Denklem (3.142), Denklem (3.143), Denklem (3.144), Denklem (3.145), Denklem (3.146), Denklem (3.147), Denklem (3.148) ve Denklem (3.149) kullanılarak elde edilmiştir.

$$x' = \infty \text{ ve } r' = 0 \text{ için } \frac{\partial \theta_{nf}}{\partial r'} = 0 \quad (3.141)$$

$$A_p \theta_p = A_N \theta_N + A_S \theta_S + A_E \theta_E + A_W \theta_W + A_p^0 \theta_p^0 + D \quad (3.142)$$

$$A_N = \frac{2 r'_n k'_{eff} \Delta x'_p}{\delta r'_n} \quad (3.143)$$

$$A_S = 0 \quad (3.144)$$

$$A_E = 0 \quad (3.145)$$

$$A_W = \frac{(r'_p - r'_p{}^3) \left(\exp \left[Pe^2 (1 - r'_p{}^2) \frac{\delta x'_w}{k'_{eff}} \right] + 1 \right) \Delta r'_p}{\exp \left[Pe^2 (1 - r'_p{}^2) \frac{\delta x'_w}{k'_{eff}} \right] - 1} \quad (3.146)$$

$$A_p^0 = \frac{r'_p (\Delta x')_p (\Delta r')_p}{\Delta t'} \quad (3.147)$$

$$D = 16 Br r_p'^3 (\Delta r')_p (\Delta x')_p \quad (3.148)$$

$$A_p = A_N + A_S + A_E + A_W + A_p^0 \quad (3.149)$$

3.9. Termofiziksel Özellik Modelleri

Ele alınan çalışma kapsamında Al_2O_3 , CuO ve TiO_2 nanoparçacıkları için Çizelge 3.1'de sırasıyla verilen termofiziksel özellik değerleri kullanılmıştır.

Çizelge 3.1. Nanoparçacıklara ait termofiziksel özellik değerleri

	ρ	C_p	k
Al_2O_3 (Pak ve Cho, 1998)	3880 kg/m ³	773 J/kg °C	36 W/m °C
CuO (Hwang ve ark., 2006; Alloui ve ark., 2011)	6320 kg/m ³	531.8 J/kg °C	76.5 W/m °C
TiO_2 (Pak ve Cho, 1998)	4175 kg/m ³	692 J/kg °C	8.4 W/m °C

Maïga ve ark. (2004) tarafından Al_2O_3 nanoparçacığının temel akışkana ilave edilmesi sonrasında oluşan nanoakışkanın termofiziksel özellik değerleri yoğunluk için Denklem (3.150), özgül ısı için Denklem (3.151), ısı iletim katsayısı için Denklem (3.152) ve dinamik viskozite için ise Denklem (3.153) ile elde edilmiştir.

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_p \quad (3.150)$$

$$C_{p_{nf}} = (1 - \phi)C_{p_f} + \phi C_{p_p} \quad (3.151)$$

$$k_{nf} = k_f (1 + 2.72 \phi + 4.97 \phi^2) \quad (3.152)$$

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 7.3 \phi + 123 \phi^2) \quad (3.153)$$

Benzer şekilde Al_2O_3 nanoparçacığın temel akışkana eklenmesi sonrasında meydana gelen nanoakışkanın termofiziksel özellik değerleri için Ho ve ark. (2010) tarafından verilen ifadeler yoğunluk için Denklem (3.154), özgül ısı için Denklem (3.155), ısı iletim katsayısı için Denklem (3.156) ve dinamik viskozite için ise Denklem (3.157)'de gösterildiği üzere kullanılmıştır.

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_p \quad (3.154)$$

$$C_{p_{nf}} = (1 - \phi)C_{p_f} + \phi C_{p_p} \quad (3.155)$$

$$k_{nf} = k_f (1 + 2.944 \phi + 19.672 \phi^2) \quad (3.156)$$

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 4.93 \phi + 222.4 \phi^2) \quad (3.157)$$

Temel akışkana nanoparçacık olarak CuO ilavesi ile elde edilen nanoakışkanın termofiziksel özellik değerleri bakımından Denklem (3.158)'de yoğunluk, Denklem (3.159)'da özgül ısı, Denklem (3.160)'da ısı iletim katsayısı ve Denklem (3.161)'de dinamik viskozite için belirtilen eşitlikler göz önünde bulundurulmuştur (Nguyen ve ark., 2007; Mintsa ve ark., 2009).

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_p \quad (3.158)$$

$$C_{p_{nf}} = (1 - \phi)C_{p_f} + \phi C_{p_p} \quad (3.159)$$

$$k_{nf} = k_f (0.99 + 1.74 \phi) \quad (3.160)$$

$$\mu_{nf} = \mu_f (1.475 - 0.319 \phi + 0.051 \phi^2 + 0.009 \phi^3) \quad (3.161)$$

Vinodhan ve ark. (2016) tarafından CuO nanoparçacığının temel akışkana eklenmesiyle oluşan nanoakışkana ait termofiziksel özellik değerleri sırasıyla Denklem (3.162), Denklem (3.163), Denklem (3.164) ve Denklem (3.165) ile yoğunluk, özgül ısı, ısı iletim katsayısı ve dinamik viskozite açısından bulunmuştur.

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_p \quad (3.162)$$

$$C_{p_{nf}} = (1 - \phi)C_{p_f} + \phi C_{p_p} \quad (3.163)$$

$$k_{nf} = k_f (1 + 13.06 \phi) \quad (3.164)$$

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 1.2136 \phi) \quad (3.165)$$

Temel akışkana nanoparçacık olarak TiO_2 eklendikten sonra elde edilen nanoakışkanın termofiziksel özellik değerleri için Buongiorno (2006) tarafından önerilen ve Denklem (3.166)'da yoğunluk, Denklem (3.167)'de özgül ısı, Denklem (3.168)'de ısı iletim katsayısı ve Denklem (3.169)'da dinamik viskozite için verilen ifadeler tercih edilmiştir.

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_p \quad (3.166)$$

$$C_{p,nf} = (1 - \phi)C_{p,f} + \phi C_{p,p} \quad (3.167)$$

$$k_{nf} = k_f (1 + 2.92 \phi - 11.99 \phi^2) \quad (3.168)$$

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 5.45 \phi + 108.2 \phi^2) \quad (3.169)$$

Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından TiO_2 nanoparçacığının temel akışkana ilave edilmesi ile meydana gelen nanoakışkan için sırasıyla yoğunluk, özgül ısı, ısı iletim katsayısı ve dinamik viskozite için Denklem (3.170), Denklem (3.171), Denklem (3.172) ve Denklem (3.173)'te sunulan termofiziksel özellik ifadeleri uygulanmıştır.

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_p \quad (3.170)$$

$$C_{p,nf} = (1 - \phi)C_{p,f} + \phi C_{p,p} \quad (3.171)$$

$$k_{nf} = k_f (1.0204 + 0.0249 \phi) \quad (3.172)$$

$$\mu_{nf} = \mu_f (1.013 + 0.092 \phi - 0.015 \phi^2) \quad (3.173)$$

3.10. Çözümün Parametrelerden Bağımsız Hale Getirilmesi

Sonlu elemanlar, sonlu farklar ve sonlu hacimler yöntemlerine uygulanabilen ağdan bağımsızlık analizi, belirsizlik tahmini kapsamında güvenilir ve yaygın bir yöntem olarak ortaya çıkmıştır (Minkowycz ve ark., 1988). Bu durum açısından seyrek, orta ve yoğun sıklıktaki ağ yapıları çözüm bölgesinde uygulanarak, aynı konum ve zaman için herhangi bir sonuç değerine ait belirsizlik analizi gerçekleştirilebilir. Ağdan bağımsızlık analizinde farklı yoğunluktaki ağ yapıları açısından düğüm noktaları arasındaki mesafelere ait bir oran elde edilmektedir. Basamak uzunluklarının oranını temsil eden bu değer, iki kat olarak değerlendirilse de iki ya da daha çok boyutlu problemlerdeki çözüm kapasiteleri göz önünde bulundurulduğunda bu oran en az 1.1 de alınabilmektedir (Roache, 1994). Buna göre Çizelge 3.2'de yer alan farklı ağ yapıları denenmiştir.

Çizelge 3.2. Sıklık değerlerine göre farklı ağ yapıları

	Eksenel yöndeki eleman sayısı		Radyal yöndeki eleman sayısı	
	Üst akış bölgesi	Alt akış bölgesi	Nanoakışkan bölgesi	Cidar bölgesi
<i>Seyrek sıklıktaki ağ yapısı</i>	24	24	15	9
<i>Orta sıklıktaki ağ yapısı</i>	32	32	20	12
<i>Yoğun sıklıktaki ağ yapısı</i>	40	40	25	15

Elde edilen sonuçlar sürekli rejimdeki $x' = 0$ noktasında ara yüzey ısı akısı ve yığık sıcaklık değerleri cinsinden Çizelge 3.2'de eleman sayılarına yer verilen seyrek, orta ve yoğun sıklıktaki farklı ağ yapıları açısından sırasıyla Çizelge 3.3'te gibi karşılaştırılmıştır.

Çizelge 3.3. Çözümün ağ yapısından bağımsız hale getirilmesi

Pe = 5, Br = 0, $\alpha_{w-nf} = 1$, $k_{w-nf} = 10$, $d' = 0.1$	q'_{wi}	Bağıl Sapma	θ_b	Bağıl Sapma
<i>Seyrek sıklıktaki ağ yapısı</i>	0.891529		0.231712	
<i>Orta sıklıktaki ağ yapısı</i>	0.83103	% 6.79	0.247572	% 6.84
<i>Yoğun sıklıktaki ağ yapısı</i>	0.819194	% 1.42	0.251186	% 1.46

Orta sıklıktaki ağ yapısı ile saptanan sonuçlar referans olarak alındığında, seyrek sıklıktaki ağ yapısı ile elde edilen değerlerin ortalama olarak % 6.82 sapmayla elde edildiği görülmekte olup, buna bağlı olarak seyrek ağ yapısı yeterli bulunmamıştır. Bu sebeple ağ yapısındaki sıklık artırılmıştır. Yoğun sıklıktaki ağ yapısındaki değerler ile karşılaştırıldığında ilgili sonuçların orta sıklıktaki ağ yapısı için ortalama % 1.44 sapmayla çözüm için uygun olduğu görülmektedir. Dolayısıyla orta sıklıktaki ağ yapısı için çözümler gerçekleştirilmiştir.

Çözüm aşamasında düşük hassasiyet limiti olarak 10^{-7} , orta hassasiyet limiti olarak 10^{-8} ve yüksek hassasiyet limiti olarak 10^{-9} değerleri sürekli rejimdeki $x' = 0$ noktasında ara yüzey ısı akısı ve yığık sıcaklık bakımından sırasıyla Çizelge 3.4'te sunulduğu üzere karşılaştırılmıştır.

Çizelge 3.4. Çözümün hassasiyet limitinden bağımsız hale getirilmesi

Pe = 5, Br = 0, $\alpha_{w-nf} = 1$, $k_{w-nf} = 10$, $d' = 0.1$	q'_{wi}	θ_b
<i>Düşük hassasiyet limiti</i>	0.83103	0.247571
<i>Orta hassasiyet limiti</i>	0.83103	0.247572
<i>Yüksek hassasiyet limiti</i>	0.83103	0.247572

İlgili sonuçlar incelendiğinde, mevcut hassasiyet değerleri açısından çözümde kayda değer herhangi bir farklılık oluşmamaktadır. Buna göre orta hassasiyet limiti olarak 10^{-8} değeri çözüm aşamasında kullanılmıştır.

Zaman adımı açısından yüksek zaman adımı olarak $\Delta t' = 0.0002$, orta zaman adımı olarak $\Delta t' = 0.0001$ ve düşük zaman adımı olarak $\Delta t' = 0.00005$ değerleri alınarak çözüm işlemleri yinelenmiştir. Sürekli rejim için $x' = 0$ noktasında için elde edilen sonuçlara ara yüzey ısı akısı ve yığık sıcaklık cinsinden sırasıyla Çizelge 3.5'te yer verilmiştir.

Çizelge 3.5. Çözümün zaman adımından bağımsız hale getirilmesi

Pe = 5, Br = 0, $\alpha_{w-nf} = 1$, $k_{w-nf} = 10$, $d' = 0.1$	q'_{wi}	θ_b
<i>Yüksek zaman adımı</i>	0.83103	0.247572
<i>Orta zaman adımı</i>	0.83103	0.247572
<i>Düşük zaman adımı</i>	0.83103	0.247572

İlgili sonuçlar farklı zaman adımlarına göre incelendiğinde, belirtilen değerler açısından çözüm aşamasında dikkate değer herhangi bir farklılık meydana gelmemektedir. Netice olarak orta zaman adımı olarak $\Delta t' = 0.0001$ değeri için çözüm gerçekleştirilmiştir. Benzer şekilde zaman adımı artırımı açısından da % 5, % 10 ve % 20 değerleri kıyaslandığında, zaman adımı artırımı dolayısıyla ilgili sonuçlarda kayda değer herhangi bir farklılık gözlenemediğinden, çözüm için % 10 zaman adımı artırımı uygulanmıştır.

3.11. Çözüm İşlemi

Mevcut durumdaki enerji denklemleriyle sıcaklık dağılımları, ayrıklaştırılmış ifadeler kullanılarak Gauss-Siedel iterasyon yöntemi yardımıyla elde edilmiştir. Hesaplama alanı içerisinde aksel yönde hem üst hem de alt akış bölgelerinde gerekli uzunluklarla radyal yönde nanoakışkan ve cidar dış yüzeyleriyle sınırlanan bölge seçilmiştir. Elde edilen deneme sonuçları neticesinde en optimum olarak radyal yönde 32 ağ elemanı kullanılarak mevcut şartlarda uygun olarak belirlenmiştir. Kullanılan 32 ağ elemanının 20 tanesi nanoakışkan bölgesinde yer almaktayken 12 tanesi ise cidar bölgesindedir. Nanoakışkan bölgesinde bulunan radyal basamak uzunlukları ($r' = 1/20$) eşit olarak dağıtılmıştır. Aynı biçimde cidar bölgesi açısından radyal basamak uzunlukları ($d' = 1/12$) da eşittir. Aksel yöne gelindiğinde ise mikrokanalın ısıtılmaya başlandığı $x' = 0$ noktasının etrafında düğüm noktaları sıklaştırılmış olup, belirtilen bölge için çözüm hassasiyeti için artış elde edilmesi amaçlanmıştır. Bahsedilen noktaya göre üst akış ve alt

akış bölgelerinde aksel yöndeki ilk basamak uzunluğu 0.001 olarak belirlenmiştir. Eksel yöndeki ardışık basamak uzunlukları arasında 1.34 katlık artış sağlanarak hem alt akış bölgesinde hem de üst akış bölgesinde kademeli bir dağılım uygulanmıştır. Bu dağılımın çalışmadaki tüm parametrelerin incelenmesinde uygun olduğu görülmüştür. Zaman adımının çözüm hassasiyetini artırmak için eşit olmayan aralıklar göz önünde bulundurulmuştur. Buna göre, ilk zaman adımı için 0.0001 değeri kullanıldıktan sonra takip eden her bir zaman adımında bir öncekinin % 10'u kadar artış uygulanmıştır. Çözüm işlemlerinde hassasiyet limiti için 10^{-8} değeri uygulanmıştır. Böylelikle, başlangıç durumunda ısı transferi karakteristiklerinin hızlı değişim göstermesine bağlı olarak daha küçük zaman aralıkları kullanılmıştır. Bu durumun devamında sürekli rejime yaklaşıldıkça ısı transferi karakteristikleri açısından değişim hızı yavaşlama gösterdiğinden, hesaplama süresini göz önünde bulundurarak ilgili zaman adımları buna bağlı olarak büyütülmüştür.

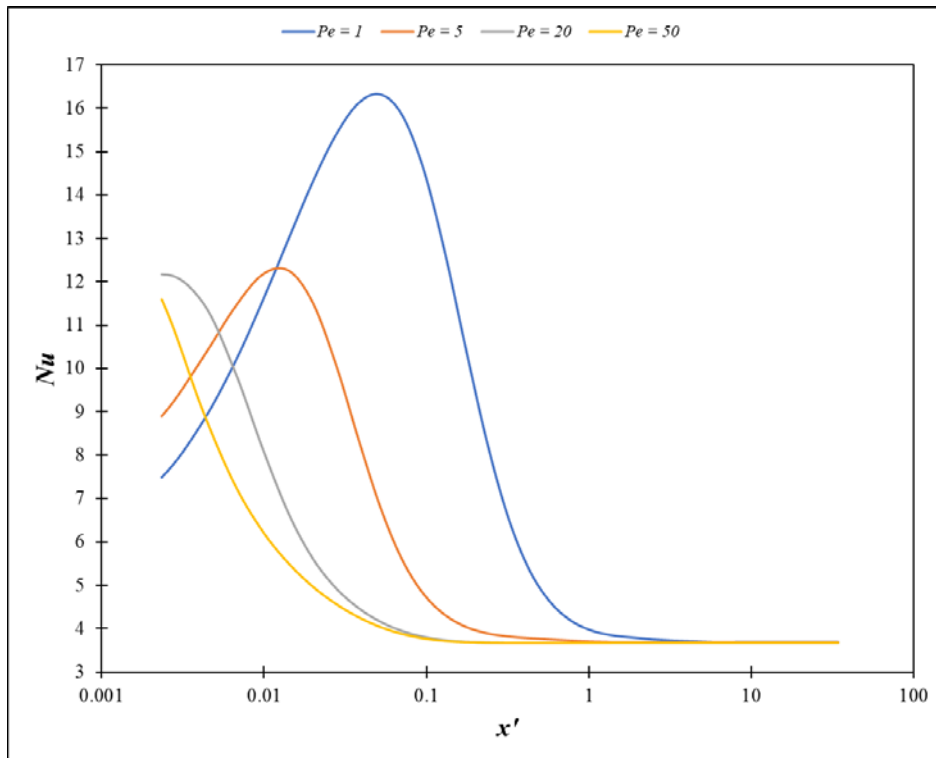
Belirtilen durum dâhilinde, her bir zaman adımına ait sıcaklık dağılımı Patankar (1980) tarafından ifade edilen nokta-nokta yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Belirtilen duruma uygun olarak düğüm noktaları radyal yönde dış cidardan eksene doğru taranırken, akış doğrultusu için $x = -\infty$ 'dan $x = \infty$ 'a doğru hareket edilmesi söz konusudur. Ara yüzeyde yer almakta olan sınır şartları için ise yine Patankar (1980) tarafından önerilen harmonik ortalama yaklaşımı uygulanmıştır. Nanoakışkan bölgesi için sınır şartı olarak, herhangi bir deneme için bir öncekinde elde edilen ara yüzey sıcaklık değerlerinin kullanımı söz konusudur. Cidar bölgesinde ise ara yüzey ısı akısı değerleri, nanoakışkan ile cidar arasındaki bilgi geçişinde kullanılmıştır.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Mevcut çalışma kapsamında ele alınan durumlara ait sonuçlara yer verilmiştir. Peclet sayısı, cidar kalınlık oranı, ısı yayılım katsayısı oranı, ısı iletim katsayısı oranı ve Brinkman sayısı açısından çözümler bu parametreler değiştirilerek gerçekleştirilmiştir. Bu parametreler için $Pe = 1, 5, 20, 50$; $d' = 0.02, 0.1, 0.2, 0.3, 0.6, 1, 1.4$; $\alpha_{w-nf} = 0.1, 1, 10$; $k_{w-nf} = 0.1, 1, 10$ ve $Br = -0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2$ değerleri mühendislik uygulamaları için göz önünde bulundurulmuş koşullar açısından ele alınmıştır. Belirtilen değerler temel akışkan olarak su ve suya nanoparçacık ilavesiyle elde edilen nanoakışkanlar açısından değerlendirilmiştir. Nanoparçacık olarak Al_2O_3 , CuO ve TiO_2 , temel akışkan olan suya % 1, % 4 ve % 7 hacimsel konsantrasyonlarında ayrı ayrı olarak ilave edilmiştir. Her bir nanoparçacık için literatürde yer alan iki farklı termofiziksel özellik modeli kullanılmıştır. Dolayısıyla toplamda altı modelin nanoparçacık bazında karşılaştırılması da yapılmıştır.

4.1. Temel Akışkan Olan Su İçin Elde Edilen Sonuçlar

Mevcut çalışma kapsamına ait sonuçların doğrulanması amacıyla Şekil 4.1'deki karşılaştırma grafiğine yer verilmiştir. Çalışmadaki sonuçların doğruluğunun göstergesi olarak farklı Peclet sayısı değerlerindeki sonuçlar karşılaştırılmıştır.

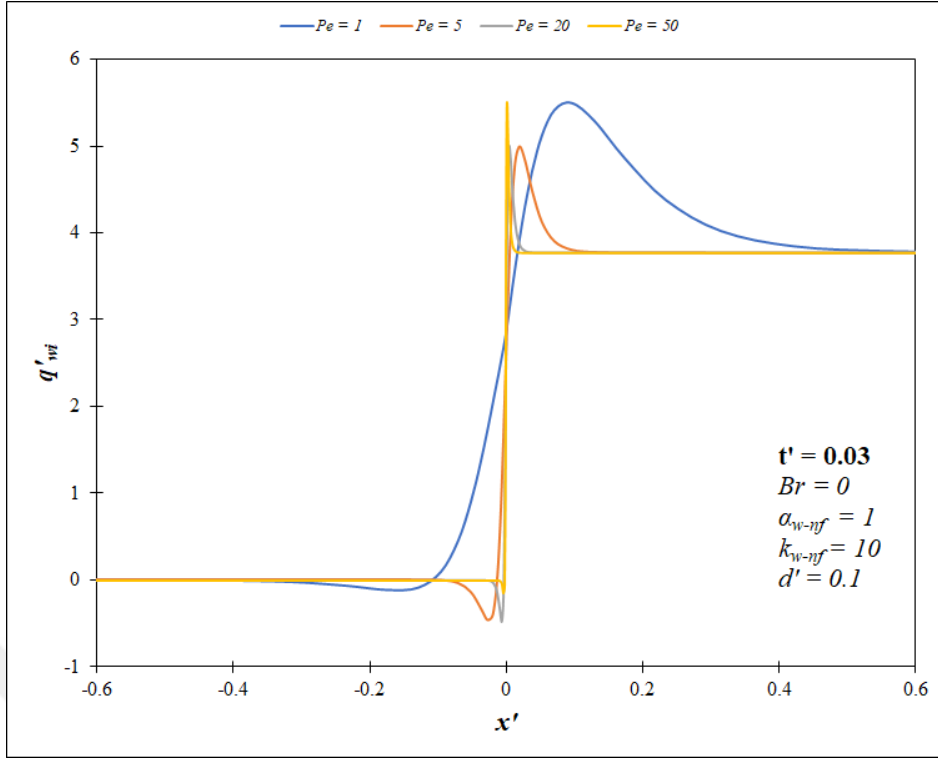


Şekil 4.1. Farklı Peclet sayısı değerleri için elde edilen sonuçların doğrulanması

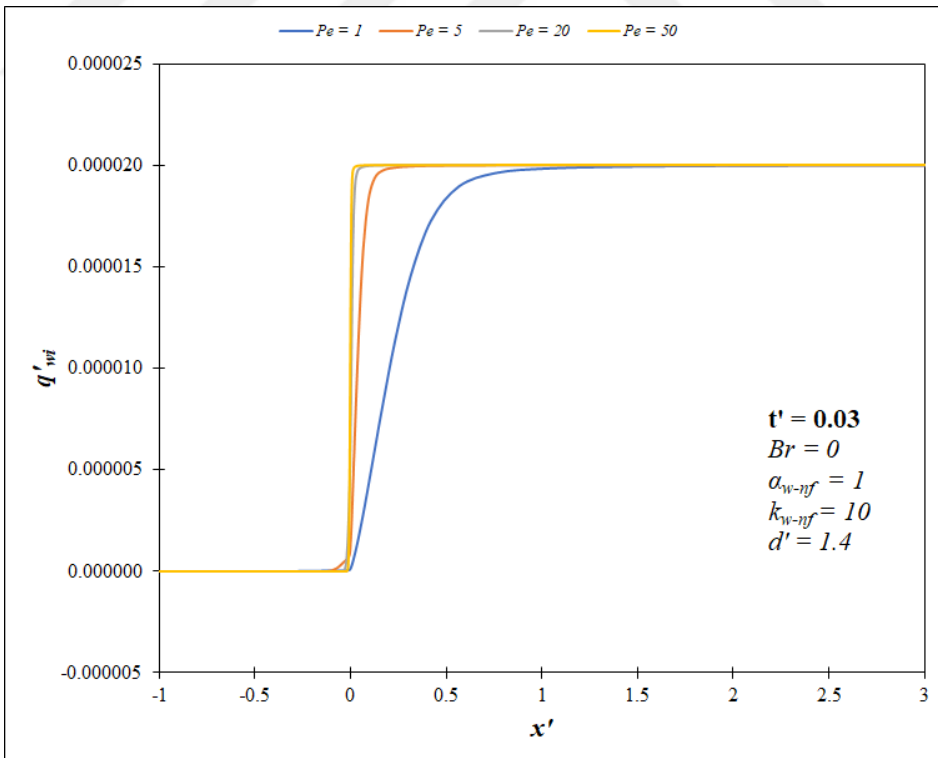
Sabit yüzey sıcaklık şartlarında laminer akışta Nusselt sayısı için $Nu = 3.66$ değeri geçerlidir. Buna göre Peclet sayısı azaldıkça sürekli rejime erişmesi için gerekli olan süre ve ısı gelişme mesafesi beklendiği üzere artma eğilimi göstermektedir. Akışkan hızının düşüşü Peclet sayısını da azalttığı için cidar ile akışkan arasındaki sıcaklık başlangıçta daha fazladır ve buna bağlı olarak ısı transferi hızı daha yüksek olmaktadır. Peclet sayısından bağımsız olarak laminer akıştaki referans değer maksimum % 1.1 sapma ile elde edilmektedir. Elde edilen bu oran çalışmadaki sonuçları doğrulamaktadır.

Zamana bağlı olarak ara yüzey ısı akısı, ara yüzey sıcaklığı ve yığık sıcaklık değerlerinin aksel yöndeki değişimi gösterilmiştir ve benzer şekilde radyal sıcaklık değerleri de farklı aksel konumlarda sunulmuştur. İlgili sonuçlara parametrelerin etkisi değerlendirilmiştir. Bu bağlamda Peclet sayısı, cidar kalınlık oranı, ısı yayılım katsayısı oranı, ısı iletim katsayısı oranı ve Brinkman sayısı göz önünde bulundurulmuştur.

Peclet sayısı olarak $Pe = 1, 5, 20$ ve 50 değerleri seçilmiştir. Cidar kalınlık oranı olarak $d' = 0.1$ için farklı Peclet sayısı değerlerinin ara yüzey ısı akısı değerlerine göre $t' = 0.03$ anındaki karşılaştırılması Şekil 4.2'de sunulmuştur. Buna göre üst akış bölgesinde $Pe = 1$ ve $Pe = 5$ değerleri için aksel ısı iletiminin etkisi görülmektedir. $Pe = 1$ için bu etki üst akış bölgesine doğru ilerlemekteyken, $Pe = 5$ 'teki etki aralığı $x' = 0$ 'a biraz daha yakındır. Belirtilen durumlar dolayısıyla üst akış bölgesinde önemli oranda ısı transferinin gerçekleştiği görülmektedir. Ayrıca $t' = 0.03$ anı, zaman anlamında başlangıca oldukça yakın olduğu için sabit yüzey sıcaklığı uygulanan cidarda aksel ısı iletimi daha yoğundur. Bu duruma ek olarak radyal yöndeki ısı iletimi etkisiyle ara yüzeydeki ısı akısı öncelikle artmaktadır. Isı transferi etkisiyle akışkan bölgesinde de aksel ısı iletimi artış göstermektedir ve bununla birlikte ara yüzey ısı akısı değerleri de azalma sürecine girmektedir. Benzer durumu alt akış bölgesi için de tekrarlamak mümkündür. $Pe = 1$ için ısı gelişme mesafesi diğer Peclet sayılarındaki mesafelere göre daha uzundur. Ancak $Pe \geq 20$ için bu etkinin üst akış ve alt akış bölgelerinde ısıtma başlangıcı olan $x' = 0$ noktasının civarında geçerlidir. Akış hızının nispeten yüksek oluşu sebebiyle aksel ısı iletimi etkisinin daha az olduğu görülmektedir. Aynı durum daha yüksek cidar kalınlığında farklı Peclet sayısı değerleri için ele alınmıştır. Buna göre cidar kalınlık oranı $d' = 1.4$ için ara yüzey ısı akısı değerleri $t' = 0.03$ anında Şekil 4.3'teki gibi kıyaslanmıştır. Bu grafiğe göre, üst akış bölgesinde aksel ısı iletiminin etkisi gözlemlenmemektedir. Alt akış bölgesinde en uzun ısı gelişme mesafesi $Pe = 1$ için geçerli olup, Peclet sayısı artışıyla bu mesafe azalma kaydetmektedir. Fakat $Pe \geq 20$ için



Şekil 4.2. Farklı Peclet sayısı değerlerinin $d' = 0.1$ kalınlık oranında ara yüzey ısı akısına etkisinin $t' = 0.03$ anındaki karşılaştırılması

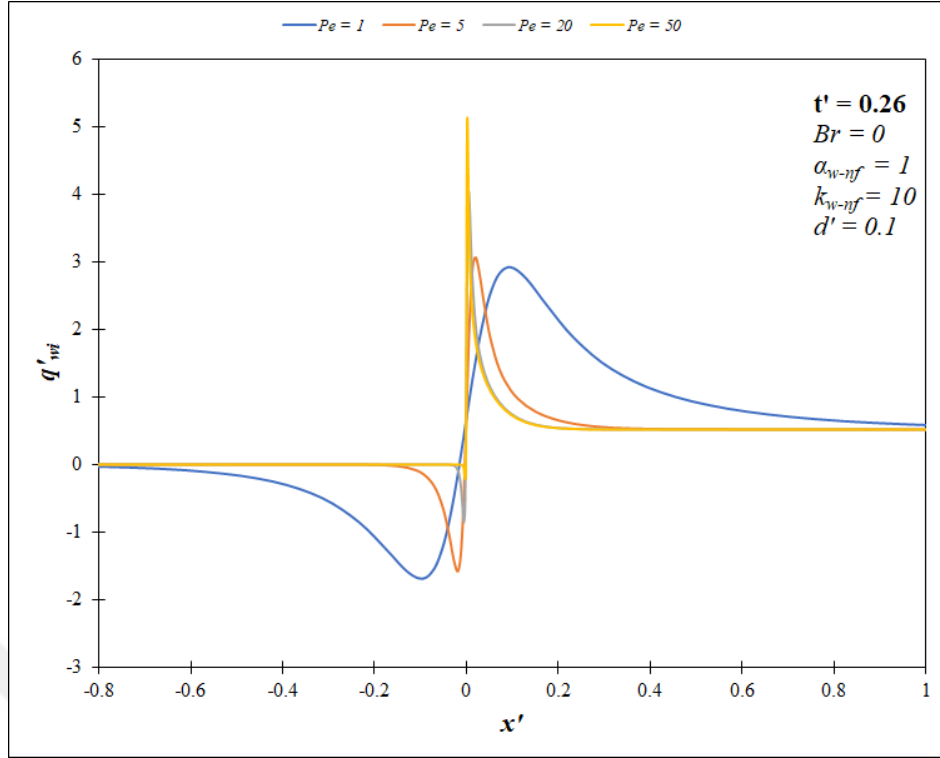


Şekil 4.3. Farklı Peclet sayısı değerlerinin $d' = 1.4$ kalınlık oranında ara yüzey ısı akısına etkisinin $t' = 0.03$ anındaki karşılaştırılması

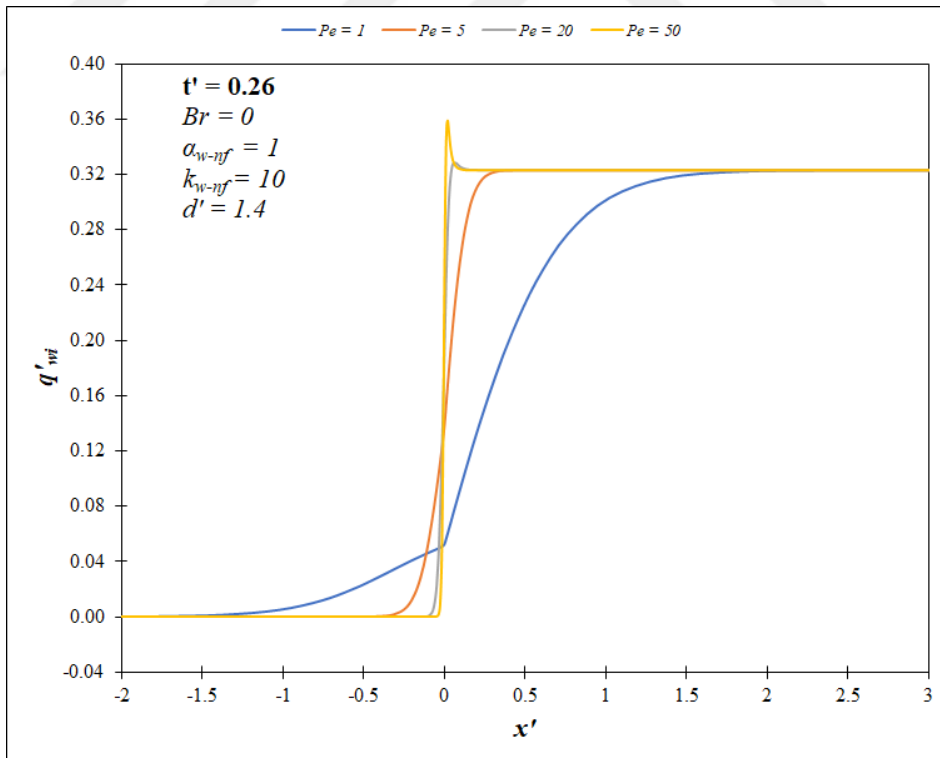
bu etki üst akış ve alt akış bölgelerinde neredeyse görülememektedir. Eksenel ısı iletimi etkisi açısından bu durumun ortaya çıkmasında akış hızı etkilidir. Peclet sayısı artışı ısı transferini artırmaktayken, cidar kalınlık oranı artışı bu durumu azaltmaktadır. Bu da maksimum ara yüzey ısı akısı değerleri ile belirlenmekte olup, tüm Peclet sayıları için yaklaşık $q'_{wi} = 0.00002$ değeri saptanmaktadır.

Cidar kalınlık oranının $d' = 0.1$ değeri için farklı Peclet sayılarının ara yüzey ısı akısı değerleri açısından $t' = 0.26$ anındaki karşılaştırılması Şekil 4.4'te verilmiştir. Üst akış bölgesinde $Pe = 1$ ve $Pe = 5$ değerleri için eksenel ısı iletiminin etkisi daha fazla görülmektedir. Bu etki üst akış bölgesinde $Pe = 1$ için akış yönüne göre daha gerideki eksenel konumlara kadar erişmektedir. Bu mesafe $Pe = 5$ için $x' = 0$ 'a daha yakındır. Isıl gelişme için gerekli olan mesafe $Pe = 1$ için en fazladır. Ancak $Pe \geq 20$ için bu etki görülememekte olup, Peclet sayısı artışı ısı transferini artırmaktadır. Ayrıca maksimum değer $Pe = 50$ değerinde $q'_{wi} = 5.12$ olarak elde edilmektedir. $Pe = 20$ değeri için $q'_{wi} = 4.04$ iken sırasıyla $Pe = 1$ ve $Pe = 5$ için $q'_{wi} = 2.92$ ve $q'_{wi} = 3.05$ değerleri görülmektedir. Benzer şekilde $d' = 1.4$ değeri için ilgili durumlara ait sonuçlar Şekil 4.5'te yer almaktadır. Üst akış bölgesi açısından $Pe = 1$ ve $Pe = 5$ değerleri için eksenel ısı iletiminin etkisi daha fazladır. Isıl yayılım mesafelerinin uzunluğu açısından genel eğilim devam etmektedir. Buna göre üst akış bölgesindeki ısı transferi oldukça etkilidir. Ancak $t' = 0.03$ anında geçerli olan cidarda yoğun eksenel ısı iletimi etkisi azalmaya geçmektedir. Böylelikle ısı transferi etkisiyle akışkan bölgesindeki eksenel ısı iletimi artışıyla sürekli rejim öncesindeki ara yüzey ısı akısı değerlerindeki azalma eğiliminin etkisi artmaktadır. Aynı Peclet sayısı için cidar kalınlık oranının azalması ısı transferini artırma eğilimi sunmaktadır. Maksimum ara yüzey ısı akısı değerlerine göre bu durum gözlemlenmektedir. $Pe = 1$ ve $Pe = 5$ için $q'_{wi} = 0.32$ olarak elde edilmektedir. $Pe = 20$ için bu değer $q'_{wi} = 0.33$ iken $Pe = 50$ 'de ise $q'_{wi} = 0.36$ değeri geçerlidir.

Sürekli rejimde $d' = 0.1$ değeri için elde edilen ara yüzey ısı akısı sonuçları farklı Peclet sayıları için Şekil 4.6'da sunulmuştur. $Pe \geq 5$ için sürekli rejime ulaşma için gereken süre aynıdır. Ancak $Pe = 1$ için bu süre daha fazladır. Üst akış bölgesinde $Pe = 1$ ve $Pe = 5$ değerleri için eksenel ısı iletiminin etkisi daha fazla görülmektedir. $Pe = 1$ için bu etki $x' = -1.25$ 'e kadar erişmekteyken, bu durum $Pe = 5$ için $x' = -0.25$ civarındır. Alt akış bölgesindeki değişim incelendiğinde, ara yüzey ısı akısı değerleri artış göstererek en yüksek değere eriştiği ve bu noktadan sonra da akış yönü boyunca bu değerlerin azalma kaydettiği gözlemlenmektedir. Bu durum ortaya çıkmasındaki sebep, cidar ile akışkan arasındaki sıcaklık farkının azalmasıdır. Ancak alt akış bölgesinde $Pe = 1$ için



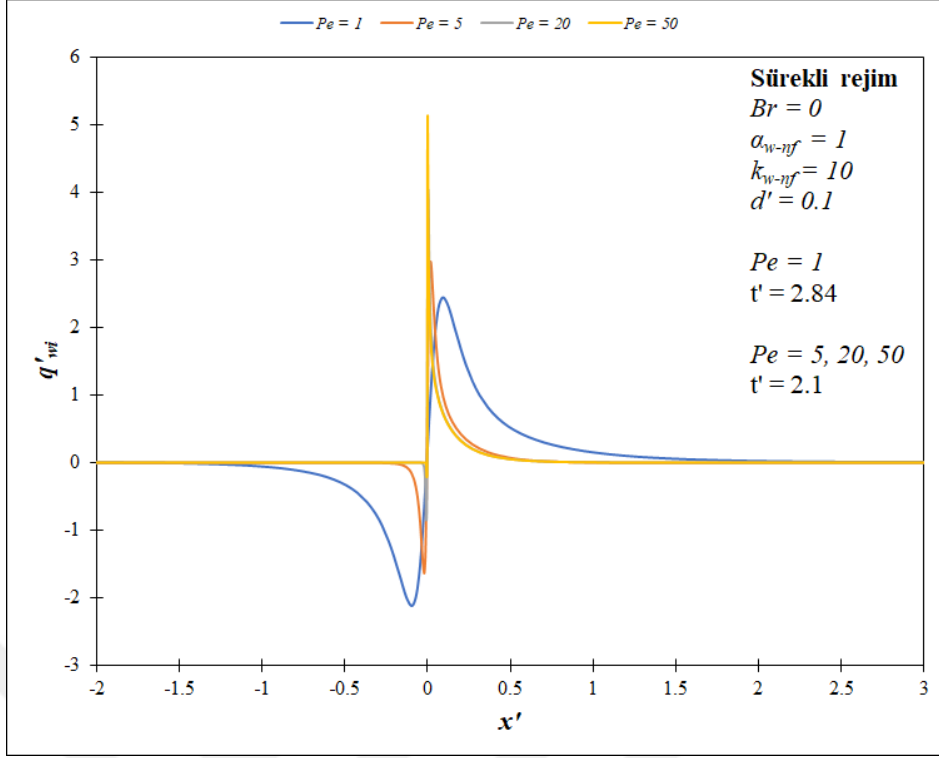
Şekil 4.4. Farklı Peclet sayısı değerlerinin $d' = 0.1$ kalınlık oranında ara yüzey ısı akısına etkisinin $t' = 0.26$ anındaki karşılaştırılması



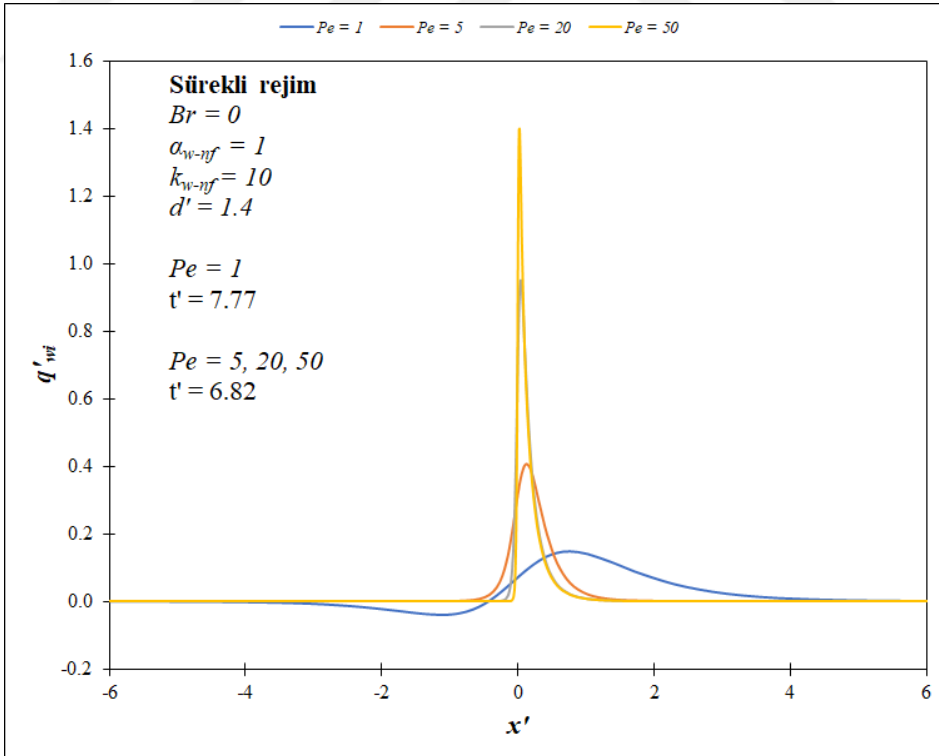
Şekil 4.5. Farklı Peclet sayısı değerlerinin $d' = 1.4$ kalınlık oranında ara yüzey ısı akısına etkisinin $t' = 0.26$ anındaki karşılaştırılması

$x' = 2$ iken diğer Peclet sayıları için ortak nokta olarak $x' = 0.5$ değeri görülmektedir. Buna göre sürekli rejimdeki sonuçlar açısından $Pe = 1$ 'deki aksenal ısı iletimi etkisi beklendiği üzere daha fazladır. Ayrıca maksimum değerler için $t' = 0.26$ 'da elde edilen değerler $Pe \geq 20$ için değişmemektedir. Sonuç olarak, minimum değerlerin alt akış bölgesinde $q'_{wi} = 0$ olması beklendiği üzere gözlemlenmektedir. Sürekli rejimde $d' = 1.4$ değeri için Peclet sayısı etkisi Şekil 4.7'de değerlendirildiğinde, $Pe = 1$ değeri için üst akış ve alt akış bölgeleri için sırasıyla $x' = -4$ ve $x' = 4$ noktaları ön plana çıkmaktadır. Üst akış bölgesi için $Pe = 5$ 'te $x' = -0.5$ değeri görülmektedir. Buna genel olarak Peclet sayısının azalması sonrasında aksenal ısı iletimi etkisi arttığı için ısı transferi üst akış bölgesine doğru da gerçekleşmektedir. Bunun yanı sıra ısı transferinin ilgili kısımdaki etki mesafesi de üst akış bölgesine doğru artma eğilimi göstermektedir. Ancak alt akış bölgesinde, diğer Peclet sayıları için ortak nokta olarak yaklaşık $x' = 1.75$ değeri gözlenmektedir. Bunun nedeni ise Peclet sayısının artması sonucunda aksenal ısı iletiminin etkisinin azalması ve buna bağlı olarak ısıl gelişme açısından daha kısa mesafesinin yeterli olmasıdır. Peclet sayısı artışı sonrasında ısı transferi artarken, buna rağmen cidar kalınlık oranı artışı ısı transferini azaltıcı yönde tesir etmektedir. Bu duruma göre $Pe = 1$ için $q'_{wi} = 0.15$, $Pe = 5$ için $q'_{wi} = 0.41$, $Pe = 20$ için $q'_{wi} = 0.95$ ve $Pe = 50$ için ise $q'_{wi} = 1.4$ olarak Peclet sayısı artışı ile daha da yükselen maksimum değerler bulunmaktadır. En yüksek değerler de genel anlamda artan radyal ısı iletimi etkisinde ortalama ısı transferini artırma eğilimi sunmaktadır. İlave olarak artan akış hızının ısı taşınımını artıran etkisi de görülmektedir.

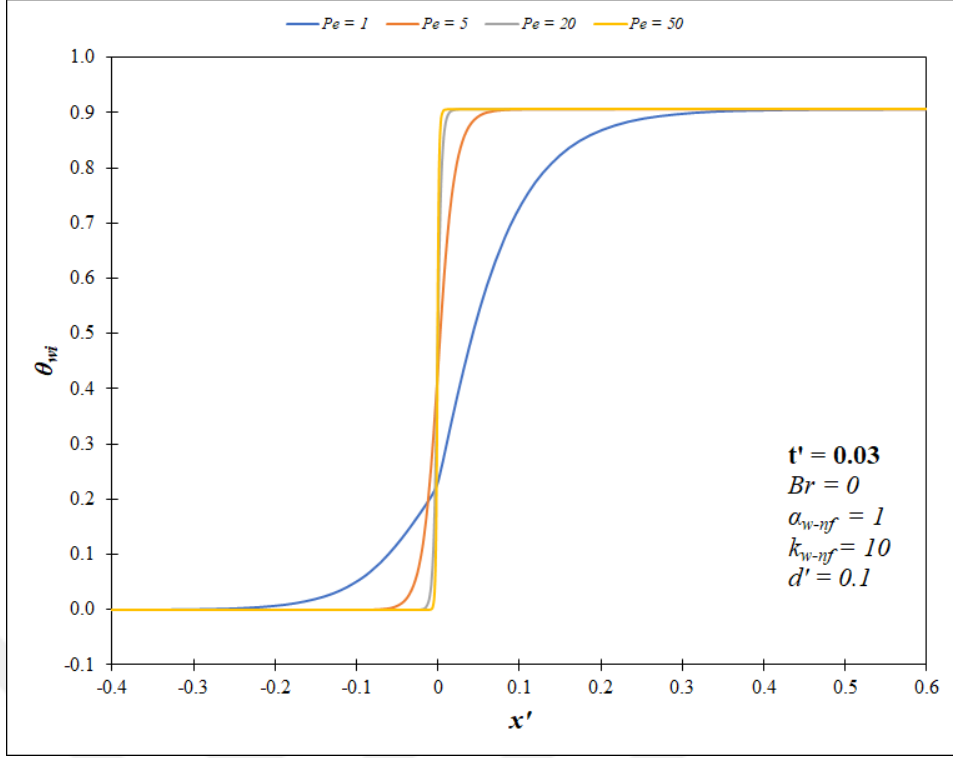
Farklı Peclet sayısı değerlerinin cidar kalınlık oranı $d' = 0.1$ için ara yüzey sıcaklığına etkisi $t' = 0.03$ anında Şekil 4.8'de karşılaştırılmıştır. Burada üst akış bölgesinde $Pe = 1$ ve $Pe = 5$ değerleri için aksenal ısı iletiminin etkisi görülmektedir. $Pe = 1$ için bu etki üst akış bölgesinde daha geniş bir aralığı kapsamaktadır. Belirtilen aksenal ısı iletimi etkisinde ara yüzey sıcaklığı değerleri ısıtma başlangıcını temsil eden $x' = 0$ noktasının çok daha öncesinde artmaktadır. Ancak $Pe \geq 20$ için bu etki, üst akış ve alt akış bölgelerinde az da olsa $x' = 0$ civarında görülmektedir. Bunun nedeni akış hızının göreceli olarak yüksek oluşudur. Bunun neticesinde, alt akış bölgesinde yüksek Peclet sayılarında ısıl gelişme daha kısa mesafede sağlanarak ara yüzey sıcaklığı değerlerinde hızlı bir artış gözlemlenmektedir. Ara yüzey sıcaklıklarının değişimi Şekil 4.9'da $t' = 0.26$ anı için verilmiştir. Üst akış bölgesinde $Pe = 1$ ve $Pe = 5$ değerleri için aksenal ısı iletiminin etkisi daha fazladır. Benzer durum alt akış bölgesi için de geçerlidir. Ancak $Pe \geq 20$ için bu etki alt ve üst akış bölgelerinde yoğun bir şekilde görülememekte olup, bir



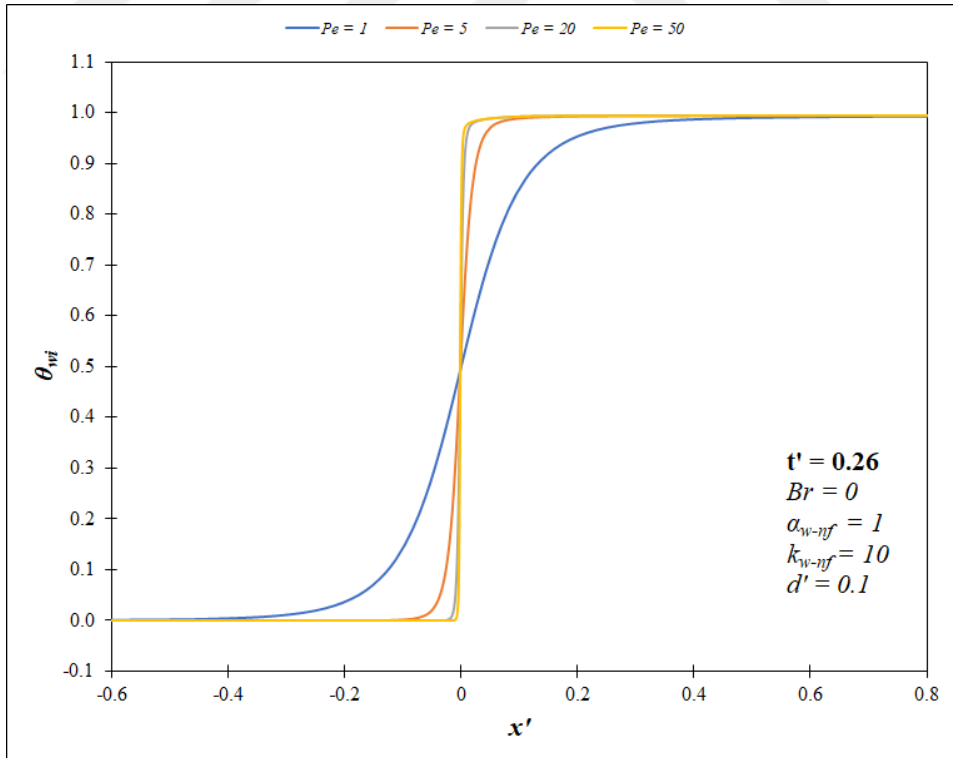
Şekil 4.6. Farklı Peclet sayısı değerlerinin $d' = 0.1$ kalınlık oranında ara yüzey ısı akısına etkisinin sürekli rejimde karşılaştırılması



Şekil 4.7. Farklı Peclet sayısı değerlerinin $d' = 1.4$ kalınlık oranında ara yüzey ısı akısına etkisinin sürekli rejimde karşılaştırılması

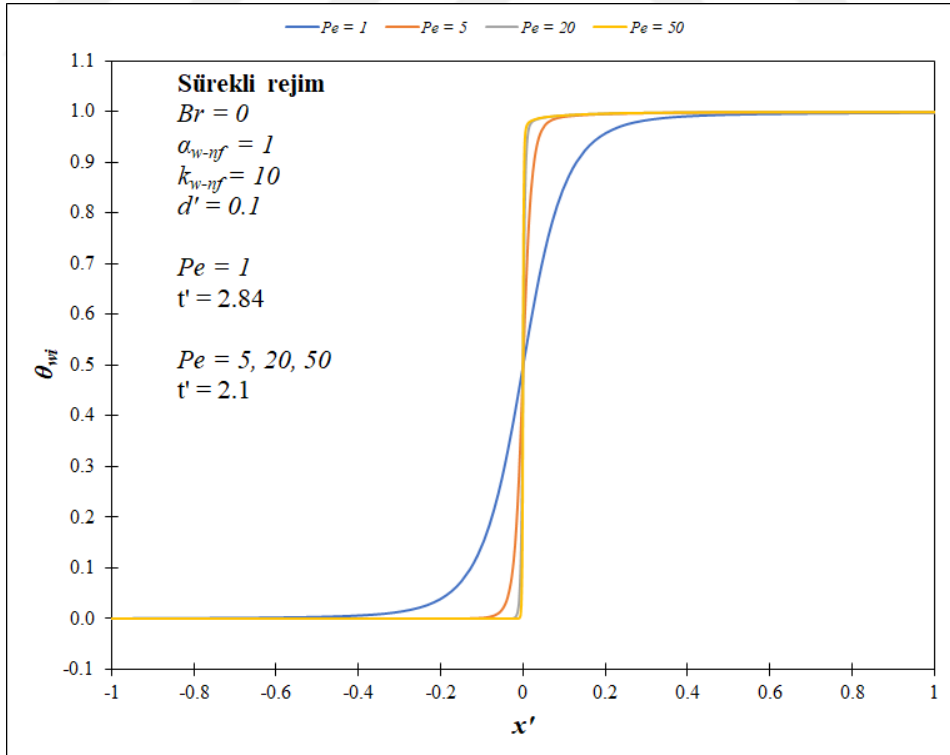


Şekil 4.8. Farklı Peclet sayısı değerlerinin ara yüzey sıcaklığına etkisinin $t' = 0.03$ anındaki karşılaştırılması



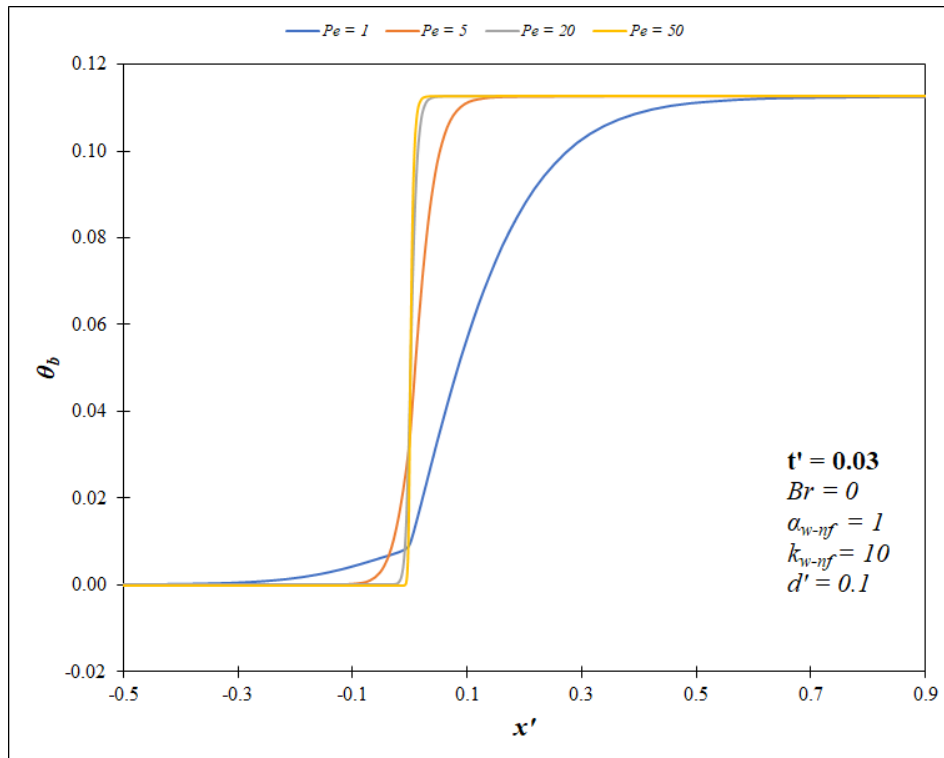
Şekil 4.9. Farklı Peclet sayısı değerlerinin ara yüzey sıcaklığına etkisinin $t' = 0.26$ anındaki karşılaştırılması

önceki durum burada geçerlilik arz etmektedir. Buna göre $x' = 0$ civarına yakın bir aralıkta değişim az da olsa gözlemlenmektedir. Netice olarak, $t' = 0.03$ anında geçerli olan genel durum $t' = 0.26$ için de görülmektedir. Sürekli rejimde elde edilen ara yüzey sıcaklığı sonuçları farklı Peclet sayıları için Şekil 4.10'da sunulmuştur. Ara yüzey sıcaklığına ait profillerin gelişimi için artan Peclet sayısı ile daha kısa aksel mesafe yeterli olmaktadır. Ancak bu durumda yüksek Peclet sayısı değerlerinde üst akış bölgesine uzanan sıcaklık profilleri gözlemlenmemektedir. $Pe \geq 5$ için sürekli rejime ulaşma için gereken süre aynıdır. Ancak bu anlamda $Pe = 1$ için daha fazla süre gerekmektedir. Üst akış bölgesinde $Pe = 1$ ve $Pe = 5$ değerleri için aksel ısı iletiminin etkisi daha fazla görülmektedir. $Pe = 1$ için bu etki $x' = -0.6$ 'a kadar erişmekteyken, bu durum $Pe = 5$ için $x' = -0.5$ civarındadır. Ancak alt akış bölgesinde $Pe = 1$ ve $Pe = 5$ için sırasıyla olarak $x' = 0.6$ ve $x' = 0.05$ değerleri görülürken, diğer Peclet sayıları için ortak nokta olarak $x' = 0$ 'a oldukça yakın değerler gözlemlenmektedir. Buna göre sürekli rejimdeki sonuçlar açısından $Pe = 1$ 'deki aksel ısı iletimi etkisi daha fazladır. Benzer şekilde, $t' = 0.03$ ve $t' = 0.26$ anlarında gözlemlenen eğilimin sürdüğü ve nihai dağılımın sağlandığı gözlemlenmektedir. Sonuçta ara yüzey sıcaklığı değerleri beklenen bir durum olarak $\theta_{wi} = 1$ değerine ulaşmaktadır.



Şekil 4.10. Farklı Peclet sayısı değerlerinin ara yüzey sıcaklığına etkisinin sürekli rejimde karşılaştırılması

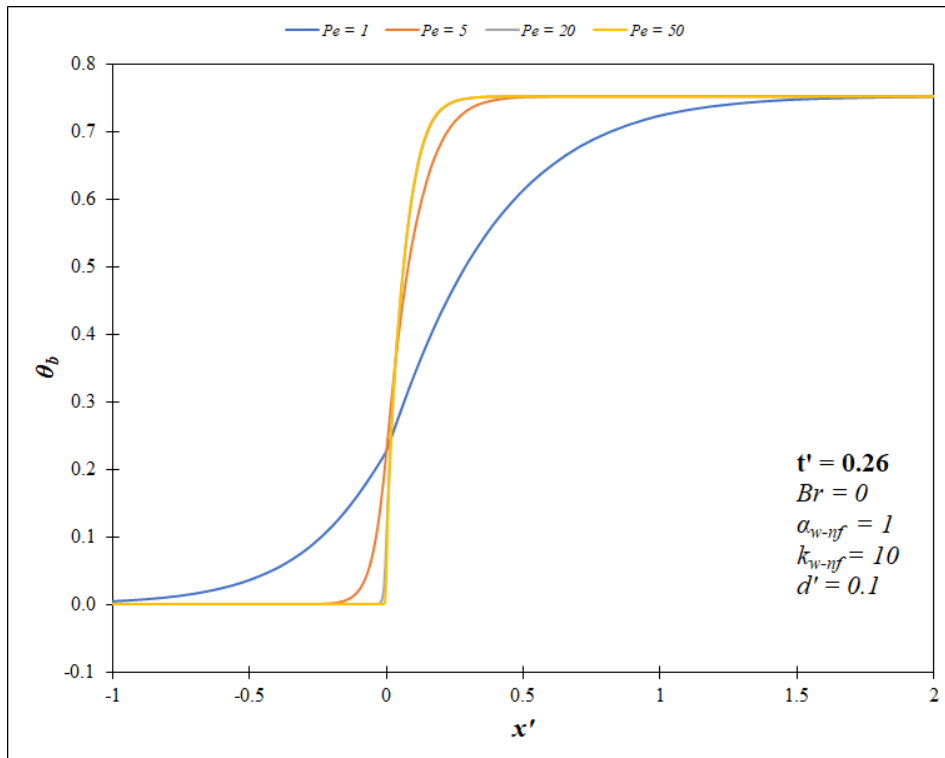
Cidar kalınlık oranı $d' = 0.1$ için farklı Peclet sayısı değerlerinin yığık sıcaklığa etkisi $t' = 0.03$ anında Şekil 4.11'de karşılaştırılmıştır. Üst akış bölgesinde $Pe = 1$ ve $Pe = 5$ değerleri için eksenel ısı iletiminin etkisi daha fazla görülmektedir. $Pe \geq 20$ için ise bu etki üst akış ve alt akış bölgelerinde az da olsa $x' = 0$ civarında görülmektedir. Aynı değerler açısından elde edilen durum $t' = 0.26$ anında Şekil 4.12'de verilmiştir. Üst akış bölgesinde $Pe = 1$ ve $Pe = 5$ değerleri için eksenel ısı iletiminin etkisi daha fazla görülmektedir. Benzer durumu alt akış bölgesi için de tekrarlamak mümkündür. Fakat $Pe \geq 20$ için bu etki üst ve alt akış bölgelerinde görülememektedir. Sürekli rejimde saptanan yığık sıcaklık sonuçlarına farklı Peclet sayıları için Şekil 4.13'te yer verilmiştir. Isı transferinin sıcaklık farkı etkisiyle cidardan akışkana doğru gerçekleşmesinden dolayı, yığık sıcaklık değerleri ara yüzey sıcaklığı değerlerinden beklendiği üzere daha düşük olarak elde edilmektedir. Bir diğer husus da cidardaki ısı iletiminin, ara yüzey hattındaki ısı taşınımına göre daha hızlı gerçekleşmesidir. Bu da ara yüzey sıcaklık değerlerindeki duruma kıyasla daha uzun ısıl gelişme mesafesi gerektirmektedir. $Pe = 1$ için bu etki $x' = -2$ 'ye kadar erişmekteyken, bu durum $Pe = 5$ için $x' = -0.1$ civarındadır. Ancak alt akış bölgesinde $Pe = 1$ 'de $x' = 2.5$ değeri görülürken, diğer Peclet sayıları için ortak nokta olarak $x' = 0.6$ 'ya oldukça yakın değerler gözlenmektedir. $Pe \geq 5$ için sürekli rejime ulaşma için gereken süre aynı olup, $Pe = 1$ 'deki duruma daha az süre gerekmektedir.



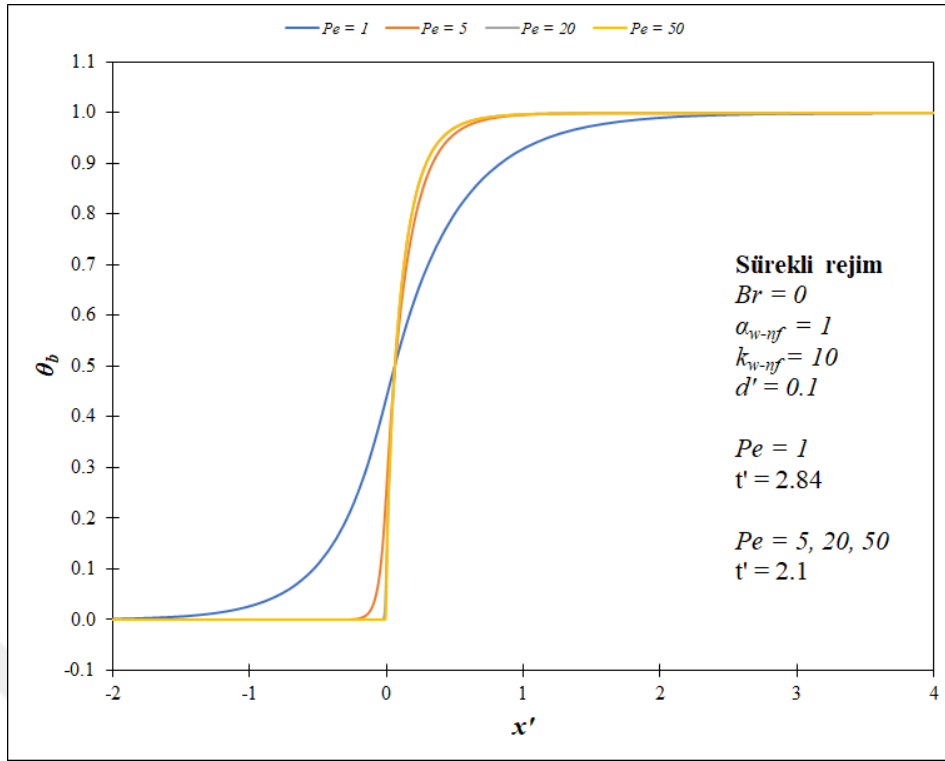
Şekil 4.11. Farklı Peclet sayısı değerlerinin yığık sıcaklığa etkisinin $t' = 0.03$ anındaki karşılaştırılması

Dolayısıyla ortaya çıkan bu sonuç radyal yönde ısı transferi etkisinin daha az olması ile açıklanmaktadır. Beklendiği üzere sürekli rejimde $Pe = 1$ durumu için eksenel ısı iletimi etkisi daha fazladır. Netice itibariyle yığık sıcaklık değerleri beklediği şekilde $\theta_b = 1$ değerine erişmektedir.

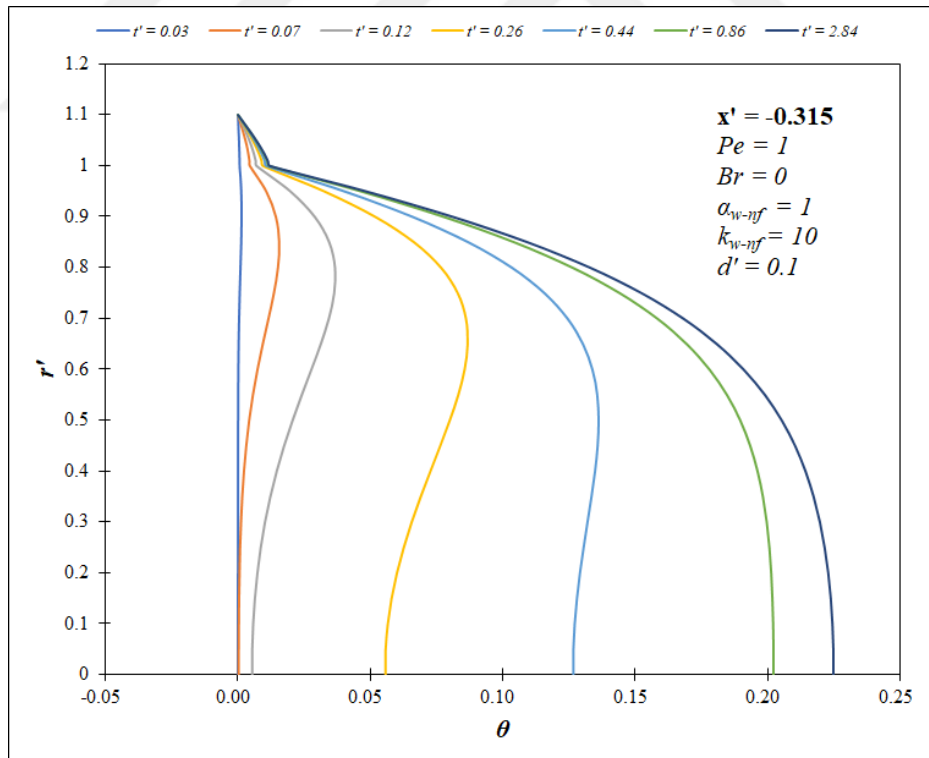
Ara yüzey ısı akısı, ara yüzey sıcaklığı ve yığık sıcaklık değerleri incelendiğinde, Peclet sayısı etkisinin $x' = 0$ civarındaki eksenel ısı iletimi açısından değişimi radyal sıcaklık değerleri cinsinden de sunulmuştur. Cidar kalınlık oranı $d' = 0.1$ için $Pe = 1$ değerinin radyal sıcaklığa etkisi $x' = -0.315$ eksenel konumu için Şekil 4.14'te karşılaştırılmıştır. Gerek cidar gerek ise akışkan bölgesindeki eksenel ısı iletimi sayesinde ısıtma uygulanmayan üst akış bölgesine, akış yönüne ters olacak şekilde ısı transferinin gerçekleştiği ve buradaki ön ısıtma mesafesinin zaman içerisinde artış gösterdiği gözlemlenmektedir. Zamana bağlı olarak verilen değişimde, radyal sıcaklık değerleri ara yüzey için $0 \leq \theta \leq 0.01$, eksen için ise $0 \leq \theta \leq 0.22$ aralığındadır. Cidardan akışkana gerçekleşen ısı transferi neticesinde, radyal sıcaklık değerleri eksene doğru artış eğilimindedir. Benzer şekilde radyal sıcaklık değişimi $Pe = 5$ için de Şekil 4.15'te sunulmuştur. Buna göre zamana bağlı olarak elde edilen radyal sıcaklık değerleri ara yüzeyde $0 \leq \theta \leq 0.00001$ aralığındayken, eksen üzerinde $0 \leq \theta \leq 0.00017$ aralığındadır. Ancak üst akış bölgesi için $Pe = 1$ durumu için belirtilen etki, $Pe = 5$ için daha sınırlıdır.



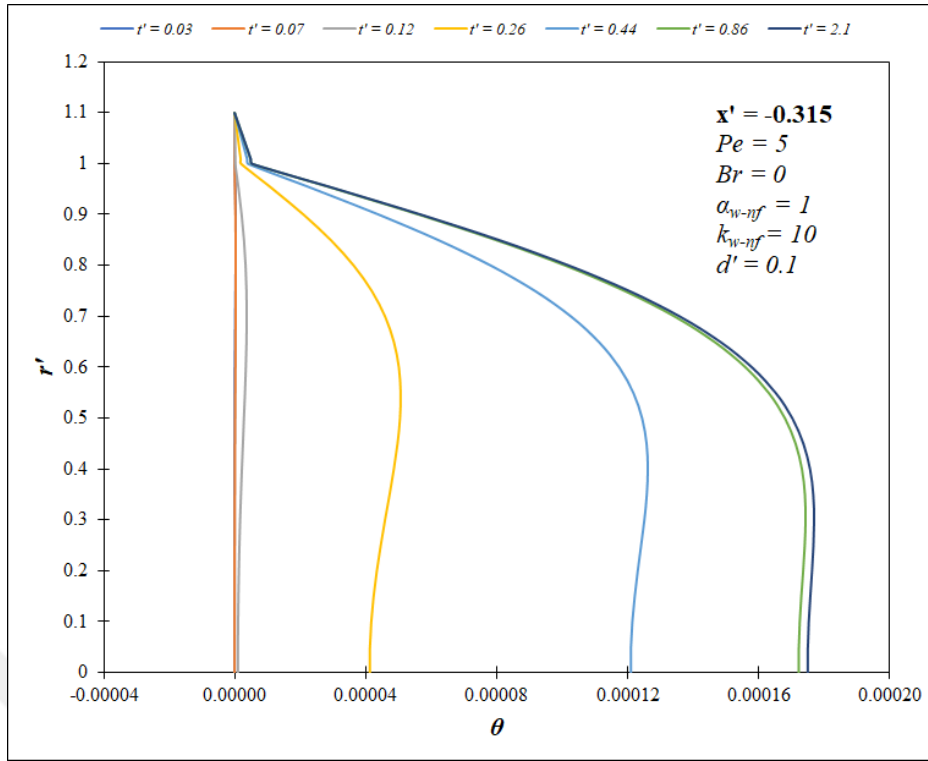
Şekil 4.12. Farklı Peclet sayısı değerlerinin yığık sıcaklığa etkisinin $t' = 0.26$ anındaki karşılaştırılması



Şekil 4.13. Farklı Peclet sayısı değerlerinin yığık sıcaklığa etkisinin sürekli rejimde karşılaştırılması



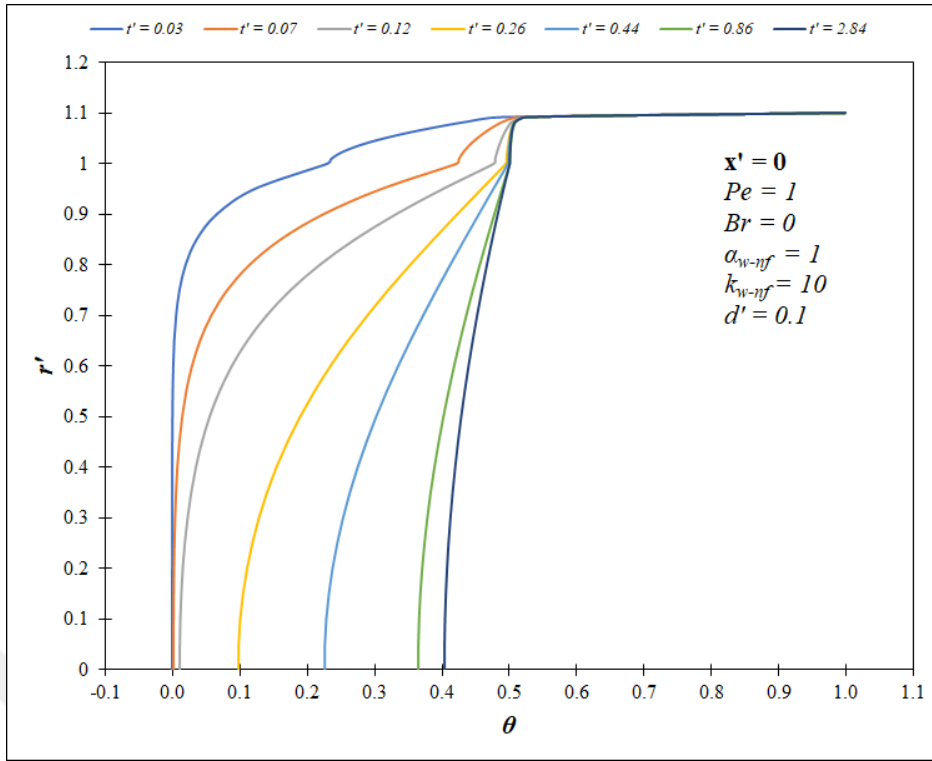
Şekil 4.14. $Pe = 1$, $Br = 0$, $\alpha_{w-nf} = 1$, $k_{w-nf} = 10$ ve $d' = 0.1$ için sıcaklığın $x' = -0.315$ konumunda radyal yönde değişimi



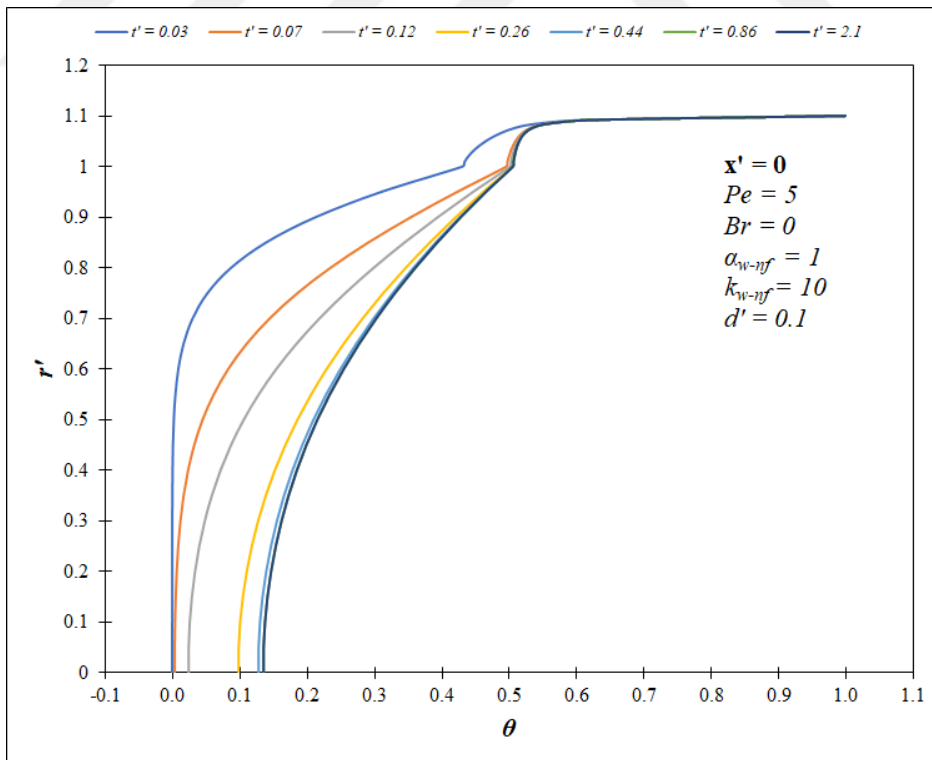
Şekil 4.15. $Pe = 5$, $Br = 0$, $\alpha_{w-nf} = 1$, $k_{w-nf} = 10$ ve $d' = 0.1$ için sıcaklığın $x' = -0.315$ konumunda radyal yönde değişimi

Aynı duruma $Pe = 20$ ve $Pe = 50$ değeri için bakıldığında ise radyal sıcaklık değerlerinin hem ara yüzeyde hem de eksende henüz sıfıra yakın değerlerde seyrettiği görülmektedir. Belirtilen durumlar ara yüzey ısı akısı, ara yüzey sıcaklığı ve yığık sıcaklık değerleri için verilen sonuçlarla uyumludur. $Pe = 1$ değerinin cidar kalınlık oranı $d' = 0.1$ için radyal sıcaklığa etkisi $x' = 0$ konumunda Şekil 4.16'da karşılaştırılmıştır. Zamana bağlı olarak verilen değişimde, radyal sıcaklık değerleri ara yüzeyde $0 \leq \theta \leq 0.5$ aralığındayken, eksen üzerinde ise $0 \leq \theta \leq 0.4$ aralığındadır. Benzer şekilde radyal sıcaklık değişimi $Pe = 5$ için de Şekil 4.17'de sunulmuştur. Buna göre zamana bağlı olarak elde edilen radyal sıcaklık değerleri ara yüzeyde $0 \leq \theta \leq 0.51$ iken ekseninde $0 \leq \theta \leq 0.13$ aralığındadır. Burada $Pe = 1$ 'deki etki net bir şekilde görülmektedir. $Pe = 50$ değeri için Şekil 4.18'deki değişime bakıldığında ise radyal sıcaklık değerlerinin ara yüzey ve eksen boyunca henüz sıfıra oldukça yakın olduğu gözlemlenmektedir.

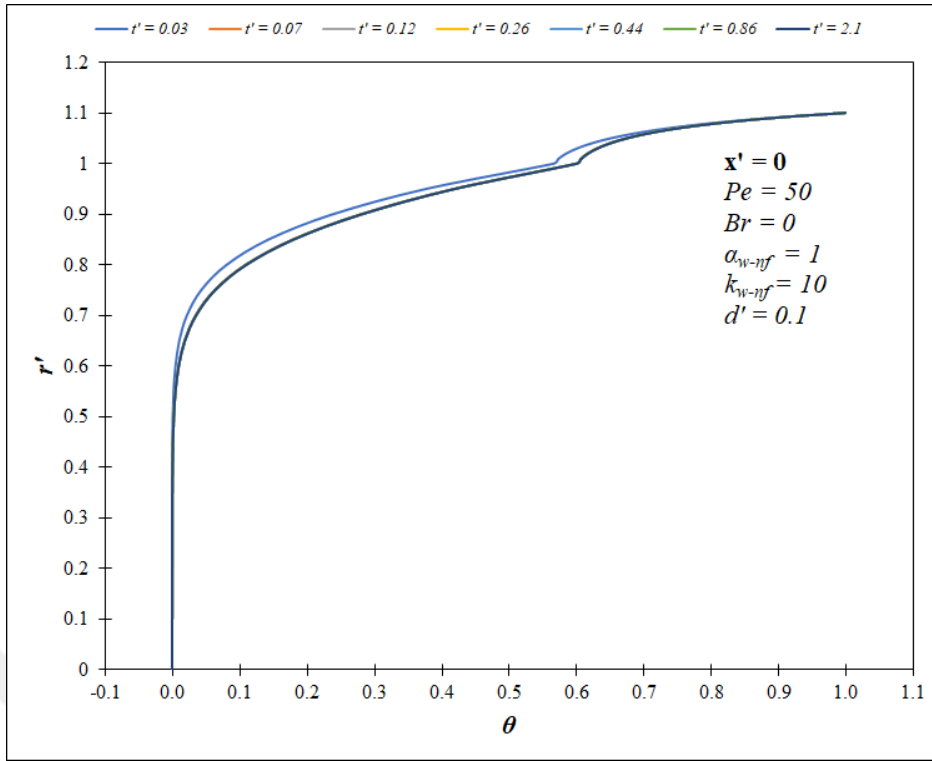
Peclet sayısının etkisi kapsamında elde edilen sonuçlar özetlenirse, cidar kalınlık oranının $d' = 0.1$ olduğu durumda Peclet sayısında $Pe = 1$ 'den $Pe = 5$ 'e olan artış ile sürekli rejime erişme süresi azalma eğiliminde olup, $Pe = 5$, $Pe = 20$ ve $Pe = 50$ bu sürede değişme gözlemlenmemektedir. Benzer durum cidar kalınlık oranı $d' = 1.4$ olduğunda geçerlilik arz etmektedir. Beklendiği üzere aksenal ısı iletimin etkisi $Pe = 1$ değerinde



Şekil 4.16. $Pe = 1$, $Br = 0$, $\alpha_{w-nf} = 1$, $k_{w-nf} = 10$ ve $d' = 0.1$ için sıcaklığın $x' = 0$ konumunda radyal yönde değişimi



Şekil 4.17. $Pe = 5$, $Br = 0$, $\alpha_{w-nf} = 1$, $k_{w-nf} = 10$ ve $d' = 0.1$ için sıcaklığın $x' = 0$ konumunda radyal yönde değişimi

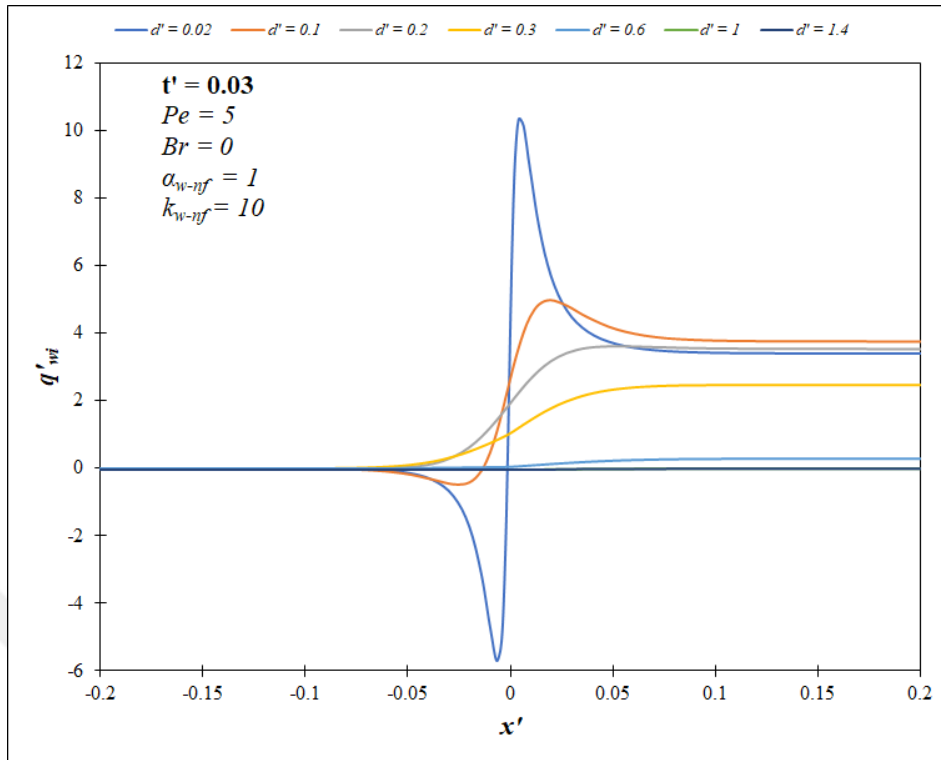


Şekil 4.18. $Pe = 50$, $Br = 0$, $\alpha_{w-nf} = 1$, $k_{w-nf} = 10$ ve $d' = 0.1$ için sıcaklığın $x' = 0$ konumunda radyal yönde değişimi

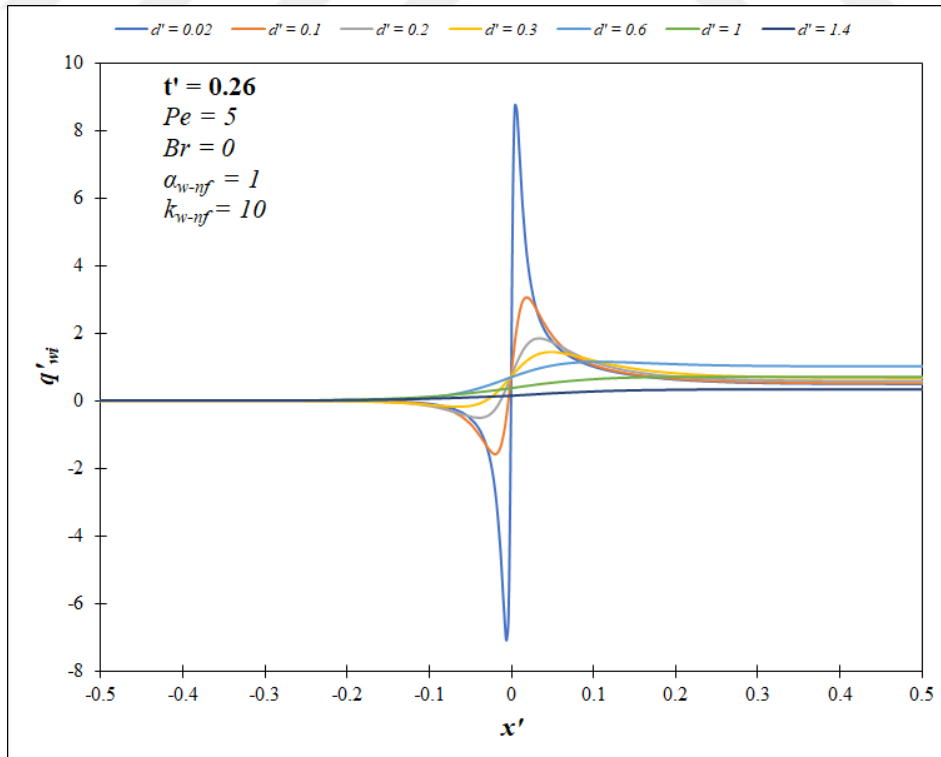
daha belirgindir. Bu durum cidar ve akışkan bölgeleri için benzer şekilde gerçekleşmektedir. Üst akış bölgesinde ısı transferi miktarı olarak daha fazla olup, bu durum aksel ısı iletimi etkisinde daha geniş bir kısmı içermektedir. Peclet sayısındaki artışa göre aksel ısı iletim etkisinin azaldığı gözlemlenmektedir. Ayrıca bu durumda $Pe = 20$ değerinden sonra önemli bir değişiklik olmamaktadır. Cidar kalınlık oranındaki artış sonrasında belirtilen durumların daha gözlemlenebilir olduğu ifade edilebilmektedir. İlave olarak düşük Peclet sayısında ara yüzey ısı akısı değerlerinin sürekli rejime daha geç ulaştığı görülmektedir. Bu durumun sebebi olarak daha düşük akış hızının etkili olduğu ve cidarla akışkan arasındaki sıcaklık farkının azalma gösterdiği belirtilebilmektedir. Cidar kalınlık oranında meydana gelen artışın sonrasında sürekli rejime ulaşma süresinin tahmin edildiği üzere artış gösterdiği saptanmaktadır. İlave olarak, ısı transferi miktarı da azalma kaydetmektedir. Aynı cidar kalınlık oranı için ısı transferi miktarının artan Peclet sayısı ile artış gösterdiği görülmektedir. Cidar kalınlık oranı artış gösterdikçe üst akış bölgesinde ısı transferi azalma kaydetmektedir ve bu durumun gözlemlenmesinde $Pe = 1$ değeri daha baskın olmaktadır.

Cidar kalınlık oranı, cidar kalınlığının yarıçapa oranını gösteren bir parametredir. Aynı zamanda birleşik ısı transferi ve mevcut çalışmanın konusu olan mikrokanallar için

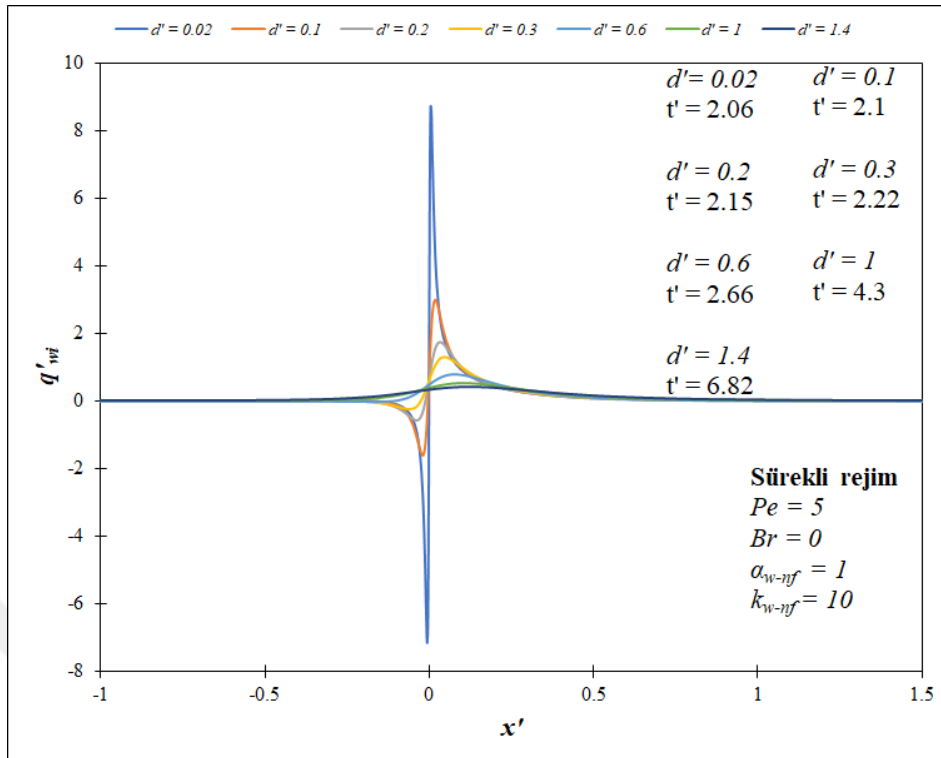
önemlidir. Cidar kalınlık oranı olarak, $d' = 0.02, 0.1, 0.2, 0.3, 0.6, 1$ ve 1.4 değerleri belirtilen durum kapsamında seçilmiştir. Farklı cidar kalınlık oranlarının $t' = 0.03$ anında ara yüzey ısı akısına etkisinin değerlendirildiği sonuçlar Şekil 4.19'da verilmiştir. Cidar kalınlık oranının az olması cidardan uygulanan ısının hızlı bir şekilde ara yüzeye geçtiğini göstermektedir. Bu boyutsuz zaman için maksimum ara yüzey ısı akısı değerleri $d' = 0.02$ için $q'_{wi} = 10.35$, $d' = 0.1$ için $q'_{wi} = 5$, $d' = 0.2$ için $q'_{wi} = 3.63$, $d' = 0.3$ için $q'_{wi} = 2.46$, $d' = 0.6$ için $q'_{wi} = 0.28$ olarak gözlenmektedir. Ancak $d' = 1$ ve $d' = 1.4$ için ara yüzey ısı akısının henüz sıfır değerine yakın olduğu görülmektedir. Cidar kalınlık oranının düşük olduğu durumlarda cidar bölgesindeki ısıl direnç de aynı oranda daha düşük olmaktadır. Böylece sabit yüzey sıcaklığının etkisindeki cidardan ısının daha hızlı bir şekilde akışkana geçişini mümkün hale getirmektedir. Bu durum düşük kalınlık oranlarındaki ısıl gelişme mesafesinin daha kısa olmasıyla gözlemlenebilmektedir. Ayrıca başlangıçtaki boyutsuz zamanlarında ara yüzey ısı akısı değerlerinin göreceli olarak daha yüksek olmasına neden olmaktadır. Aynı şekilde farklı cidar kalınlık oranlarının ara yüzey ısı akısı açısından karşılaştırılması Şekil 4.20'de bu kez $t' = 0.26$ anı için sunulmuştur. Bir önceki durumda da belirtildiği üzere cidar kalınlık oranının artması ısı transferi miktarını azaltmaktadır. Buna göre maksimum ara yüzey ısı akısı değerleri $d' = 0.02$ için $q'_{wi} = 8.76$, $d' = 0.1$ için $q'_{wi} = 3.05$, $d' = 0.2$ için $q'_{wi} = 1.84$, $d' = 0.3$ için $q'_{wi} = 1.46$, $d' = 0.6$ için $q'_{wi} = 1.14$, $d' = 1$ için $q'_{wi} = 0.72$ ve $d' = 1.4$ için ise $q'_{wi} = 0.32$ olarak elde edilmektedir. Sürekli rejim neticesinde elde edilen ara yüzey ısı akısı değerlerine için Şekil 4.21'deki dağılım söz konusudur. Isıl yayılım etkisi üst akış bölgesinde $x' = -0.25$ 'e kadar görülmektedir. Bu durumun nedeni olarak cidar kalınlık oranı düşük olduğunda akışkanın sıcaklığının daha çabuk bir şekilde artması gösterilmektedir. Bu etki de akışkandan cidara doğru olan ters yönlü ısı geçişini beraberinde getirmektedir. Fakat cidar kalınlık oranının yüksek olduğu durumlarda cidar bölgesi açısından ısıl atalet de daha büyüktür. Böylelikle cidar ile akışkan arasındaki sıcaklık farkı daha az olduğu için daha düşük ara yüzey ısı akısı değerleri gözlemlenmektedir. Alt akış bölgesi için ise tüm durumların $x' \geq 0.5$ noktasından sonra ısıl gelişimi gösterdiği görülmektedir. Buna göre cidar kalınlık oranının azalması ile ısı transferi değerlerinin arttığı gözlemlenmektedir. Maksimum ara yüzey ısı akısı değerleri $d' = 0.02$ için $q'_{wi} = 8.69$, $d' = 0.1$ için $q'_{wi} = 2.98$, $d' = 0.2$ için $q'_{wi} = 1.73$, $d' = 0.3$ için $q'_{wi} = 1.28$, $d' = 0.6$ için $q'_{wi} = 0.77$, $d' = 1$ için $q'_{wi} = 0.52$ ve $d' = 1.4$ için ise $q'_{wi} = 0.41$ olarak elde edilmektedir. Buna göre cidar kalınlık oranı artışıyla, ısı transferinin büyük oranda aksel iletim etkisi ile cidarda görülmesinin önü açılmaktadır.



Şekil 4.19. Farklı cidar kalınlık oranlarının ara yüzey ısı akısına etkisinin $t' = 0.03$ anındaki karşılaştırılması



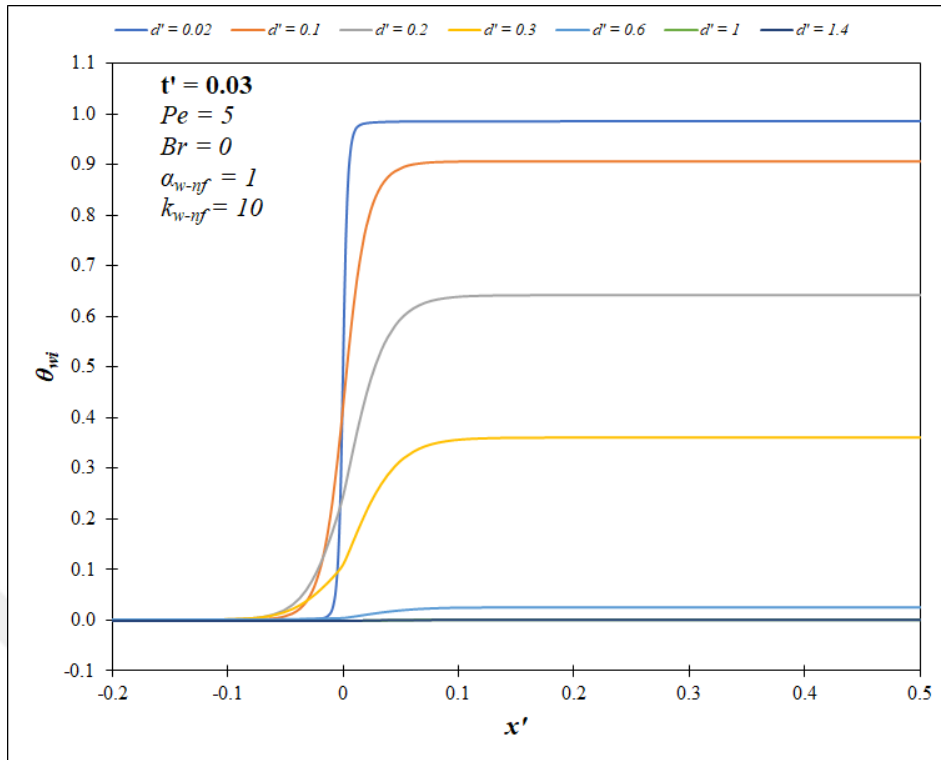
Şekil 4.20. Farklı cidar kalınlık oranlarının ara yüzey ısı akısına etkisinin $t' = 0.26$ anındaki karşılaştırılması



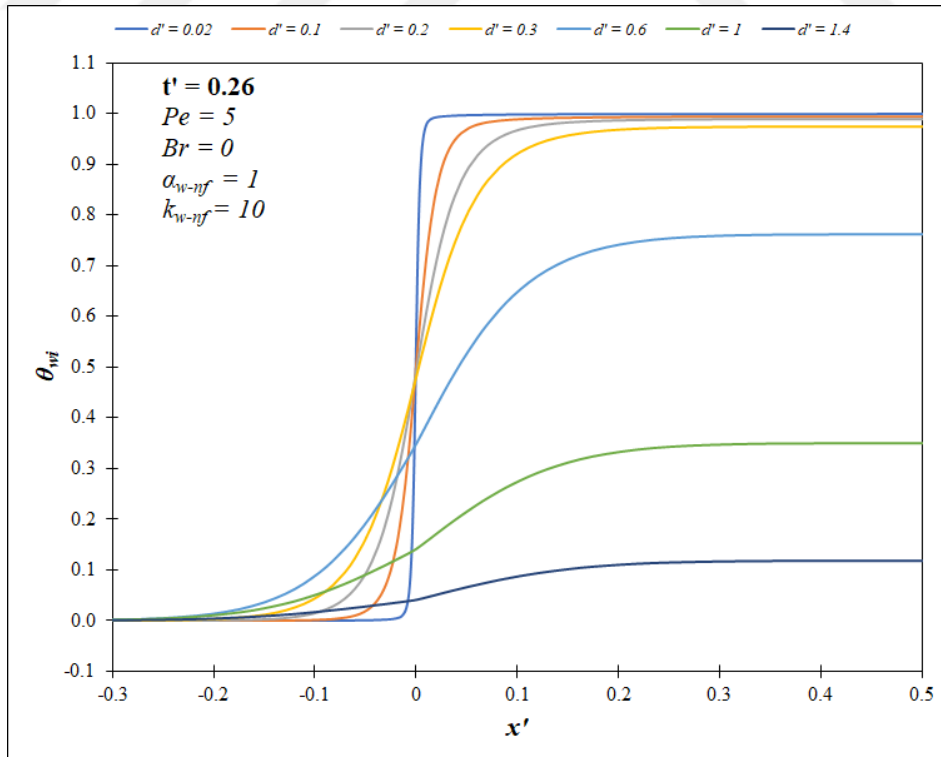
Şekil 4.21. Farklı cidar kalınlık oranlarının ara yüzey ısı akısına etkisinin sürekli rejimde karşılaştırılması

Bu etki de cidardan akışkana doğru olan ısı transferini tetiklemektedir. Isı transferine azalma eğilimi veren cidar kalınlık oranındaki artışın ise sürekli rejime ulaşma süresini fazlalaştırdığı da bir diğer sonuçtur. Netice olarak alt akış bölgesinde beklendiği biçimde $q'_{wi} = 0$ değerine ulaşılmaktadır.

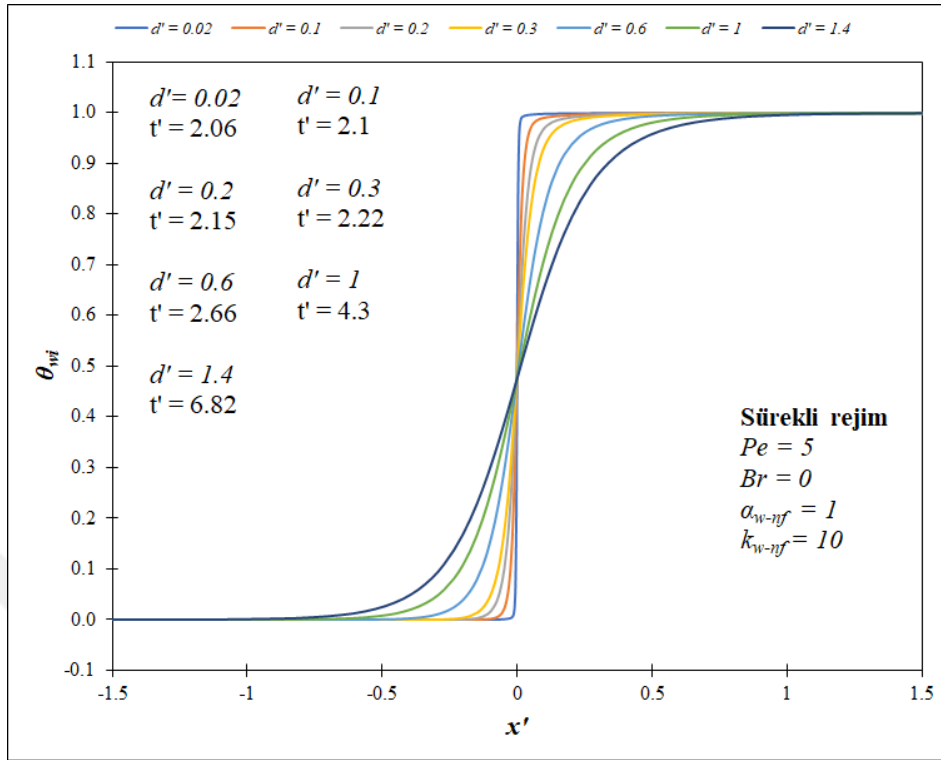
Ara yüzey sıcaklığı değerleri bakımından farklı cidar kalınlık oranlarının $t' = 0.03$ anındaki etkisine Şekil 4.22'de yer verilmiştir. Cidar kalınlık oranının az olması neticesinde ara yüzey sıcaklığı artan ısı transferinin etkisinde daha hızlı bir şekilde yükselmiştir. Bu durumda sabit yüzey sıcaklığının etkisindeki cidardan ısının daha hızlı bir şekilde ara yüzeye ulaşması söz konusudur. Bu da düşük kalınlık oranları açısından hızlı toparlanma ile gözlemlenebilmektedir. Aynı şekilde farklı cidar kalınlık oranlarının ara yüzey sıcaklığı açısından karşılaştırılması Şekil 4.23'te bu sefer $t' = 0.26$ anı için gerçekleştirilmiştir. Bir önceki durumda görüldüğü üzere cidar kalınlık oranının artması ısı transferini azaltmaktadır. Sürekli rejim neticesinde elde edilen ara yüzey sıcaklığı değerleri için Şekil 4.24'teki dağılım söz konusudur. Sürekli rejimde üst akış bölgesindeki ısı yayılma mesafesi $x' = -0.75$ noktasına kadar etkilidir. Alt akış bölgesi için ise $x' = 0.75$ noktası ile ısı gelişim sağlanmaktadır. Netice itibariyle cidar kalınlık oranının artması ile cidardaki ısı direnç artışı kaçınılmaz olmaktadır. Artan ısı ataletin



Şekil 4.22. Farklı cidar kalınlık oranlarının ara yüzey sıcaklığına etkisinin $t' = 0.03$ anındaki karşılaştırılması



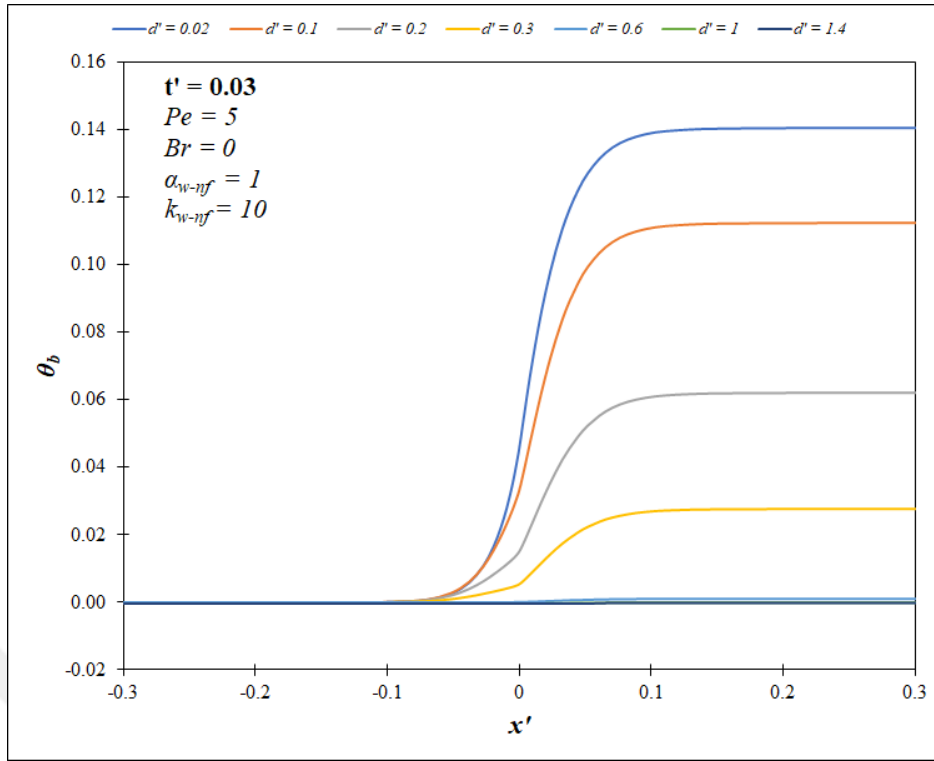
Şekil 4.23. Farklı cidar kalınlık oranlarının ara yüzey sıcaklığına etkisinin $t' = 0.26$ anındaki karşılaştırılması



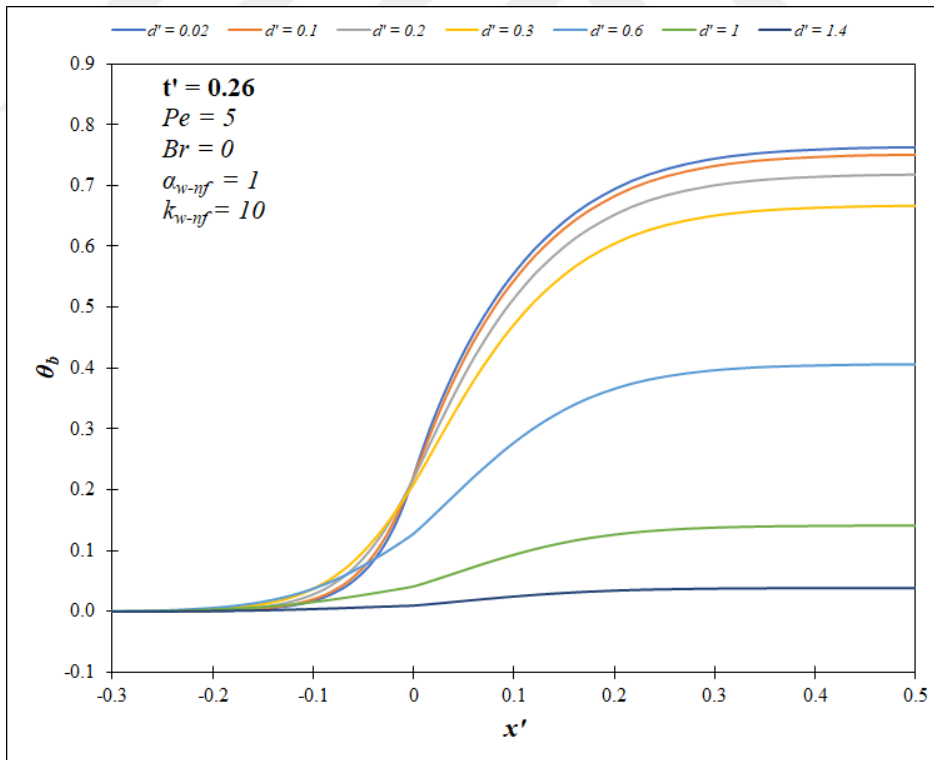
Şekil 4.24. Farklı cidar kalınlık oranlarının ara yüzey sıcaklığına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması

neticesinde, ısı transferi değerlerinin azaldığı gözlemlenmektedir. Isı transferini artıran yönde etki gösteren kalınlık oranının düşüşü, aynı zamanda sürekli rejime ulaşma süresini de azaltmaktadır. Genel anlamda, alt akış bölgesi boyunca beklenen üzere $\theta_{wi} = 1$ değeri elde edilmektedir.

Farklı cidar kalınlık oranlarının $t' = 0.03$ anında yığık sıcaklığa etkisinin değerlendirildiği sonuçlar Şekil 4.25'te verilmiştir. Cidar kalınlık oranının az olduğu durumlarda ısı transferinin daha kolay bir şekilde gerçekleştiği görülmektedir. Düşük cidar kalınlık oranı için akışkanın yığık sıcaklığı daha yüksek olarak elde edilmektedir. Bu durumun ortaya çıkmasında ilgili değerlerin daha hızlı toparlanması etkilidir. Aynı şekilde farklı cidar kalınlık oranlarının yığık sıcaklık açısından karşılaştırılması Şekil 4.26'da $t' = 0.26$ anı için sunulmuştur. Bir önceki durumda da belirtildiği üzere cidar kalınlık oranının artması ısı transferi miktarını azaltmaktadır. Buna bağlı olarak $d' \geq 1$ için yığık sıcaklık artışı oldukça sınırlı iken diğer tüm durumlarda sürekli rejime yaklaşma ibareleri görülmektedir. Sürekli rejim neticesinde elde edilen yığık sıcaklık değerleri için



Şekil 4.25. Farklı cidar kalınlık oranlarının yığık sıcaklığa etkisinin $t' = 0.03$ anındaki karşılaştırılması

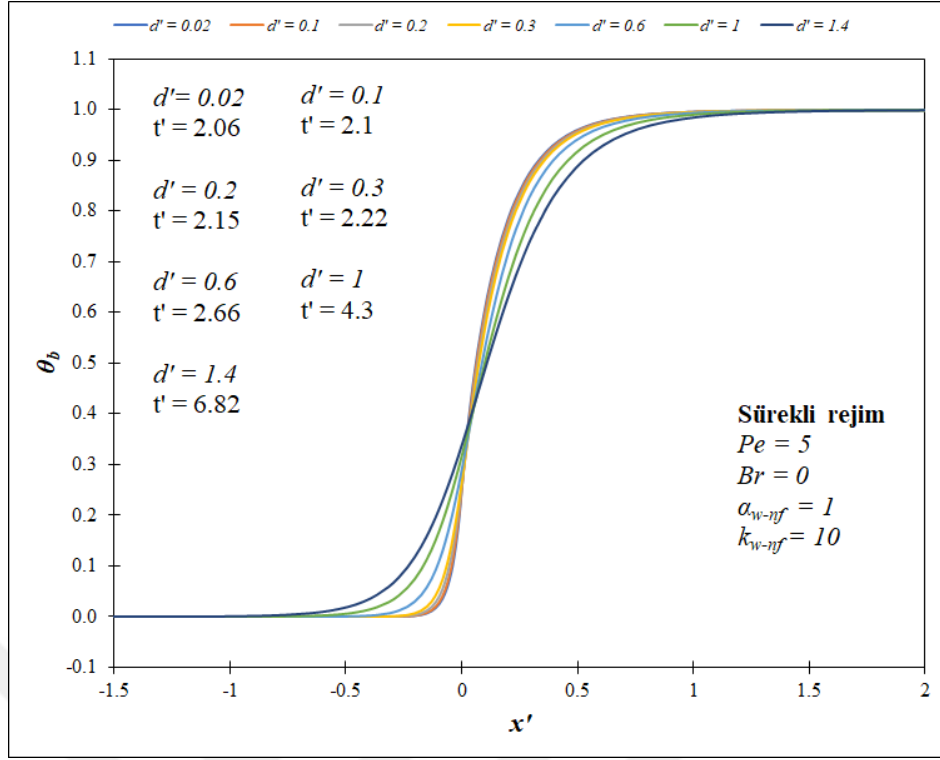


Şekil 4.26. Farklı cidar kalınlık oranlarının yığık sıcaklığa etkisinin $t' = 0.26$ anındaki karşılaştırılması

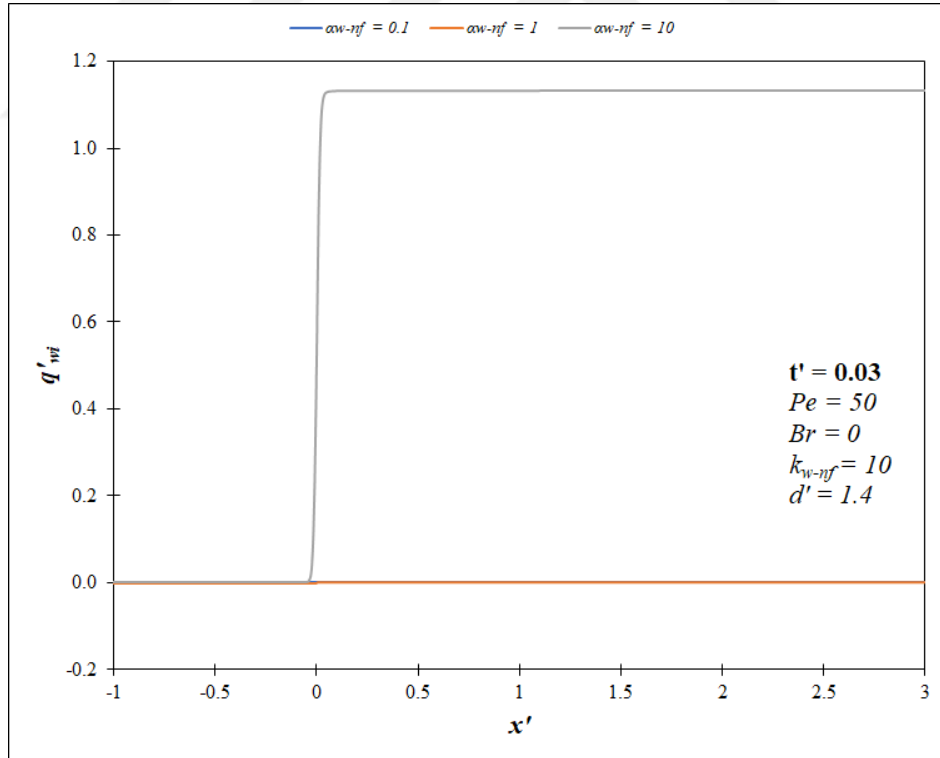
Şekil 4.27'deki dağılım söz konusudur. Alt akış bölgesi için ise tüm durumların $x' = 1.25$ noktasından sonra ısı gelişimi gösterdiği görülmektedir. Buna göre cidar kalınlık oranının azalması ile ısı transferi değerleri artmaktadır. Buna bağlı olarak yığık sıcaklık değerleri hızlı bir şekilde sürekli rejime erişmektedir. Bu durum ısı gelişme mesafesi değerlerini de aynı oranda etkilemektedir. Isı transferini azaltıcı yönde etki eden cidar kalınlık oranının artması ile sürekli rejime erişme süresi de artmaktadır. Bu nokta ısı direncin daha fazla oluşuna bağlıdır. Alt akış bölgesinde beklenen bir durumun sonucu olarak $\theta_b = 1$ değeri saptanmaktadır.

Cidar kalınlık oranının etkisinin belirlenmesine yönelik olarak elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, bu oran azaldıkça sabit yüzey sıcaklığı olarak dış cidara uygulanan sınır şartı vasıtasıyla ısı transferi daha kolay bir şekilde gerçekleşmektedir. Aksi durumda cidardaki malzemenin gösterdiği ısı direncin artışı meydana gelmektedir. Cidar kalınlık oranının bir diğer etkisi de sürekli rejime erişme süresini önemli ölçüde etkilemesidir. Buna göre cidar kalınlık oranı arttıkça beklendiği üzere sürekli rejime ulaşılabilmesi için gerekli olan süre de artma eğilimi göstermektedir. İlave olarak, cidar kalınlık oranının düşük olduğu durumda, akışkana ısı transferini daha çabuk gerçekleştirdiği ve üst akış bölgesinde ise ısı transferi yönünün değişim gösterdiği gözlemlenmektedir. Ancak cidar kalınlık oranı arttıkça ısı transferinin azalması söz konusudur. Bunun yanı sıra cidar kalınlık oranının yüksek olduğu durumda cidardaki aksel iletim etkisi daha önemli hale gelmektedir. Akışkana transfer olması gereken ısı, cidar içerisinde üst akış bölgesine doğru yayılmaktadır.

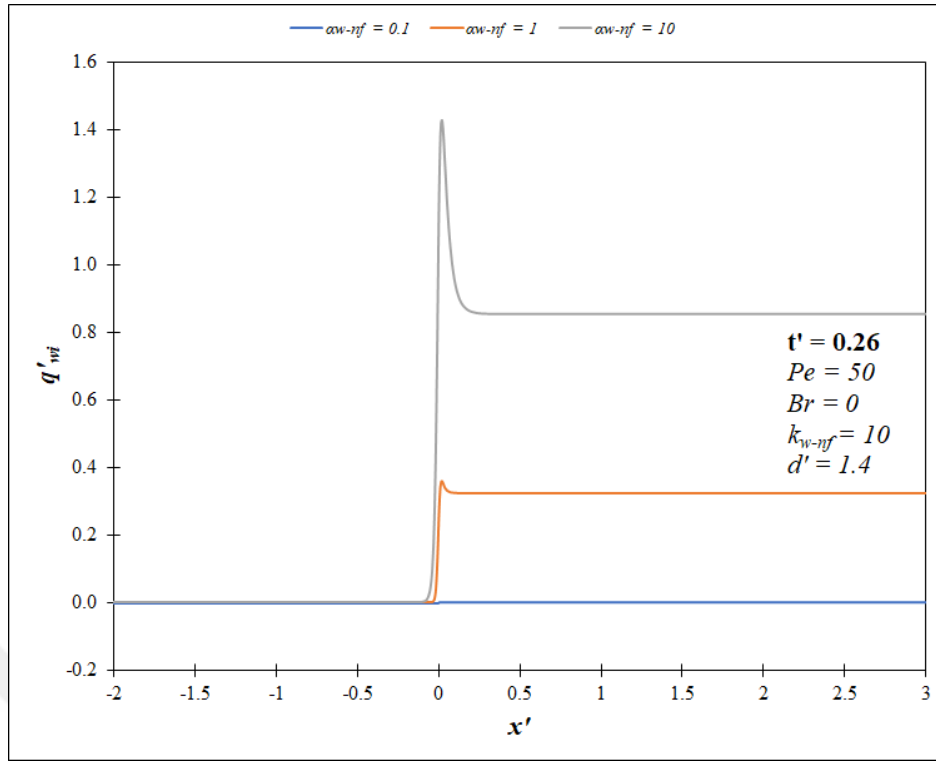
Isıl yayılım katsayısı oranının etkisi kapsamında $\alpha_{w-nf} = 0.1$, $\alpha_{w-nf} = 1$ ve $\alpha_{w-nf} = 10$ değerleri uygulanmıştır. Bu değer cidardaki değer, akışkandaki değere oranlanmasıdır. Farklı ısı yayılım katsayısı oranlarının etkisel değerlendirilmesi kapsamında elde edilen sonuçlar $t' = 0.03$ anında Şekil 4.28'de verilmiştir. Buna göre bu katsayı oranının artışı ile ısı transferi miktarında artma gözlenmektedir. En yüksek ara yüzey ısı akısı değeri $\alpha_{w-nf} = 0.1$ için henüz sıfıra yakındır. Fakat $\alpha_{w-nf} = 1$ ve $\alpha_{w-nf} = 10$ için sırasıyla $q'_{wi} = 0.00002$ ve $q'_{wi} = 1.13$ değerleri maksimum olarak bulunmaktadır. Bu durumun ortaya çıkmasında cidar bölgesi için ısı yayılım katsayısının daha baskın oluşu etkilidir. Nitekim bu da cidar bölgesinde ısının hızlı bir şekilde yayılımını sağlamaktadır. Belirtilen bu anda, diğer ısı yayılım katsayısı oranlarının etkisinin henüz gözlenemediği aşıkardır. Zaman değişimi içerisinde farklı ısı yayılım katsayısı oranlarının etkisi $t' = 0.26$ anı için Şekil 4.29'da



Şekil 4.27. Farklı cidar kalınlık oranlarının yığık sıcaklığa etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



Şekil 4.28. Farklı ısı yayılım katsayısı oranlarının ara yüzey ısı akısına etkisinin $t' = 0.03$ anındaki karşılaştırılması

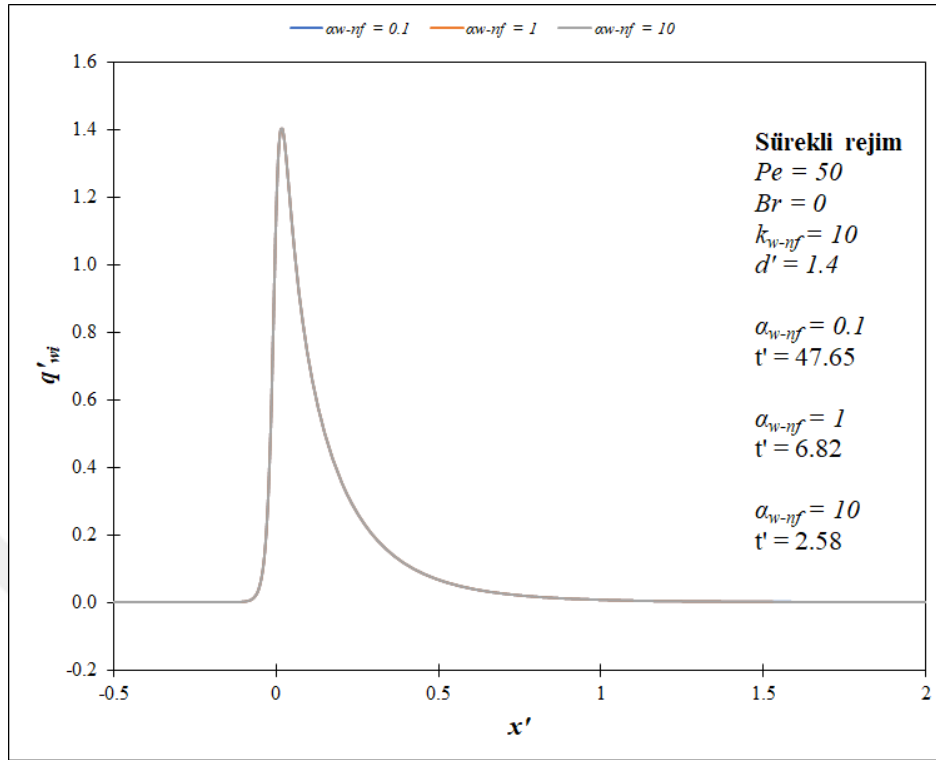


Şekil 4.29. Farklı ısı yayılım katsayısı oranlarının ara yüzey ısı akısına etkisinin $t' = 0.26$ anındaki karşılaştırılması

sunulmuştur. Düşük ısı yayılım katsayısı oranındaki ısı transferi miktarının az olması durumu aynı eğilimde sürmektedir. En yüksek değer olarak elde edilen ara yüzey ısı akısı değerleri sırasıyla $\alpha_{w-nf} = 0.1$ için $q'_{wi} = 0.000002$, $\alpha_{w-nf} = 1$ için $q'_{wi} = 0.36$ ve $\alpha_{w-nf} = 10$ için $q'_{wi} = 1.43$ olarak saptanmaktadır. Sürekli rejime ait sonuçlara göre ilgili durumlara Şekil 4.30'da yer verilmiştir. Buradaki neticeler incelendiğinde, ısı yayılım katsayısı oranının sürekli rejim sonuçlarına etkisi bulunmamaktadır. Bu durum elde edilen maksimum değerler açısından görülmekte olup, $q'_{wi} = 1.4$ değeri ortak olarak tüm ısı yayılım katsayıları için sağlanmaktadır. Fakat ısı yayılım katsayısı oranlarının düşmesi ile sürekli rejime ulaşmak için gerekli olan sürenin arttığı da bir gerçektir. Neticede alt akış bölgesinde beklendiği biçimde $q'_{wi} = 0$ değerine ulaşılmaktadır.

Isı yayılım katsayısı oranının tesiri açısından saptanan bulgular bir arada sunulduğunda, $t' = 0.03$ anında ara yüzey ısı akısı değerleri incelendiğinde en yüksek değer $\alpha_{w-nf} = 10$ için saptanmaktadır. Bu zaman adımı $\alpha_{w-nf} = 0.1$ ve $\alpha_{w-nf} = 1$ değerlerinin benzer bir dağılıma sahiptir. Benzer şekilde $t' = 0.26$ anı incelendiğinde $\alpha_{w-nf} = 10$ için en yüksek değer elde edildiği görülmektedir. Üst akış bölgesindeki en düşük değer $\alpha_{w-nf} = 0.1$ için gerçekleştiği gözlemlenmektedir. Ara yüzey ısı akısının en yüksek

değerinin $\alpha_{w-nf} = 10$ için sağlanması ile cidar kalınlık oranının artışı benzerlik göstermektedir. Bir

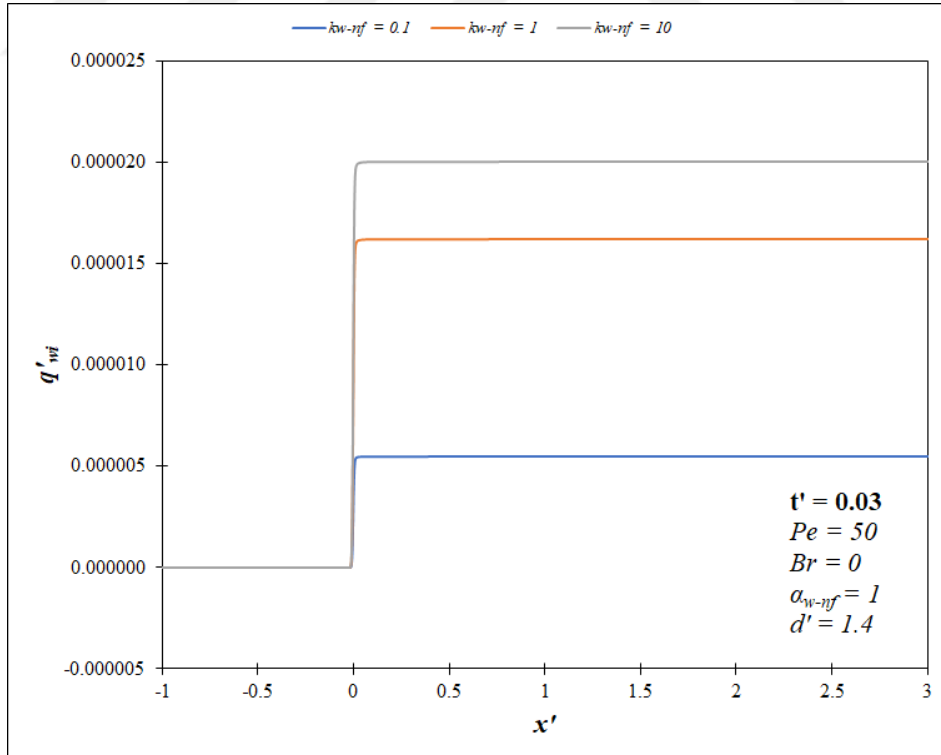


Şekil 4.30. Farklı ısı yayılım katsayısı oranlarının ara yüzey ısı akısına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması

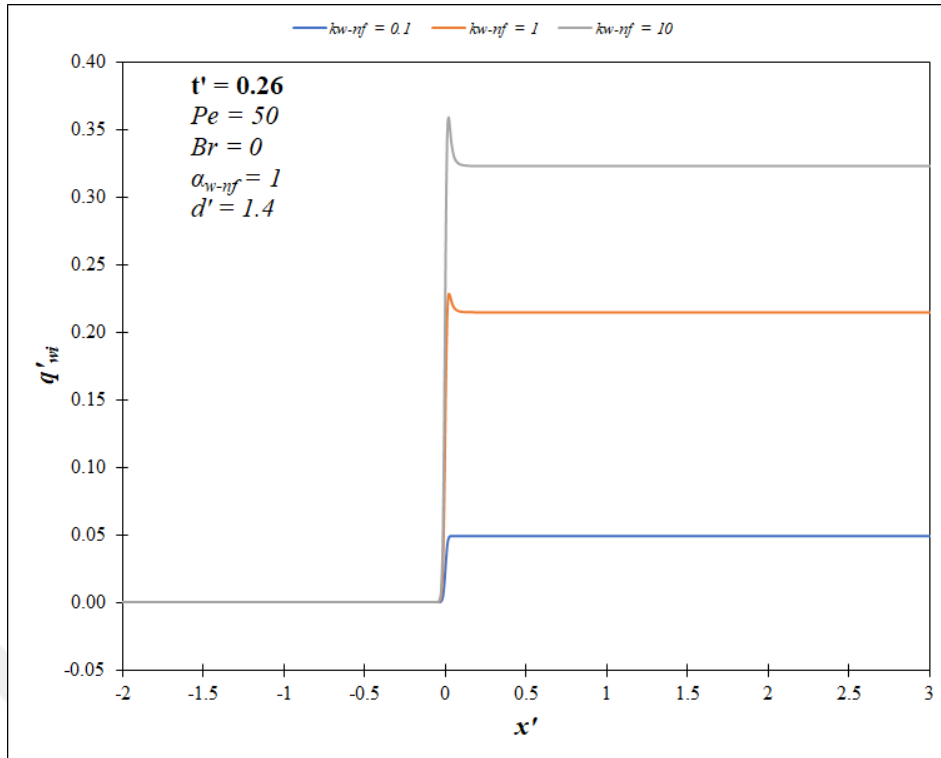
başka deyişle ısı transferi daha hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir. Ayrıca aksenal mesafe anlamında ısı gelişim bu iki zaman adımında en geç $\alpha_{w-nf} = 10$ için meydana gelmektedir. Ancak sürekli rejime ulaşma manasında $\alpha_{w-nf} = 0.1$ için $t' = 47.65$ değerinde, $\alpha_{w-nf} = 1$ için $t' = 6.82$ değerinde ve $\alpha_{w-nf} = 10$ için $t' = 2.58$ değerinde bu durumun sağlandığı görülmektedir. Buna göre ısı yayılım katsayısı oranının, cidar kalınlık oranı ile ters orantı gösterdiği belirtilebilmektedir. Sürekli rejime ulaşıldıktan sonra ısı yayılım katsayısı oranı için herhangi bir etkinin olmadığı görülmektedir.

Isı iletim katsayısı oranı, cidardaki ısı iletim katsayısının akışkana ait ısı iletim katsayısına oranı şeklinde tarif edilmektedir. Bu da ilgili bölgede ısı iletimi potansiyelini göstermektedir. Bu amaçla $k_{w-nf} = 0.1$, $k_{w-nf} = 1$ ve $k_{w-nf} = 10$ değerleri ara yüzey ısı akısı değerleri bakımında karşılaştırılmaya tabi tutulmuştur. Bu farklı değerlerin çözüme etkisi Şekil 4.31'de $t' = 0.03$ anında gösterilmiştir. Bu katsayı oranının artışının sonucu olarak ısı transferi değerlerinde önemli bir artış gözlenmektedir. Isı iletim katsayısı oranının yüksek olması sonucunda ısı transferinin daha kolay bir şekilde gerçekleştiği gözlemlenmektedir. En yüksek değer olarak elde edilen ara yüzey ısı akıları sırasıyla k_w -

$nf = 0.1$ için $q'_{wi} = 0.000005$, $k_{w-nf} = 1$ için $q'_{wi} = 0.000016$ ve $k_{w-nf} = 10$ için $q'_{wi} = 0.00002$ olarak saptanmaktadır. Bu durumun temel nedeni olarak cidar bölgesi için ısı iletim katsayısı değerinin bu manada daha baskın oluşu önde gelmektedir. Çünkü cidar bölgesi açısından ısının daha kolay bir şekilde iletimi sağlanmaktadır. Isı iletim katsayısının yüksek olduğu durumlarda cidar bölgesindeki ısıl atalet daha düşük olmaktadır. Buna bağlı olarak sabit yüzey sıcaklığının etkisindeki cıdardan ısının daha hızlı bir şekilde akışkana geçişi mümkün hale gelmektedir. Bu durum düşük ısı iletim katsayısı oranlarındaki ısıl gelişme mesafesinin daha fazla olmasıyla gözlemlenebilmektedir. Ayrıca başlangıçtaki boyutsuz zamanlarda ara yüzey ısı akısı değerlerinin bağlı olarak daha düşük olmasına sebep olmaktadır. Ancak mevcut anda, $k_{w-nf} = 0.1$ oranının etkisinin oldukça az olduğu belirgin bir şekildedir. Zaman değişimine göre farklı ısı iletim katsayısı oranlarının gelişimi $t' = 0.26$ anı için Şekil 4.32'de sunulmuştur. Bir önceki duruma kıyasla ısı iletim katsayısı oranının artması ısı transferi miktarının artışı sağlamaktadır. Maksimum değer olarak sırasıyla $k_{w-nf} = 0.1$ için $q'_{wi} = 0.05$, $k_{w-nf} = 1$ için $q'_{wi} = 0.23$ ve $k_{w-nf} = 10$ için $q'_{wi} = 0.36$ değerleri sağlanmaktadır. Yüksek ısı iletim katsayısı oranındaki ısı transferi miktarının daha fazla oluşu benzer eğilimde sürmektedir.

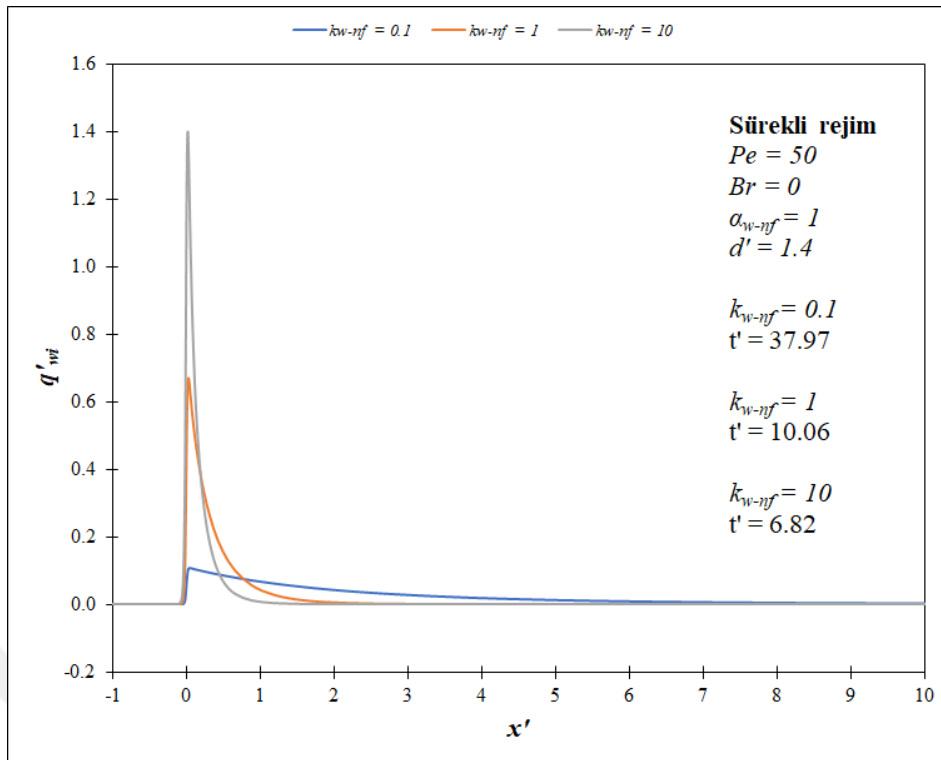


Şekil 4.31. Farklı ısı iletim katsayısı oranlarının ara yüzey ısı akısına etkisinin $t' = 0.03$ anındaki karşılaştırılması



Şekil 4.32. Farklı ısı iletim katsayısı oranlarının ara yüzey ısı akısına etkisinin $t' = 0.26$ anındaki karşılaştırılması

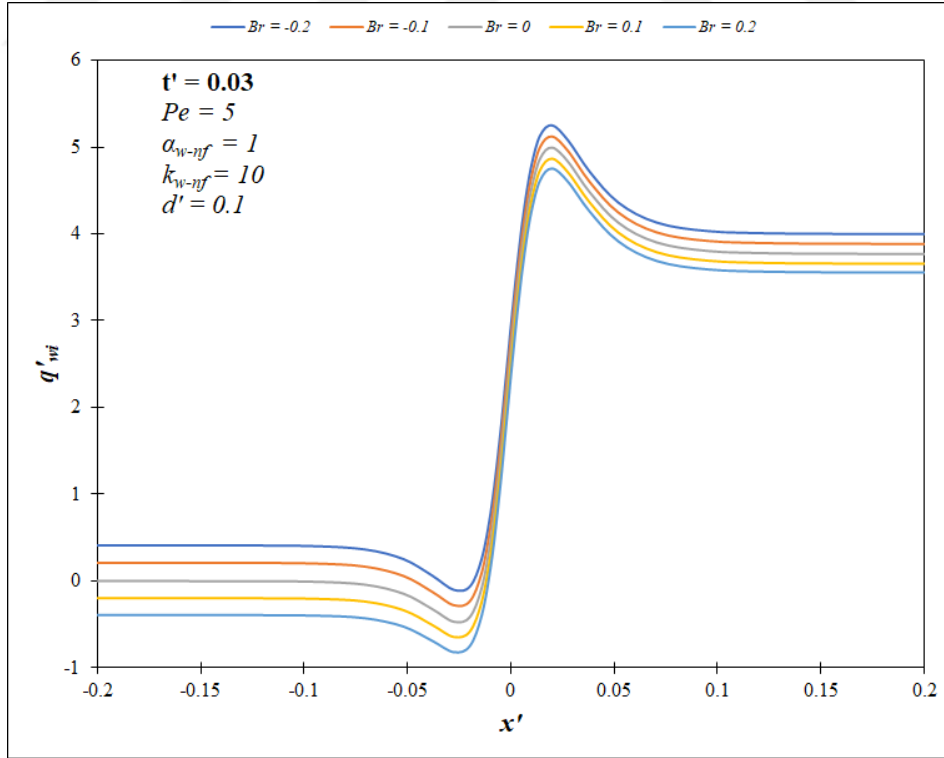
Sürekli rejime ait sonuçlar için Şekil 4.33'te verilen dağılım söz konusudur. Buna göre, ısı iletim katsayısı oranının sürekli rejim sonuçlarına etkisi bariz bir şekilde görülmektedir. Isı iletim katsayısı oranı arttıkça akışkana olan ısı transferi de artma eğilimine sahiptir. Ara yüzey ısı akısı için en yüksek değer olarak sırasıyla $k_{w-nf} = 0.1$ için $q'_{wi} = 0.11$, $k_{w-nf} = 1$ için $q'_{wi} = 0.67$ ve $k_{w-nf} = 10$ için $q'_{wi} = 1.4$ gözlemlenmektedir. Bu da ısı iletim katsayısı oranı ile cidar kalınlık oranının ters orantılı olduğunun göstergesidir. Isı iletim katsayısı oranı artış gösterdikçe cidar bölgesindeki ısıl direncin azalma kaydettiği görülmektedir. Bu durumun nedeni ise akışkanın sıcaklığının daha çabuk bir şekilde artmasıdır. Bu etki de akışkandan cidara doğru olan ters yönlü ısı geçişini beraberinde getirmektedir. Fakat ısı iletim katsayısı oranının düşük olduğu durumlarda cidar bölgesi açısından ısıl direnç de daha büyüktür. Böylelikle cidar ile akışkan arasındaki sıcaklık farkı daha az olduğu için daha düşük ara yüzey ısı akısı değerleri gözlemlenmektedir. Ancak ısı iletim katsayısı oranlarının artması neticesinde sürekli rejime erişim açısından gerekli olan sürenin azalma kaydettiği de görülmektedir. Bu durumun sebebi olarak belirtilen oranının artışı ile cidar bölgesindeki ısıl atalet etkisinin de azalması gösterilmektedir. Sonuç olarak alt akış bölgesi için beklenen şekilde $q'_{wi} = 0$ değerine erişilmektedir.



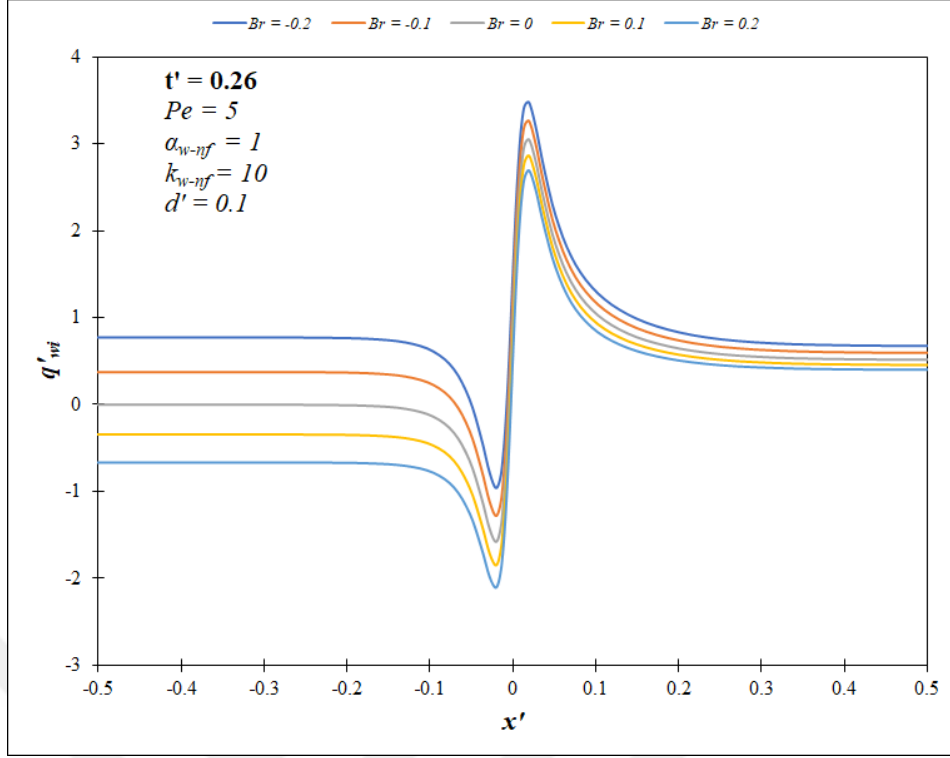
Şekil 4.33. Farklı ısı iletim katsayısı oranlarının ara yüzey ısı akısına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması

Isı iletim katsayısının etkisel değerlendirilmesi üzerine ulaşılan genel sonuçlara göre sürekli rejime ulaşılması, ısı iletim katsayısı oranının azalmasına bağlı olarak artma eğilimi sergilemektedir. Cidardaki ısı iletimin daha iyi olması neticesinde akışkanın sıcaklığında daha fazla artış meydana gelmektedir. Bu durumun ortaya çıkmasında ara yüzeyden merkeze doğru radyal sıcaklık değerlerinin azalma eğiliminde olması gösterilebilmektedir. Bu noktada $k_{w-nf} = 10$ için cidar ile ara yüzey arasındaki sıcaklık farkının daha fazla olduğu görülmektedir. Cidar ile ara yüzey arasındaki sıcaklık farkının eğilimi ısıtma başlangıcı konumunda nispeten benzerlik göstermektedir. Bu konumda maksimum değerler elde edildikten sonra ısı iletim katsayısı oranının değerine göre farklı ısı gelişme mesafeleri ile ilgili değerlere asimptotik olarak yaklaşım söz konusudur. Ayrıca ısı iletim katsayısı oranının artışıyla ara yüzey ısı akısı değerlerinde artma meydana gelmektedir. Bu durum cidar kalınlık oranının azalması ile de sağlanmaktadır. Bir başka deyişle ısı transferi daha hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir. Çünkü bu iki durum için cidardaki ısı direncin etkisi bu yolla azaltılmaktadır. Sürekli rejime ulaşıldıktan sonra ısı iletim katsayısı oranının çözüme etkisi bariz bir şekilde gözlemlenmektedir. Burada sürekli rejime ulaşma süresi değerlerinin azalma eğilimi, artan ısı iletim katsayısı oranı değerleri ile elde edilmektedir.

Brinkman sayısı viskoz yitim etkisini gösteren bir boyutsuz sayıdır. Bu bağlamda bu boyutsuz sayı için $Br = -0.2, -0.1, 0, 0.1$ ve 0.2 değerleri kullanılmıştır. Farklı Brinkman sayılarının ara yüzey ısı akısına etkisi $t' = 0.03$ anında Şekil 4.34'te verilmiştir. Maksimum değer olarak $Br = -0.2$ için $q'_{wi} = 5.25$, $Br = -0.1$ için $q'_{wi} = 5.12$, $Br = 0$ için $q'_{wi} = 5$, $Br = 0.1$ için $q'_{wi} = 4.87$ ve $Br = 0.2$ için $q'_{wi} = 4.75$ elde edilmektedir. Viskoz yitim etkisinde üst akış bölgesinde ısı transferi değerleri değişim göstermektedir. Belirtilen bölgede sıfırdan farklı pozitif Brinkman sayılarında viskoz ısınma sonucunda akışkanın sıcaklık değeri artmaktadır. Bu durumun sonucunda ısı transferi yönü değişmekte ve akışkandan cidara ısı transferi gözlemlenmektedir. Üst akış bölgesinden gelen akışkanın sıcaklığı bir miktar yükseldiği için alt akış bölgesinde sıcaklık farkının daha az olmasına bağlı olarak cidardan akışkana gerçekleşen ısı transferi biraz azalma göstermektedir. Brinkman sayısı değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisi açısından $t' = 0.26$ için sunulan karşılaştırma Şekil 4.35'te verilmiştir. Üst akış bölgesinde geçerli olan ısı transferi yönü etkisi sürmektedir. Negatif Brinkman sayısı değerleri için bu durum nispeten geçerli değildir. Brinkman sayısı azaldıkça ısı gelişme mesafesi de azalmaktadır. Ayrıca Brinkman sayısı azaldıkça aksenal ısı iletimi etkisinin azaldığı



Şekil 4.34. Farklı Brinkman sayısı değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin $t' = 0.03$ anındaki karşılaştırılması

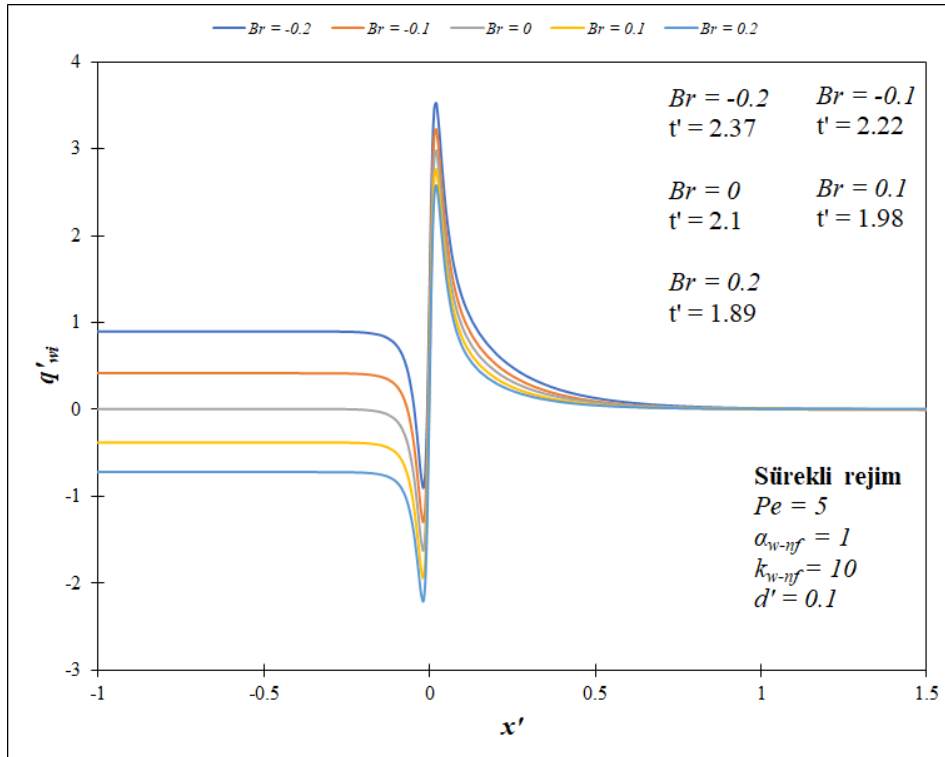


Şekil 4.35. Farklı Brinkman sayısı değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin $t' = 0.26$ anındaki karşılaştırılması

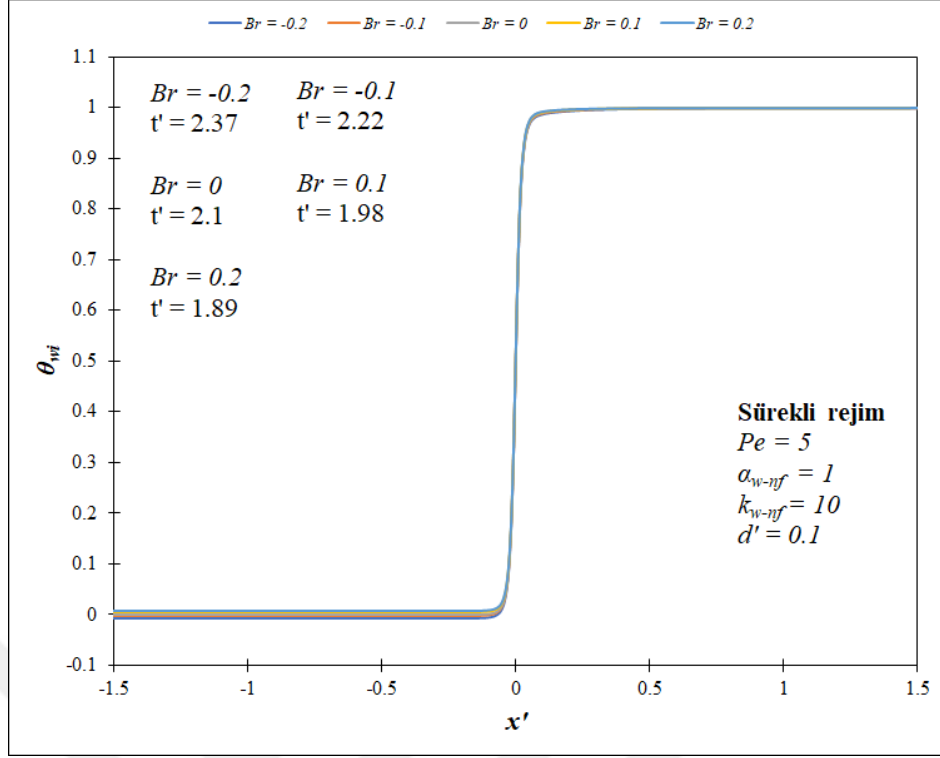
sonucu ortaya çıkmaktadır. Bunun yanı sıra Brinkman sayısı arttıkça ısıl gelişme mesafesi artmaktadır. Ayrıca bu artışın sonucu olarak üst akış bölgesine doğru ısı transferi artış göstermektedir. Bu durum da ara yüzeydeki ısı akısı değerlerini azaltmaktadır. Maksimum değer olarak $Br = -0.2$ için $q'_{wi} = 3.48$, $Br = -0.1$ için $q'_{wi} = 3.26$, $Br = 0$ için $q'_{wi} = 3.05$, $Br = 0.1$ için $q'_{wi} = 2.87$ ve $Br = 0.2$ için $q'_{wi} = 2.7$ elde edilmektedir. Sürekli rejimdeki sonuçlar ise Şekil 4.36'da farklı durumlar için sunulmuştur. Üst akış bölgesinde viskoz yitim etkisinde ısı transferi yönü ve miktarı değişmektedir. Bu durumun ortaya çıkışında akışkan ve cidar için sıcaklık farkının artışı etkilidir. Neticede doğal olarak akışkandan cidara ısı transferi meydana gelmektedir. En yüksek değer de bu anlamda $Br = -0.2$ değerinde gözlemlenmektedir. Maksimum değer olarak $Br = -0.2$ için $q'_{wi} = 3.52$, $Br = -0.1$ için $q'_{wi} = 3.23$, $Br = 0$ için $q'_{wi} = 2.98$, $Br = 0.1$ için $q'_{wi} = 2.76$ ve $Br = 0.2$ için $q'_{wi} = 2.57$ elde edilmektedir. Alt akış bölgesi için ise negatif Brinkman sayısı değerleri ile viskoz yitim etkisinde akışkan için ısınma durumu söz konusudur. Bu durumla akışkanın sıcaklığı artmaktadır. Belirtilen süreç cidar ile akışkan açısından sıcaklık farkının artması ile sonuçlanmaktadır. Sıcaklık farkının artışı da ısı akısı değerlerinin artışına yol açmaktadır. Dolayısıyla akışkandan cidara doğru gerçekleşen ısı geçişi gözlemlenmektedir. Bu durum sonrasında sürekli rejime ulaşma süresi artma eğilimi

göstermektedir. Beklendiği üzere, ara yüzey ısı akısı değerleri tüm durumlarda $q'_{wi} = 0$ değerine ulaşmaktadır.

Sürekli rejimde farklı Brinkman sayısı değerlerinin ara yüzey sıcaklığına etkisi için Şekil 4.37'ye yer verilmiştir. Bu durum için $t' = 0.03$ ve $t' = 0.26$ anlarındaki değişimler sınırlıdır. Belirtilen sonuçlar sürekli rejim koşullarında da geçerlilik arz etmektedir. Buna göre Brinkman sayısı üst akış bölgesini ara yüzey sıcaklığı değerleri açısından daha fazla etkilemektedir. Viskoz yitim etkisi ile $Br = 0$ değerindeki durumdan farklı olarak ısı transferi mekanizması değişikliğe uğramaktadır. Bu sonucun meydana gelmesinde viskoz ısıtma etkisinin üst akış bölgesindeki varlığı oldukça baskındır. Bu bölgede pozitif Brinkman sayısı değerlerindeki yükselme ile ara yüzey sıcaklığında artış gözlemlenmektedir. Eksenel ısı iletiminin etkisi bu durumun ortaya çıkışında önemlidir. Alt akış bölgesinde de üst akış bölgesi için belirtilen durumlar benzerlik göstermekte olsa da buradaki viskoz ısıtma etkisinin daha pasif olduğu görülmektedir. Bunun nedeni olarak alt akış bölgesinde $x' = 0$ noktası ile cidar ısıtması da devreye girmektedir. Brinkman sayısının artması ile sürekli rejime geçiş süresi azalma eğilimine sahip olmaktadır. Beklenen bir durumun sonucu olarak, ara yüzey sıcaklığı değerleri tüm durumlar için $\theta_{wi} = 1$ değerini sağlamaktadır.

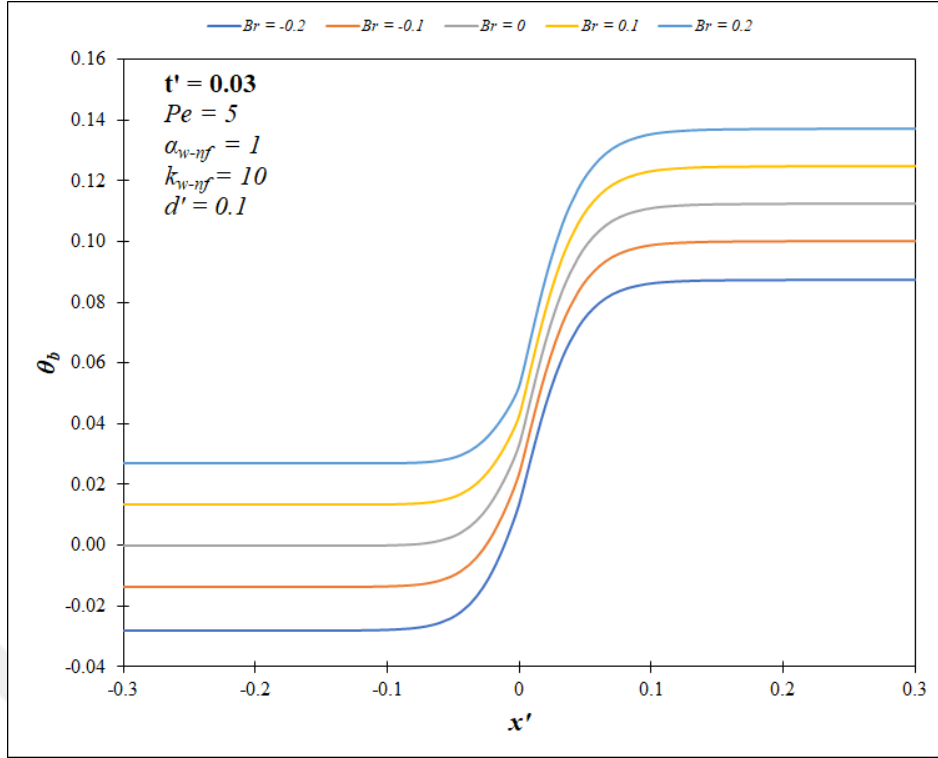


Şekil 4.36. Farklı Brinkman sayısı değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması

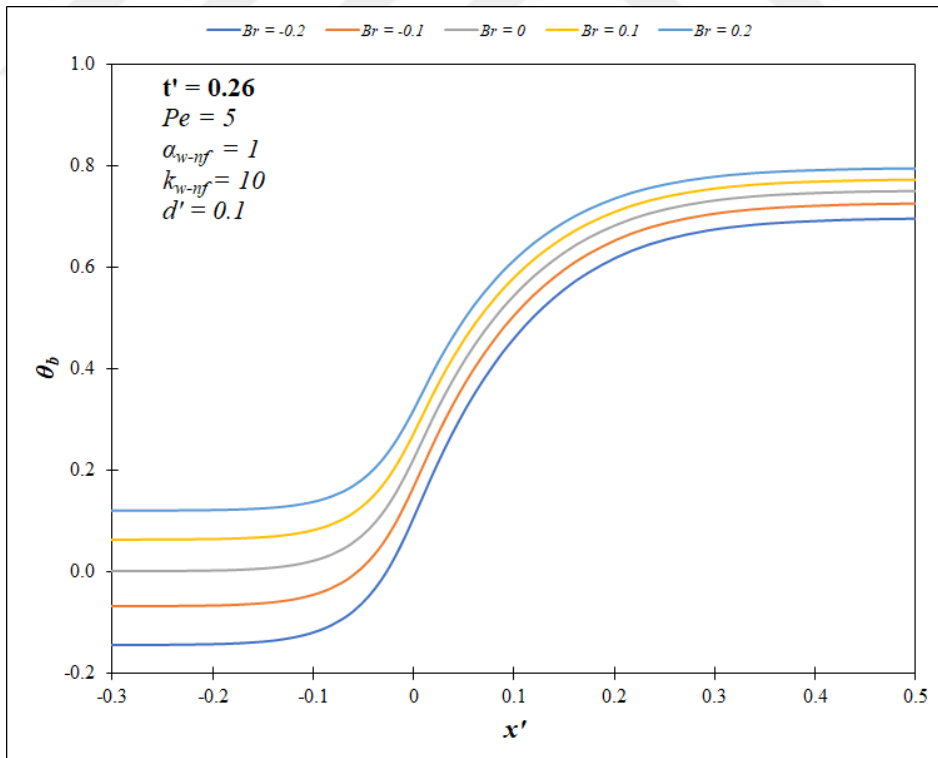


Şekil 4.37. Farklı Brinkman sayısı değerlerinin ara yüzey sıcaklığına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması

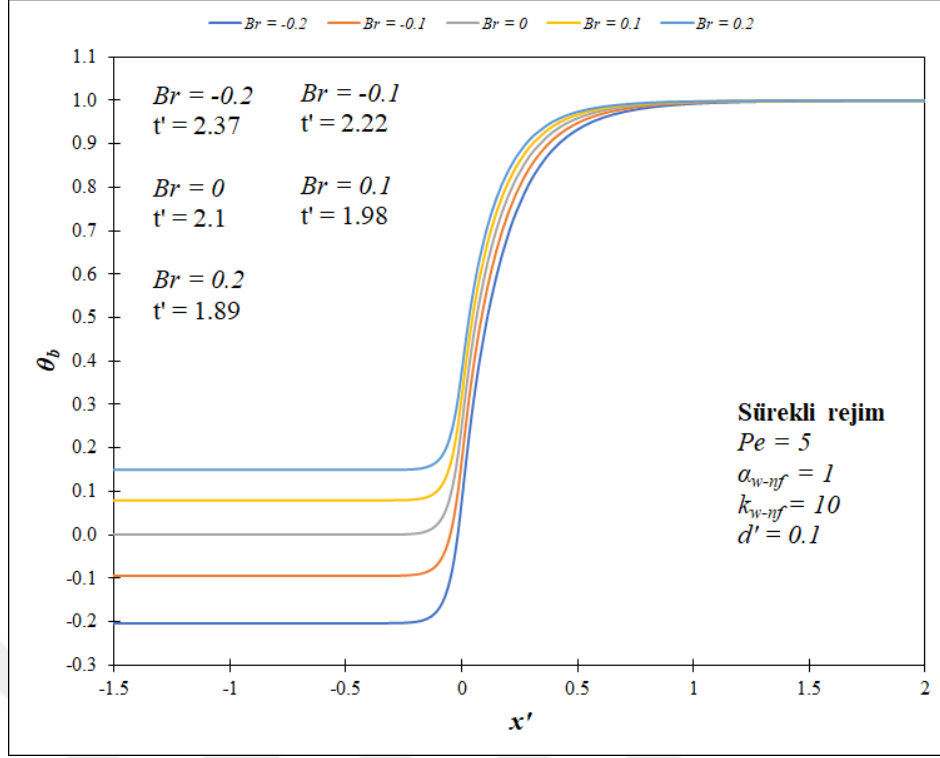
Farklı Brinkman sayılarının yığık sıcaklığa etkisi $t' = 0.03$ anında Şekil 4.38'de verilmiştir. Buna göre viskoz yitim etkisinde üst akış bölgesinde ilgili değerler değişim göstermektedir. Sıfırdan farklı pozitif Brinkman sayılarında ısı transferinin yönü değiştiği için yığık sıcaklık değerleri de etkilenmektedir. Brinkman sayısı arttıkça aksel ısı iletimi etkisi de artma eğilimindedir. Ayrıca bu durumu ısı gelişme mesafesinin artışı da gözlemlemek mümkündür. Brinkman sayısı değerlerinin yığık sıcaklık değerlerine etkisi $t' = 0.26$ için Şekil 4.39'da verilmiştir. Zaman adımı arttıkça yığık sıcaklık değerleri artma eğilimindedir. Isı transferi yönünün değişim etkisi üst akış bölgesinde görülmektedir. Bu durumun gözlemlendiği mesafe üst akış bölgesinde daha azken, alt akış bölgesi için daha fazla mesafe gerekmektedir. Sürekli rejime ait yığık sıcaklık sonuçları ise Şekil 4.40'ta farklı Brinkman sayısı değerleri için sunulmuştur. Üst akış bölgesinde viskoz yitim etkisinde ısı transferinin yönü önemli oranda değişmektedir. Buna bağlı Brinkman sayısının artışı ile viskoz ısı üretimi kaynaklı olarak yığık sıcaklık değerleri daha yüksek bir seviyede seyretmektedir. Ancak alt akış bölgesindeki sonuçlar açısından viskoz yitim ile akışkanın ilave bir ısıtmaya maruz kaldığı gözlemlenmektedir. Alt akış bölgesindeki hız gradyanlarına bağlı olarak viskoz anlamdaki tesirin önemi ortaya çıkarak, yığık sıcaklık değerleri artışa geçmektedir. Diğer sonuç olarak Brinkman sayısı



Şekil 4.38. Farklı Brinkman sayısı değerlerinin yığık sıcaklığa etkisinin $t' = 0.03$ anındaki karşılaştırılması



Şekil 4.39. Farklı Brinkman sayısı değerlerinin yığık sıcaklığa etkisinin $t' = 0.26$ anındaki karşılaştırılması



Şekil 4.40. Farklı Brinkman sayısı değerlerinin yığık sıcaklığa etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması

azaldıkça sürekli rejime ulaşma süresi artma eğilimi göstermektedir. Neticede tüm durumlar için beklenen bir durumun parçası olarak, yığık sıcaklık değerleri $\theta_b = 1$ değerine erişmektedir.

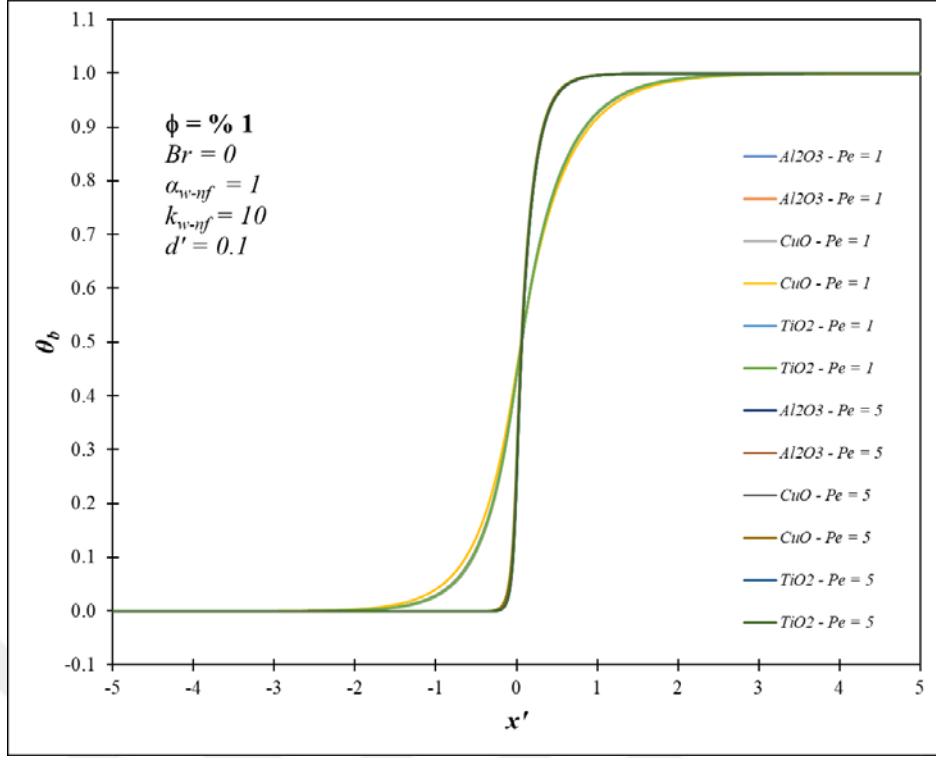
Brinkman sayısının viskoz yitim kapsamındaki etkisine göre üst akış bölgesinde önemli bir değişim söz konusudur. Bu durum beklendiği üzere hem cidar bölgesini hem de akışkan bölgesini etkilemektedir. Bununla birlikte viskoz yitim etkisinde $Br = 0.2$ değeri için akışkanın sıcaklığında daha fazla artış meydana gelmektedir. Akışkan bölgesinde sürekli rejime doğru sıcaklık değerleri artma eğilimi göstermektedir. Ara yüzey ısı akısına ait değerler farklı Brinkman sayıları için değerlendirilmiştir. Buna göre Brinkman sayısının ısı transferi yönünü önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Burada viskoz yitimin etkisinin olmadığı gösteren $Br = 0$ değeri referans durumu teşkil etmektedir. Üst akış bölgesinde de ara yüzey ısı akısı değerleri açısından farklı Brinkman sayısı değerleri için değişiklik mevcuttur. Üst akış bölgesine doğru olan ısı yayılma mesafesi $Br = -0.2$ değerinde en fazladır. Brinkman sayısı arttıkça bu uzunluğun azalma gösterdiği görülmektedir. İlave olarak Brinkman sayısı arttıkça sürekli rejime erişme süresi için gerekli olan zaman da azalma göstermektedir. Bu da ısı transferinin böylelikle daha kolay gerçekleştiğini gösteren bir diğer parametredir. Ara yüzey sıcaklık değerlerine göre Brinkman sayısının etkisi de değerlendirilmiştir. Üst akış bölgesi için ara yüzey sıcaklık

değerlerinin sınırlı şekilde etkilendiği görülmektedir. Bu durumun sebebi Brinkman sayısının akışkan özellikleri ile daha ilişkili olmasıdır. Benzer durumu alt akış bölgesi için yinelemek mümkündür. Isıl gelişme için gerekli olan mesafenin $Br = -0.2$ değerinde en fazla olduğu ve bu uzunluğun Brinkman sayısı artışıyla ters orantı gösterdiği gözlemlenmektedir. Yığık sıcaklık değerleri açısından da Brinkman sayısı değerleri karşılaştırılmıştır. Üst akış bölgesinde Brinkman sayısı değeri ısı transferi yönünü oldukça etkilemektedir.

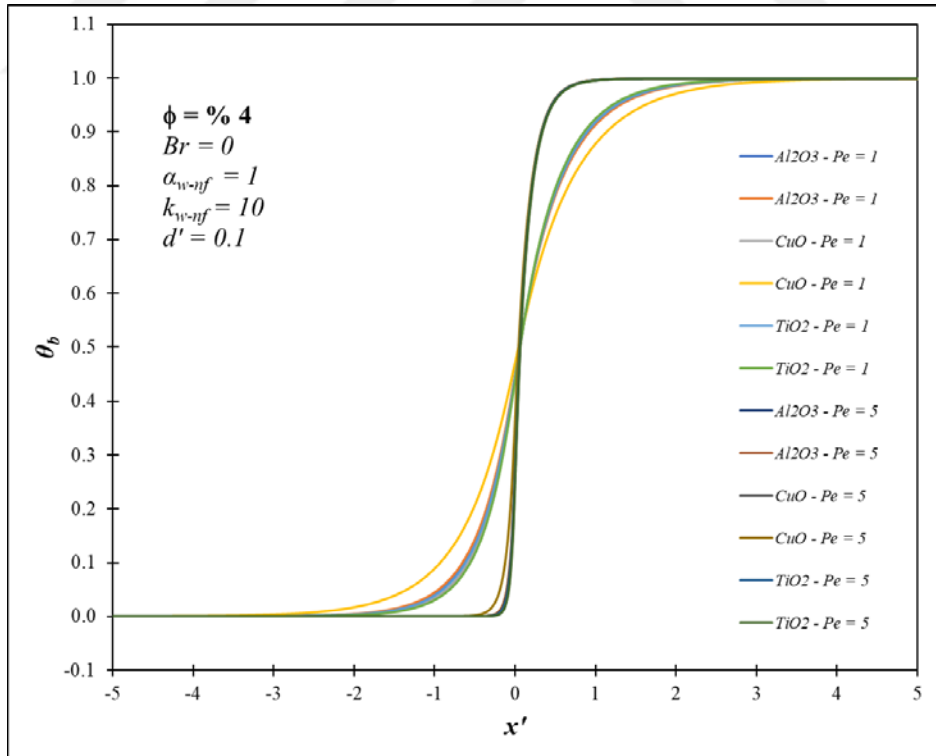
4.2. Nanoakışkanlar İçin Elde Edilen Sonuçlar

Temel akışkan olan suya % 1, % 4 ve % 7 hacimsel konsantrasyon değerlerinde farklı nanoparçacıkların ilave edilmesinin ısı transferi değerlerine etkisini göstermek üzere çözümler gerçekleştirilmiştir. Nanoparçacık olarak Al_2O_3 , CuO ve TiO_2 , çalışma kapsamında ısı performans açısından değerlendirilmiştir.

Farklı nanoparçacıkların % 1 hacimsel konsantrasyon değerindeki etkisi Şekil 4.41'de sunulmuştur. Bu karşılaştırmada ayrıca Peclet sayısı değişimi de mevcuttur. Bilindiği üzere akış hızının artışı ısı transferinin artmasına neden olan bir durumdur. Bu durum açısından Peclet sayısı artışı zaten ısı transferi artışını tetiklemektedir. Ancak düşük Peclet sayısında nanoakışkan kullanımının daha önemli olduğu grafikte görülmektedir. Buna göre üst akış bölgesinde $Pe = 1$ için eksenel ısı iletimi etkisinin daha fazla olduğu görülmektedir. $Pe = 1$ durumu için bu etki üst akış bölgesine doğru ilerlemekteyken, $Pe = 5$ durumunun etki aralığı ısıtma başlangıcını gösteren noktaya biraz daha yakındır. Belirtilen durumlarla üst akış bölgesinde önemli oranda ısı transferinin gerçekleştiği yığık sıcaklık değerlerindeki artış sonucunda görülmektedir. Alt akış bölgesinde meydana gelen değişim incelendiğinde, yığık sıcaklık değerlerinin artış göstererek en yüksek değerine eriştiği ve Peclet sayısına göre belirli bir noktadan sonra da akış yönü boyunca ısı gelişme mesafesine ulaşıldığı gözlemlenmektedir. $Pe = 5$ için ısı gelişme mesafesi daha kısadır. Bu durumun ortaya çıkmasındaki sebep, cidar ile nanoakışkan arasındaki sıcaklık farkının azalmasıdır. Ayrıca düşük Peclet sayısında nanoparçacık malzemesinin etkisinin daha fazla olduğu görülmektedir. Benzer şekilde farklı nanoparçacıklarının % 4 hacimsel konsantrasyon değeri için Peclet sayısı değişimine göre davranışı Şekil 4.42'de yer almaktadır. Nispeten yüksek Peclet sayısında nanoparçacık etkisi görüldüğü üzere daha sınırlıdır.



Şekil 4.41. Farklı nanoparçacıkların % 1 hacimsel konsantrasyonda temel akışkan olan suya ilave edilmesinin yığık sıcaklığa etkisinin karşılaştırılması

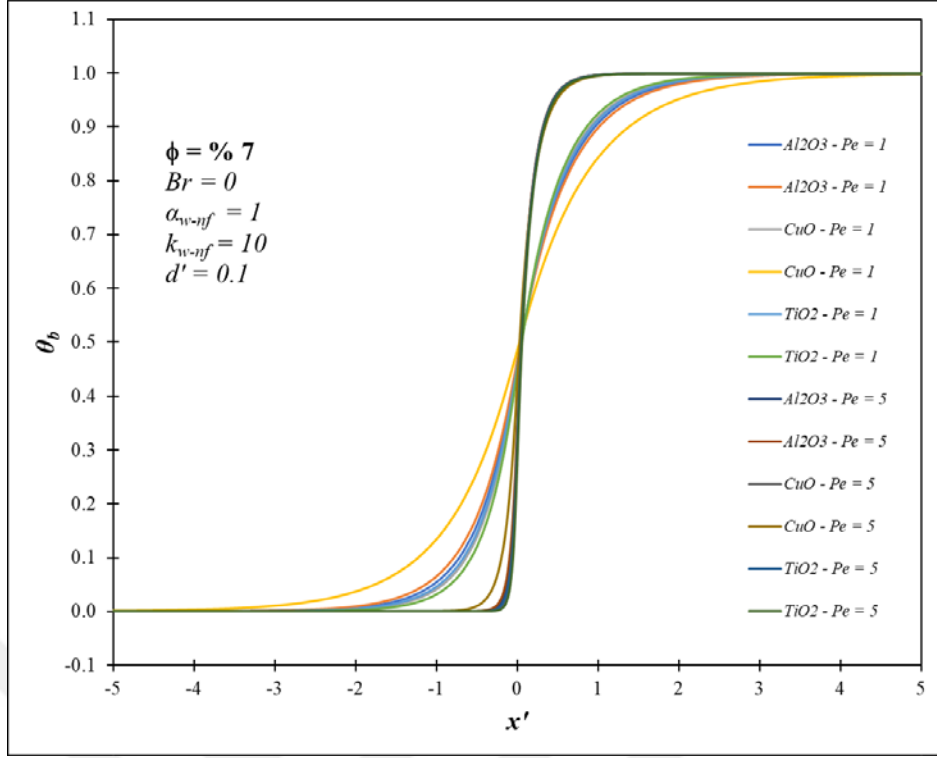


Şekil 4.42. Farklı nanoparçacıkların % 4 hacimsel konsantrasyonda temel akışkan olan suya ilave edilmesinin yığık sıcaklığa etkisinin karşılaştırılması

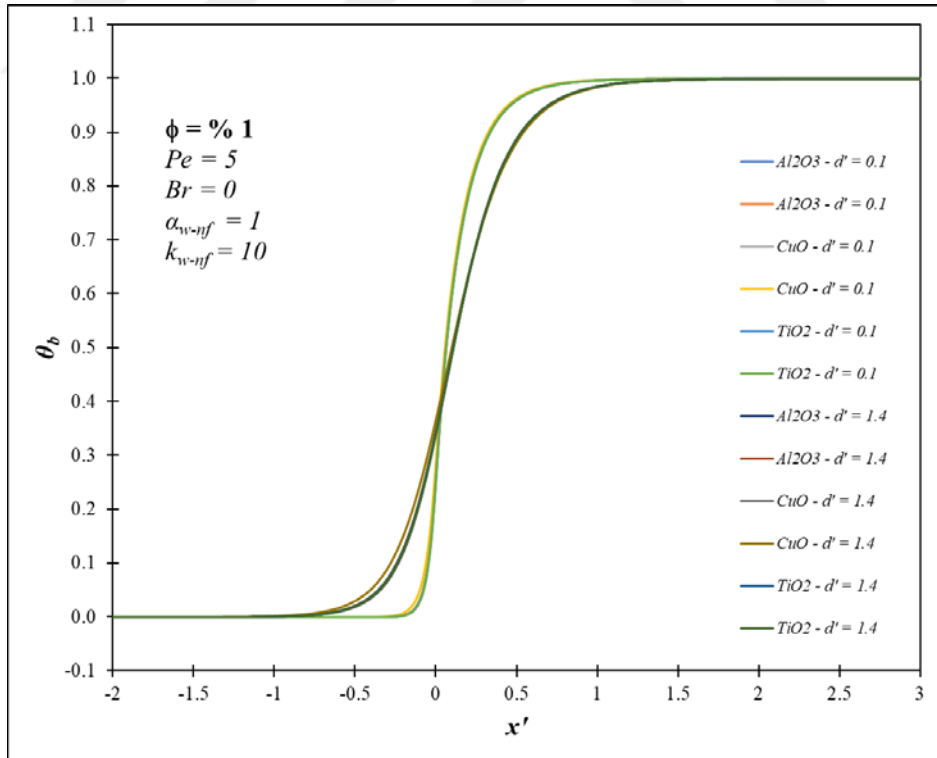
Ancak $Pe = 1$ değeri için % 4 hacimsel konsantrasyon değerinde nanoparçacık malzemesinin etkisi de daha belirgindir. Bu hususta CuO nanoparçacığı ön plana çıkmaktadır. Aynı biçimde farklı nanoparçacıkların % 7 hacimsel konsantrasyon değerindeki etkisi Peclet sayısına bağlı olarak Şekil 4.43'te sunulmuştur. Nanoparçacık türü olarak CuO etkisi daha bariz bir şekilde gözlemlenmektedir. Sonuç olarak, alt akış bölgesinde tüm durumlar için $\theta_b = 1$ değerine beklenen şekilde erişilmektedir.

Türü farklı nanoparçacıkların % 1 hacimsel konsantrasyon değerindeki etkisi cidar kalınlık oranları açısından Şekil 4.44'te verilmiştir. Cidar kalınlık oranının azalması ısı transferinin daha kolay bir şekilde gerçekleşmesine neden olmaktadır. Cidar kalınlık oranının değişimi açısından nanoparçacık malzemesinin etkisinin daha fazla olduğu görülmektedir. Aynı şekilde farklı nanoparçacıklarının % 4 hacimsel konsantrasyon değeri için cidar kalınlık oranına göre ortaya çıkan sonuçlar Şekil 4.45'te yer almaktadır. Cidar kalınlık oranının düşük olduğunda cidar bölgesindeki ısıl atalet de aynı oranda daha düşüktür. Böylelikle sabit yüzey sıcaklığının etkisi altındaki cidardan ısının daha hızlı bir şekilde nanoakışkana geçişi mümkün hale gelmektedir. Bu da düşük kalınlık oranında ısı gelişme mesafesinin daha kısa olması sonucuyla gözlemlenebilmektedir. Düşük cidar kalınlık oranı için nanoakışkanın yığık sıcaklığı öncelikle daha yüksek olarak elde edilmektedir. Nispeten düşük cidar kalınlık oranında nanoparçacık etkisi görüldüğü üzere daha sınırlıdır. Ancak $d' = 1.4$ değeri için % 4 hacimsel konsantrasyon değerinde nanoparçacık malzemesinin etkisi de daha belirgindir. Bu aşamada daha önce de belirtildiği üzere CuO nanoparçacığı etkilidir. Benzer biçimde farklı nanoparçacıkların % 7 hacimsel konsantrasyon değerindeki etkisi cidar kalınlık oranına bağlı olarak Şekil 4.46'da sunulmuştur. Nanoparçacık türü olarak CuO daha etkili olarak gözlemlenmektedir. Netice itibari ile tüm durumlarda $\theta_b = 1$ değerine amaçlandığı şekilde ulaşılmaktadır.

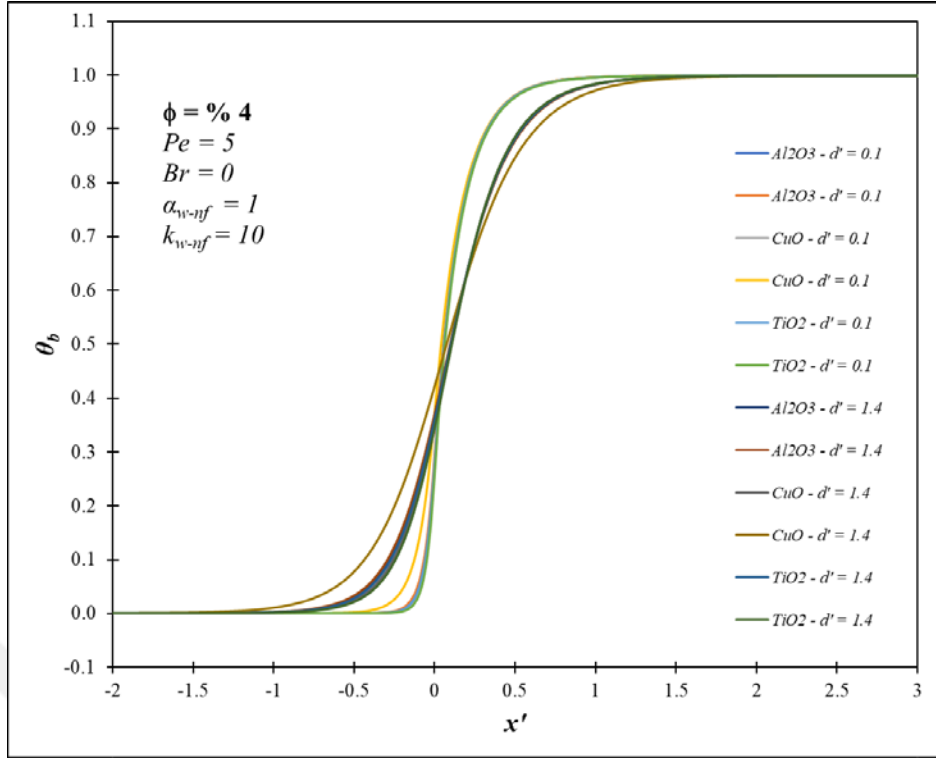
Brinkman sayısı etkisinde farklı nanoparçacıkların % 1 hacimsel konsantrasyon değerinde ilave edilmesine ait sonuçlar Şekil 4.47'de sunulmuştur. Diğer parametrelerin aksine Brinkman sayısı, en düşük hacimsel konsantrasyon değerinde bile etkisini göstermektedir. Üst akış bölgesi için viskoz yitim etkisi ısı transferi yönünü önemli oranda değiştirmektedir. Fakat alt akış bölgesinde viskoz yitim sonucunda ilave bir ısıtmaya nanoakışkanın maruz kaldığı görülmektedir. Bu bağlamda CuO nanoparçacığının daha etkili olduğu gözlemlenmektedir. Farklı nanoparçacıklarının % 4 hacimsel konsantrasyon değeri için Brinkman sayısı değişimine göre elde edilen sonuçlar Şekil 4.48'de gösterilmiştir. Nanoparçacık malzemesinin yığık sıcaklık değerlerine etkisi



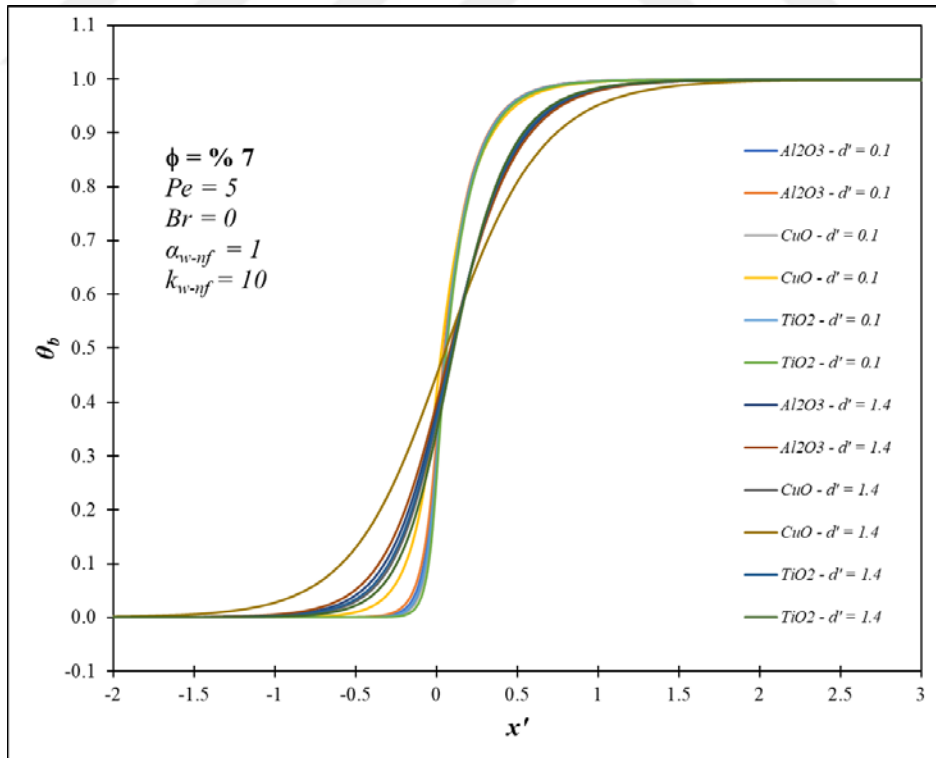
Şekil 4.43. Farklı nanoparçacıkların % 7 hacimsel konsantrasyonda temel akışkan olan suya ilave edilmesinin yığık sıcaklığa etkisinin karşılaştırılması



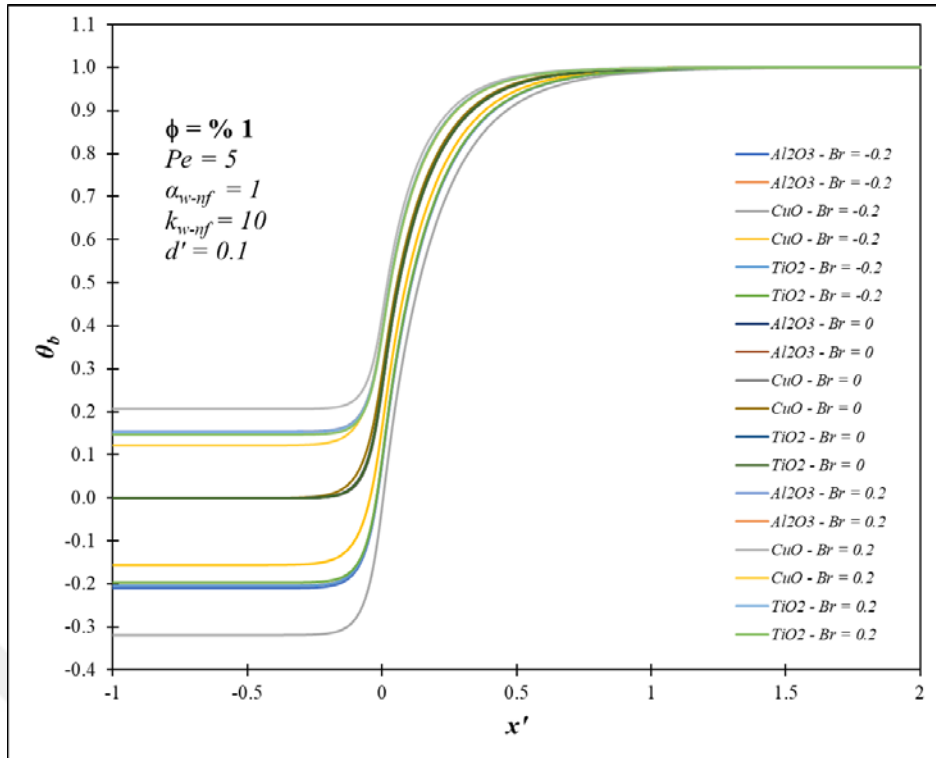
Şekil 4.44. Farklı nanoparçacıkların % 1 hacimsel konsantrasyonda temel akışkan olan suya ilave edilmesinin yığık sıcaklığa etkisinin karşılaştırılması



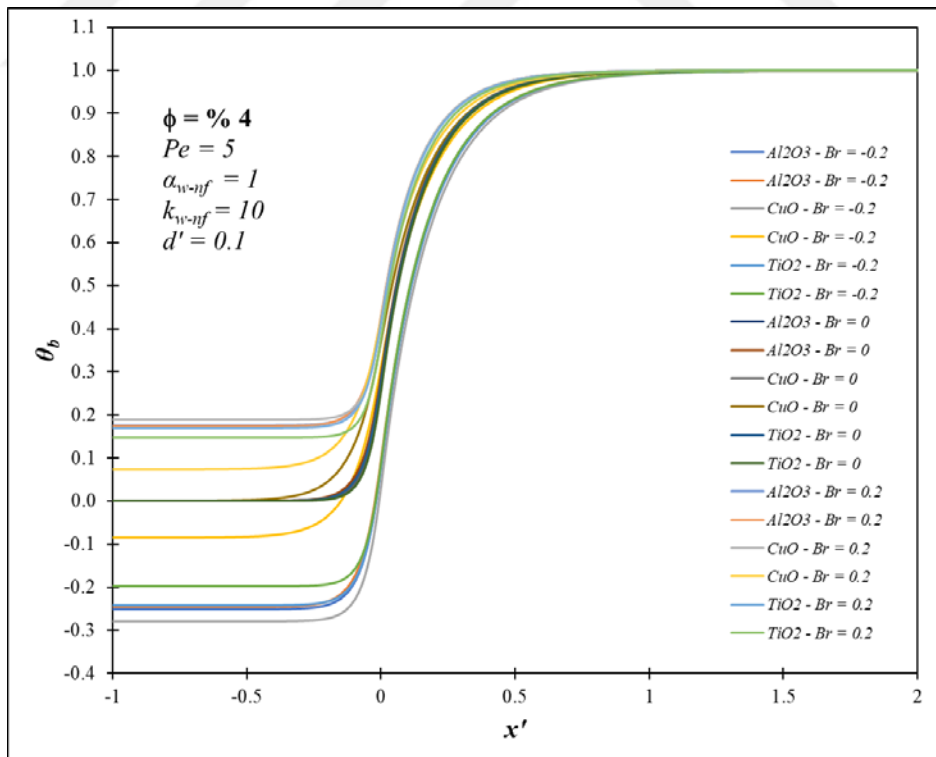
Şekil 4.45. Farklı nanoparçacıkların % 4 hacimsel konsantrasyonda temel akışkan olan suya ilave edilmesinin yığık sıcaklığa etkisinin karşılaştırılması



Şekil 4.46. Farklı nanoparçacıkların % 7 hacimsel konsantrasyonda temel akışkan olan suya ilave edilmesinin yığık sıcaklığa etkisinin karşılaştırılması

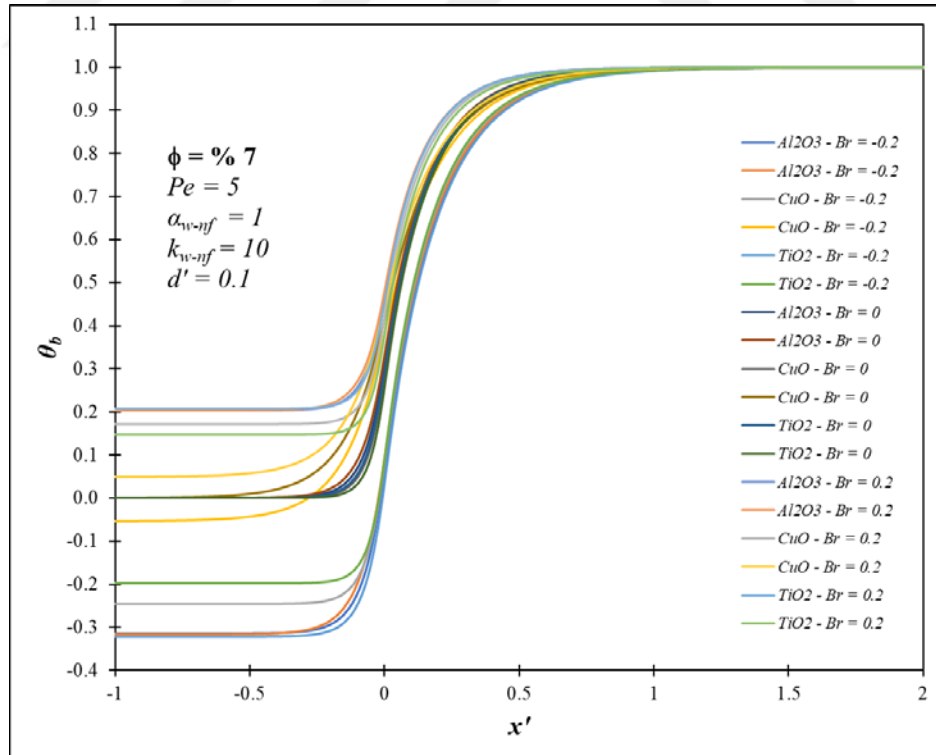


Şekil 4.47. Farklı nanoparçacıkların % 1 hacimsel konsantrasyonda temel akışkan olan suya ilave edilmesinin yığık sıcaklığa etkisinin karşılaştırılması



Şekil 4.48. Farklı nanoparçacıkların % 4 hacimsel konsantrasyonda temel akışkan olan suya ilave edilmesinin yığık sıcaklığa etkisinin karşılaştırılması

net bir şekilde görülmektedir. Buna göre CuO nanoparçacığının etkisi daha baskındır. Ayrıca % 7 hacimsel konsantrasyon değeri için Brinkman sayısı değişimiyle bulunan sonuçlar, Şekil 4.49'da yer almaktadır. Buradaki hacimsel konsantrasyonu için de CuO nanoparçacığının etkili olduğu görülmektedir. Üst akış bölgesinde sıfırdan farklı pozitif Brinkman sayısında viskoz ısınma neticesinde nanoakışkanın sıcaklık değeri artmaktadır. Bu durumun sonucunda ısı transferi yönü değiştiğinden, nanoakışkandan cidara ısı transferi meydana gelmektedir. Üst akış bölgesinden gelen nanoakışkanın sıcaklığı bir miktar yükseldiği için alt akış bölgesinde sıcaklık farkının daha az olmasına bağlı olarak cidardan nanoakışkana doğru gerçekleşen ısı transferi biraz azalma göstermektedir. Brinkman sayısı azaldıkça ısıl gelişme mesafesinin azaldığı sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu durum üst akış bölgesinde daha dar bir aralıkta geçerliken, alt akış bölgesi için belirtilen dağılım daha geniş bir mesafede etki göstermektedir. Ayrıca Brinkman sayısı düşük olduğunda aksel ısı iletimi etkisi de azalmaktadır. Ayrıca bunun sonucu olarak üst akış bölgesine doğru ısı transferi azalma kaydetmektedir. Alt akış bölgesi için ise negatif Brinkman sayısı değerleri ile viskoz yitim etkisinde nanoakışkan için ısınma durumu söz konusu olup, bu etki nanoakışkanın sıcaklığında artışa neden olmaktadır.

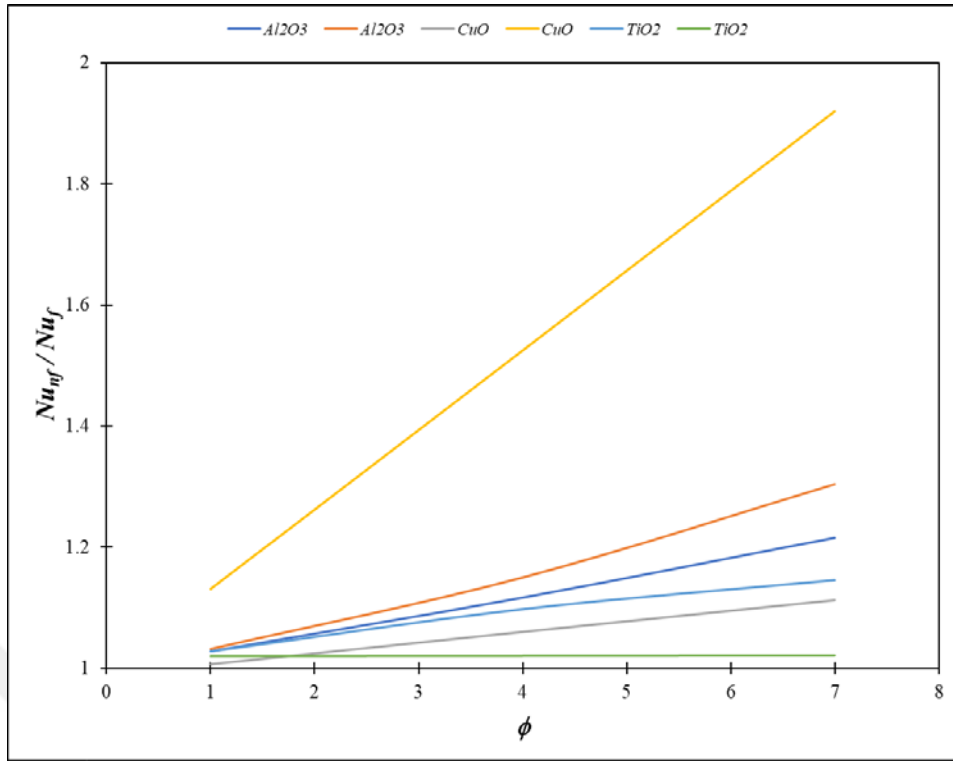


Şekil 4.49. Farklı nanoparçacıkların % 7 hacimsel konsantrasyonda temel akışkan olan suya ilave edilmesinin yığık sıcaklığı etkisinin karşılaştırılması

Sonuçta beklenen üzere alt akış bölgesinde tüm durumlar için $\theta_b = 1$ değeri sağlanmaktadır.

Elde edilen genel neticeler kapsamında Peclet sayısının artışı ısı transferinin artmasına neden olan faktördür. Ancak ısı performansına etki bakımından nanoparçacıklar değerlendirildiğinde en düşük Peclet sayısında nanoparçacık ilavesi daha önemlidir. Tüm hacimsel konsantrasyon değerinde CuO nanoparçacığının ilave edilmesi daha etkilidir. Bu nanoparçacıktan sonra Al_2O_3 nanoparçacığının eklenmesi bu anlamda önerilmektedir. Peclet sayısından bağımsız olarak hacimsel konsantrasyon değerleri arttıkça, ısı transferi de artmaktadır. Cidar kalınlık oranının daha düşük olması nanoparçacık etkisini olumlu yönde etkilemektedir. Benzer şekilde mevcut hacimsel konsantrasyon değerleri göz önüne alındığında, nanoparçacık ilavesi için CuO, Al_2O_3 ve TiO_2 sıralaması oluşmaktadır. Ancak nanoparçacığın türüne bağlı olmadan hacimsel konsantrasyon değerlerinin artması ile ısı transferi değerleri beklendiği şekilde artma eğilimi göstermektedir. Brinkman sayısının değeri ısı transferi yönünü etkilemektedir. Negatif değerlerde yığık sıcaklık değerleri daha düşük olarak elde edilmektedir. Viskoz yitimin olmadığı durumda $Br = 0$ değeri referans alınmaktadır. Bu değer pozitif olduğunda ise yığık sıcaklık değerlerinin ilave ısınma sebebiyle artış gösterdiği görülmektedir. Nanoparçacık ilavesinin etkisi bakımından sırasıyla CuO, Al_2O_3 ve TiO_2 türleri önerilmektedir. Brinkman sayısının etkisi dışında, artan hacimsel konsantrasyon değerlerinin ısı performansına olumlu tesir ettiği görülmektedir. Radyal sıcaklık profillerine göre de nanoparçacık türünün etkisi görülmektedir. Farklı eksenel konumlardaki değişimler irdelendiğinde CuO nanoparçacığının etkisi, eksenel iletimle birlikte üst akış bölgesinde gözlemlenmektedir. Bu nanoparçacıktan sonra aynı bölge için Al_2O_3 ısı performansını etkileyen bir diğer türdür. Diğer eksenel konumlarda da nanoparçacık etkisi açısından benzer durum sürmektedir. İlave olarak nanoakışkandaki sıcaklık dağılımının dışında, nanoparçacık etkisinin cidar üzerindeki dolaylı etkisi de görülmektedir.

Temel akışkan olan suya ait olan Nusselt sayısı değeri (Nu_f) referans alınmaktadır. Suyu nanoparçacık ilavesiyle elde edilen nanoakışkana ait Nusselt sayısı değeri (Nu_{nf}) ortaya çıkmaktadır. Nanoparçacığın ısı performansına etkisini göstermek üzere Nu_{nf} değeri, Nu_f değerine oranlanmaktadır. Böylelikle ısı performanstaki artış ifade edilebilmektedir. Bu kapsamda üç farklı nanoparçacığın değişik hacimsel konsantrasyonlardaki etkisini değerlendirmek üzere toplamda altı farklı termofiziksel özellik modeli de kıyaslanmaktadır (Şekil 4.50). Isıl performansa ortalama etkinin



Şekil 4.50. Farklı nanoparçacıkların değişik hacimsel konsantrasyon değerlerinde temel akışkan olan suya ilave edilmesinin ısı performansına ortalama etkisi

karşılaştırılmasına yönelik sunulan grafiğe göre, CuO nanoparçacığının mevcut hacimsel konsantrasyon aralığında suya ilave edilmesinin ısı transferini daha fazla artırdığı görülmektedir. Bu nanoparçacık etkisi için Nguyen ve ark. (2007) - Mintsä ve ark. (2009) ile Vinodhan ve ark. (2016) tarafından kullanılan termofiziksel özellik modellerine göre $1.07 \leq Nu_{nf}/Nu_f \leq 1.52$ ortalama oranları sırasıyla $1 \leq \phi \leq 7$ hacimsel konsantrasyon aralığı için elde edilmiştir. CuO nanoparçacığına ait sonuçlar için sırasıyla gri ((Nguyen ve ark., 2007) - (Mintsä ve ark., 2009)) ve sarı (Vinodhan ve ark., 2016) renkler kullanılmıştır. Referans olarak alınan Bouhaleb ve Abbassi (2016) tarafından hazırlanan çalışmanın sonuçlarına göre, Vinodhan ve ark. (2016) tarafından verilen modellerin kullanılması sonrasında elde edilen sonuçların % 1.65 sapma gösterdiği bulunmaktadır. Nguyen ve ark. (2007) - Mintsä ve ark. (2009) tarafından kullanılan modellerin tercih edilmesiyle sağlanan sonuçların % 14.2 oranında sapmaya neden olduğu ortaya çıkmaktadır. Benzer şekilde, Zarringhalam ve ark. (2016) tarafından verilen sonuçlarla kıyaslandığında, Vinodhan ve ark. (2016) tarafından önerilen modellerle elde edilen sonuçların % 0.6 sapma gösterdiği gözlemlenmektedir. Ancak Nguyen ve ark. (2007) - Mintsä ve ark. (2009) tarafından kullanılan modellerin bu anlamda % 19.32'lik sonuç sapmasına yol açtığı görülmektedir. Bu nanoparçacıktan sonra Al₂O₃ nanoparçacığının

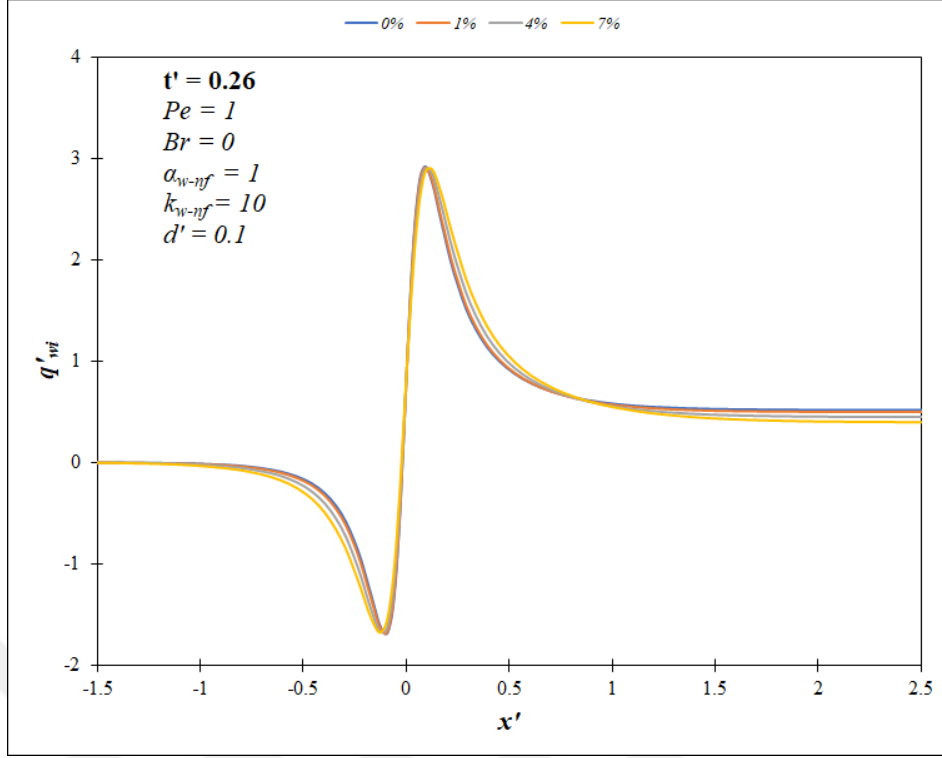
suya eklenmesinin daha etkili olduğu gözlenmektedir. Belirtilen nanoparçacığın kullanımıyla Maïga ve ark. (2004) ile Ho ve ark. (2010) tarafından önerilen termofiziksel özellikler modelleri ile elde edilen $1.03 \leq Nu_{nf}/Nu_f \leq 1.26$ ortalama oranları sırasıyla $1 \leq \phi \leq 7$ hacimsel konsantrasyon aralığı için geçerlidir. Al_2O_3 nanoparçacığına ait sonuçlar için sırasıyla koyu mavi (Maïga ve ark., 2004) ve turuncu (Ho ve ark., 2010) renkler ile işaretlenmiştir. Akbari ve ark. (2008) tarafından sunulan sonuçlara göre Ho ve ark., 2010 tarafından önerilen modeller ısı performans iyileştirmesi için aynı sonucu vermekteyken, Maïga ve ark. (2004) tarafından kullanılan modellere göre bulunan sonuçlar % 2.87 sapma göstermektedir. Aynı nanoparçacık için Yang ve Lai (2011) tarafından sunulan çalışma referans alındığında ise Ho ve ark., 2010 tarafından önerilen modellere göre bulunan sonuçlar % 1.71 sapma göstermekteyken, Maïga ve ark. (2004) tarafından verilen modellerle elde edilen sonuçlar ise % 4.53 sapma kaydetmektedir. Buna göre Al_2O_3 nanoparçacığı için kullanılan her iki modelin literatürde uygun neticeler sunduğu görülmektedir. Benzer şekilde TiO_2 nanoparçacığının ilave edilmesi durumunda, Buongiorno (2006) ile Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından verilen termofiziksel özellikler modelleri ile elde edilen $1.02 \leq Nu_{nf}/Nu_f \leq 1.08$ ortalama oranları sırasıyla $1 \leq \phi \leq 7$ hacimsel konsantrasyon aralığına ait olarak sağlanmaktadır. TiO_2 nanoparçacığına ait sonuçlar ise açık mavi (Buongiorno, 2006) ve yeşil (Duangthongsuk ve Wongwises, 2009) renklerle gösterilmiştir. Kayhani ve ark. (2012) tarafından verilen sonuçlarla kıyaslandığında, Buongiorno (2006) tarafından belirtilen modeller kullanılarak elde edilen sonuçların % 0.72 sapma gösterdiği neticesi ortaya çıkmaktadır. Fakat Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından önerilen modellerin kullanımı sonrasında % 3.59 oranındaki sapmayla sonuçlar elde edilmektedir. Aynı biçimde, Elibol ve Turgut (2022) tarafından sunulan çalışmanın sonuçları ile kıyaslandığında, Buongiorno (2006) tarafından hazırlanan çalışmadaki modeller tercih edildiğinde elde edilen sonuçların % 2.43 sapmaya sebep olduğu görülmektedir. Bu durum, Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından verilen termofiziksel özellik modelleri kullanıldığında ise sonuçlar açısından % 4.71 değerinde sapma göstermektedir. Beklendiği üzere nanoparçacık ilavesini gösteren hacimsel konsantrasyon oranı artış gösterdikçe ısı transferi de göreceli olarak artma eğilimi göstermektedir. Elde edilen değerler literatürde verilen aralık değerlerine ve değişim eğilimine uygundur. Nanoparçacık bazındaki termofiziksel özellik modelleri kıyaslandığında ise birbirine en yakın sonucu Al_2O_3 için geçerli olan modeller sunmaktadır. CuO nanoparçacığı için Nguyen ve ark. (2007) - Mintsu ve ark. (2009) tarafından önerilen modelin nispeten

yetersiz kaldığı görülmektedir. Benzer durum TiO_2 nanoparçacığı için Duangthongsuk ve Wongwises (2009) sunulan model için de geçerlidir.

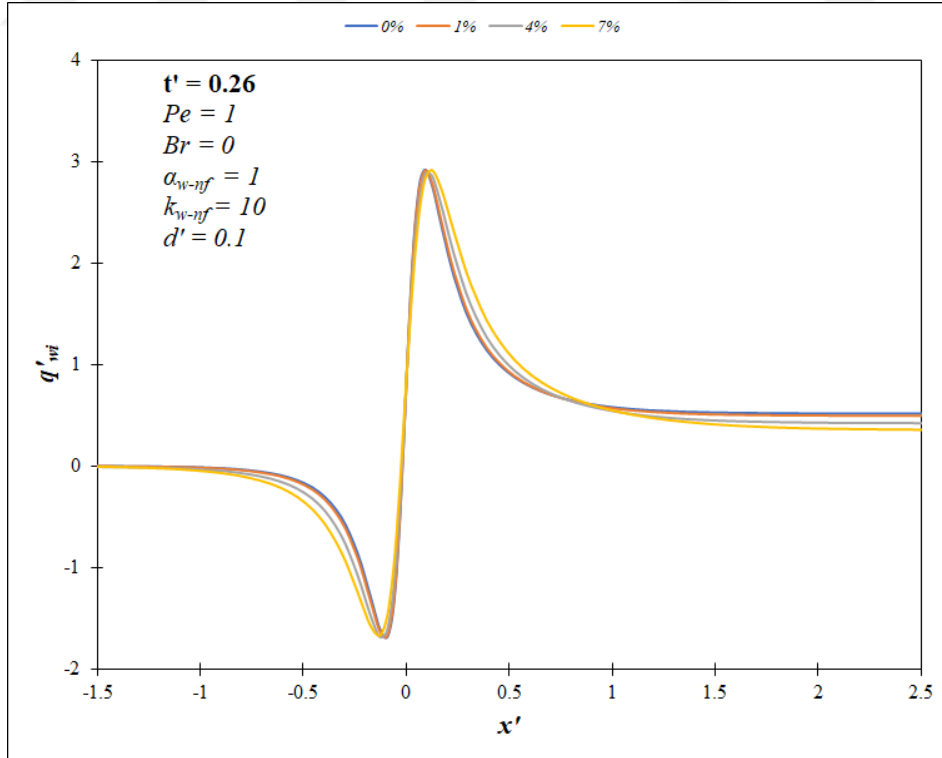
4.2.1. Su- Al_2O_3 nanoakışkanının etkisi

Nanoparçacık olarak Al_2O_3 ilavesi ile temel akışkan olarak kullanılan suyun ısı transferi açısından özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Buna göre ilgili nanoparçacık suya % 1, % 4 ve % 7 hacimsel konsantrasyon değerlerinde eklenmiştir. Ara yüzey ısı akısı, ara yüzey sıcaklığı, yığık sıcaklık değerleri kapsamında Peclet sayısı, cidar kalınlık oranı, ısı yayılım katsayısı, ısı iletim katsayısı ve Brinkman sayısı parametrelerinin çözüme etkisi değerlendirilmiştir. Bu amaçla zamana bağlı olarak belirtilen ısı transferi özelliklerinin değişimi açısından sonuçlar ortaya konmuştur.

Farklı hacimsel konsantrasyon değerleri için Al_2O_3 nanoparçacığının etkisi Maïga ve ark. (2004) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre düşük Peclet sayısında incelenmiştir. Buna göre elde edilen ara yüzey ısı akısı değerleri Şekil 4.51'de $t' = 0.26$ anı için verilmiştir. Belirtilen durumlarda üst akış bölgesinde önemli miktarda ısı transferinin gerçekleştiği görülmektedir. Bu etkinin akışa ters istikamette üst akış bölgesindeki belirli bir noktaya sürdüğü görülmektedir. Bu duruma ilave olarak radyal yöndeki iletimin sonucunda ara yüzeydeki ısı akısı öncelikle artmaktadır. Isı transferi etkisiyle akışkan bölgesinde de eksenel ısı iletimi artış göstermektedir ve bununla birlikte ara yüzey ısı akısı değerleri de azalma sürecine girmektedir. Alt akış bölgesinde ise ara yüzey ısı akısı değerlerinin artış göstererek maksimum değerine eriştiği ve bu tepe noktasından sonra da akış yönü boyunca azaldığı gözlemlenmektedir. Bu durumun sebebi, cidar ile nanoakışkan arasındaki sıcaklık farkının azalmasıdır. Bu yüksek değerlerle genel anlamda artan radyal ısı iletimi etkisinde ortalama ısı transferi de artmaktadır. İlgili sonuçlara göre ısı yayılma mesafesi üst akış bölgesinde $x' = -1$ 'e ulaşmaktayken, alt akış bölgesi için ısı gelişme mesafesi $x' = 1$ 'e uzanmaktadır. Artan hacimsel konsantrasyon değerleri neticesinde ara yüzey ısı akısı değerleri artmaktadır. Bu durum da ısı transferi artışının göstergesidir. Aynı boyutsuz zaman değerinde hacimsel konsantrasyon etkisi Al_2O_3 nanoparçacığı için Ho ve ark. (2010) tarafından kullanılan termofiziksel özellik modellerine göre de Şekil 4.52'de sunulmuştur. Isıl gelişme mesafesi bakımından benzer değerler sağlanmıştır. Isı transferi artışı da yakın oranlarda gözlemlenmiştir. Sürekli rejimde ara yüzey ısı akısı açısından bulunan sonuçlar Maïga ve ark. (2004) ile Ho ve ark. (2010) tarafından verilen termofiziksel özellik modelleri bakımından sırasıyla Şekil 4.53'te ve Şekil 4.54'te yer almaktadır. Nanoparçacık etkisi



Şekil 4.51. Maïga ve ark. (2004) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su- Al_2O_3 nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin $t' = 0.26$ anındaki karşılaştırılması

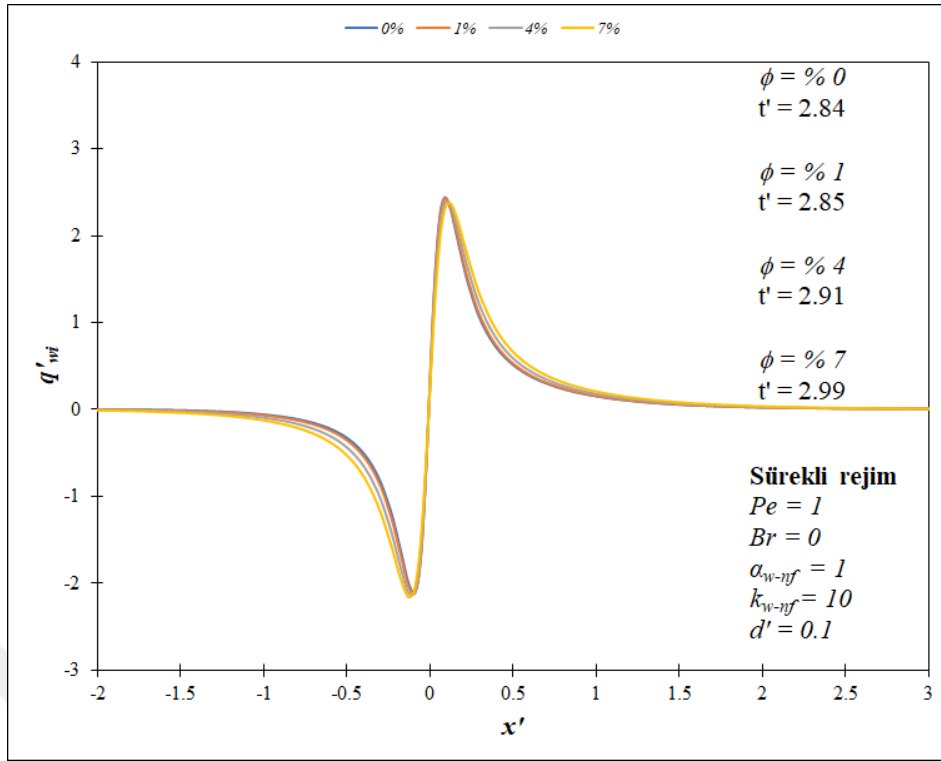


Şekil 4.52. Ho ve ark. (2010) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su- Al_2O_3 nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin $t' = 0.26$ anındaki karşılaştırılması

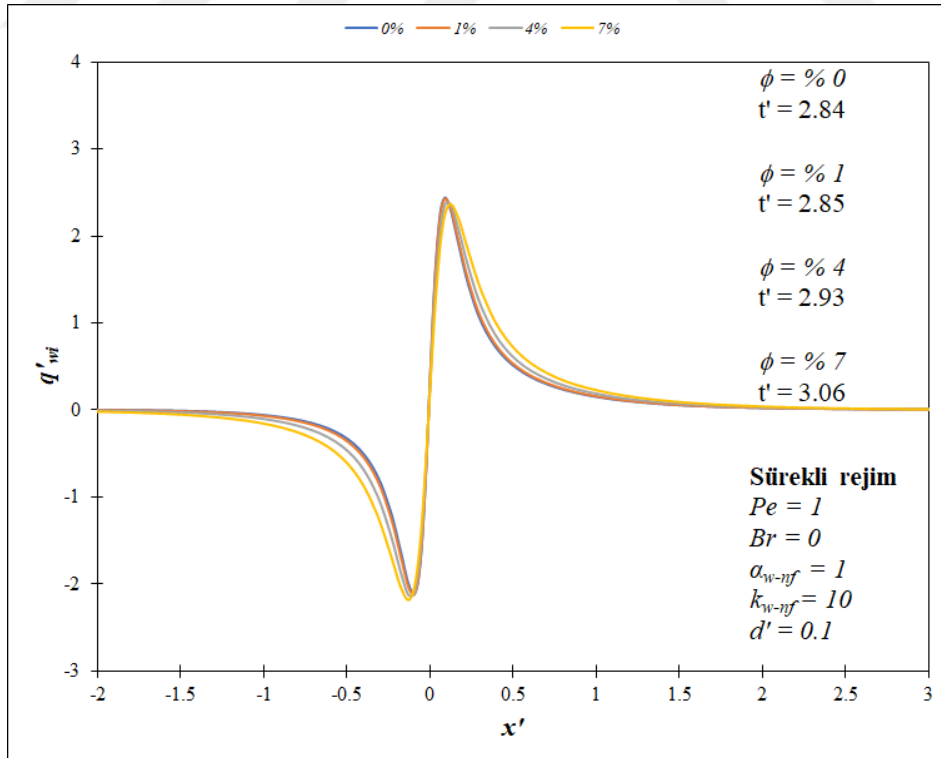
ısı gelişme mesafeleri öncesinde net bir şekilde görülmektedir. Her iki model de artan hacimsel konsantrasyon değerlerine göre elde edilen ısı transferinin artma eğilimini net bir biçimde ortaya koymaktadır. İlave olarak artan hacimsel konsantrasyon etkisi sürekli rejime ulaşma süresi de artış göstermekte olup, bu etki Ho ve ark. (2010) tarafından önerilen termofiziksel özellik modelleri ile sağlanan sonuçlarda daha baskındır. Sonuç olarak, minimum değer alt akış bölgesinde $q'_{wi} = 0$ olarak elde edilmektedir.

Ara yüzey sıcaklık değerleri açısından sürekli rejimde elde edilen sonuçlar Maïga ve ark. (2004) ile Ho ve ark. (2010) tarafından verilen termofiziksel özellik modellerine göre sırasıyla Şekil 4.55'te ve Şekil 4.56'da sunulmuştur. Üst akış bölgesinde aksel iletme ait etki aralığı geniş bir mesafeyi kapsamaktadır. Belirtilen aksel ısı iletimi etkisinde ara yüzey sıcaklığı değerleri ısıtma başlangıcını temsil eden $x' = 0$ noktasının çok daha öncesinde artmaktadır. Düşük Peclet sayısındaki nanoparçacık etkisi $x' = 0$ etrafında açık bir şekilde gözlemlenmektedir. Artan hacimsel konsantrasyon değerleriyle ısı transferinin artış eğilimi ara yüzey sıcaklık değerleri ile görülmektedir. Sonuç anlamında ara yüzey sıcaklığı değerleri alt akış bölgesinde $\theta_{wi} = 1$ değerine asimptotik olarak erişmektedir. Artan hacimsel konsantrasyon etkisi sürekli rejime erişme süresini artırmaktadır. Buna göre Maïga ve ark. (2004) tarafından önerilen termofiziksel özellik modelleri ile elde edilen sonuçlarda bu artış göreceli olarak daha azdır. Ayrıca % 4 ve % 7 hacimsel konsantrasyon değerlerinde bu farklılık meydana gelmektedir.

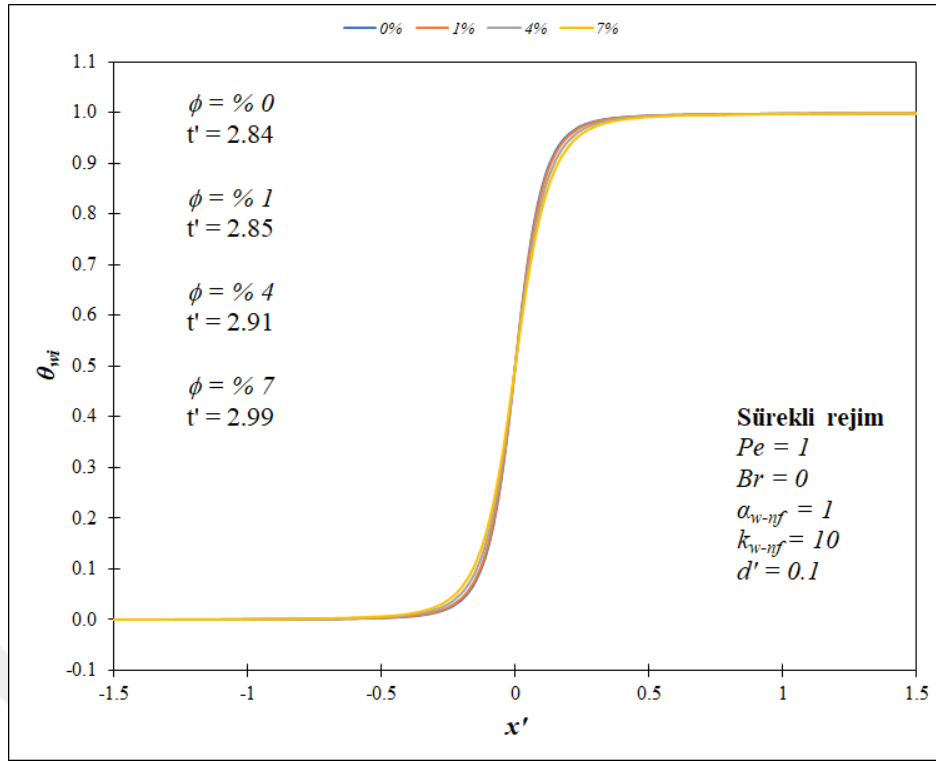
Sürekli rejimde yığık sıcaklık değerleriyle saptanan sonuçlar Maïga ve ark. (2004) ile Ho ve ark. (2010) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre sırasıyla Şekil 4.57'de ve Şekil 4.58'de düşük Peclet sayısı için verilmiştir. Nanoparçacığın ısı transferine yoğun etkisi $-1 \leq x' \leq 1$ aralığında açık bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Sürekli rejimin sağlanmasından önceki ara yüzey sıcaklık değerleri ile kıyaslandığında aynı konumda daha düşük değerler elde edilmektedir. Bu durum sebebi ilgili konumda ısı transferinin devam etmesidir. Ancak sürekli rejim koşullarında yığık sıcaklık değerleri alt akış bölgesinde $\theta_b = 1$ değerine varmaktadır. Bu da artış gösteren hacimsel konsantrasyon değerlerinin sonucu olarak ısı transferinin de artışını sağlamaktadır. Diğer sonuçlarda da ifade edildiği üzere, hacimsel konsantrasyon oranı azaldıkça sürekli rejime ulaşma süresi de daha az olmaktadır. Ayrıca $\phi \leq \% 1$ olan hacimsel konsantrasyon değeri için sürekli rejime ulaşma süresinin değişmediği görülmekteyse de artan hacimsel konsantrasyon etkisinde bu süre de artmaktadır ve bu artış Ho ve ark. (2010) tarafından kullanılan modellerle elde edilen sonuçlarda daha da fazladır.



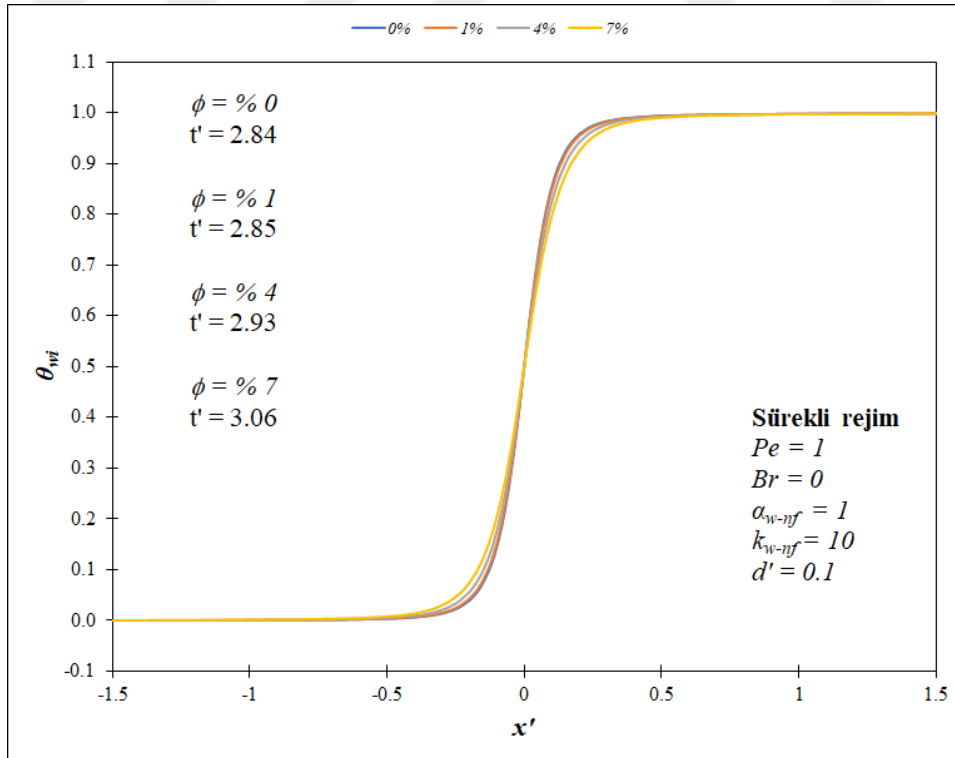
Şekil 4.53. Mağa ve ark. (2004) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su- Al_2O_3 nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



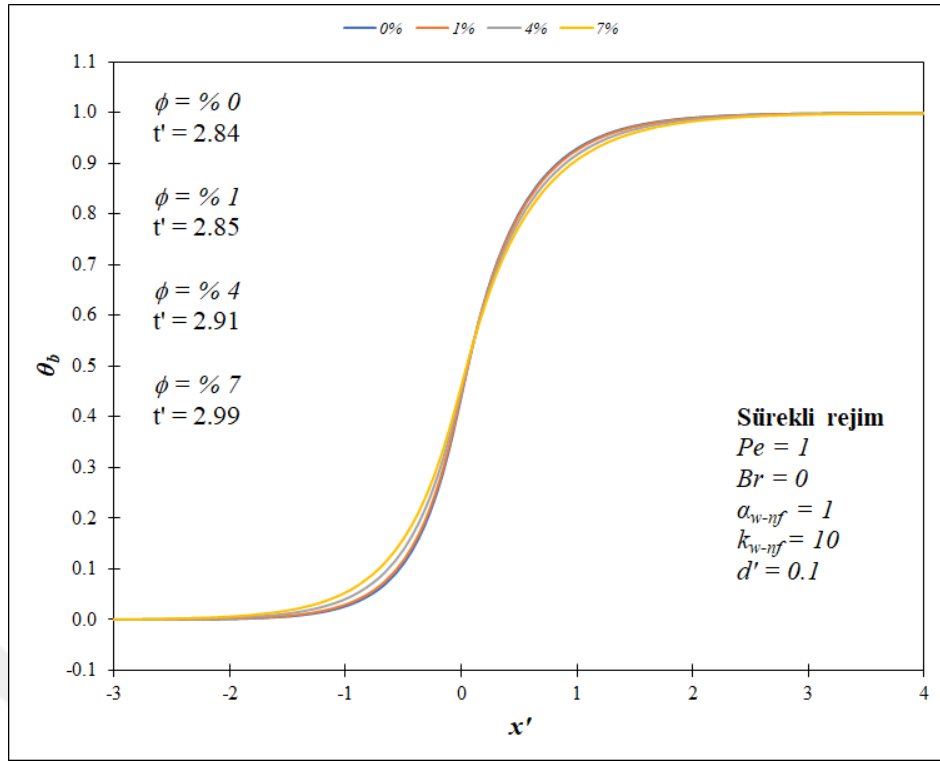
Şekil 4.54. Ho ve ark. (2010) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su- Al_2O_3 nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



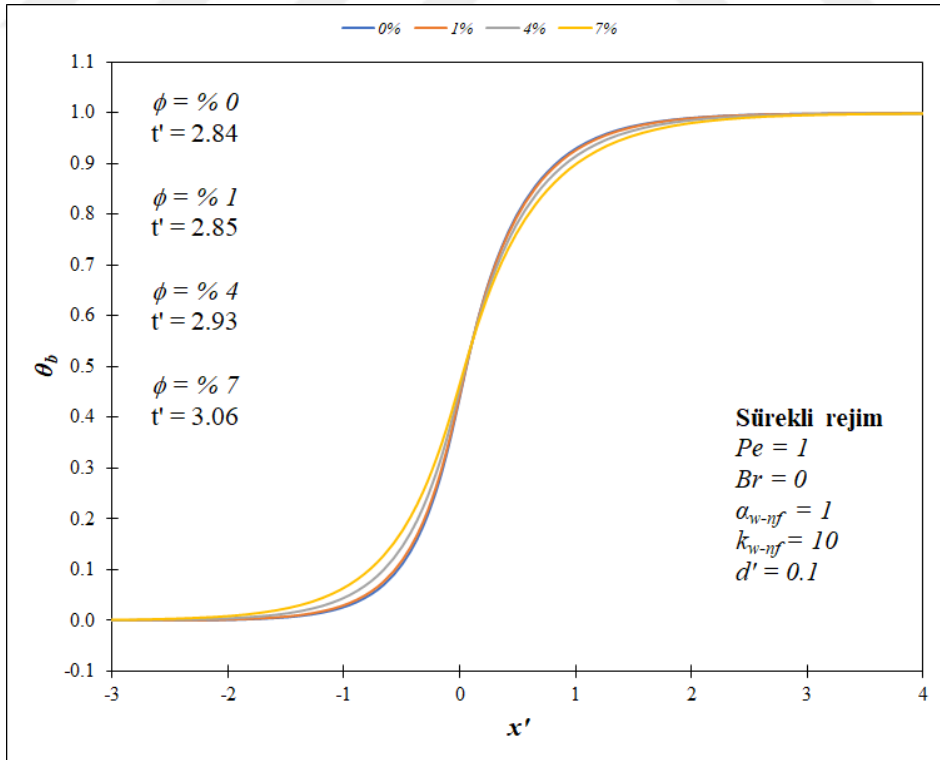
Şekil 4.55. Maïga ve ark. (2004) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su- Al_2O_3 nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey sıcaklığına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



Şekil 4.56. Ho ve ark. (2010) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su- Al_2O_3 nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey sıcaklığına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



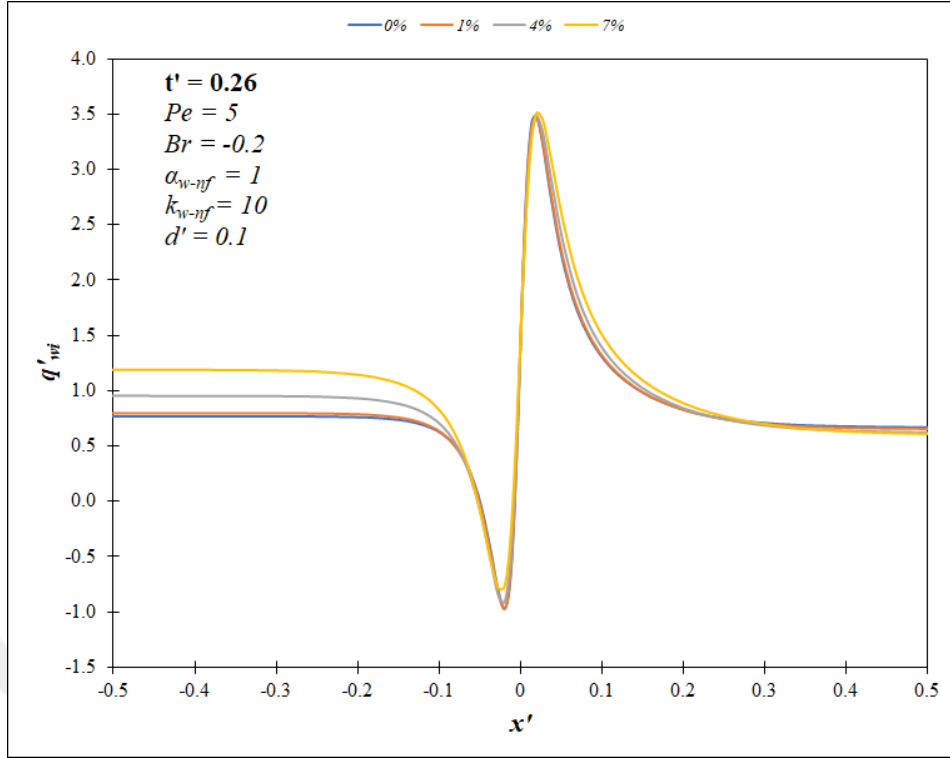
Şekil 4.57. Maïga ve ark. (2004) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su- Al_2O_3 nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin yığık sıcaklığa etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



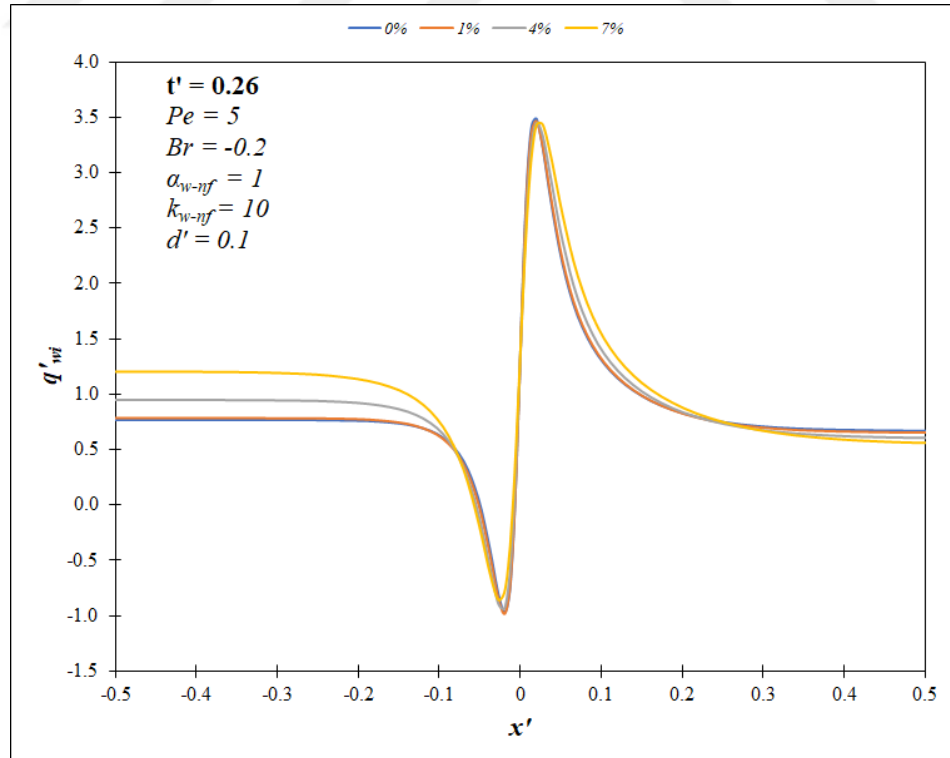
Şekil 4.58. Ho ve ark. (2010) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su- Al_2O_3 nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin yığık sıcaklığa etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması

Farklı hacimsel konsantrasyonlar için Maïga ve ark. (2004) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre Al_2O_3 nanoparçacığının etkisi viskoz yitim göz önüne alınarak incelenmiştir. Bu hususta elde edilen ara yüzey ısı akısı değerleri $t' = 0.26$ anı için Şekil 4.59'da verilmiştir. İlgili sonuçlar incelendiğinde ısı yayılma mesafesi üst akış bölgesinde $x' = -0.2$ 'e varmaktayken, alt akış bölgesi için ısı gelişme $x' = 0.4$ ile sağlanmaktadır. Hacimsel konsantrasyon değerlerinin artması neticesinde ara yüzey ısı akısı değerlerin de artış gözlemlenmektedir. Saptanan bu durum ısı transferi iyileştirmesinin göstergesidir. Hacimsel konsantrasyon etkisi Al_2O_3 nanoparçacığı için aynı boyutsuz zaman değerinde Ho ve ark. (2010) tarafından kullanılan termofiziksel özellik modellerine göre Şekil 4.60 sunulmuştur. Isıl gelişme uzunluğu açısından birbirine yakın değerler sağlanmıştır. Isı transferi artışı da benzer değerlerde gözlemlenmiştir. Ayrıca ısı transferi yönünün Brinkman sayısına bağlı olarak etkilenmesi üst akış bölgesindeki sonuçlara yansımıştır. Sürekli rejimde elde edilen ara yüzey ısı akısı değerlerine Maïga ve ark. (2004) ile Ho ve ark. (2010) tarafından verilen termofiziksel özellik modelleri bakımından sırasıyla Şekil 4.61'de ve Şekil 4.62'de yer verilmiştir. Hem cidar hem de nanoakışkan açısından eksenel ısı iletimi etkisinde üst akış bölgesine doğru göz ardı edilemeyecek miktarda ısının transferi söz konusudur. Boyutsuz zaman değeri $t' = 0.26$ 'daki durum ile karşılaştırıldığında, sürekli rejime ulaşıncaya kadar ısı geçişinin akış yönüne ters yöndeki hareketinin girişe doğru sürdüğü ve bu durumun da ön ısıtma uzunluğunu artırdığı görülmektedir. Nanoparçacığın ısı transferine etkisi ısı gelişme mesafeleri öncesinde açıkça görülmektedir. Sonuçta, ara yüzey ısı akısı değerleri alt akış bölgesinde $q'_{wi} = 0$ değerine asimptotik olarak ulaşmaktadır. Artan hacimsel konsantrasyon değerlerine göre elde edilen ısı transferinin artma eğilimi her iki model yardımıyla bulunmaktadır. Brinkman sayısı etkisinde artan hacimsel konsantrasyonla sürekli rejime ulaşma süresi azalmıştır. Bu etki Ho ve ark. (2010) tarafından verilen termofiziksel özellik modelleri ile elde edilen sonuçlarda daha baskın eğilime neden olmaktadır.

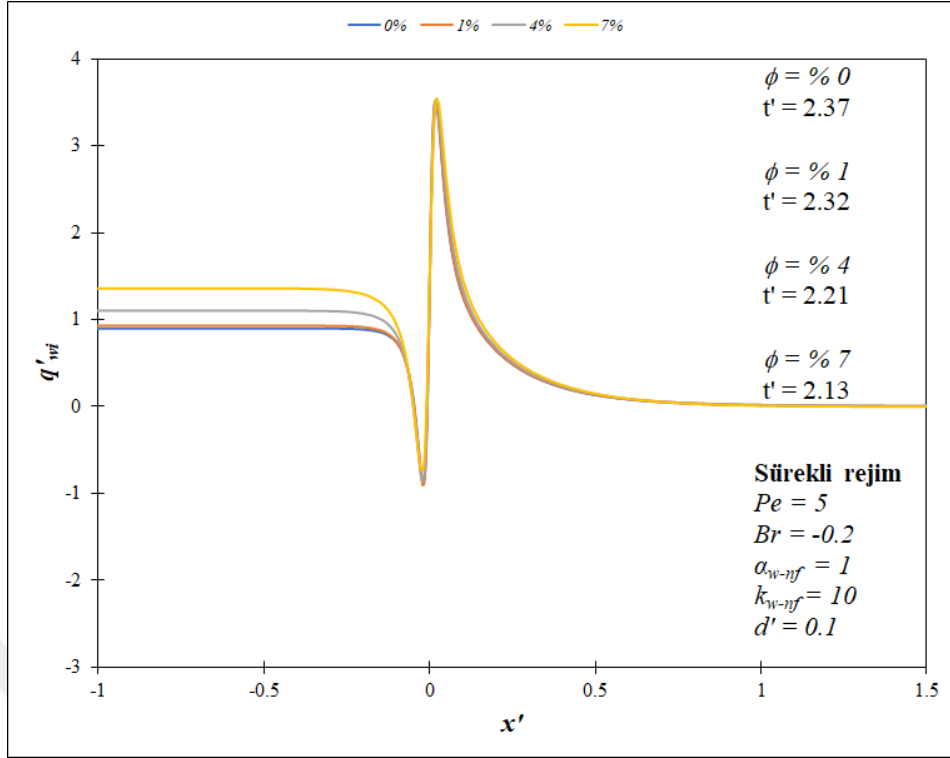
Viskoz yitim etkisindeki ara yüzey sıcaklık değerleri açısından sürekli rejim sonuçları Maïga ve ark. (2004) ile Ho ve ark. (2010) tarafından verilen termofiziksel özellik modellerine göre sırasıyla Şekil 4.63'te ve Şekil 4.64'te gösterilmiştir. Nanoparçacık etkisi $x' = 0$ etrafında gözlemlenmektedir. Bu etki viskoz yitim açısından ara yüzey ısı akısındaki kadar bariz değildir. Ancak hacimsel konsantrasyon değerlerindeki artışın bir sonucu olarak ısı transferinin artış eğilimi ara yüzey sıcaklık değerleri ile de görülmektedir. Fakat ısı transferi etkisi sürekli rejime ulaşıldıktan sonra



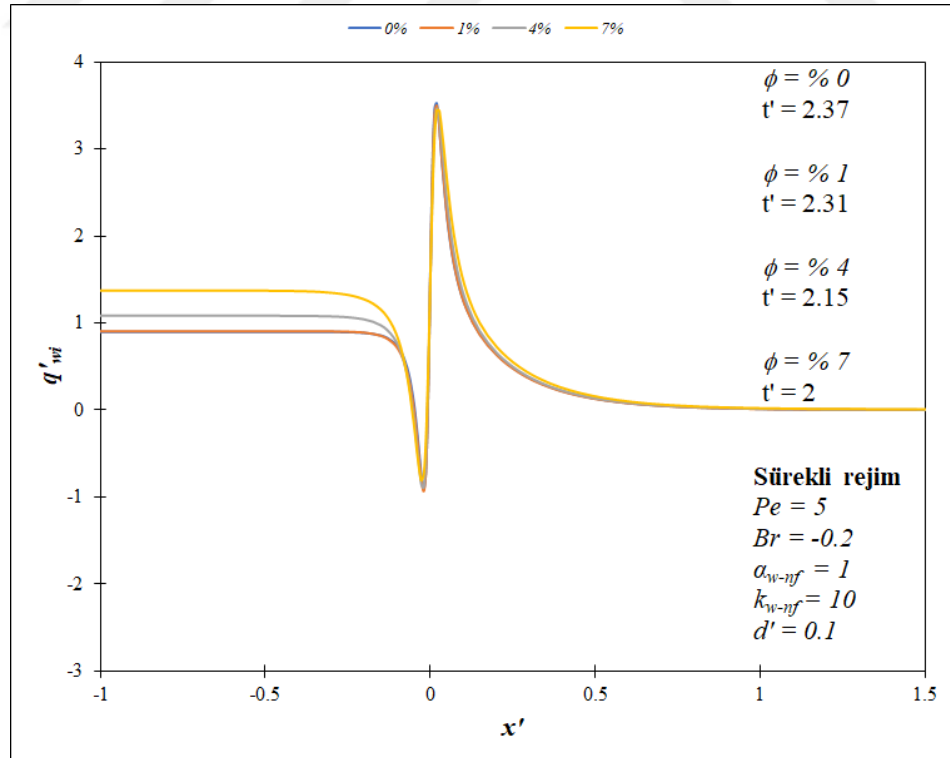
Şekil 4.59. Maıga ve ark. (2004) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su- Al_2O_3 nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin $t' = 0.26$ anındaki karşılaştırılması



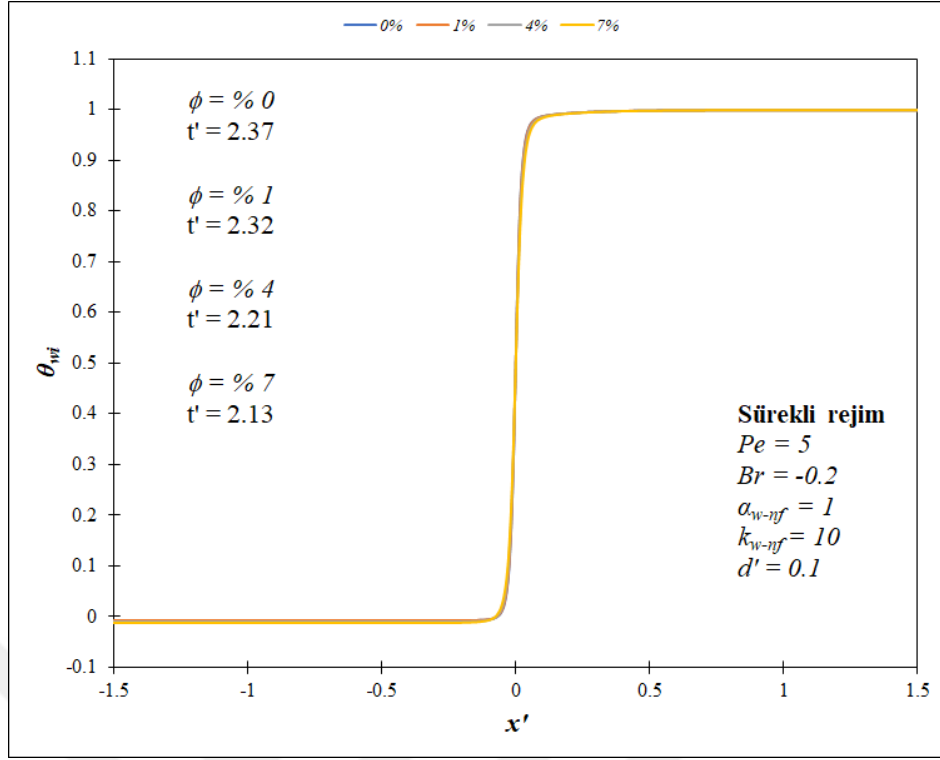
Şekil 4.60. Ho ve ark. (2010) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su- Al_2O_3 nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin $t' = 0.26$ anındaki karşılaştırılması



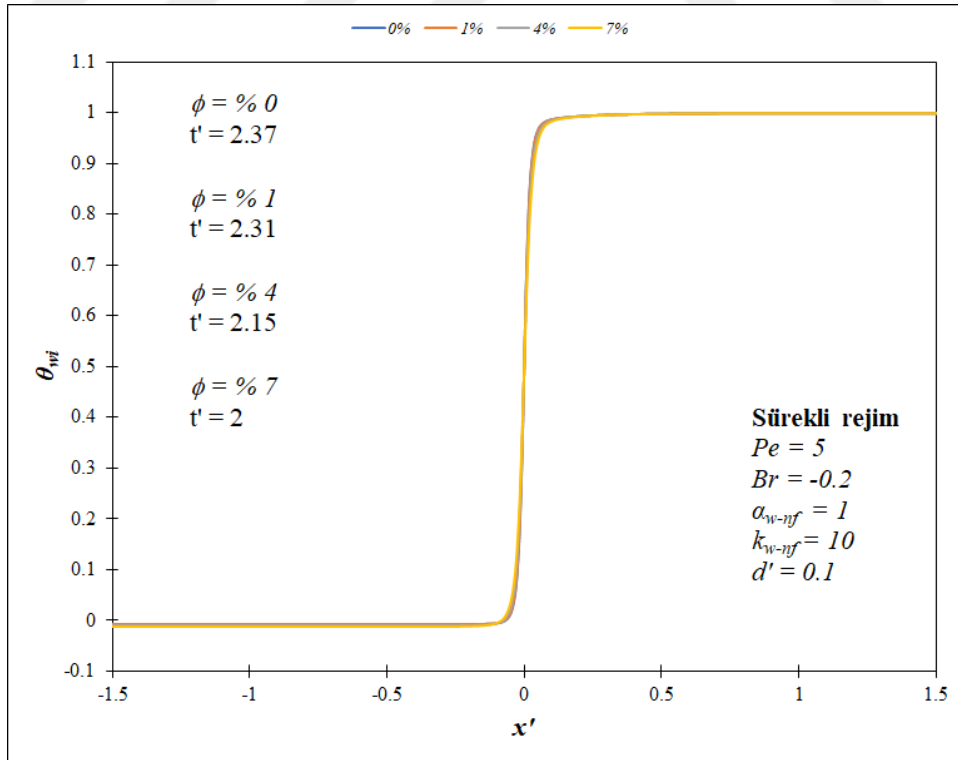
Şekil 4.61. Maïga ve ark. (2004) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su- Al_2O_3 nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



Şekil 4.62. Ho ve ark. (2010) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su- Al_2O_3 nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



Şekil 4.63. Maïga ve ark. (2004) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su- Al_2O_3 nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey sıcaklığına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması

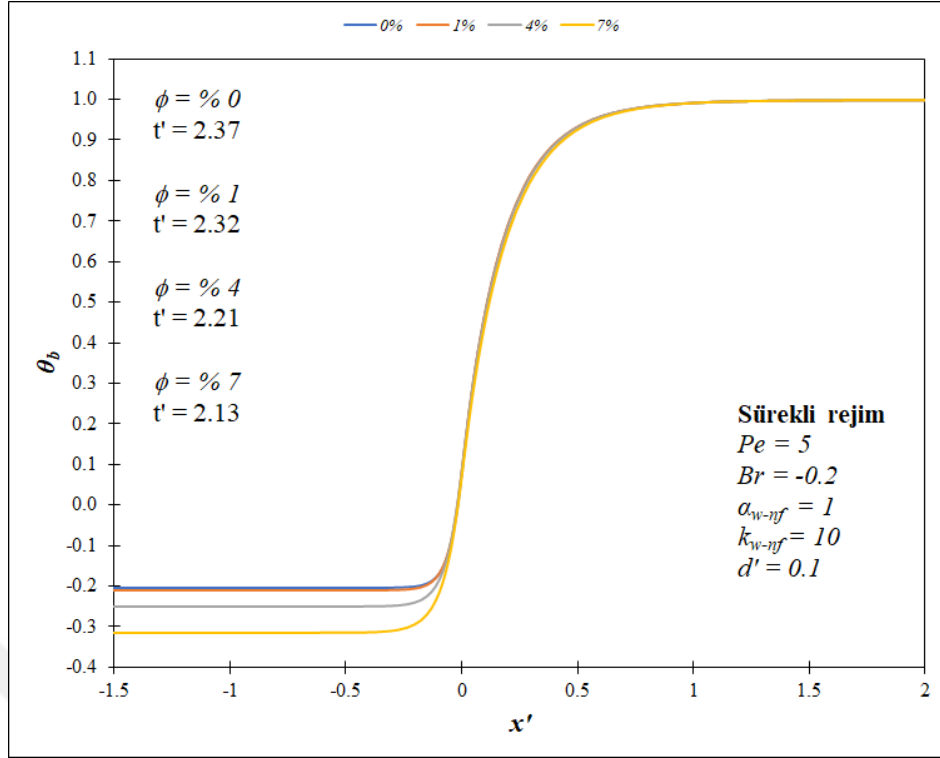


Şekil 4.64. Ho ve ark. (2010) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su- Al_2O_3 nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey sıcaklığına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması

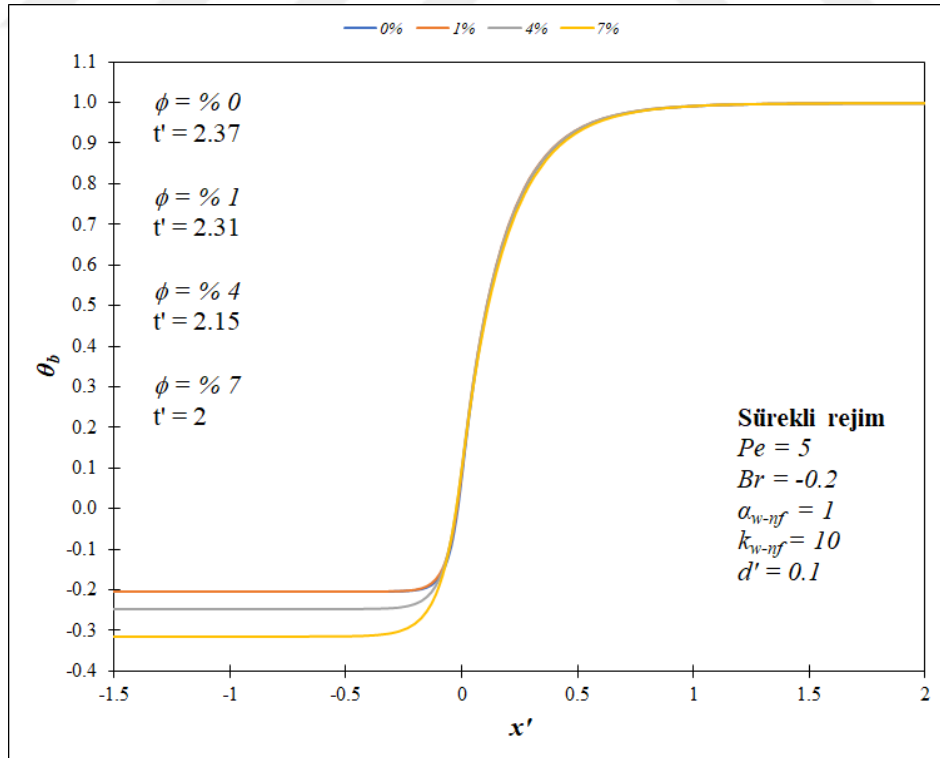
sıcaklık farkı azalması ile ortadan kalkmaktadır. Bu da ara yüzey sıcaklığı değerlerinin belirli bir aksenal mesafeden sonra $\theta_{wi} = 1$ değerine ulaşması ile görülmektedir. Artan hacimsel konsantrasyon etkisi sürekli rejime erişme süresini azaltmaktadır. Buna göre Maıga ve ark. (2004) tarafından önerilen termofiziksel özellik modelleri ile elde edilen sonuçlarda bu azalma göreceli olarak daha azdır. Bunun yanı sıra % 4 ve % 7 hacimsel konsantrasyon değerleri için bu farklılık ortaya çıkmaktadır.

Yığık sıcaklık değerleri açısından sürekli rejimde saptanan sonuçlar Maıga ve ark. (2004) ile Ho ve ark. (2010) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre sırasıyla Şekil 4.65'te ve Şekil 4.66'da viskoz yitim tesirinde verilmiştir. Üst akış bölgesinde ısı transferi yönünde değişme söz konusudur. Bu durum da negatif Brinkman sayısından kaynaklanmaktadır. Buna rağmen nanoparçacığın ısı transferine olan etkisi $-0.5 \leq x' \leq 0.5$ aralığında belirgin bir şekildedir. Bu da artış gösteren hacimsel konsantrasyon değerlerinin sonucu olarak nanoakışkan kullanımı sonrasındaki ısı transferi iyileştirmesini sağlamaktadır. Böylelikle ısı performans artışı sağlandıktan sonra yığık sıcaklık değerleri $\theta_b = 1$ değerine erişmektedir. Diğer durumlara ait sonuçlarda da ifade edildiği üzere, hacimsel konsantrasyon oranı azaldıkça sürekli rejime erişme süresi de daha fazla olmaktadır. Ayrıca bu azalma yüzdesi Ho ve ark. (2010) tarafından kullanılan modellerle elde edilen sonuçlarda daha da fazladır.

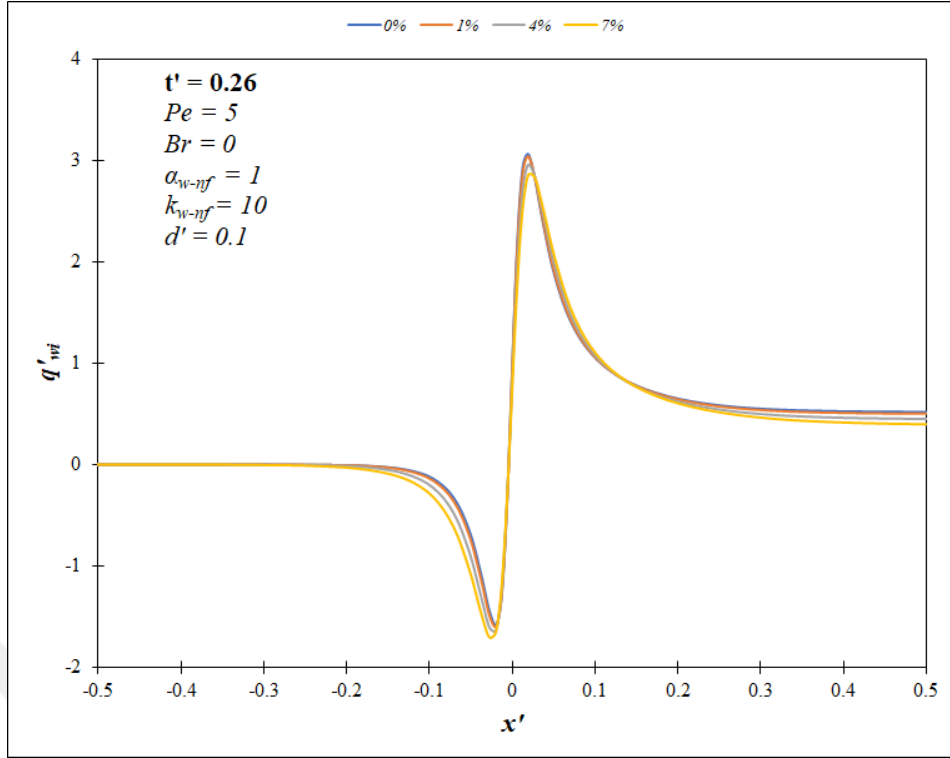
Eksenal ısı iletim etkisi bakımından $Pe = 5$ için farklı hacimsel konsantrasyonlarda Maıga ve ark. (2004) tarafından sunulan termofiziksel özellik modellerine göre Al_2O_3 nanoparçacığının etkisi araştırılmıştır. Elde edilen ara yüzey ısı akısı değerleri $t' = 0.26$ anı için Şekil 4.67'de verilmiştir. İlgili sonuçlar incelendiğinde ısı yayılmanın ulaştığı nokta üst akış bölgesinde $x' = -0.2$ iken, alt akış bölgesi için ısı gelişme mesafesi $x' = 0.4$ 'e uzanmaktadır. Hacimsel konsantrasyonun artması sonucunda ara yüzey ısı akısı değerleri artmaktadır ve bu durum ısı performans artışının neticesidir. Al_2O_3 nanoparçacığı için hacimsel konsantrasyonun sonuçlara etkisi $t' = 0.26$ anı için Ho ve ark. (2010) tarafından kullanılan termofiziksel özellik modellerine göre Şekil 4.68'de sunulmuştur. Isı gelişme uzunluğu için elde edilen değerler birbirine yakın olarak gözlemlenmektedir. Isı transferi artış yüzdesi de benzer şekildedir. Sürekli rejime ait ara yüzey ısı akısı değerleri Maıga ve ark. (2004) ile Ho ve ark. (2010) tarafından verilen termofiziksel özellik modelleri bakımından sırasıyla Şekil 4.69'da ve Şekil 4.70'te sunulmuştur. Üst akış bölgesinde aksenal ısı iletiminin etkisi sürmektedir. Ancak bu etki $Pe = 1$ 'deki durum ile karşılaştırıldığında daha azdır. Bu bölgede önemli oranda ısı transferinin gerçekleştiği, akışa ters yöndeki bu etki aralığı sayesinde gözlemlenmektedir.



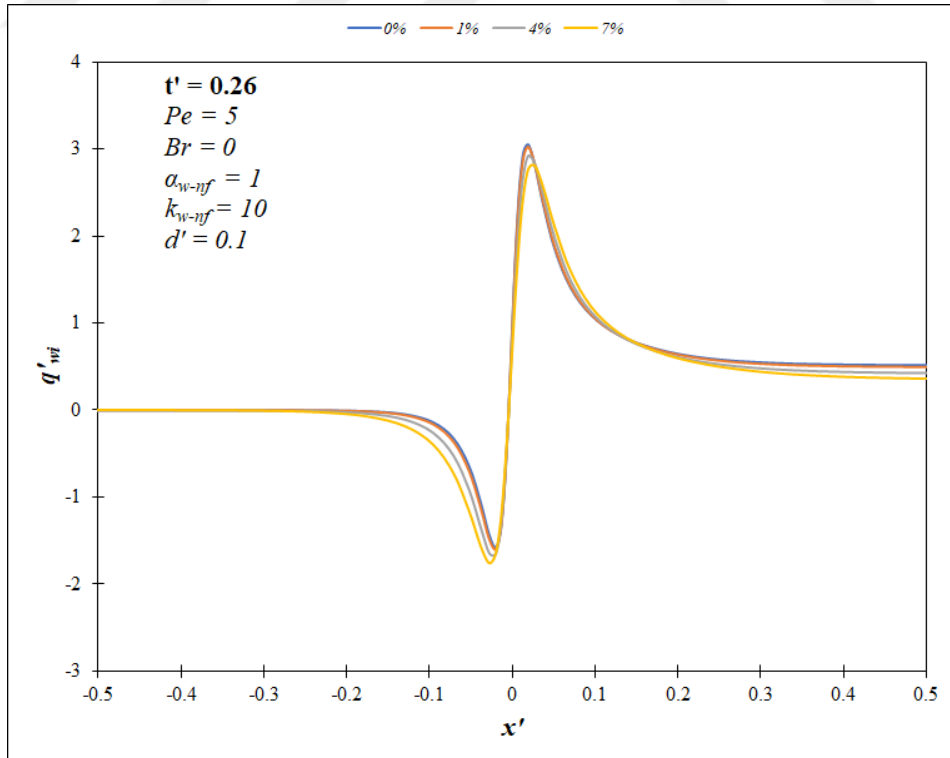
Şekil 4.65. Maïga ve ark. (2004) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su- Al_2O_3 nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin yığık sıcaklığa etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



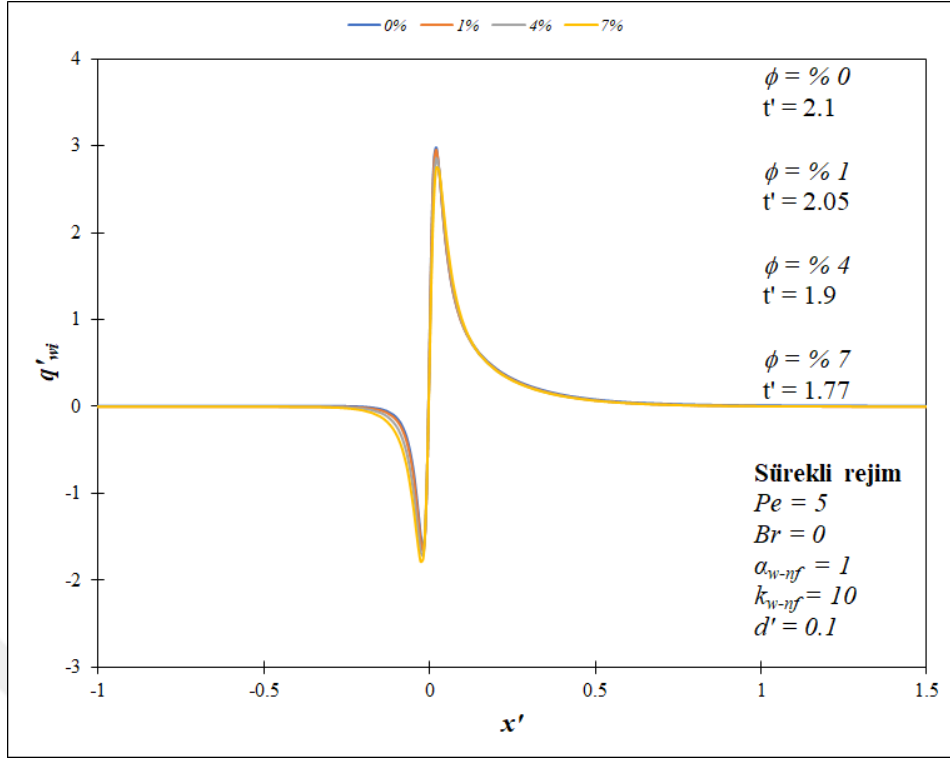
Şekil 4.66. Ho ve ark. (2010) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su- Al_2O_3 nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin yığık sıcaklığa etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



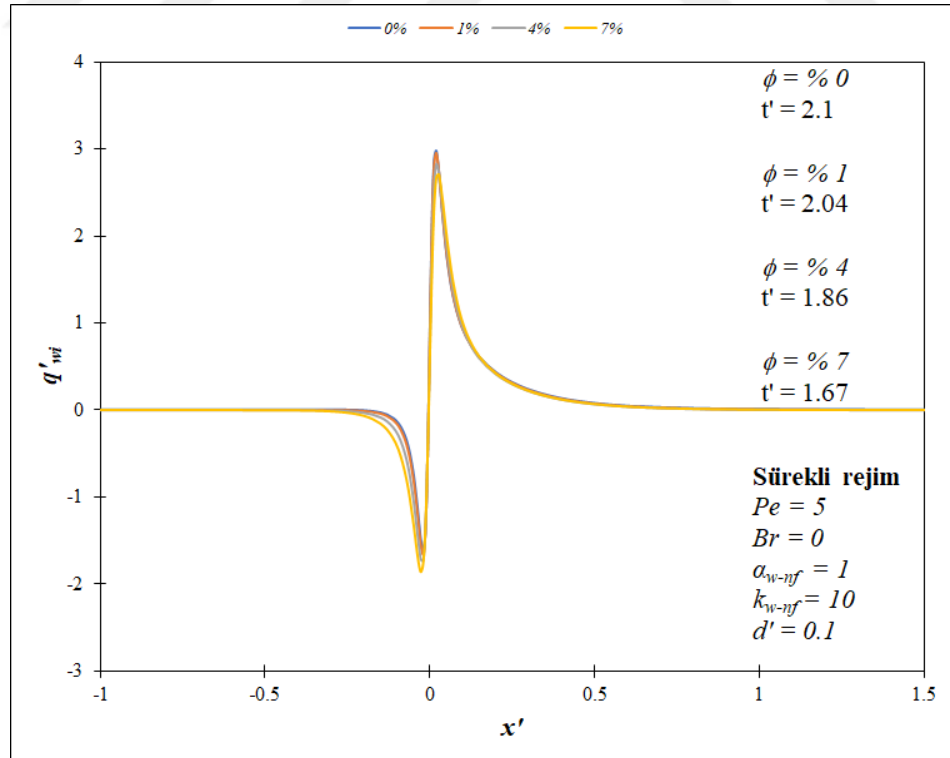
Şekil 4.67. Maïga ve ark. (2004) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su- Al_2O_3 nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin $t' = 0.26$ anındaki karşılaştırılması



Şekil 4.68. Ho ve ark. (2010) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su- Al_2O_3 nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin $t' = 0.26$ anındaki karşılaştırılması



Şekil 4.69. Maïga ve ark. (2004) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su- Al_2O_3 nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması

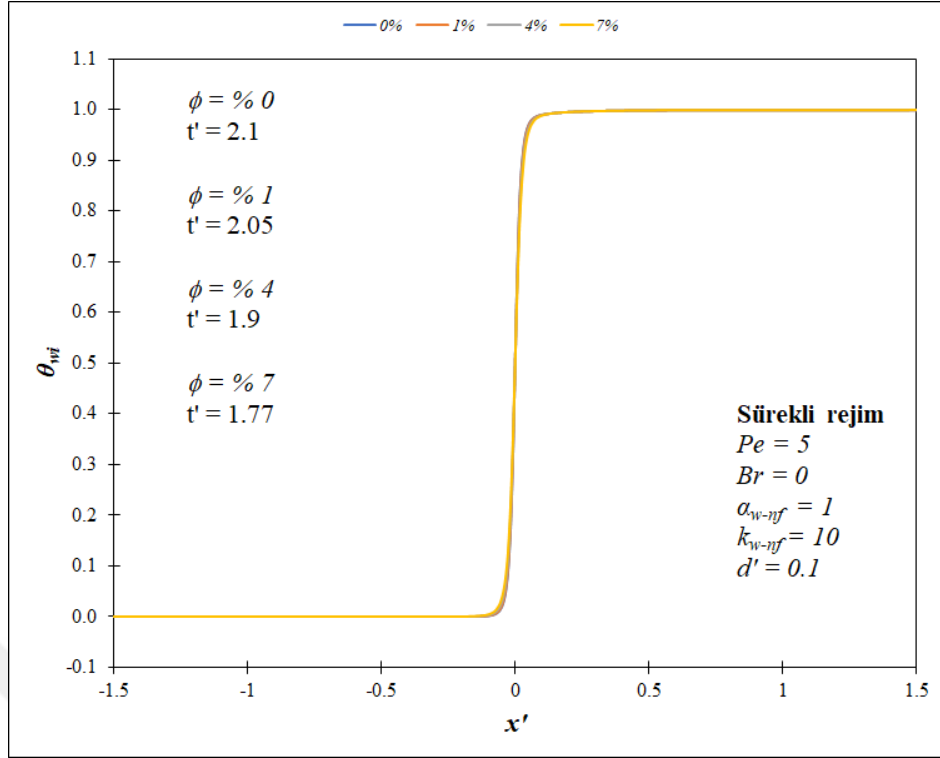


Şekil 4.70. Ho ve ark. (2010) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su- Al_2O_3 nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması

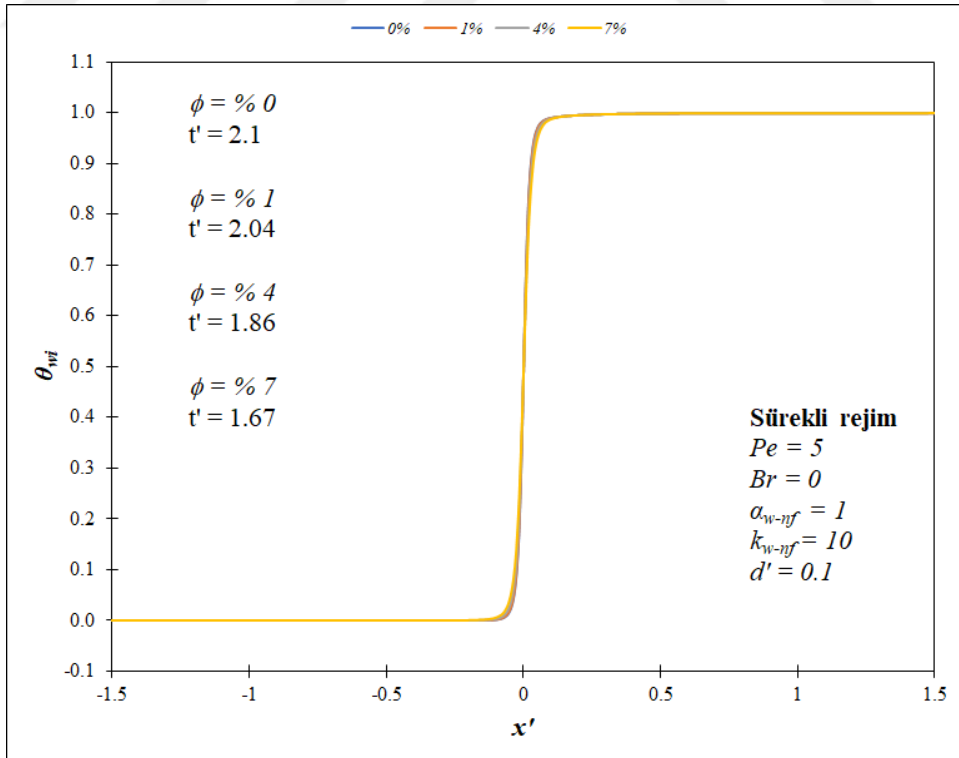
Buna ek olarak yarıçap boyunca eksene doğru iletimin neticesinde ara yüzeydeki ısı akısı değerleri artış sağlamaktadır. Isı transferi sonucu nanoakışkan için aksel ısı iletimi artarak, ara yüzey ısı akısı değerlerinin azalmasına yol açmaktadır. Isıtma başlangıç noktasından sonra ise ara yüzey ısı akısı değerlerinin artış göstererek maksimum bir değere ulaştığı ve en yüksek değerden sonra çıkışa doğru aksel yönde azalma kaydettiği sonucu elde edilmektedir. Buradaki asıl etki cidar ile nanoakışkan arasındaki sıcaklık farkının azalması olarak nitelendirilmektedir. Maksimum değerlerin etkisinde ortalama ısı transferinin de artış gösterdiği saptanmaktadır. Isı transferine etki açısından nanoparçacık kullanımı ısı gelişme mesafeleri öncesinde net bir biçimde fayda sağlamaktadır. Artan hacimsel konsantrasyon değerlerine göre ısı transferi artışı her iki modelle bulunmaktadır. Artan hacimsel konsantrasyon etkisinde sürekli rejime ulaşma süresi de azalmıştır. Bahsedilen bu durum Ho ve ark. (2010) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine ait sonuçlarda daha baskın bir şekilde ortaya çıkmaktadır.

Ara yüzey sıcaklık değerleri açısından $Pe = 5$ 'teki sürekli rejim sonuçları Maïga ve ark. (2004) ile Ho ve ark. (2010) tarafından verilen termofiziksel özellik modellerine göre sırasıyla Şekil 4.71'de ve Şekil 4.72'de gösterilmiştir. Üst akış bölgesinde aksel ısı iletimi etkisi $Pe = 1$ 'deki kadar geniş aralığı kapsamamaktadır. Bu tesirin neticesinde ara yüzey sıcaklığı değerleri, sabit yüzey sıcaklığıyla asıl ısıtmanın başlangıcı olan $x' = 0$ noktasının öncesinde artış eğilimine girmektedir. Buradaki nanoparçacık etkisi $x' = 0$ etrafında belirgin bir şekildedir. Artan hacimsel konsantrasyonlarla ısı geçişinin iyileştirilmesi ara yüzey sıcaklık değerleri ile gözlemlenmektedir. Netice olarak bu değerler alt akış bölgesinde $\theta_{wi} = 1$ 'e asimptotik anlamda erişmektedir. Artan hacimsel konsantrasyonla sürekli rejime ulaşma için gereken süre de azaltılmaktadır. Maïga ve ark. (2004) tarafından verilen termofiziksel özellik modelleri ile elde edilen sonuçlarda bu azalma daha azdır.

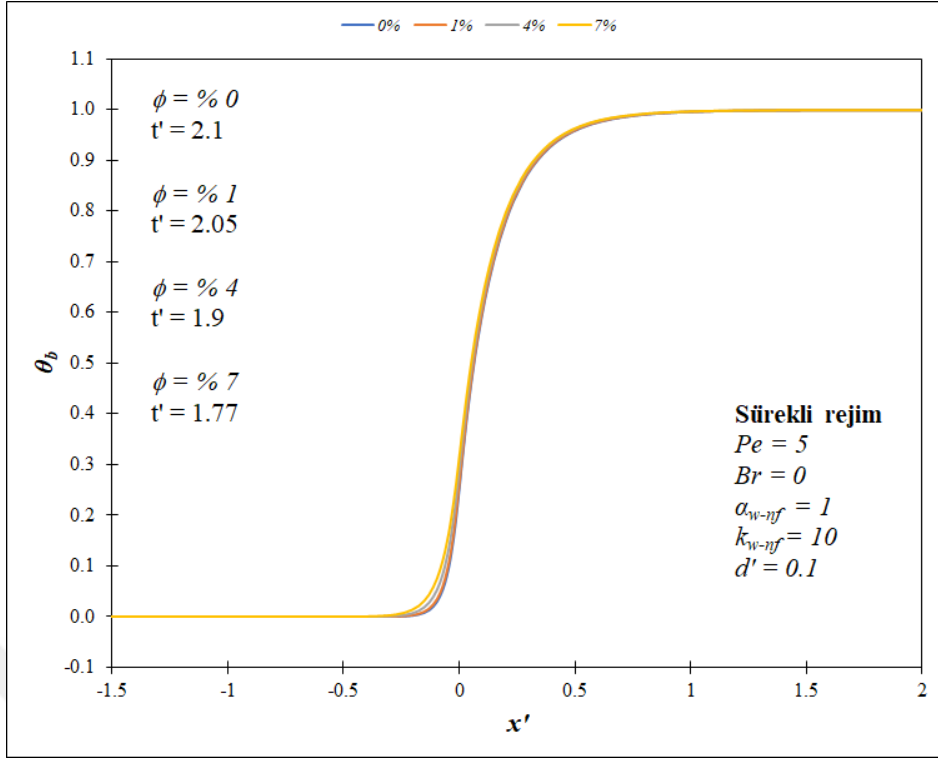
Yığık sıcaklık değerlerinin sürekli rejimdeki sonuçları Maïga ve ark. (2004) ile Ho ve ark. (2010) tarafından önerilen termofiziksel özellik modelleri için sırasıyla Şekil 4.73'te ve Şekil 4.74'te verilmiştir. Isıl gelişmenin öncesinde ara yüzey sıcaklık değerleri ile aynı aksel konumda karşılaştırıldığında göreceli olarak daha düşük değerler görülmektedir. Bu hususta belirtilen sonucun sebebi ısı transferinin kıyaslama noktasında sürmesidir. Bu sürecin sonrasında yığık sıcaklık değerleri beklenen üzere alt akış bölgesinde $\theta_b = 1$ değerine erişmektedir. Nanoparçacığın $-0.5 \leq x' \leq 0.5$ aralığı için ısı



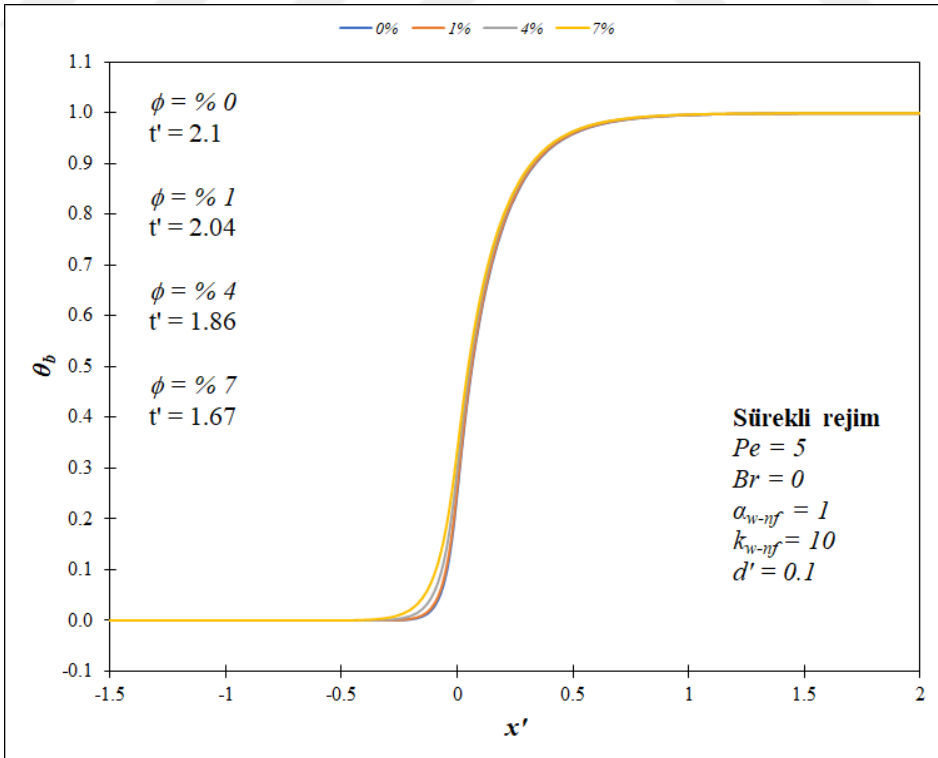
Şekil 4.71. Maïga ve ark. (2004) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su- Al_2O_3 nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey sıcaklığına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



Şekil 4.72. Ho ve ark. (2010) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su- Al_2O_3 nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı sıcaklığına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



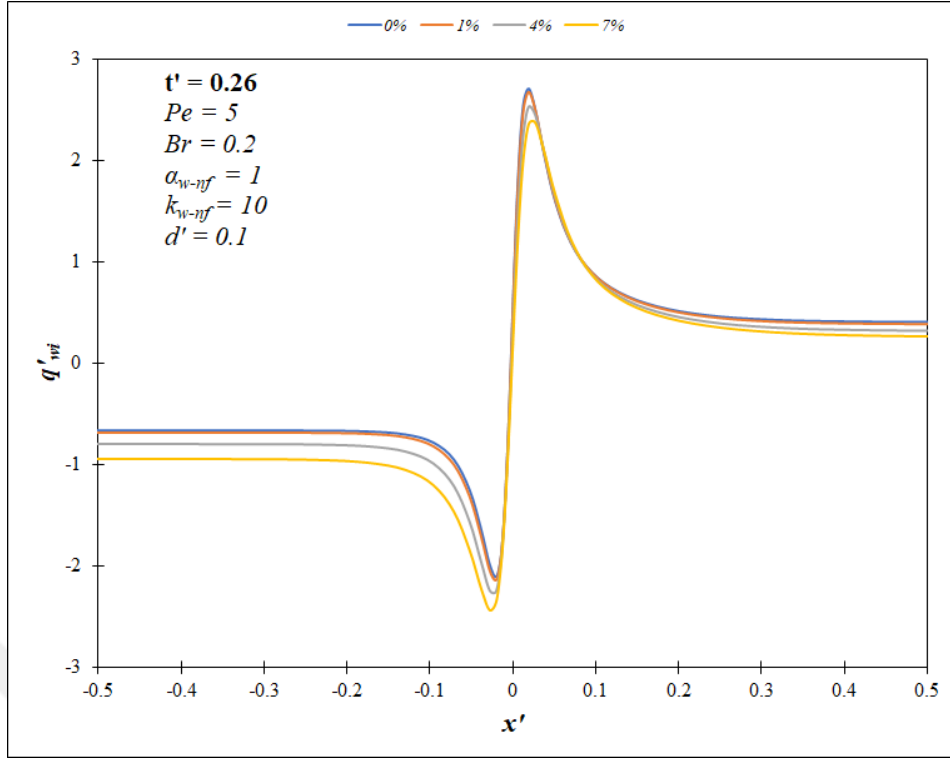
Şekil 4.73. Maıga ve ark. (2004) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su- Al_2O_3 nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin yığık sıcaklığa etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



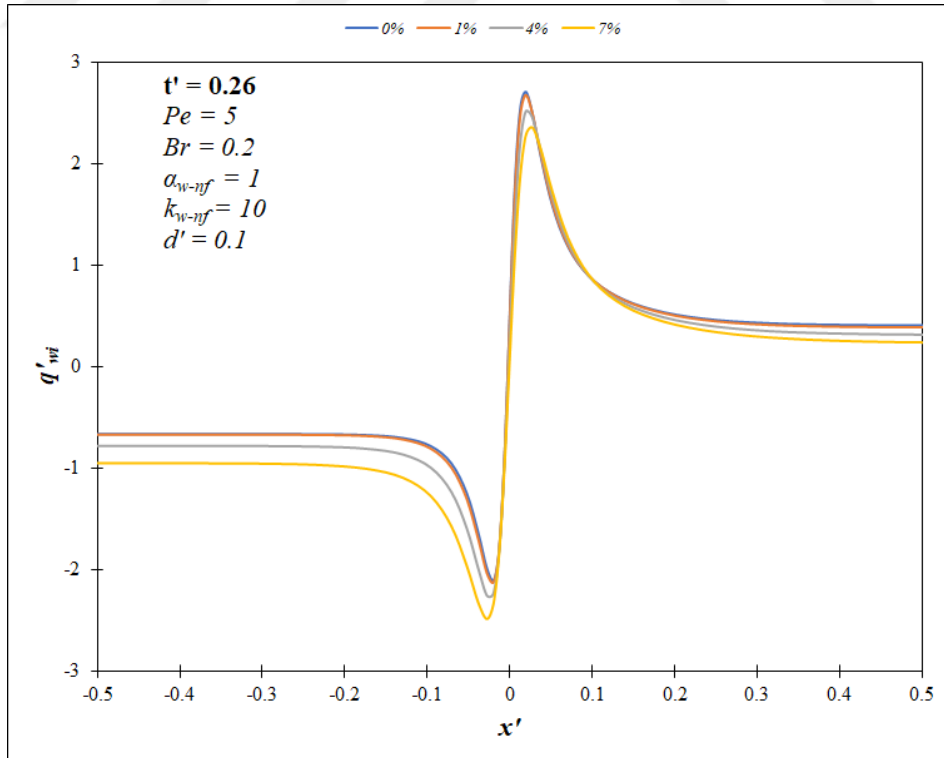
Şekil 4.74. Ho ve ark. (2010) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su- Al_2O_3 nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin yığık sıcaklığa etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması

transferine tesiri daha belirgindir. Artan hacimsel konsantrasyon değerlerinin neticesi olarak nanoakışkan etkisiyle ısı transferi iyileştirmesi sağlanmaktadır. Hacimsel konsantrasyon oranı azaldıkça sürekli rejime erişme süresi de daha fazla elde edilmektedir. Buradaki azalma oranı Ho ve ark. (2010) tarafından kullanılan modeller için daha çoktur.

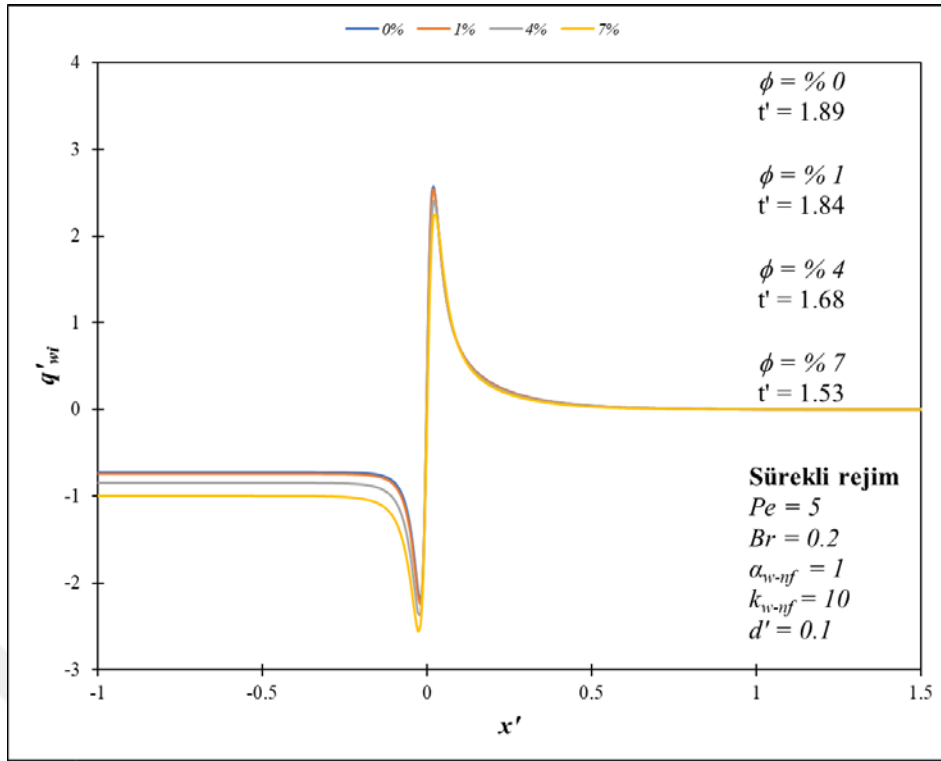
Maïga ve ark. (2004) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre farklı hacimsel konsantrasyonlar için Al_2O_3 nanoparçacığının etkisi viskoz yitim göz önüne alınarak araştırılmıştır. Elde edilen ara yüzey ısı akısı değerleri $t' = 0.26$ anı için Şekil 4.75'te verilmiştir. Buna göre üst akış bölgesinde ısı olarak yayılma $x' = -0.15$ 'e kadarken, alt akış bölgesi için ısı gelişme mesafesi $x' = 0.35$ 'e kadardır. Hacimsel konsantrasyonun artmasıyla ara yüzey ısı akısı değerleri de artmaktadır. Bu durum ısı transferi artışın kaynaklanmaktadır. Hacimsel konsantrasyon etkisi Al_2O_3 nanoparçacığı için aynı boyutsuz zaman değerinde Ho ve ark. (2010) tarafından önerilen termofiziksel özellik modelleri için Şekil 4.76'daki sonuçlar sunulmuştur. Isıl gelişme uzunluğu bakımında yakın değerler bulunmuştur. Isı transferi iyileştirmesi için de benzer değerler gözlemlenmiştir. Isı transferi yönünün Brinkman sayısına bağlı olarak değişimi üst akış bölgesindeki sonuçlara yansımıştır. Cidar ve nanoakışkan bölgelerinde eksenel ısı iletimi neticesinde ısıtılmayan kısma doğru önemli miktarda ısı geçişi vardır. Sürekli rejim sağlanmadan önce ısı transferinin akışa zıt yöndeki ilerlemesinin girişe istikametinde devam ederek, ön ısıtma mesafesini artıran bir etki oluşturduğu gözlemlenmektedir. Nanoparçacığın ısı performansına olan önemli tesiri ısı gelişme mesafeleri öncesinde belirgin bir ölçüdedir. Sürekli rejim için elde edilen ara yüzey ısı akısı değerlerine Maïga ve ark. (2004) ile Ho ve ark. (2010) tarafından verilen termofiziksel özellik modelleri bakımından sırasıyla Şekil 4.77'de ve Şekil 4.78'de yer verilmiştir. Nanoparçacığın ısı performansına etkisi ısı gelişme uzunluklarının öncesinde net bir şekilde görülmektedir. Artan hacimsel konsantrasyonlar için elde edilen ısı transferinin artış eğilimi her iki model ile de gözlemlenmektedir. Bu değerler alt akış bölgesinde $q'_{wi} = 0$ değerine ulaşmaktadır. Viskoz yitim etkisinde artan hacimsel konsantrasyon sonrasında sürekli rejime ulaşma süresini azalma kaydetmiştir. Bu da Ho ve ark. (2010) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine ait sonuçlarda daha baskın eğilimdedir. Ara yüzey sıcaklık değerleri açısından viskoz yitim etkisindeki sürekli rejim sonuçları Maïga ve ark. (2004) ile Ho ve ark. (2010) tarafından sunulan termofiziksel özellik modellerine göre



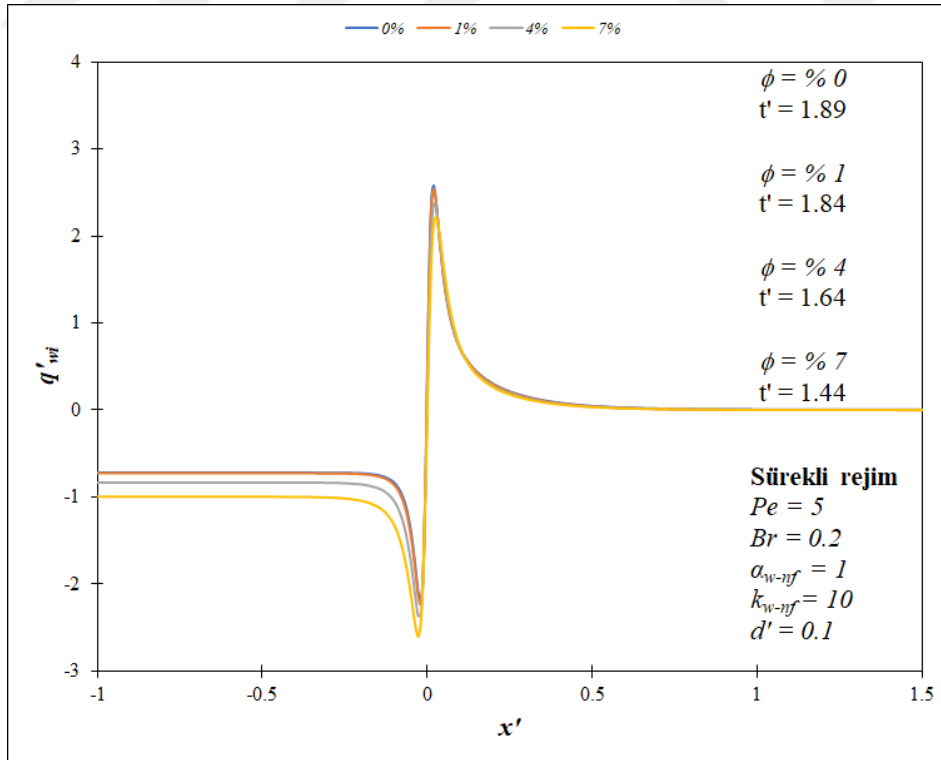
Şekil 4.75. Mağa ve ark. (2004) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su- Al_2O_3 nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin $t' = 0.26$ anındaki karşılaştırılması



Şekil 4.76. Ho ve ark. (2010) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su- Al_2O_3 nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin $t' = 0.26$ anındaki karşılaştırılması



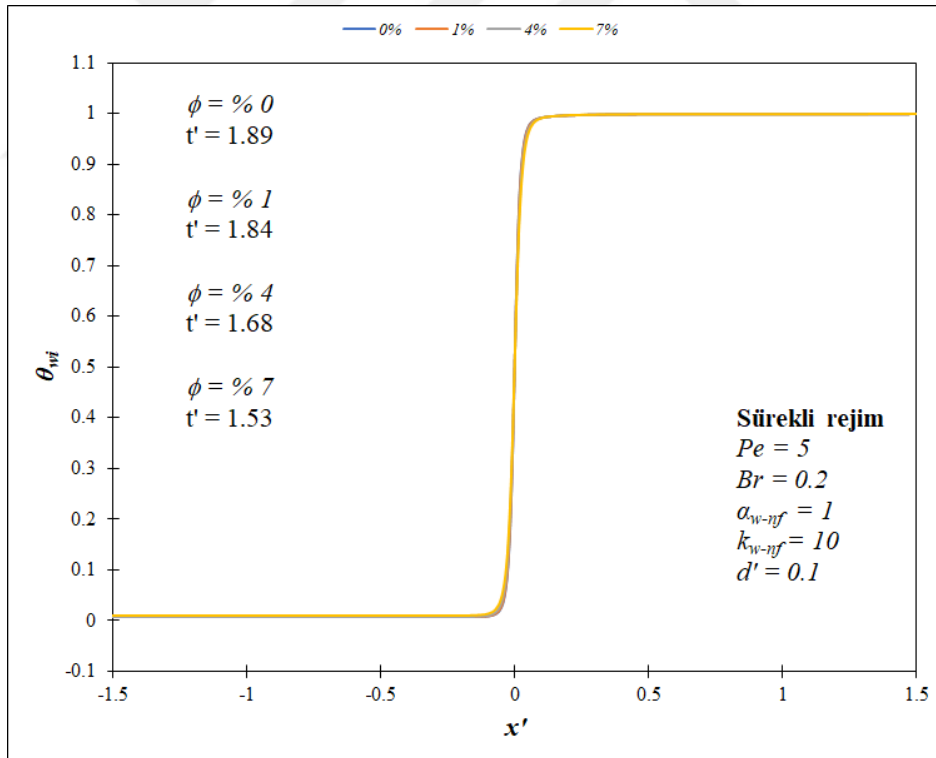
Şekil 4.77. Maïga ve ark. (2004) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su- Al_2O_3 nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



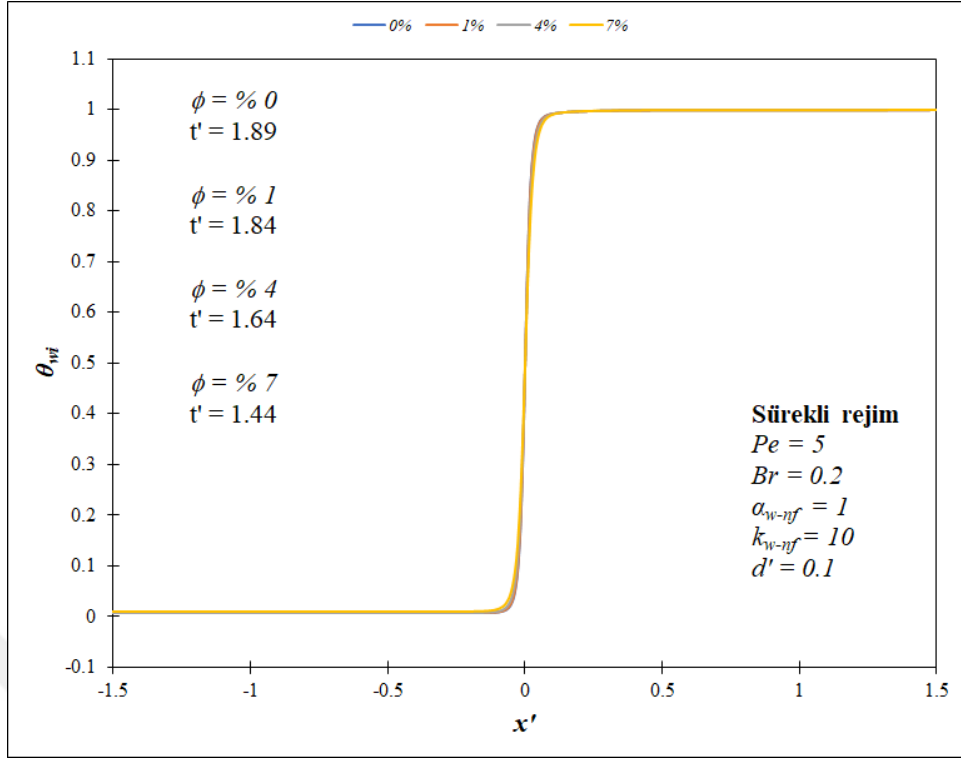
Şekil 4.78. Ho ve ark. (2010) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su- Al_2O_3 nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması

sırasıyla Şekil 4.79'da ve Şekil 4.80'dedir. Yoğun şekildeki nanoparçacık etkisi $x' = 0$ noktasının çevresinde gözlemlenmektedir. Belirtilen bu tesir ara yüzey ısı akısı değerlerindeki ölçüde bariz değildir. Hacimsel konsantrasyon değerlerindeki artışla ısı transferinin de arttığı ara yüzey sıcaklık değerleri ile görülmektedir. Bu etki sürekli rejime ulaşıldıktan sonra sıcaklık farkı azalması ile kaybolmaktadır. Dolayısıyla ara yüzey sıcaklığı değerlerinin belirli bir aksel mesafeden sonra $\theta_{wi} = 1$ değerine ulaşması ile görülmektedir. Aynı zamanda sürekli rejime erişme süresi de azalmaktadır. Ancak Maıga ve ark. (2004) tarafından önerilen termofiziksel özellik modelleri ile elde edilen sonuçlar göz önüne alındığında, bu azalma oranı göreceli olarak daha azdır.

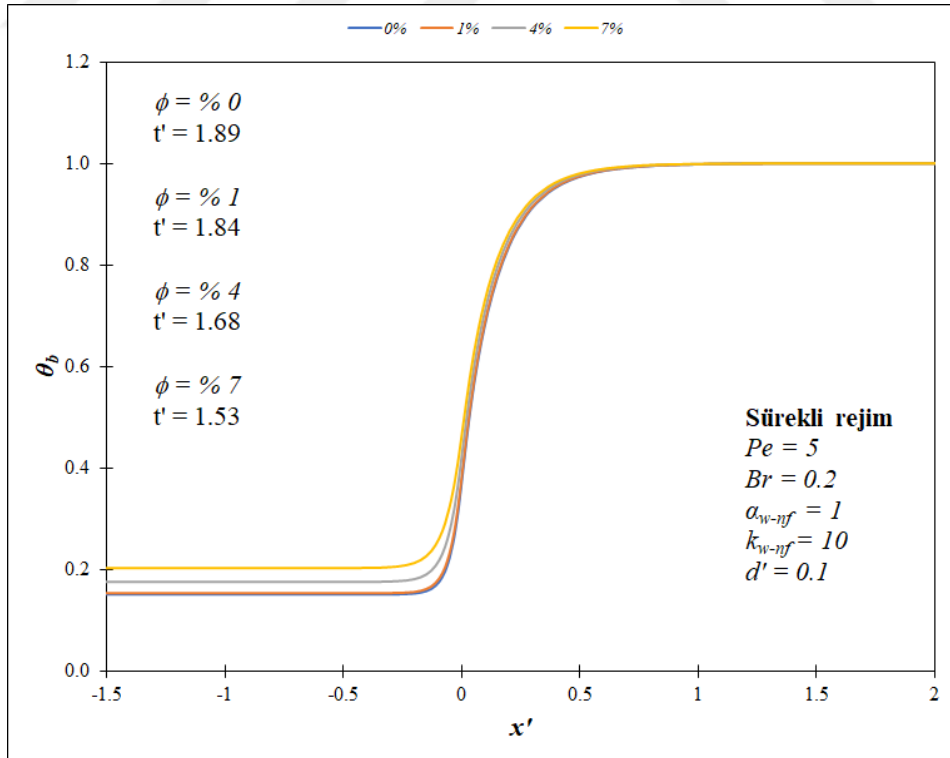
Sürekli rejimde yığık sıcaklık değerleri açısından saptanan sonuçlar Maıga ve ark. (2004) ile Ho ve ark. (2010) tarafından verilen termofiziksel özellik modellerine göre sırasıyla Şekil 4.81'de ve Şekil 4.82'de viskoz yitim etkisinde sunulmuştur. Üst akış bölgesinde ısı transferi yönü açısından önemli oranda değişim vardır. Bu durum da pozitif Brinkman sayısı kaynaklıdır. Nanoparçacığın ısıl iyileştirmeye olan etkisi $-0.5 \leq x' \leq 0.5$



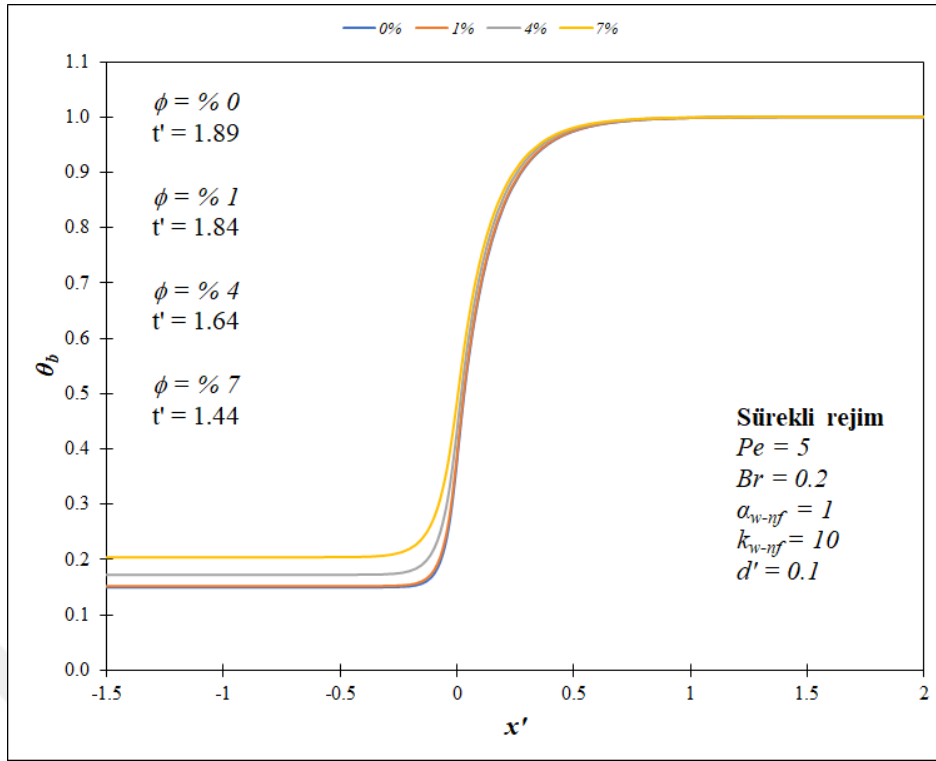
Şekil 4.79. Maıga ve ark. (2004) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su- Al_2O_3 nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey sıcaklığına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



Şekil 4.80. Ho ve ark. (2010) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su- Al_2O_3 nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey sıcaklığına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



Şekil 4.81. Mağa ve ark. (2004) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su- Al_2O_3 nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin yığık sıcaklığına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



Şekil 4.82. Ho ve ark. (2010) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su- Al_2O_3 nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin yığık sıcaklığa etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması

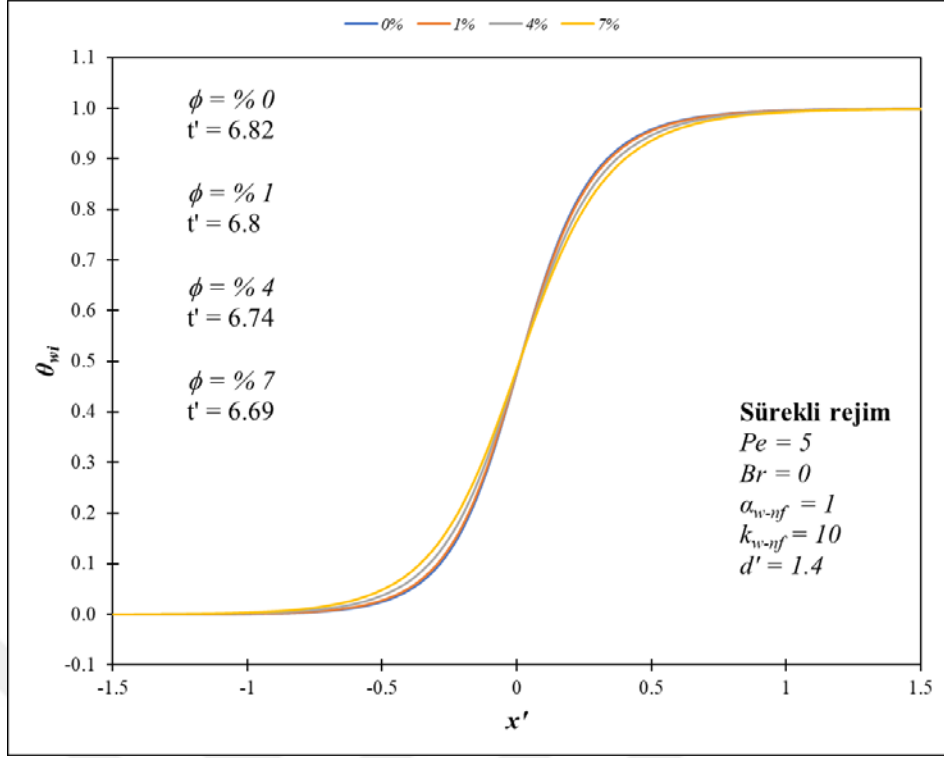
aralığında belirgindir. Bu da artan hacimsel konsantrasyona sahip nanoakışkanın kullanımı ile ısı transferi artışına neden olmaktadır. Böylelikle ısı performans artışı sağlandıktan sonra yığık sıcaklık değerleri $\theta_b = 1$ değerine erişmektedir. Hacimsel konsantrasyon oranı azaldıkça sürekli rejime erişme süresi artmaktadır. Buradaki azalma yüzdesi Ho ve ark. (2010) tarafından kullanılan modellerle elde edilen sonuçlarda daha çoktur.

Farklı hacimsel konsantrasyon değerleri için Al_2O_3 nanoparçacığının etkisi Maïga ve ark. (2004) tarafından verilen termofiziksel özellik modellerine göre cidar kalınlık oranının yüksek olduğu durumda incelenmiştir. Ara yüzey ısı akısı değerlerine ait $t' = 0.26$ anı için verilen sonuçlarda ısı yayılımı $x' = -0.4$ 'e ulaşmaktadır. Ayrıca ısı gelişme de $x' = 0.4$ 'te sağlanmaktadır. Artan hacimsel konsantrasyon değerleri neticesinde ara yüzey ısı akısı değerleri de artmaktadır. Isı transferi böylelikle artma eğilimine sahip olmaktadır. Aynı boyutsuz zaman değerinde hacimsel konsantrasyon etkisi Al_2O_3 nanoparçacığı için Ho ve ark. (2010) tarafından kullanılan termofiziksel özellik modellerine göre de yer almaktadır. Isıl gelişme uzunluklarına göre benzer değerler sağlanmıştır. Isı transferi artışı göreceli olarak yakın oranlarda gözlemlenmiştir. Kalınlık oranının yüksek olmasına

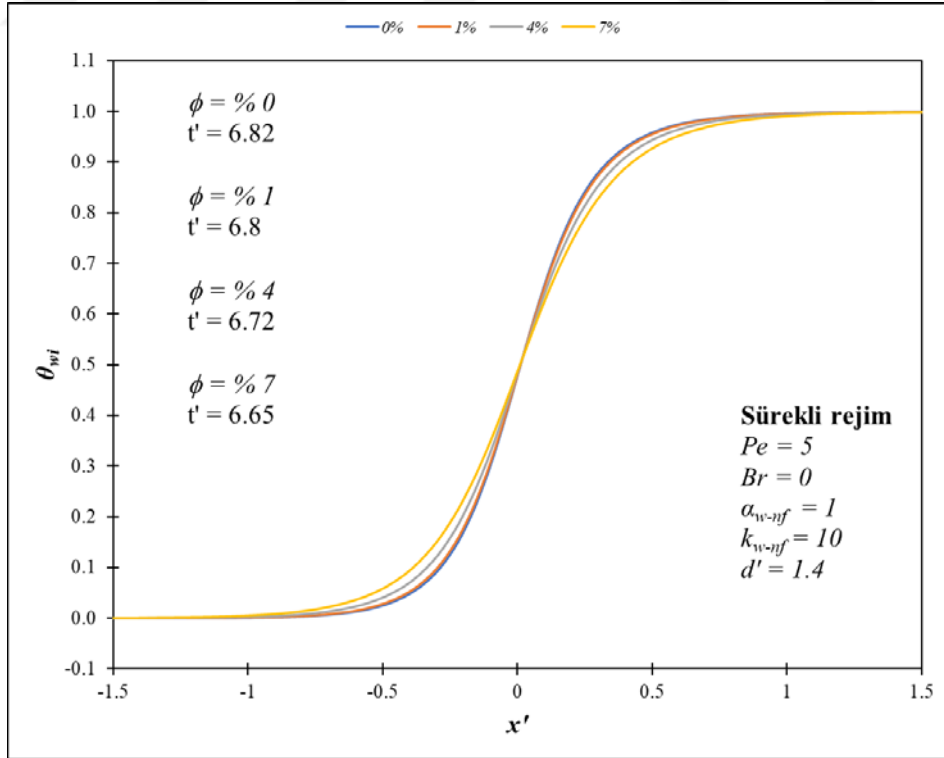
bağlı olarak cidar bölgesindeki ısı atalet bir hayli fazladır. Bu etmen ısıtma uygulanan cidardan ısının nanoakışkana transfer edilmesine engel teşkil etmektedir. Bu da ısı gelişme mesafesinin kısalmasını etkilemektedir. Sürekli rejimdeki sonuçlar Maïga ve ark. (2004) ile Ho ve ark. (2010) tarafından verilen termofiziksel özellik modellerine göre nanoparçacık etkisi ısı gelişme mesafeleri öncesinde net bir şekilde görülmektedir. Her iki model de artan hacimsel konsantrasyon değerlerine göre elde edilen ısı transferi artışını net bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu artış sağlandıktan sonra ısı gelişmesinin sağlanması ile $q'_{wi} = 0$ değerine ulaşılması ile sağlanmaktadır. Hacimsel konsantrasyon etkisiyle sürekli rejime ulaşma süresi de azalmakta olup, bu durum Ho ve ark. (2010) tarafından sunulan termofiziksel özellik modellerine ait sonuçlarda daha baskındır.

Ara yüzey sıcaklık değerleri açısından sürekli rejimde elde edilen sonuçlar Maïga ve ark. (2004) ile Ho ve ark. (2010) tarafından verilen termofiziksel özellik modellerine göre sırasıyla Şekil 4.83'te ve Şekil 4.84'te sunulmuştur. Cidar kalınlık oranının yüksek değerinde nanoparçacık etkisi $-0.5 \leq x' \leq 0.5$ için açık bir şekilde gözlemlenmektedir. Artan hacimsel konsantrasyon değerleriyle ısı transferinin artışı ara yüzey sıcaklık değerleri sayesinde görülmektedir. Netice itibariyle cidar kalınlık oranı yüksek olduğunda cidardaki ısı direnç daha fazla olduğu için ısı transferi değerlerinin azalması söz konusudur. Bu durumdaki olumsuz ortadan kaldıracak faktör ise nanoakışkan etkisi olup, bu sayede ısı transferi önemli şekilde artmaktadır. Ara yüzey sıcaklığı değerleri beklenen üzere $\theta_{wi} = 1$ değerine asimptotik olarak ulaşmaktadır. Artan hacimsel konsantrasyon değerleri, sürekli rejime erişme süresini azaltan yönde tesir etmektedir. Maïga ve ark. (2004) tarafından verilen termofiziksel özellik modelleri ile elde edilen sonuçlarda bu artış daha azdır. Dahası % 4 ve % 7 hacimsel konsantrasyon değerlerinde bu farklılık meydana gelmektedir.

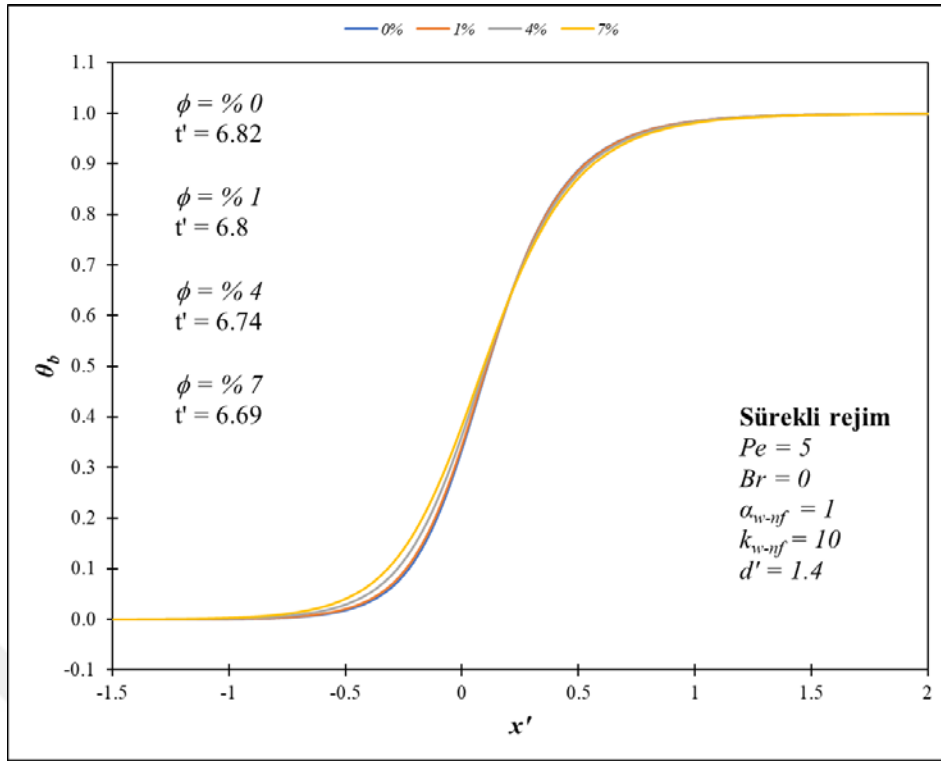
Yığık sıcaklık değerleriyle sürekli rejimde elde edilen sonuçlar Maïga ve ark. (2004) ile Ho ve ark. (2010) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre sırasıyla Şekil 4.85'te ve Şekil 4.86'da cidar kalınlık oranının yüksek değerinde verilmiştir. Bu durumda sabit yüzey sıcaklığı uygulanan cidardan ısının daha yavaş bir şekilde nanoakışkana geçme söz konusudur. Yüksek cidar kalınlık oranı için nanoakışkanın yığık sıcaklığı nispeten daha düşük düzeyde elde edilmektedir. Bu durumun ortaya çıkmasında ısı karakteristiklerin seri şekilde toparlanamaması etkilidir. Ancak nanoparçacığın ısı transferine olan tesiri $-1 \leq x' \leq 1$ aralığında gözlemlenebilir durumdadır. Bu yolla ısı transferi artışı, artan hacimsel konsantrasyon değerleriyle sağlanmaktadır. Diğer sonuçlar için de belirtildiği üzere, hacimsel konsantrasyon oranı azaldıkça sürekli rejime ulaşma



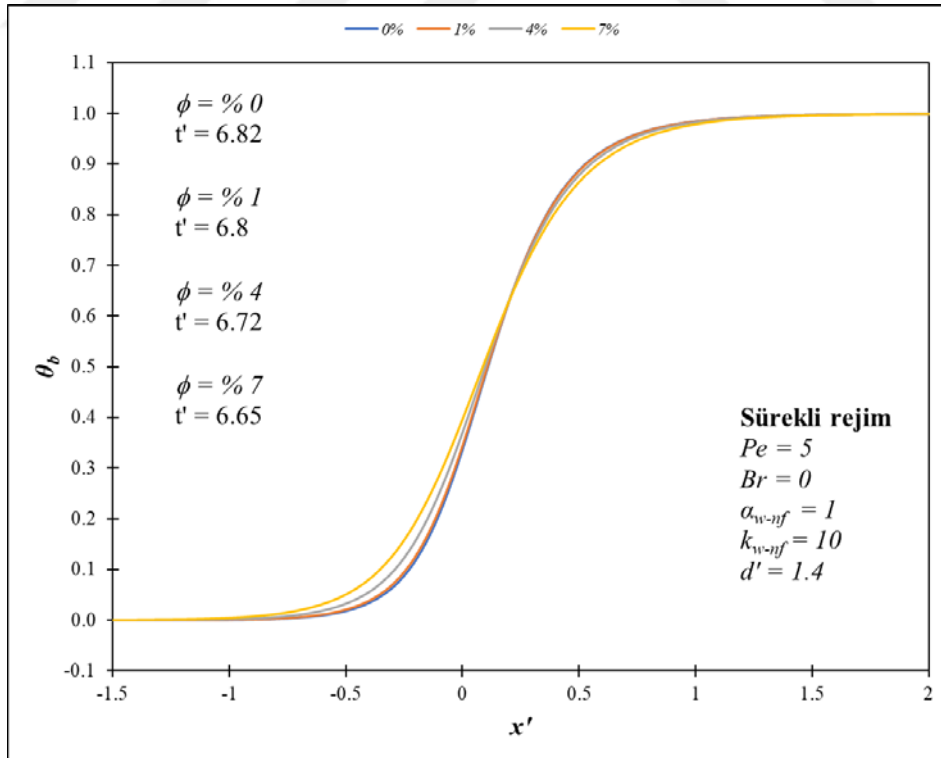
Şekil 4.83. Maïga ve ark. (2004) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su- Al_2O_3 nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey sıcaklığına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



Şekil 4.84. Ho ve ark. (2010) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su- Al_2O_3 nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey sıcaklığına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



Şekil 4.85. Maïga ve ark. (2004) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su- Al_2O_3 nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin yığık sıcaklığa etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



Şekil 4.86. Ho ve ark. (2010) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su- Al_2O_3 nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin yığık sıcaklığa etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması

süresi daha fazla olmaktadır. Bunun yanı sıra $\phi \leq \% 1$ olan hacimsel konsantrasyon için sürekli rejime erişme süresinin sabit kaldığı görülmekteyse de artış gösteren hacimsel konsantrasyon ile bu süre de azalma eğilimi sergilemektedir ve bu azalış yüzdesi Ho ve ark. (2010) tarafından kullanılan modellerle elde edilen sonuçlarda daha fazladır. Sonuç olarak buradaki yığık sıcaklık değerleri beklenen bir durumun parçası olarak $\theta_b = 1$ değerine erişmektedir.

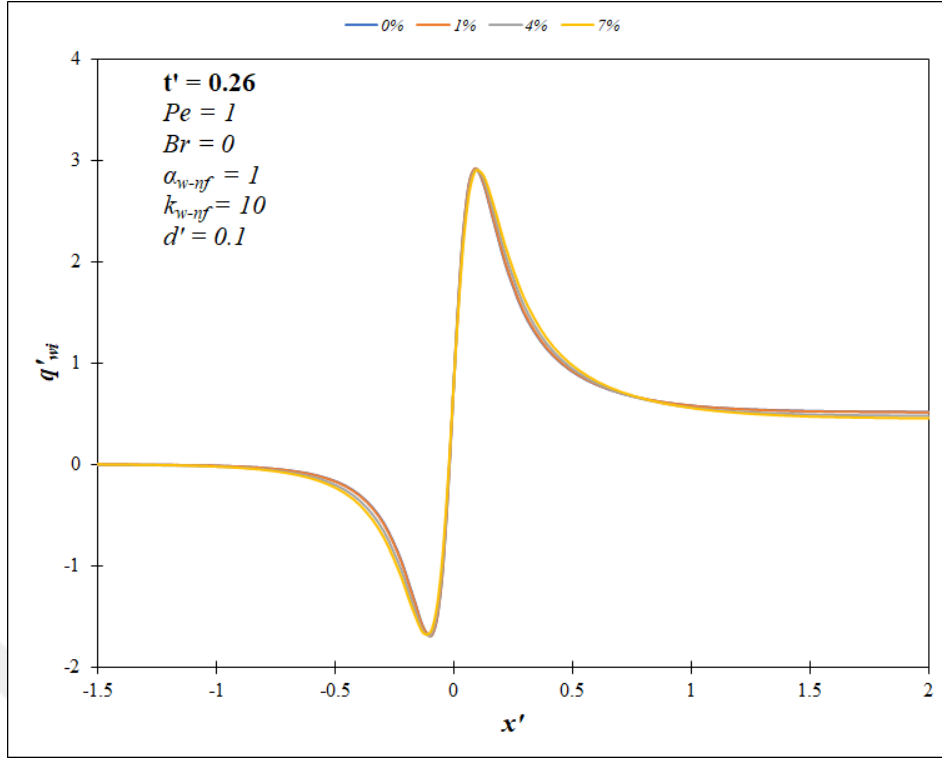
Nanoparçacık olarak Al_2O_3 etkisine göre elde edilen genel sonuçlara neticesinde ara yüzey ısı akısı, ara yüzey sıcaklığı ve yığık sıcaklığı değerlerinin değişimi doğrudan ısı taşınım katsayısını etkilemektedir. Buna göre de temel akışkan olarak yalnızca suyun kullanıldığı durumdaki değerle kıyaslandığında ısı taşınım katsayısı artışı elde edilmektedir. Ayrıca nanoparçacığın suya ilave edilmesiyle nanoakışkan elde edilmesi sonrasında göreceli olarak ısı iletim katsayısında da artış meydana gelmektedir. Nanoparçacık olarak Al_2O_3 ilavesinin ısı performans açısından değerlendirilmesinde literatürdeki iki farklı model kullanılmıştır. Termofiziksel özellik modelleri için Maïga ve ark. (2004) ile Ho ve ark. (2010) tarafından hazırlanan çalışmalar göz önünde bulundurulmuştur. Peclet sayısı için $Pe = 1$ 'den $Pe = 5$ 'e olan değişimle sürekli rejime ulaşma süresinde azalış görülmektedir. Diğer değerler açısında sürekli rejime erişme süresinde önemli bir değişim olmamaktadır. Ancak, cidar kalınlık oranı arttıkça bu süre de artış eğilimi göstermektedir. Bu durumu cidar kalınlık oranı $d' = 1.4$ için belirgin bir şekilde gözlemlemek mümkündür. İlave olarak, ara yüzey ısı akısı değerleri göz önünde bulundurduğunda ısı transferi miktarı bu duruma bağlı olarak azalma kaydetmektedir. Cidar kalınlık oranı arttıkça üst akış bölgesinde ısı transferi azalmaktadır ve belirtilen durum $Pe = 1$ değerinde daha barizdir. Aynı cidar kalınlık oranı açısında ısı transferinin artan Peclet sayısı ile doğru orantılı olduğu beklendiği üzere görülmektedir. Düşük Peclet sayısında ise sürekli rejime aksenel mesafe açısından daha geç ulaşılmaktadır. Daha düşük akış hızının varlığında cidarla nanoakışkan arasındaki sıcaklık farkı azalmaktadır. Nanoparçacık ilavesi ile hacimsel konsantrasyon değerlerini artışı ile yığık sıcaklık değerlerinde artış meydana gelmektedir. Ara yüzey sıcaklığı ise kademeli bir azalma göstermektedir. Nusselt sayısı, ara yüzey sıcaklığı ile yığık sıcaklık arasındaki fark ile ters orantılıdır. Bu da doğal olarak hacimsel konsantrasyon artışı ile ara yüzey sıcaklığı ile yığık sıcaklık arasındaki farkı azaltıcı yönde bir etkiye neden olmaktadır. Dolayısıyla Nusselt sayısı artışı da ısı transferinin arttığını göstermektedir. Maïga ve ark. (2004) ile Ho ve ark. (2010) tarafından önerilen termofiziksel özellikleri kıyaslandığında, Al_2O_3 nanoparçacığının temel akışkana ilave edilmesi için geçerli olan bu iki modelin birbirine

yakın sonuçları verdiği görülmektedir. Hacimsel konsantrasyon değerleri arttıkça sürekli rejime erişme süresi de artma eğilimindedir.

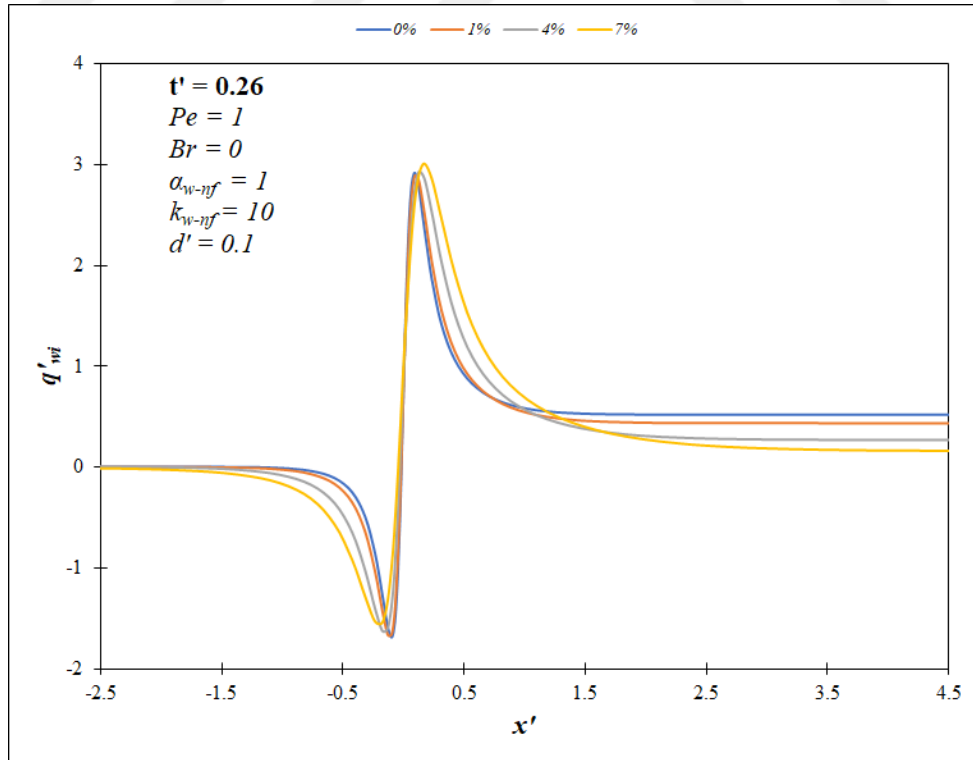
4.2.2. Su-CuO nanoakışkanının etkisi

Nanoparçacık olarak CuO ilavesi ile temel akışkan olarak kullanılan suyun ısı transferi açısından özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Buna göre ilgili nanoparçacık suya % 1, % 4 ve % 7 hacimsel konsantrasyon değerlerinde eklenmiştir. Ara yüzey ısı akısı, ara yüzey sıcaklığı, yığık sıcaklık değerleri kapsamında Peclet sayısı, cidar kalınlık oranı, ısıl yayılım katsayısı, ısı iletim katsayısı ve Brinkman sayısı parametrelerinin çözüme etkisi değerlendirilmiştir. Bu amaçla zamana bağlı olarak belirtilen ısı transferi özelliklerinin değişimi açısından sonuçlar ortaya konmuştur.

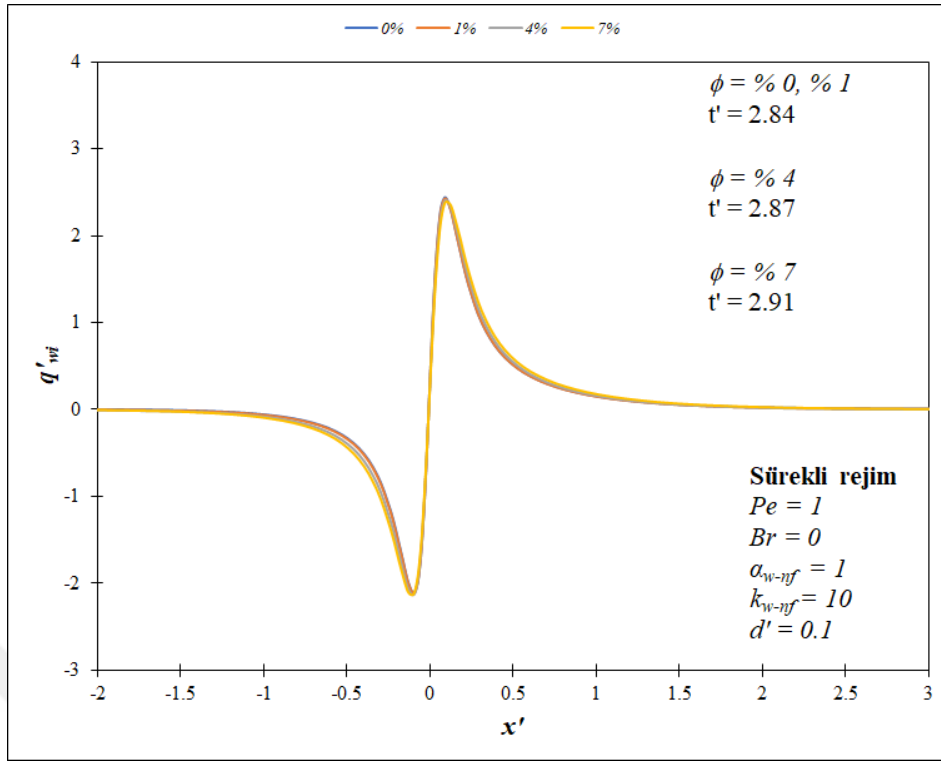
Farklı hacimsel konsantrasyon değerleri için CuO nanoparçacığının etkisi Nguyen ve ark. (2007) - Mintsu ve ark. (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre düşük Peclet sayısında incelenmiştir. Buna göre elde edilen ara yüzey ısı akısı değerleri Şekil 4.87'de $t' = 0.26$ anı için verilmiştir. İlgili sonuçlarla ısıl yayılma üst akış bölgesinde $x' = -1$ 'e ulaşmaktayken, alt akış bölgesinde ısıl gelişme $x' = 1$ 'de sağlanmaktadır. Artan hacimsel konsantrasyon değerleri neticesinde ara yüzey ısı akısı değerleri artmaktadır. Bu durum da ısı transferi artışının göstergesidir. Aynı boyutsuz zaman değerinde hacimsel konsantrasyon etkisi CuO nanoparçacığı için Vinodhan ve ark. (2016) tarafından kullanılan termofiziksel özellik modellerine göre de Şekil 4.89'da sunulmuştur. Isıl yayılma üst akış bölgesinde $x' = -2$ 'e erişirken, ısıl gelişme için $x' = 2$ 'den sonrasındır. Isı transferi artışı da farklı oranlarda gözlemlenmiştir. Sürekli rejimde ara yüzey ısı akısı açısından bulunan sonuçlar Nguyen ve ark. (2007) - Mintsu ve ark. (2009) ile Vinodhan ve ark. (2016) tarafından verilen termofiziksel özellik modelleri bakımından sırasıyla Şekil 4.89'da ve Şekil 4.90'da yer almaktadır. Eksenel ısı iletiminin etkisi üst akış bölgesinde görülmektedir. Üst akış bölgesinde önemli oranda ısı geçişinin olduğu gözlemlenmektedir. Bu bölgedeki etki, akışın tersi yönünde belirli bir eksenel mesafeye kadar sürmektedir. Ayrıca radyal yönde meydana gelen ısı iletimiyle ara yüzeydeki ısı akısı öncelikle artış sağlamaktadır. Isı transferinin tesiri altında nanoakışkanda da eksenel ısı iletimi artarak, ara yüzey ısı akısı değerleri de artan nanoakışkan sıcaklığı sonucunda azalma sürecine geçmektedir. Benzer şekilde alt akış bölgesinde ara yüzey ısı akısı değerlerinin artarak belirli bir maksimum değerine ulaştığı



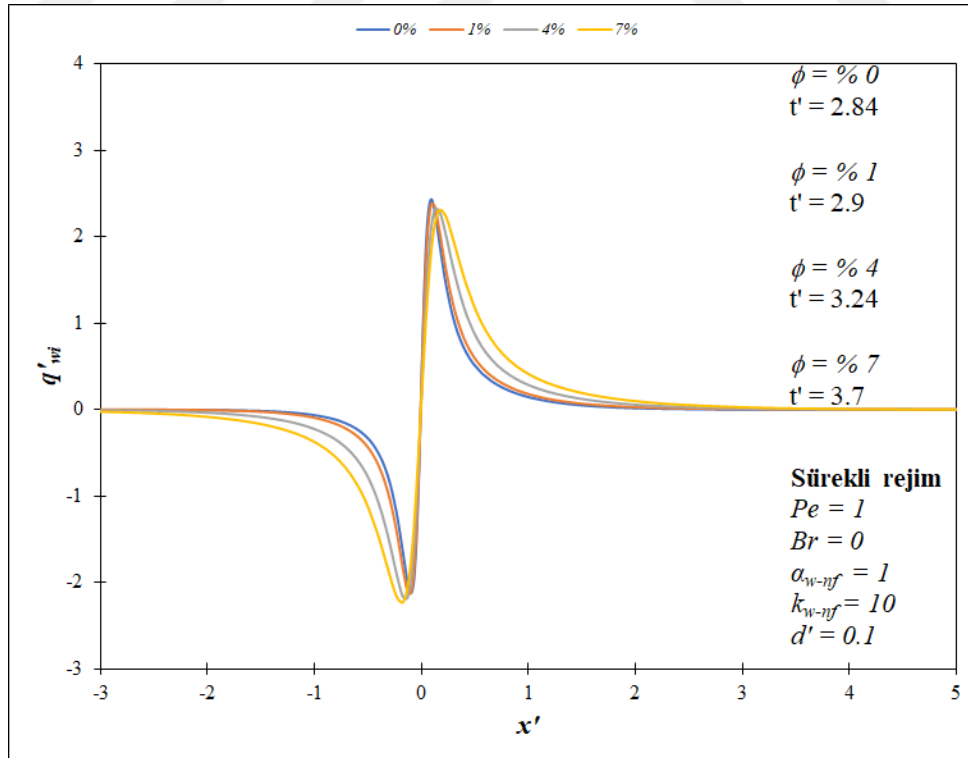
Şekil 4.87. Nguyen ve ark. (2007) – Mintsu ve ark. (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-CuO nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin $t' = 0.26$ anındaki karşılaştırılması



Şekil 4.88. Vinodhan ve ark. (2016) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-CuO nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin $t' = 0.26$ anındaki karşılaştırılması



Şekil 4.89. Nguyen ve ark. (2007) – Mintsu ve ark. (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-CuO nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması

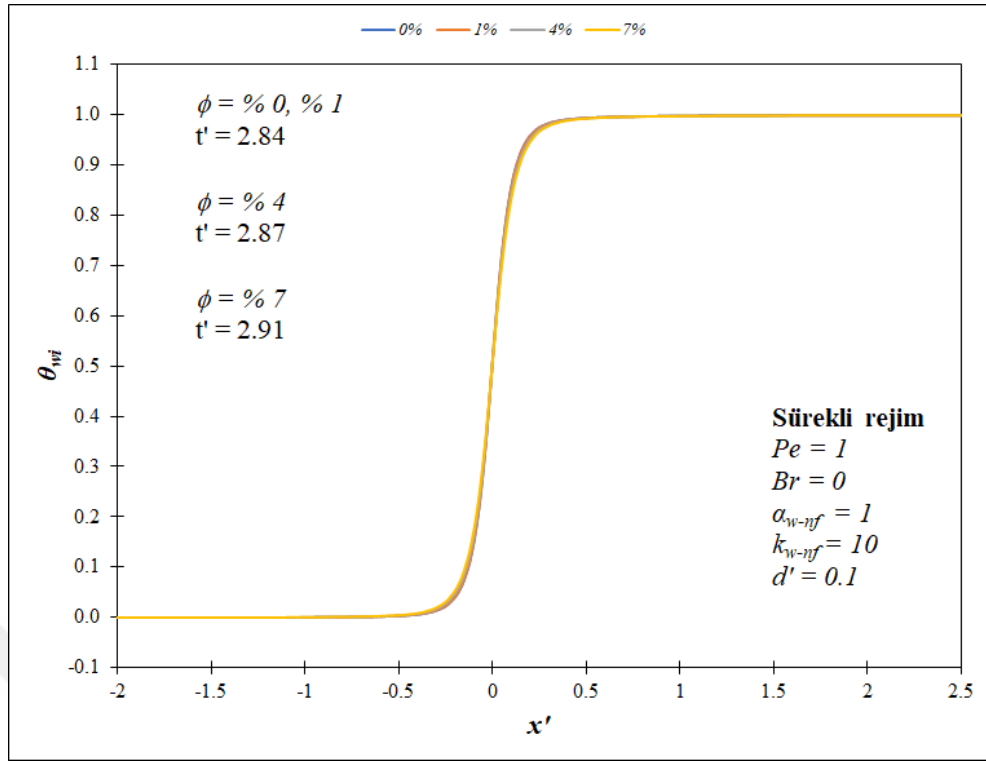


Şekil 4.90. Vinodhan ve ark. (2016) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-CuO nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması

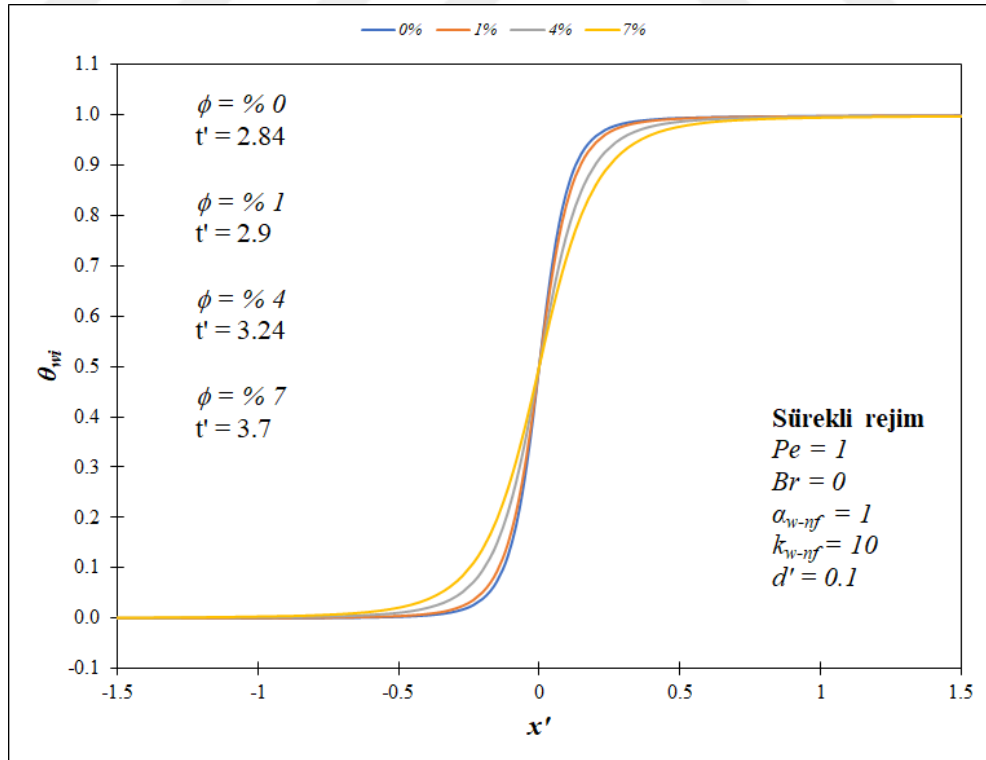
ve en yüksek değerden sonra da akış yönünde azalması gözlemlenmektedir. Bu durumun ortaya çıkmasında nanoakışkan ve cidar açısından sıcaklık farkının azalması etkilidir. Ortalama olarak ısı transferi miktarı da yüksek değerler vasıtasıyla genel manada artış eğilimine sahip olmaktadır. Bunun yanı sıra nanoparçacık etkisi ısı gelişme mesafeleri öncesinde net bir şekilde görülmektedir. Her iki model de artan hacimsel konsantrasyon değerlerine göre elde edilen ısı transferinin artma eğilimini net bir biçimde ortaya koymaktadır. Ancak Nguyen ve ark. (2007) - Mintsas ve ark. (2009) tarafından önerilen modeller vasıtasıyla saptanan ısı transferi artışın daha az olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, minimum değer bazında alt akış bölgesinde $q'_{wi} = 0$ 'a ulaşılmaktadır. İlave olarak artan hacimsel konsantrasyon etkisi sürekli rejime ulaşma süresi de artış göstermekte olup, bu etki Vinodhan ve ark. (2016) tarafından önerilen termofiziksel özellik modelleri ile sağlanan sonuçlarda daha baskındır.

Ara yüzey sıcaklık değerleri açısından sürekli rejimde elde edilen sonuçlar Nguyen ve ark. (2007) - Mintsas ve ark. (2009) ile Vinodhan ve ark. (2016) tarafından verilen termofiziksel özellik modellerine göre sırasıyla Şekil 4.91'de ve Şekil 4.92'de sunulmuştur. Üst akış bölgesinde eksenel ısı iletimine ait etki aralığı daha geniş bir mesafeye yayılmaktadır. Isıtma başlangıcı olan $x' = 0$ noktasının öncesinde eksenel ısı iletimi etkisindeki ara yüzey sıcaklığı değerleri artmaktadır. Düşük Peclet sayısındaki nanoparçacık etkisi Nguyen ve ark. (2007) - Mintsas ve ark. (2009) tarafından önerilen modeller için $x' = 0$ etrafında görülürken, Vinodhan ve ark. (2016) tarafından verilen modellerle elde edilen sonuçlarda durum $-0.5 \leq x' \leq 0.5$ aralığını işaret etmektedir. Artan hacimsel konsantrasyon değerleriyle ısı transferinin artış eğilimi ara yüzey sıcaklık değerleri ile görülmektedir. Artan hacimsel konsantrasyon etkisi sürekli rejime erişme süresini artırmaktadır. Buna göre Nguyen ve ark. (2007) - Mintsas ve ark. (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modelleri ile elde edilen sonuçlarda bu artış göreceli olarak daha azdır. Ayrıca % 4 ve % 7 hacimsel konsantrasyon değerlerinde bu farklılık meydana gelmektedir. Neticede ara yüzey sıcaklığı değerleri alt akış bölgesinde $\theta_{wi} = 1$ değerine asimptotik olarak ulaşmaktadır.

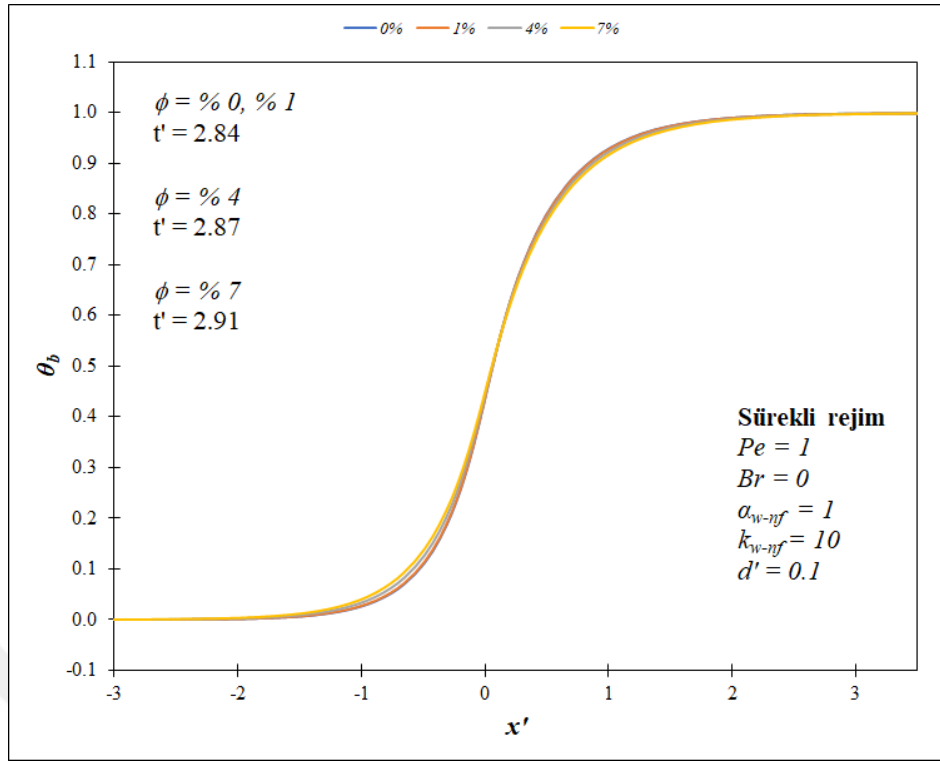
Sürekli rejimde yığık sıcaklık değerleriyle saptanan sonuçlar Nguyen ve ark. (2007) - Mintsas ve ark. (2009) ile Vinodhan ve ark. (2016) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre sırasıyla Şekil 4.93'te ve Şekil 4.94'te düşük Peclet sayısı için verilmiştir. Nanoparçacığın ısı transferine etkisi Nguyen ve ark. (2007) - Mintsas ve ark. (2009) modelleri için $-1.5 \leq x' \leq 1.5$ aralığında açık bir şekilde ortaya çıkmaktayken, Vinodhan ve ark. (2016) modellerinde $-3 \leq x' \leq 3$ aralığında geçerlidir.



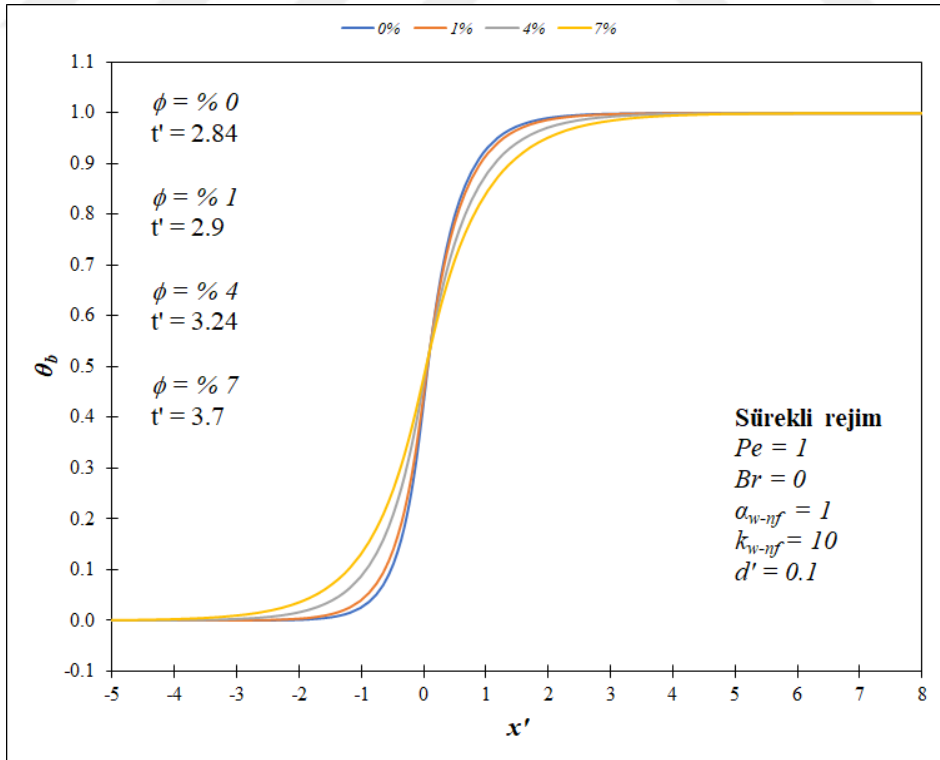
Şekil 4.91. Nguyen ve ark. (2007) – Mintsas ve ark. (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-CuO nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey sıcaklığına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



Şekil 4.92. Vinodhan ve ark. (2016) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-CuO nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey sıcaklığına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



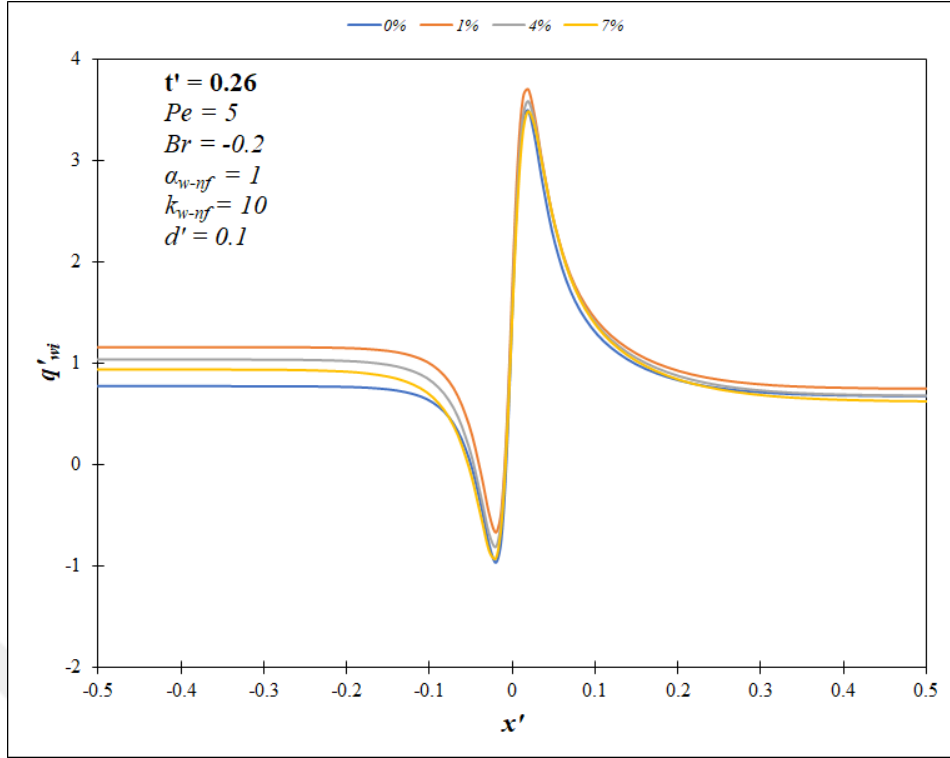
Şekil 4.93. Nguyen ve ark. (2007) – Mintsu ve ark. (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-CuO nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin yığık sıcaklığa etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



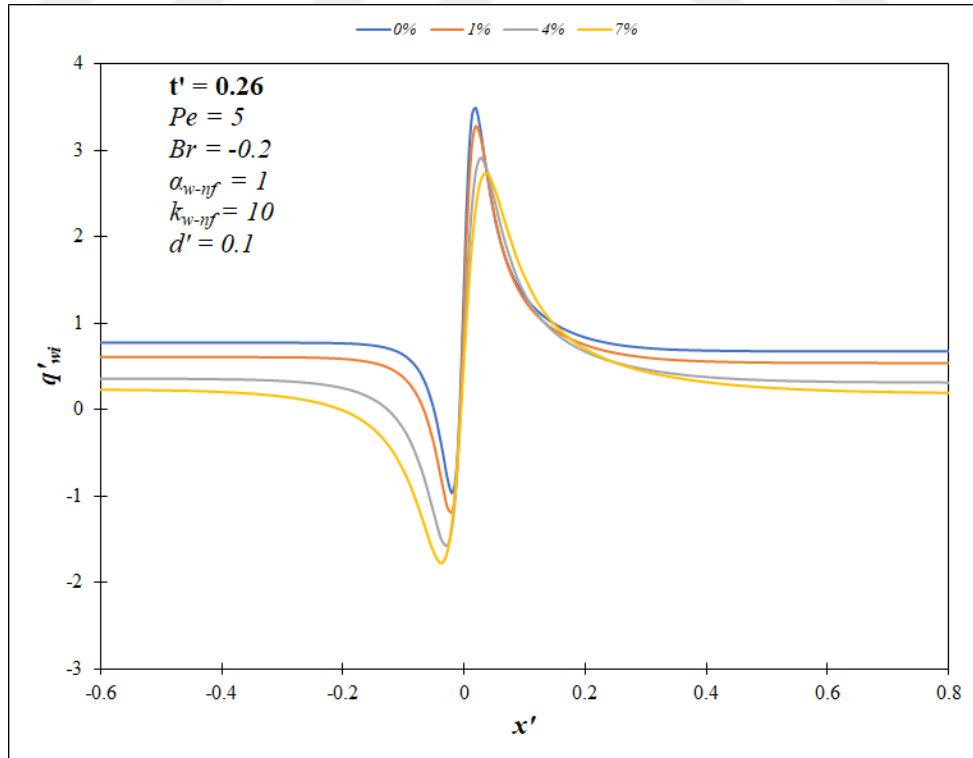
Şekil 4.94. Vinodhan ve ark. (2016) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-CuO nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin yığık sıcaklığa etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması

Isıl gelişme tamamlanmadan önce ara yüzey sıcaklık değerleri ile kıyaslandığında, belirli konum için daha düşük değerler elde edilmektedir. İlgili aksenal konumda ısı transferi böylelikle devam etmektedir. Sürekli rejim şartlarında yığık sıcaklık değerleri $\theta_b = 1$ değerine alt akış bölgesinde erişmektedir. Bu da artış gösteren hacimsel konsantrasyon değerlerinin sonucu olarak ısı transferinin de artışını sağlamaktadır. Diğer sonuçlarda da ifade edildiği üzere, hacimsel konsantrasyon oranı azaldıkça sürekli rejime ulaşma süresi de daha az olmaktadır. Ayrıca Nguyen ve ark. (2007) - Mintsas ve ark. (2009) modelleri için $\phi \leq \% 1$ olan hacimsel konsantrasyon değerlerinde sürekli rejime ulaşma süresinin değişmediği görülmekteyse de artan hacimsel konsantrasyon etkisinde bu süre de artmaktadır ve bu artış Vinodhan ve ark. (2016) tarafından kullanılan modellerle elde edilen sonuçlarda daha da fazladır.

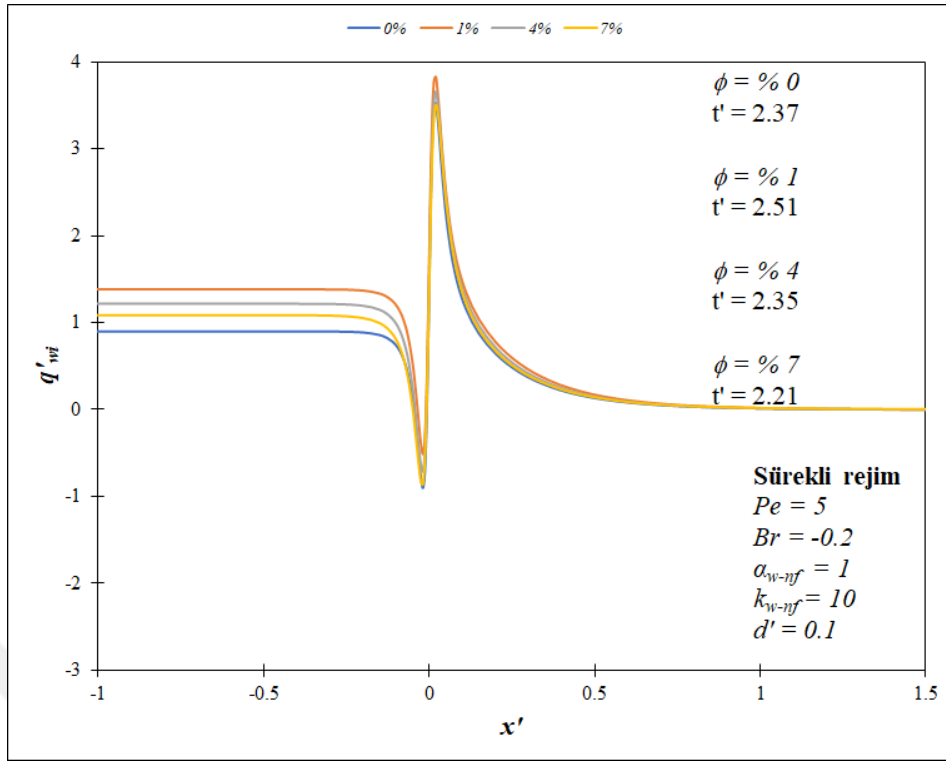
Farklı hacimsel konsantrasyonlar için Nguyen ve ark. (2007) - Mintsas ve ark. (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre CuO nanoparçacığının etkisi viskoz yitim göz önüne alınarak incelenmiştir. Bu hususta elde edilen ara yüzey ısı akısı değerleri $t' = 0.26$ anı için Şekil 4.95'te verilmiştir. İlgili sonuçlar incelendiğinde ısı yayılma üst akış bölgesinde $x' = -0.2$ 'e varmaktayken, alt akış bölgesi için $x' = 0.4$ 'ten sonrasdır. Hacimsel konsantrasyon değerlerinin artması neticesinde ara yüzey ısı akısı değerlerin de artış gözlemlenmektedir. Saptanan bu durum ısı transferi iyileştirmesinin göstergesidir. Hacimsel konsantrasyon etkisi CuO nanoparçacığı için aynı boyutsuz zaman değerinde Vinodhan ve ark. (2016) tarafından kullanılan termofiziksel özellik modellerine göre Şekil 4.96 sunulmuştur. İlgili sonuçlar incelendiğinde ısı yayılma üst akış bölgesinde $x' = -0.4$ 'ten önce sağlanmaktayken, alt akış bölgesi için $x' = 0.6$ 'dan sonrasdır. Isı transferi artışı da benzer değerlerde gözlemlenmiştir. Ayrıca ısı transferi yönünün Brinkman sayısına bağlı olarak etkilenmesi üst akış bölgesindeki sonuçlara yansımıştır. Sürekli rejimde elde edilen ara yüzey ısı akısı değerlere Nguyen ve ark. (2007) - Mintsas ve ark. (2009) ile Vinodhan ve ark. (2016) tarafından verilen termofiziksel özellik modelleri bakımından sırasıyla Şekil 4.97'de ve Şekil 4.98'de yer verilmiştir. Cidar ve nanoakışkan için aksenal ısı iletimi etkisinde herhangi bir ısıtmanın olmadığı üst akış bölgesine doğru önemli miktarda ısı aktarımı görülmektedir. Bu durum $t' = 0.26$ 'daki durum ile kıyaslanmaktadır. Buna göre sürekli rejime sağlanıncaya kadar ısı transferinin akış yönüne zıt tarafa doğru da gerçekleşerek, ön ısıtma mesafesinin artışına neden olduğu gözlemlenmektedir. Sonuçta, ara yüzey ısı akısı değerleri alt akış bölgesinde $q'_{wi} = 0$ değerine asimptotik olarak ulaşmaktadır. Nanoparçacığın ısı transferine etkisi ısı gelişme mesafeleri öncesinde açıkça görülmektedir. Artan hacimsel



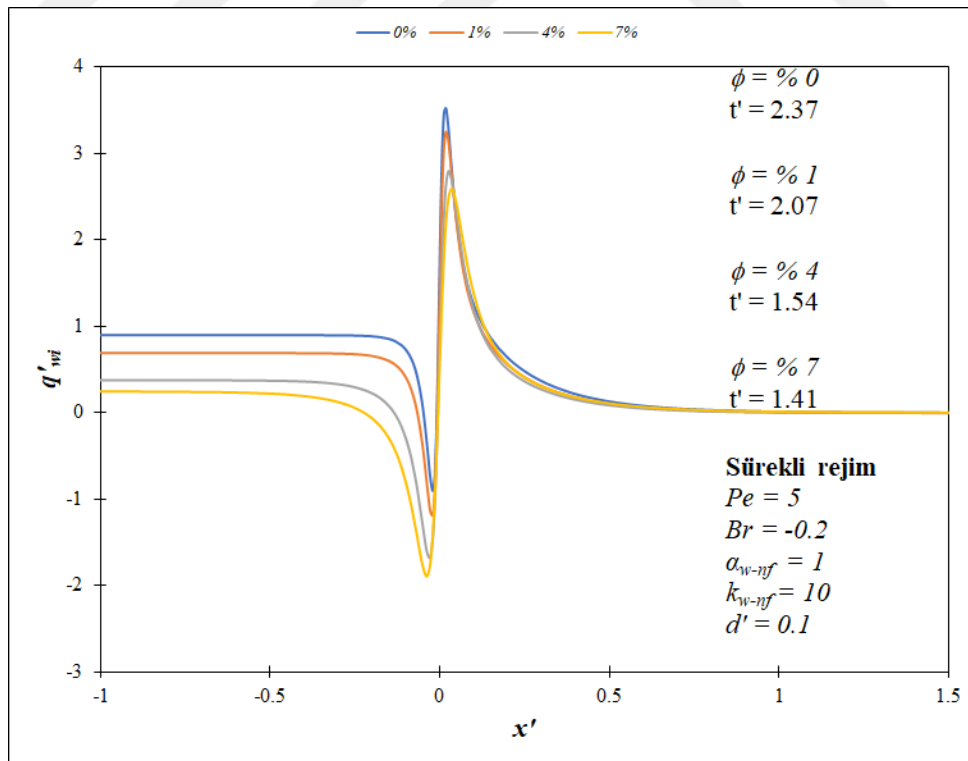
Şekil 4.95. Nguyen ve ark. (2007) – Mintsu ve ark. (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-CuO nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin $t' = 0.26$ anındaki karşılaştırılması



Şekil 4.96. Vinodhan ve ark. (2016) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-CuO nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin $t' = 0.26$ anındaki karşılaştırılması



Şekil 4.97. Nguyen ve ark. (2007) – Mintsu ve ark. (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-CuO nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması

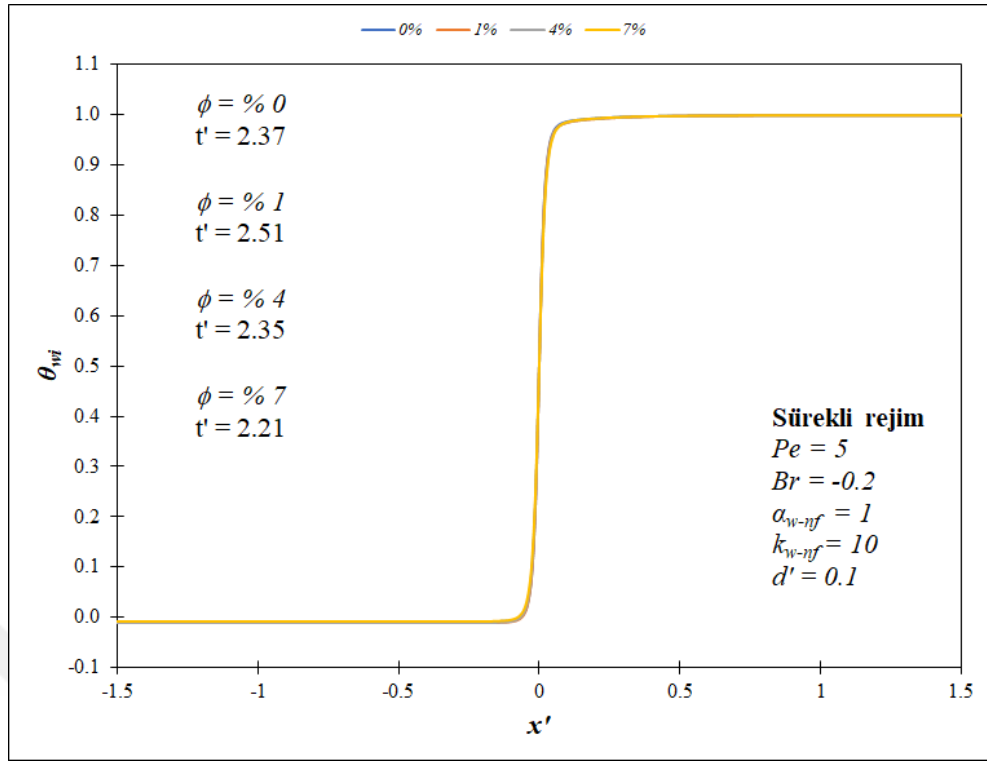


Şekil 4.98. Vinodhan ve ark. (2016) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-CuO nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması

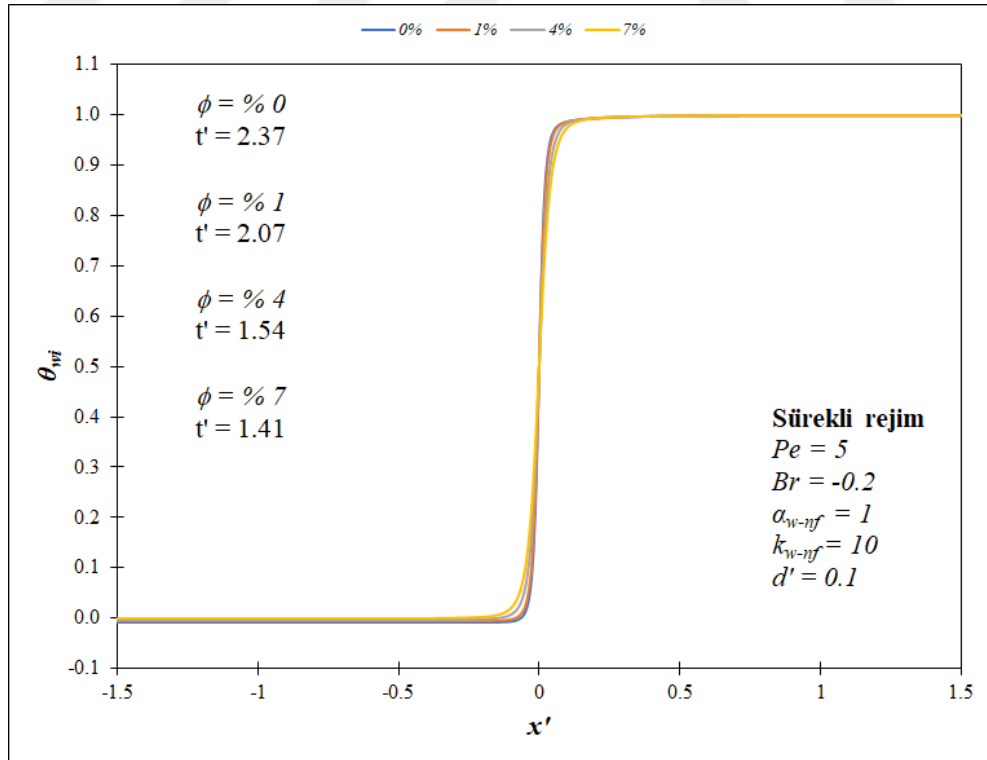
konsantrasyon değerlerine göre elde edilen ısı transferinin artma eğilimi her iki model yardımıyla bulunmaktadır. Ancak bu anlamda Vinodhan ve ark. (2016) tarafından önerilen modellerle elde edilen sonuçlar önerilmektedir. Brinkman sayısı etkisinde artan hacimsel konsantrasyon etkisi sürekli rejime ulaşma süresini azalmıştır. Bu etki Vinodhan ve ark. (2016) tarafından verilen termofiziksel özellik modelleri ile elde edilen sonuçlarda daha baskın eğilime neden olmaktadır.

Viskoz yitim etkisindeki ara yüzey sıcaklık değerleri açısından sürekli rejim sonuçları Nguyen ve ark. (2007) - Mints ve ark. (2009) ile Vinodhan ve ark. (2016) tarafından verilen termofiziksel özellik modellerine göre sırasıyla Şekil 4.99'da ve Şekil 4.100'de gösterilmiştir. Nanoparçacık etkisi Nguyen ve ark. (2007) - Mints ve ark. (2009) modellerine ait sonuçlarda $x' = 0$ etrafında gözlemlenmekteyken, bu durum Vinodhan ve ark. (2016) tarafından verilen modellerle elde edilen sonuçlarda $-0.2 \leq x' \leq 0.2$ aralığında geçerlidir. Hacimsel konsantrasyon değerlerindeki artışın bir sonucu olarak ısı transferinin artış eğilimi ara yüzey sıcaklık değerleri ile görülmektedir. Bu etki Vinodhan ve ark. (2016) modellerinde daha belirgindir. Ancak bu durum viskoz yitim açısından ara yüzey ısı akısındaki dağılım kadar bariz olmamaktadır. Hacimsel konsantrasyon değerlerindeki artışıyla ısı transferinin artışı bu kısımda da görülmektedir. Isı transferinin bu yöndeki etkisi ısı gelişme sonrasında sıcaklık farkının büyük oranda ortadan kalkması ile gözlenmektedir. Belirtilen değişim ara yüzey sıcaklığı değerlerinin belli bir aksel mesafeden sonra $\theta_{wi} = 1$ değerine ulaşması ile sağlanmaktadır. Artan hacimsel konsantrasyon etkisi sürekli rejime erişme süresini azaltmaktadır. Buna göre Nguyen ve ark. (2007) - Mints ve ark. (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modelleri ile elde edilen sonuçlarda bu azalma göreceli olarak daha azdır. Bunun yanı sıra % 4 ve % 7 hacimsel konsantrasyon değerleri için bu farklılık ortaya çıkmaktadır.

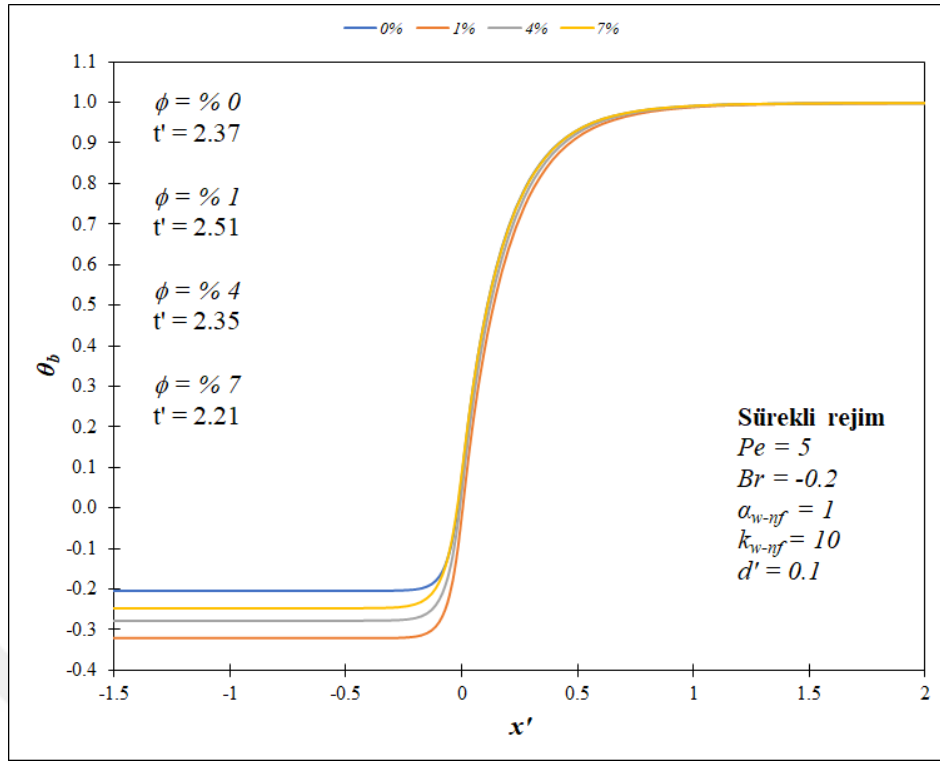
Yığık sıcaklık değerleri açısından sürekli rejimde saptanan sonuçlar Nguyen ve ark. (2007) - Mints ve ark. (2009) ile Vinodhan ve ark. (2016) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre sırasıyla Şekil 4.101'de ve Şekil 4.102'de viskoz yitim tesirinde verilmiştir. Üst akış bölgesinde ısı transferi yönü kapsamında bir değişim mevcut durumdadır. Bu tesirin sebebi negatif Brinkman sayısıdır. Nanoparçacığın ısı transferine olan etkisi $-0.5 \leq x' \leq 0.5$ aralığında belirgin bir şekildedir. Bu da artış gösteren hacimsel konsantrasyon değerlerinin sonucu olarak nanoakışkan kullanımı sonrasındaki ısı transferi iyileştirmesini sağlamaktadır. Bu yolla ısı transferi iyileştirmesi sağlandıktan sonra yığık sıcaklıkta maksimum değer olarak $\theta_b = 1$ elde edilmektedir. Diğer durumlara ait sonuçlarda da ifade edildiği üzere, hacimsel konsantrasyon oranı azaldıkça sürekli



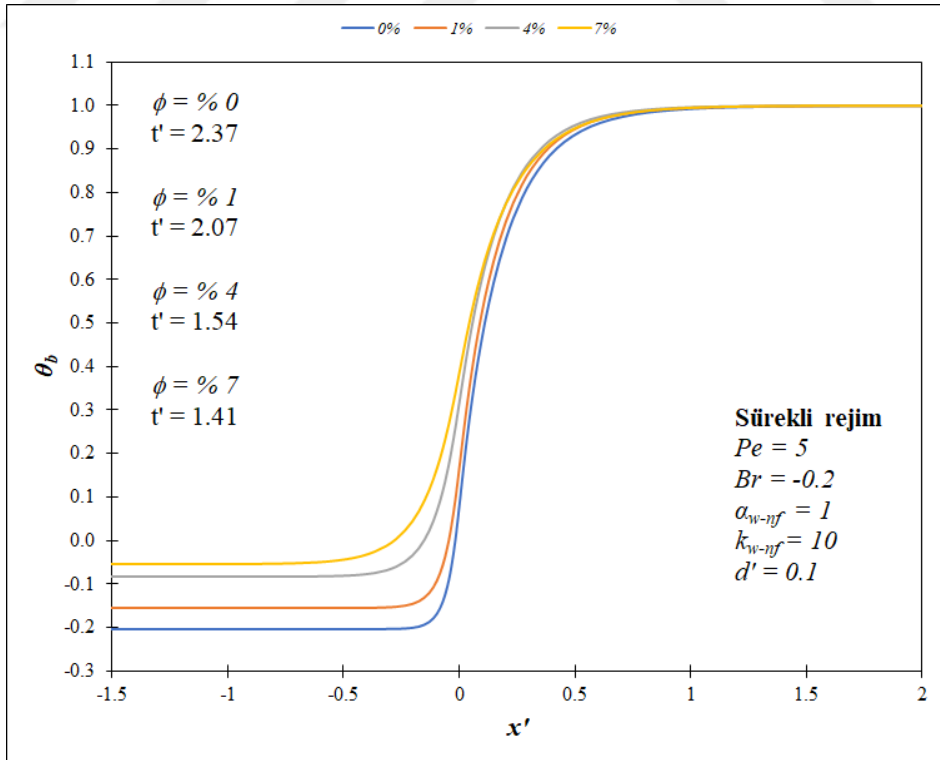
Şekil 4.99. Nguyen ve ark. (2007) – Mintsu ve ark. (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-CuO nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey sıcaklığına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



Şekil 4.100. Vinodhan ve ark. (2016) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-CuO nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey sıcaklığına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



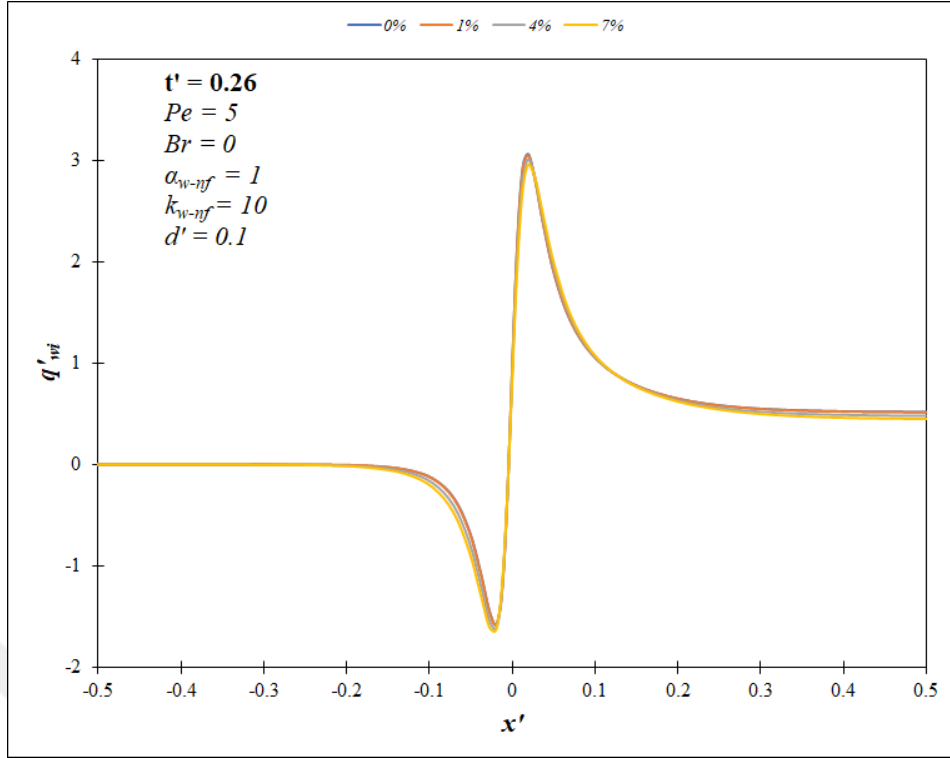
Şekil 4.101. Nguyen ve ark. (2007) – Mintsu ve ark. (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-CuO nanoakışkan için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin yığık sıcaklığa etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



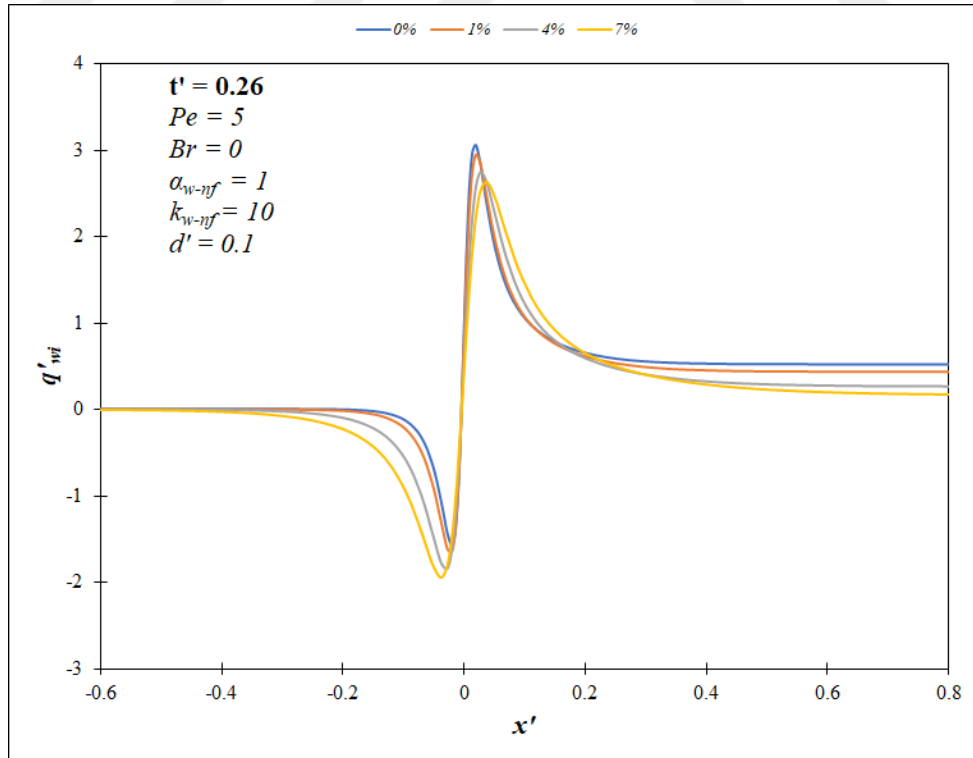
Şekil 4.102. Vinodhan ve ark. (2016) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-CuO nanoakışkan için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin yığık sıcaklığa etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması

rejime erişme süresi de daha fazla olmaktadır. Ayrıca bu azalma yüzdesi Vinodhan ve ark. (2016) tarafından kullanılan modellerle elde edilen sonuçlarda daha da fazladır.

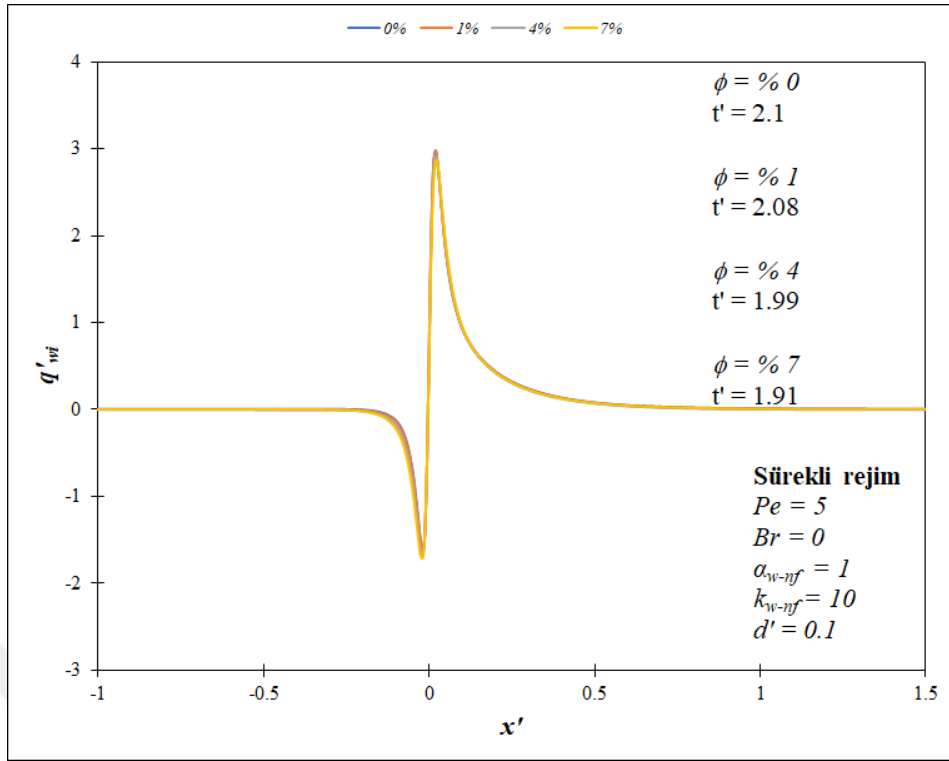
Eksenel ısı iletim etkisi bakımından $Pe = 5$ için farklı hacimsel konsantrasyonlar için Nguyen ve ark. (2007) - Mintsu ve ark. (2009) tarafından sunulan termofiziksel özellik modellerine göre CuO nanoparçacığının etkisi araştırılmıştır. Elde edilen ara yüzey ısı akısı değerleri $t' = 0.26$ anı için Şekil 4.103'te verilmiştir. İlgili sonuçlar incelendiğinde ısı yayılmanın görüldüğü uç nokta üst akış bölgesinde $x' = -0.2$ iken, alt akış bölgesi için bu değer $x' = 0.4$ 'tür. Hacimsel konsantrasyonun artması sonucunda ara yüzey ısı akısı değerleri artmaktadır ve bu durum ısı performans artışının neticesidir. CuO nanoparçacığı için hacimsel konsantrasyonun sonuçlara etkisi $t' = 0.26$ anı için Vinodhan ve ark. (2016) tarafından kullanılan termofiziksel özellik modellerine göre Şekil 4.104'te sunulmuştur. İlgili sonuçlar incelendiğinde ısı yayılmanın ulaştığı nokta üst akış bölgesinde $x' = -0.4$ iken, alt akış bölgesi için bu değer $x' = 0.6$ 'dır. Isı transferi artış yüzdesi Vinodhan ve ark. (2016) tarafından önerilen modelle elde edilen sonuçta daha fazladır. Sürekli rejime ait ara yüzey ısı akısı değerleri Nguyen ve ark. (2007) - Mintsu ve ark. (2009) ile Vinodhan ve ark. (2016) tarafından verilen termofiziksel özellik modelleri bakımından sırasıyla Şekil 4.105'te ve Şekil 4.106'da sunulmuştur. Eksenel ısı iletiminin etkisi üst akış bölgesinde sürme eğiliminde olup, bu etki $Pe = 1$ 'deki duruma göre daha azdır. Bu bölge içinde ısı geçişinin önemli oranda gerçekleştiği açıktır. Akışa ters istikamette belirli noktaya kadar ısı transferinin etki aralığı devam etmektedir. Ayrıca radyal yönde ısı iletiminin etkisinde bu değerler artış sağlamaktadır. Isı transferinin sonucu olarak nanoakışkan için eksenel ısı iletimi artmaktadır. Isıtma başlangıcı olan $x' = 0$ noktasının sonrasında ara yüzey ısı akısı değerlerinin öncelikle artış göstererek maksimum bir değere geldiği ve bu değerden sonra eksenel yönde azaldığı görülmektedir. Buradaki temel etki sıcaklık farkının azalmasıdır. Maksimum değerlerin ortalama ısı transferi miktarını da artışa geçirdiği saptanmaktadır. Isı transferine etki açısından nanoparçacık kullanımı ısı gelişme mesafeleri öncesinde net bir biçimde fayda sağlamaktadır. Artan hacimsel konsantrasyon değerlerine göre ısı transferi artışı her iki modelle bulunsu da Nguyen ve ark. (2007) - Mintsu ve ark. (2009) modellerine ait sonuçlar oransal olarak daha düşüktür. Artan hacimsel konsantrasyon etkisinde sürekli rejime ulaşma süresi de azalmıştır. Bahsedilen bu durum Vinodhan ve ark. (2016) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine ait sonuçlarda daha baskın bir şekilde ortaya çıkmaktadır.



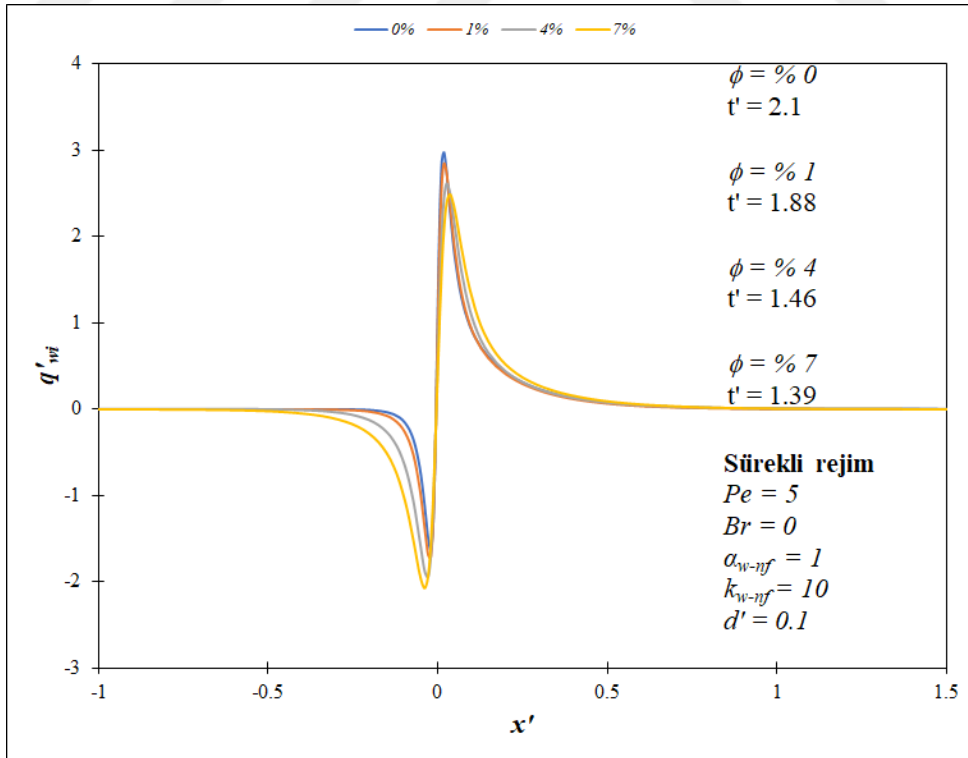
Şekil 4.103. Nguyen ve ark. (2007) – Mintsu ve ark. (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-CuO nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin $t' = 0.26$ anındaki karşılaştırılması



Şekil 4.104. Vinodhan ve ark. (2016) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-CuO nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin $t' = 0.26$ anındaki karşılaştırılması



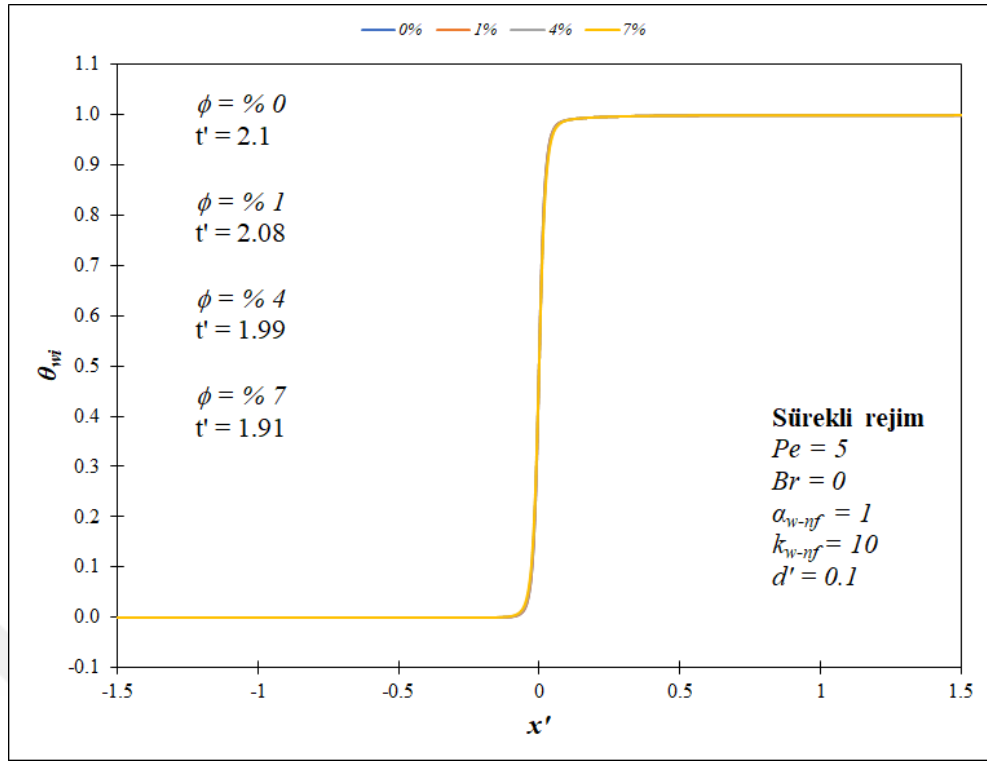
Şekil 4.105. Nguyen ve ark. (2007) – Mintsu ve ark. (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-CuO nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



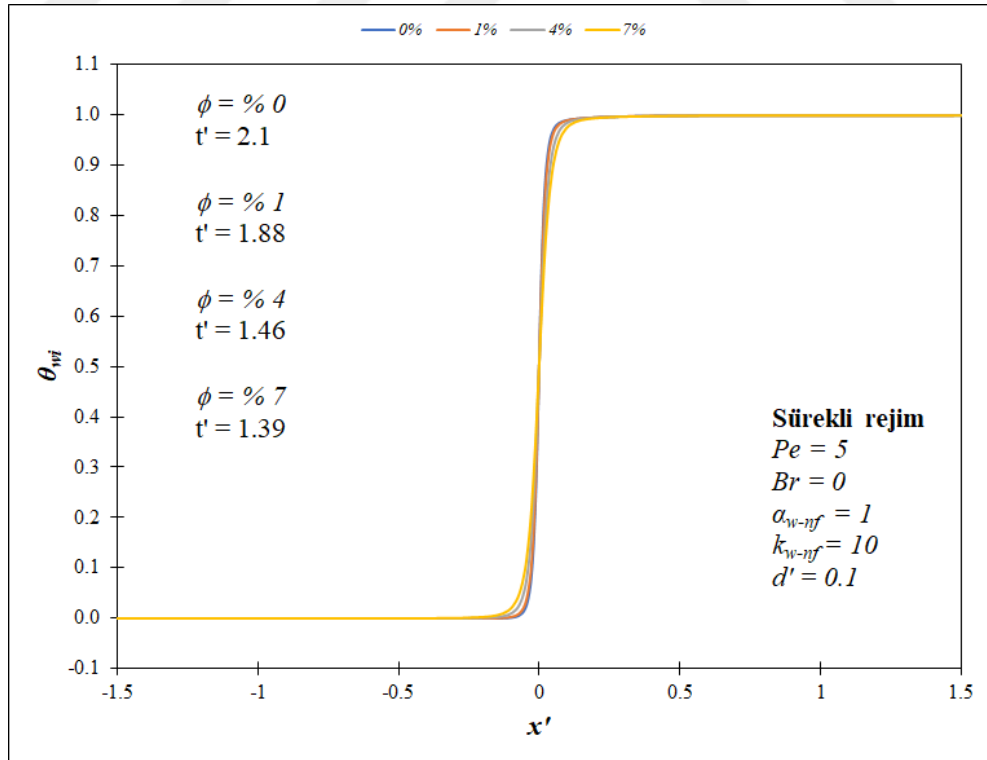
Şekil 4.106. Vinodhan ve ark. (2016) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-CuO nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması

Ara yüzey sıcaklık değerleri açısından $Pe = 5$ 'teki sürekli rejim sonuçları Nguyen ve ark. (2007) - Mintsas ve ark. (2009) ile Vinodhan ve ark. (2016) tarafından verilen termofiziksel özellik modellerine göre sırasıyla Şekil 4.107'de ve Şekil 4.108'de gösterilmiştir. Üst akış bölgesinde aksel iletim etkisi $Pe = 1$ 'deki kadar geniş aralığı kapsamamaktadır. Bunun neticesinde ara yüzey sıcaklığı değerleri, ısıtmanın başlangıcı olan $x' = 0$ noktasının öncesinde artış eğilimine girmektedir. Bu nanoparçacık etkisi $x' = 0$ etrafında belirgindir. Artan hacimsel konsantrasyonlarla ısı performans iyileştirilmesi ara yüzey sıcaklık değerleri ile gözlemlenmektedir. Bu değerler sonrasında alt akış bölgesinde $\theta_{wi} = 1$ 'e asimptotik anlamda erişmektedir. Nanoparçacık etkisi Nguyen ve ark. (2007) - Mintsas ve ark. (2009) modellerine göre $x' = 0$ civarında, Vinodhan ve ark. (2016) modellerine göre ise $-0.2 \leq x' \leq 0.2$ aralığı için gözlemlenmektedir. Hacimsel konsantrasyon değerlerindeki artışla beraber ısı transferi de artış eğilimine sahip olmaktadır ve bu sonuç ara yüzey sıcaklık değerleri için görülmektedir. Artan hacimsel konsantrasyonla sürekli rejime ulaşma için gereken süre de azaltılmaktadır. Nguyen ve ark. (2007) - Mintsas ve ark. (2009) tarafından verilen termofiziksel özellik modelleri ile elde edilen sonuçlarda bu azalma daha azdır.

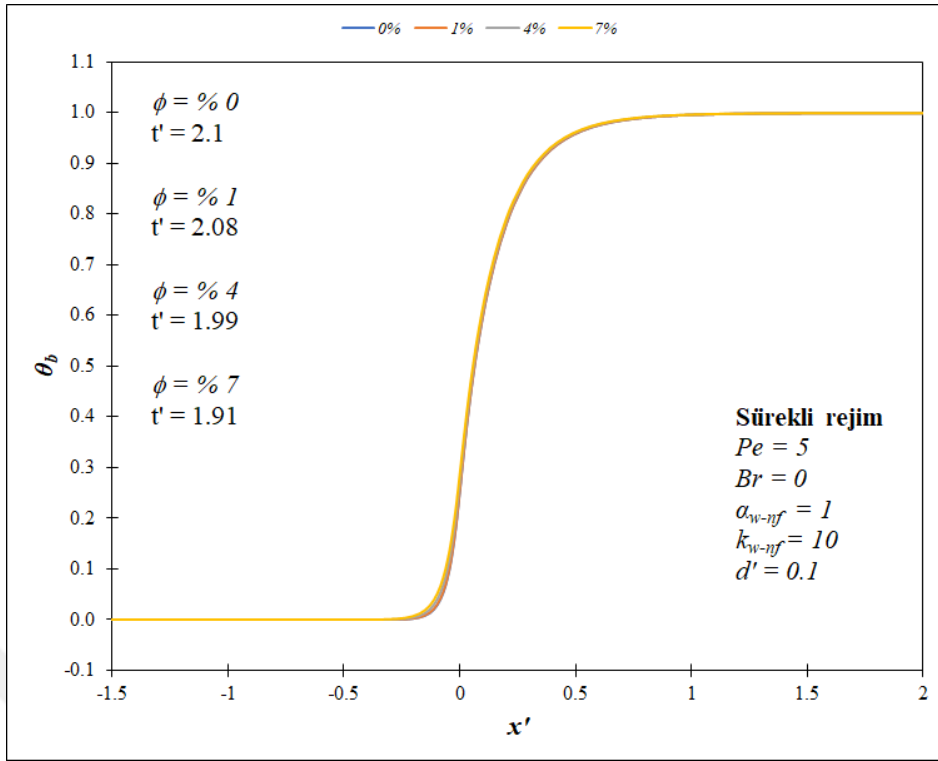
Yığık sıcaklık değerlerinin sürekli rejimdeki sonuçları Nguyen ve ark. (2007) - Mintsas ve ark. (2009) ile Vinodhan ve ark. (2016) tarafından önerilen termofiziksel özellik modelleri için sırasıyla Şekil 4.109'da ve Şekil 4.110'da verilmiştir. Isıl gelişmeden önce ara yüzey sıcaklık değerleri ile belirli bir aksel konumda karşılaştırıldığında daha düşük değerler görülmektedir. Belirtilen sonucun nedeni ısı transferinin kıyaslama noktasında büyük oranda bitmemiş olmasıdır. Bu süreç tamamlandığında yığık sıcaklık değerleri beklendiği üzere alt akış bölgesinde $\theta_b = 1$ değerine varmaktadır. Nguyen ve ark. (2007) - Mintsas ve ark. (2009) modellerine göre nanoparçacığın ısı transferine olan tesiri $-0.5 \leq x' \leq 0.5$ aralığı için daha belirgindir. Bu aralık, Vinodhan ve ark. (2016) modelleri için $-0.75 \leq x' \leq 0.75$ 'tür. Artan hacimsel konsantrasyon değerlerinin neticesi olarak nanoakışkan etkisiyle ısı transferi iyileştirmesi sağlanmaktadır. Hacimsel konsantrasyon oranı azaldıkça sürekli rejime erişme süresi de daha fazla elde edilmektedir. Buradaki azalma oranı Vinodhan ve ark. (2016) tarafından kullanılan modeller için daha çoktur. Nguyen ve ark. (2007) - Mintsas ve ark. (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre farklı hacimsel konsantrasyonlar için CuO nanoparçacığının etkisinde viskoz yitim göz önüne alınarak araştırılmıştır. Elde edilen ara yüzey ısı akısı değerleri için $t' = 0.26$ anına yönelik olarak



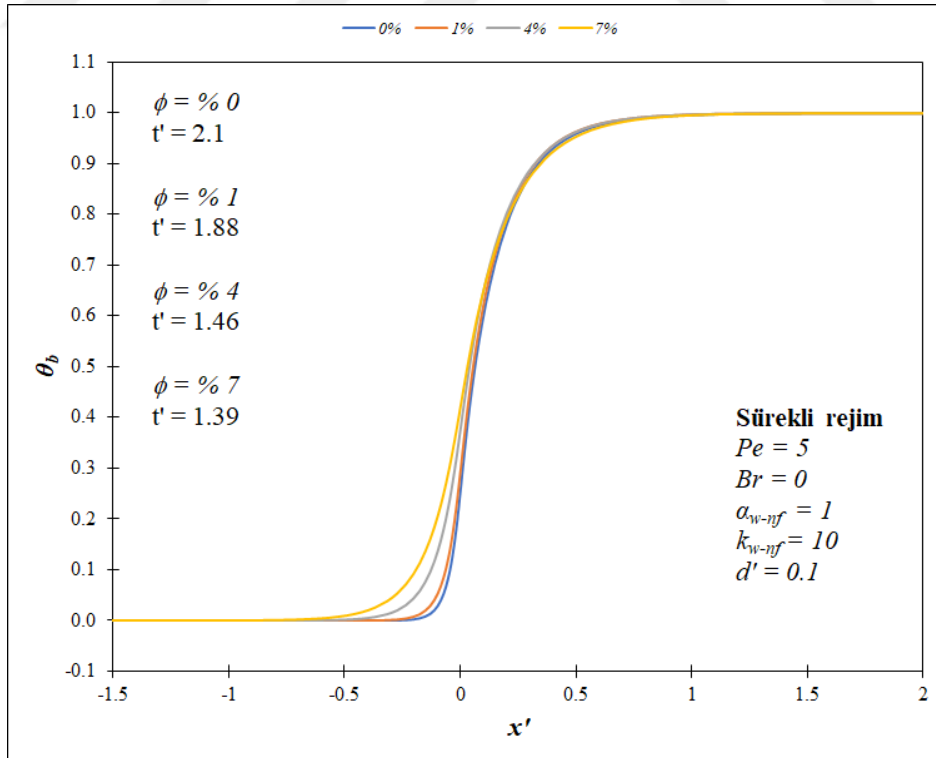
Şekil 4.107. Nguyen ve ark. (2007) – Mintsu ve ark. (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-CuO nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey sıcaklığına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



Şekil 4.108. Vinodhan ve ark. (2016) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-CuO nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey sıcaklığına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



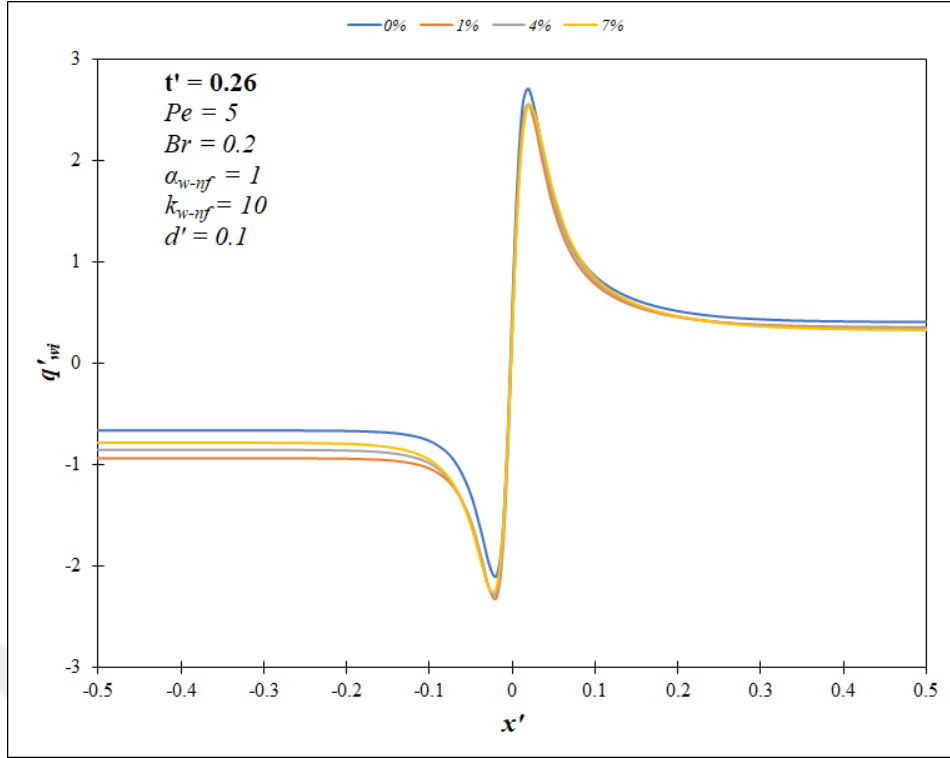
Şekil 4.109. Nguyen ve ark. (2007) – Mintsu ve ark. (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-CuO nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin yığık sıcaklığa etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



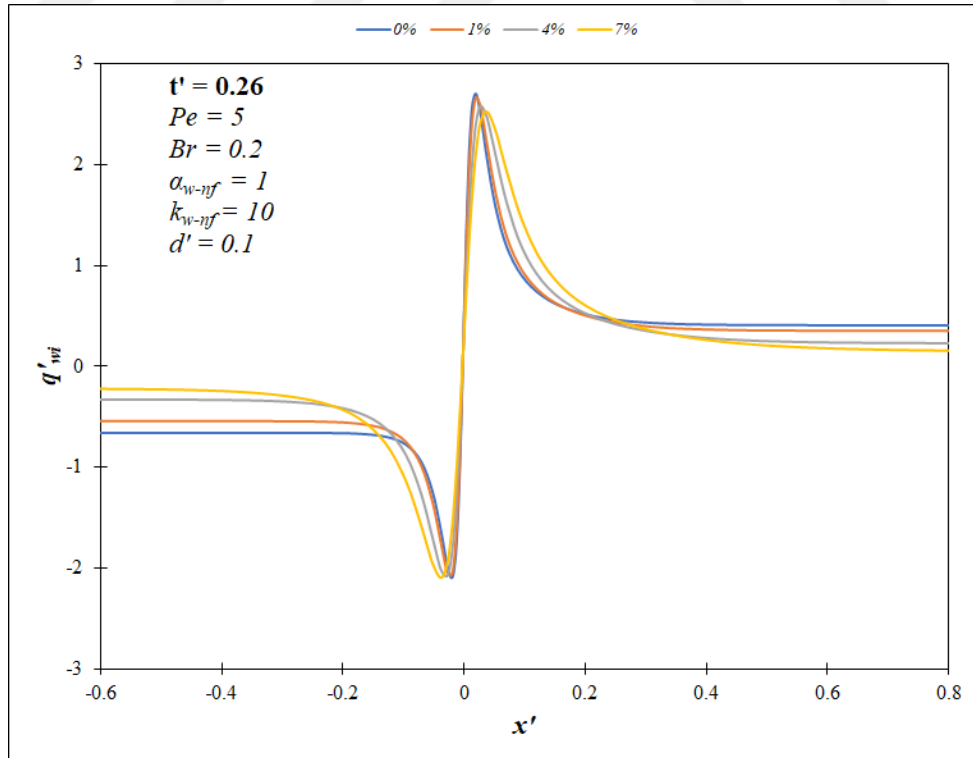
Şekil 4.110. Vinodhan ve ark. (2016) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-CuO nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin yığık sıcaklığa etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması

Şekil 4.111 verilmiştir. Buna göre ısı yayılma üst akış bölgesinde $x' = -0.15$ 'e gelmekteyken, alt akış bölgesi için ısı gelişme mesafesi $x' = 0.35$ 'tir. Isı transferindeki yön değişimi Brinkman sayısına bağlıdır. Bu da üst akış bölgesindeki sonuçlara yansımıştır. Eksenel ısı iletimi neticesinde ısıtma olmayan bölgeye doğru etkin bir ısı geçişi vardır. Isıl gelişme sağlanmadan önce ısı transferinin akışa ters yöndeki etkisi devam ederek, ön ısıtma uzunluğunu artışa zorlayan bir sonuç sağladığı gözlemlenmektedir. Hacimsel konsantrasyonun artmasıyla ara yüzey ısı akısı değerleri de artmaktadır. Bu durum ısı transferi artışından kaynaklanmaktadır. Hacimsel konsantrasyon etkisi CuO nanoparçacığı için aynı boyutsuz zaman değerinde Vinodhan ve ark. (2016) tarafından önerilen termofiziksel özellik modelleri için Şekil 4.112'deki sonuçlar sunulmuştur. Isıl gelişme uzunluğu bakımında yakın değerler bulunmuştur. Buna göre ısı gelişme üst akış bölgesinde $x' = -0.4$ 'ten sonra sağlanmaktayken, alt akış bölgesi için $x' = 0.6$ 'dan sonrasıdır. Isı transferi yönünün Brinkman sayısına bağlı olarak değişimi üst akış bölgesindeki sonuçlara yansımıştır. Sürekli rejim için elde edilen ara yüzey ısı akısı değerlerine Nguyen ve ark. (2007) - Mints ve ark. (2009) ile Vinodhan ve ark. (2016) tarafından verilen termofiziksel özellik modelleri bakımından sırasıyla Şekil 4.113'te ve Şekil 4.114'te yer verilmiştir. Nanoparçacığın ısı performans etkisi ısı gelişme uzunluklarının öncesinde net bir şekilde görülmektedir. Artan hacimsel konsantrasyonlar için elde edilen ısı transferinin artış eğilimi her iki model ile de gözlemlense de Vinodhan ve ark. (2016) modelleri ile elde edilen değerler daha yüksektir. Viskoz yitim etkisinde artan hacimsel konsantrasyon sonrasında sürekli rejime ulaşma süresini azalma kaydetmiştir. Bu da Vinodhan ve ark. (2016) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine ait sonuçlarda daha baskın eğilimdedir.

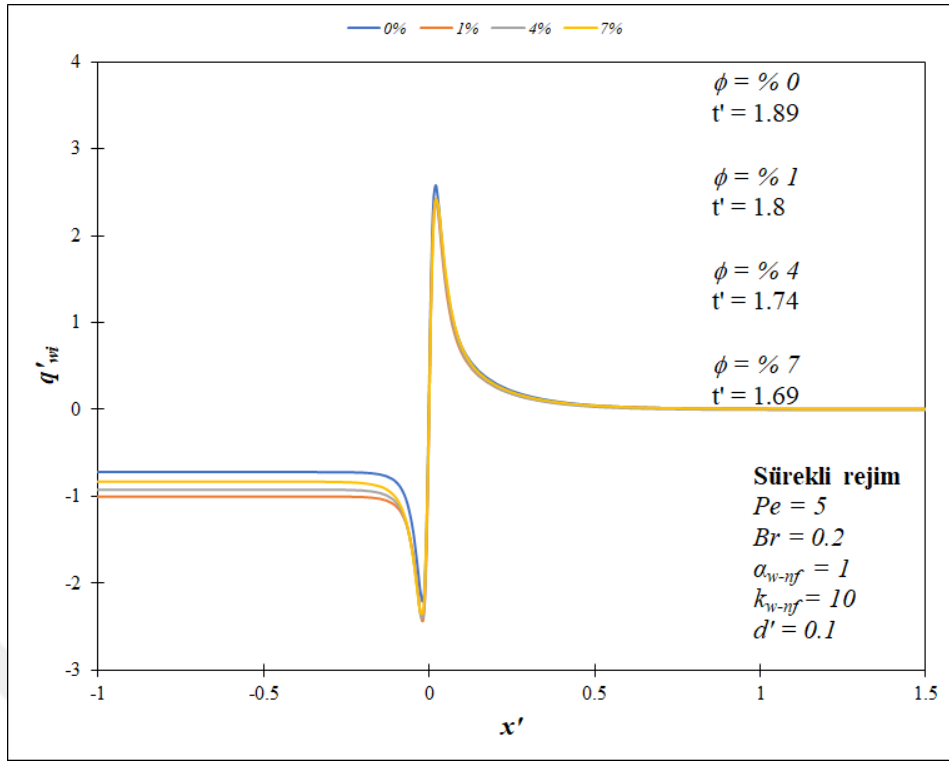
Ara yüzey sıcaklık değerleri açısından viskoz yitim etkisindeki sürekli rejim sonuçları Nguyen ve ark. (2007) - Mints ve ark. (2009) ile Vinodhan ve ark. (2016) tarafından sunulan termofiziksel özellik modellerine göre sırasıyla Şekil 4.115'te ve Şekil 4.116'dadır. Nguyen ve ark. (2007) - Mints ve ark. (2009) modelleri için yoğun şekildeki nanoparçacık etkisi $x' = 0$ noktasının çevresinde gözlemlenmektedir. Bu tesir Vinodhan ve ark. (2016) tarafından önerilen modellerde $-0.2 \leq x' \leq 0.2$ aralığındadır. Hacimsel konsantrasyon değerlerindeki artışla ısı transferinin de arttığı ara yüzey sıcaklık değerleri ile görülmektedir. Bu etki aynı anlamda sürekli rejime erişme süresini de azaltmaktadır.



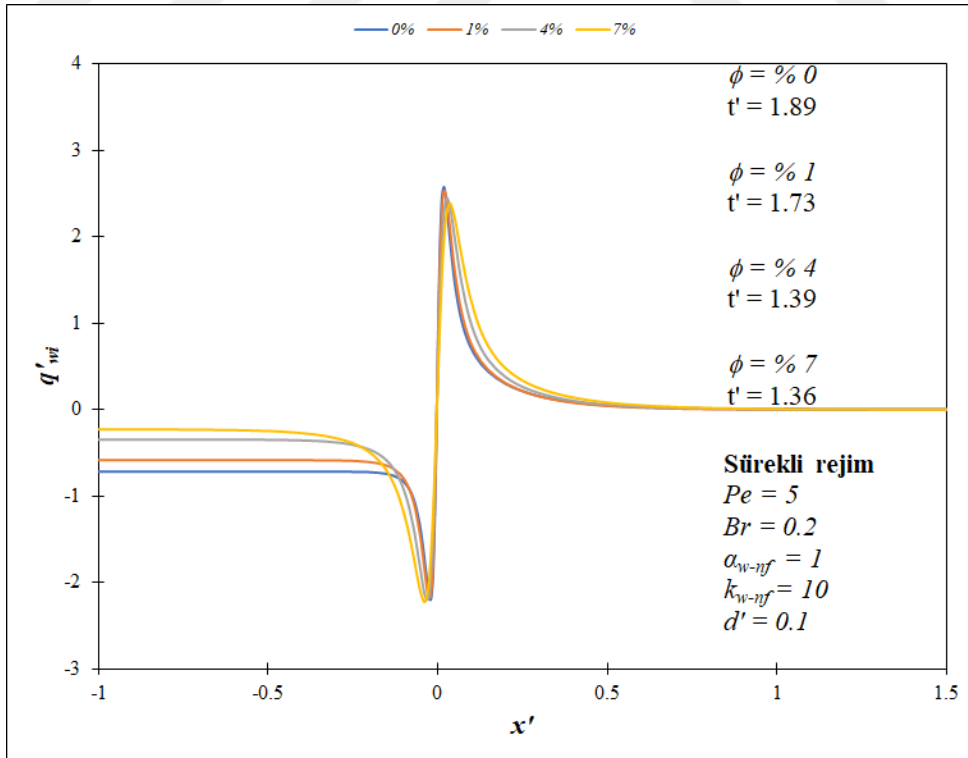
Şekil 4.111. Nguyen ve ark. (2007) – Mintsu ve ark. (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-CuO nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin $t' = 0.26$ anındaki karşılaştırılması



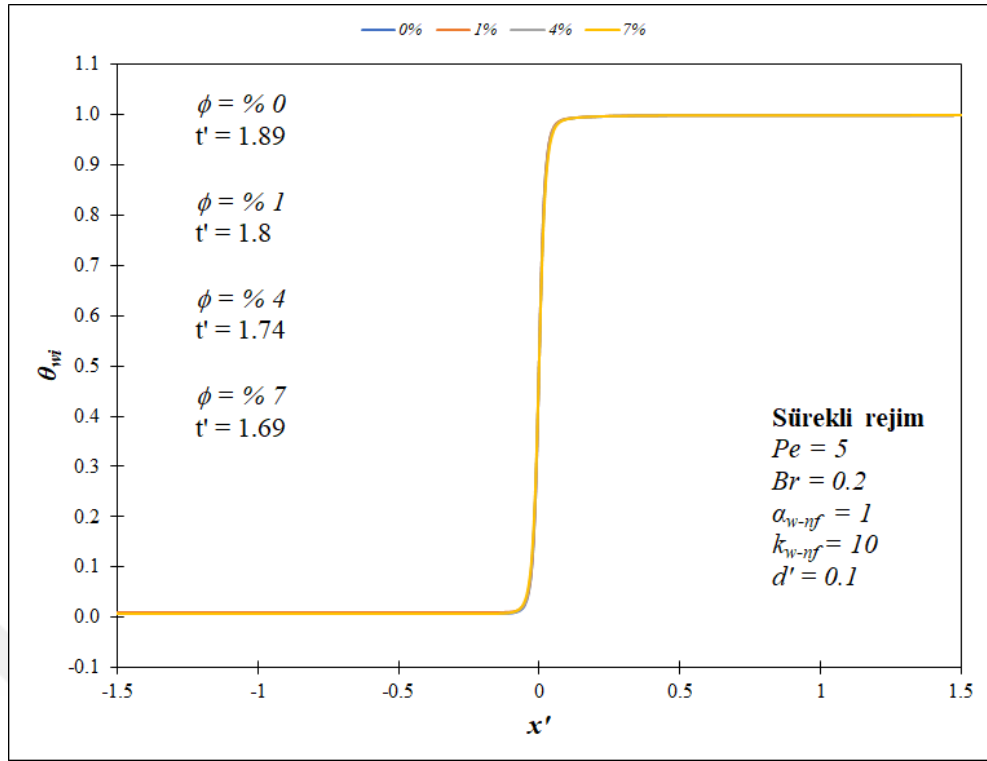
Şekil 4.112. Vinodhan ve ark. (2016) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-CuO nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin $t' = 0.26$ anındaki karşılaştırılması



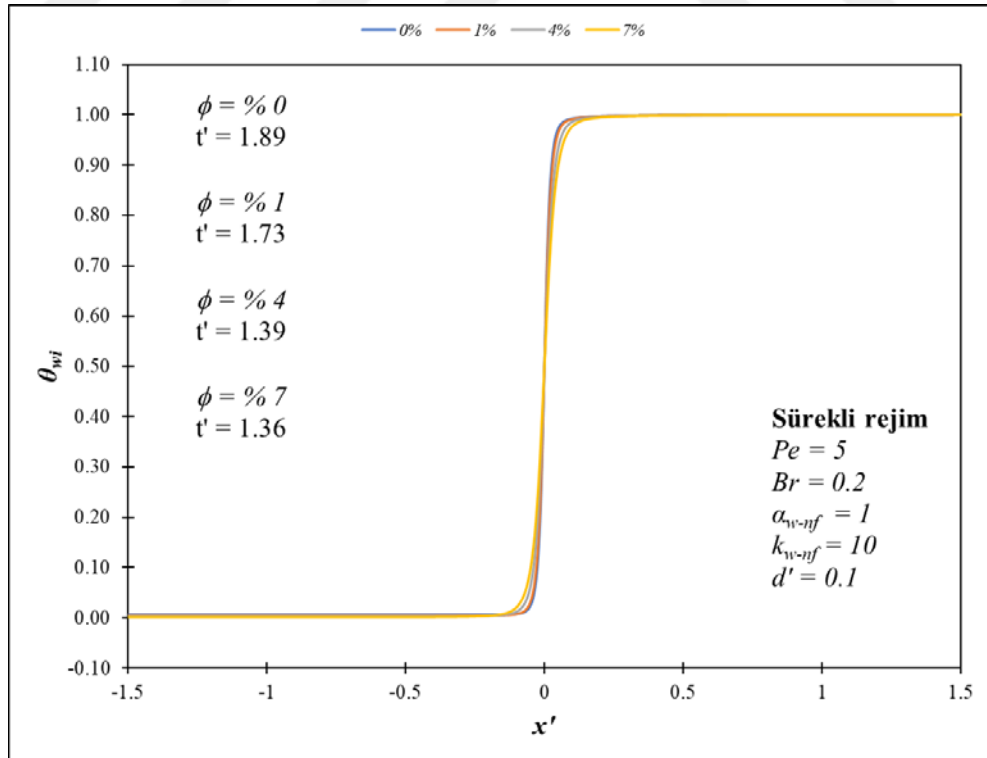
Şekil 4.113. Nguyen ve ark. (2007) – Mintsu ve ark. (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-CuO nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



Şekil 4.114. Vinodhan ve ark. (2016) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-CuO nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



Şekil 4.115. Nguyen ve ark. (2007) – Mintsu ve ark. (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-CuO nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey sıcaklığına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması

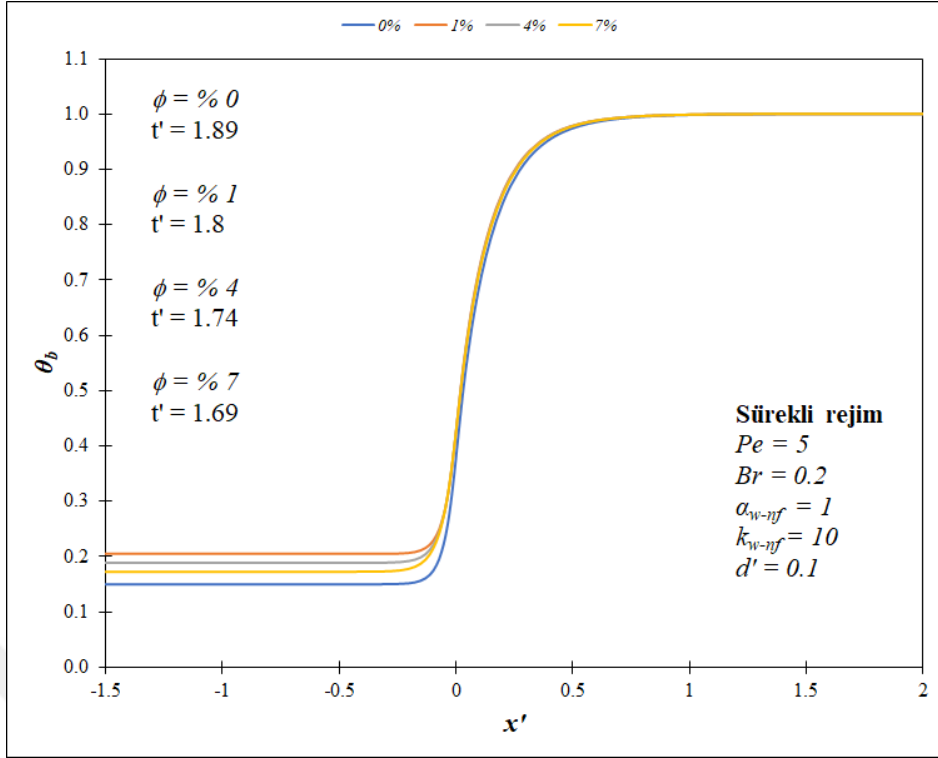


Şekil 4.116. Vinodhan ve ark. (2016) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-CuO nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey sıcaklığına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması

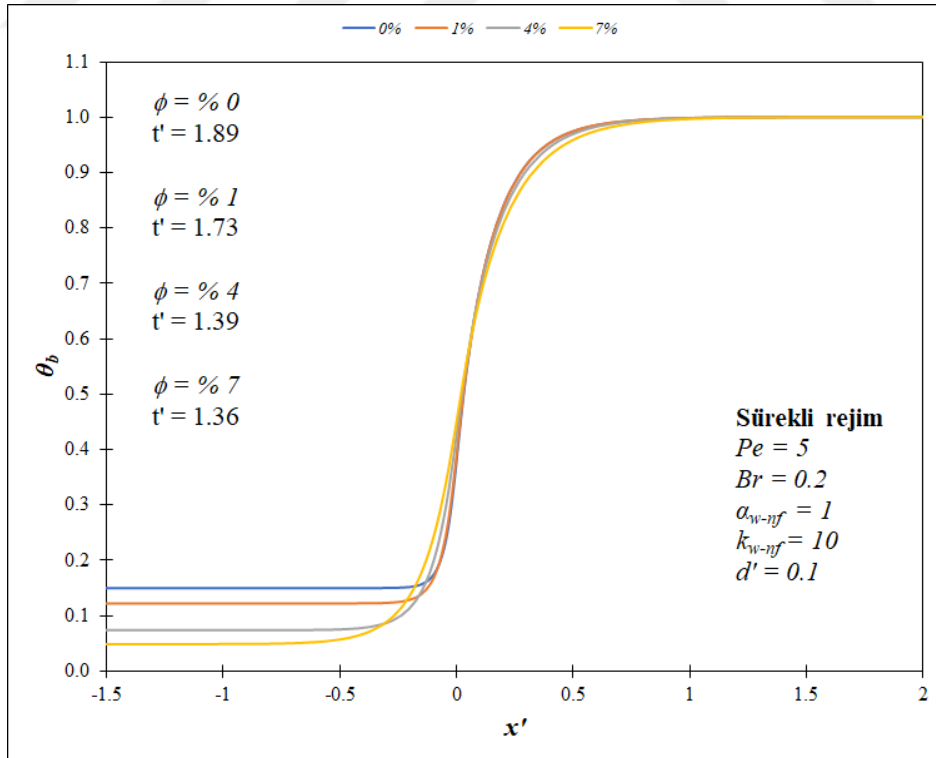
Buna bağılı olarak ara yüzey sıcaklığı değerlerinin belirli bir aksel nokta geçildikten sonra $\theta_{wi} = 1$ değerine ulaşması söz konusudur. Ancak Nguyen ve ark. (2007) - Mints ve ark. (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modelleri ile elde edilen sonuçlar göz önüne alındığında, bu azalma oranı göreceli olarak daha azdır.

Sürekli rejimde yığık sıcaklık değerleri açısından saptanan sonuçlar Nguyen ve ark. (2007) - Mints ve ark. (2009) ile Vinodhan ve ark. (2016) tarafından verilen termofiziksel özellik modellerine göre sırasıyla Şekil 4.117'de ve Şekil 4.118'de viskoz yitim etkisinde sunulmuştur. Nanoparçacığın ısı iyileştirmeye olan etkisi $-0.5 \leq x' \leq 0.5$ aralığında belirgindir. Bu da artan hacimsel konsantrasyona sahip nanoakışkanın kullanımı ile ısı transferi artışına neden olmaktadır. Hacimsel konsantrasyon oranı azaldıkça sürekli rejime erişme süresi artmaktadır. Buradaki azalma yüzdesi Vinodhan ve ark. (2016) tarafından kullanılan modellerle elde edilen sonuçlarda daha çoktur. Sonuçta ısı performans artışıyla yığık sıcaklık değerleri $\theta_b = 1$ değerine ulaşmaktadır.

Farklı hacimsel konsantrasyon değerleri için CuO nanoparçacığının etkisi Nguyen ve ark. (2007) - Mints ve ark. (2009) tarafından verilen termofiziksel özellik modellerine göre cidar kalınlık oranının yüksek olduğu durumda incelenmiştir. Ara yüzey ısı akısı değerlerindeki $t' = 0.26$ anı için verilen sonuçlarda ısı gelişme üst akış bölgesinde $x' = -0.4$ 'ten sonra sağlanmaktayken, alt akış bölgesi için $x' = 0.4$ 'ten sonrasındır. Artan hacimsel konsantrasyon değerleri neticesinde ara yüzey ısı akısı değerleri de artmaktadır. Isı transferi böylelikle artma eğilimine sahip olmaktadır. Aynı boyutsuz zaman değerinde hacimsel konsantrasyon etkisi CuO nanoparçacığı Vinodhan ve ark. (2016) için tarafından kullanılan termofiziksel özellik modellerine göre ısı gelişme uzunluklarına göre benzer değerler sağlanmıştır. İlgili sonuçlara ısı yayılma üst akış bölgesinde $x' = -0.5$ 'e ulaşırken, alt akış bölgesindeki ısı gelişim $x' = 0.5$ 'te sağlanmaktadır. Cidar kalınlık oranının yüksek oluşu neticesinde cidar bölgesindeki ısı anlamındaki direnç bir hayli fazla olmaktadır. Bu faktör de ısıtılan cidardan nanoakışkana transfer edilen ısıyı engellemektedir. Bu durum da ısı gelişme mesafesinde kısalma olmasına neden olmaktadır. Sürekli rejimdeki sonuçlar Nguyen ve ark. (2007) - Mints ve ark. (2009) ile Vinodhan ve ark. (2016) tarafından verilen termofiziksel özellik modelleri kapsamında nanoparçacık etkisi ısı gelişme mesafeleri öncesinde net bir şekilde görülmektedir. Her iki model de artan hacimsel konsantrasyon değerlerine göre elde edilen ısı transferi artışını net bir şekilde ortaya koymaktadır. Hacimsel konsantrasyon etkisiyle sürekli rejime ulaşma süresi azalmakta olup, bu durum Vinodhan ve ark. (2016) tarafından



Şekil 4.117. Nguyen ve ark. (2007) – Mintsu ve ark. (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-CuO nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin yığık sıcaklığa etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması

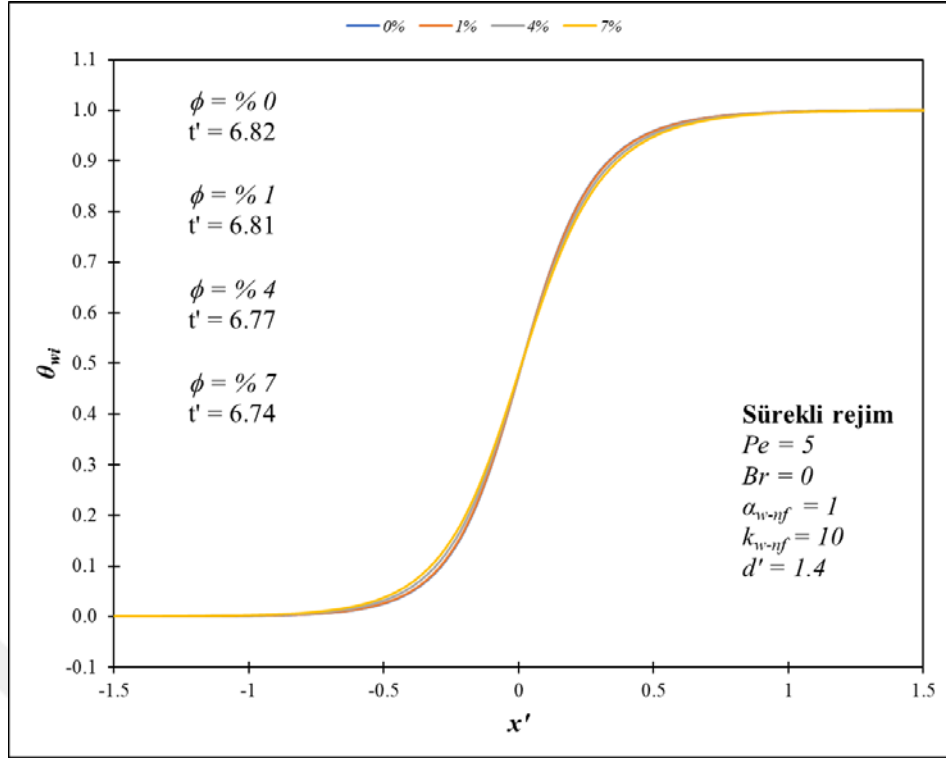


Şekil 4.118. Vinodhan ve ark. (2016) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-CuO nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin yığık sıcaklığa etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması

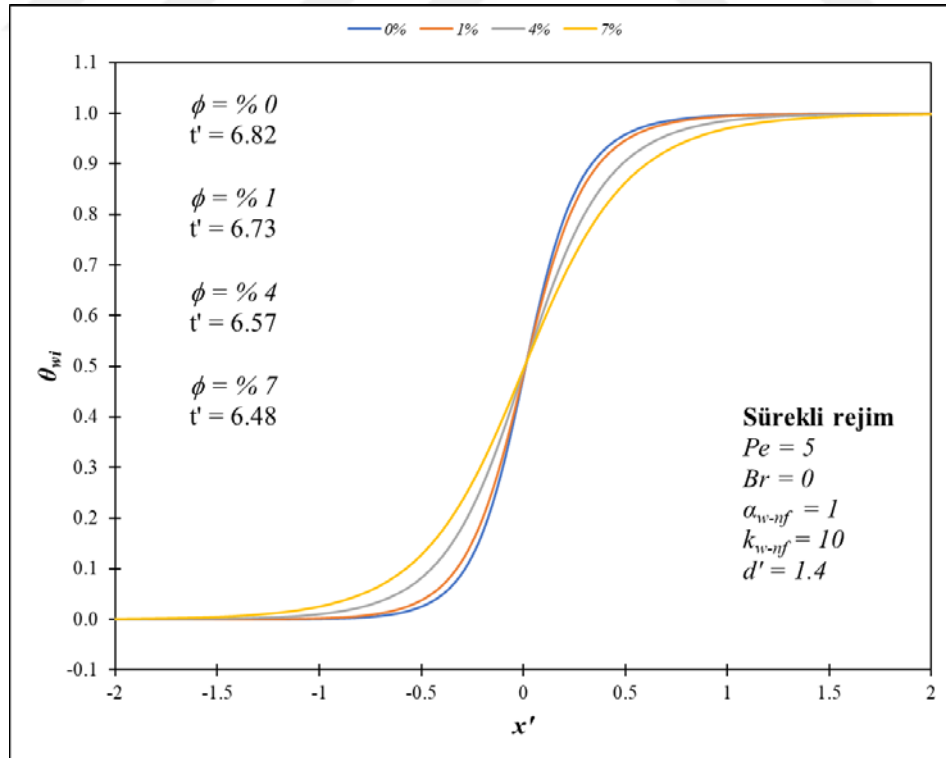
sunulan termofiziksel özellik modellerine ait sonuçlarda daha baskındır. Isıl gelişmesinin sağlanması ile $q'_{wi} = 0$ değeri minimum değer olarak beklendiği şekilde elde edilmektedir.

Ara yüzey sıcaklık değerleri açısından sürekli rejimde elde edilen sonuçlar Nguyen ve ark. (2007) - Mintsu ve ark. (2009) ile Vinodhan ve ark. (2016) tarafından verilen termofiziksel özellik modellerine göre sırasıyla Şekil 4.119'da ve Şekil 4.120'de sunulmuştur. Nguyen ve ark. (2007) - Mintsu ve ark. (2009) modellerine göre cidar kalınlık oranının yüksek değerinde nanoparçacık etkisi $-0.5 \leq x' \leq 0.5$ için açık bir şekilde gözlemlenmektedir. Bu aralık Vinodhan ve ark. (2016) tarafından verilen modellere göre ise $-1 \leq x' \leq 1$ 'dir. Cidar kalınlık oranı yüksek olduğunda ısıl direnç daha fazladır ve bu da ısı transferi değerlerinin azalmasına yol açmaktadır. Nanoakışkanın ısı transferini artıran etkisi ile bu ısıl ataletten kaynaklanan sorun önemli oranda ortadan kalkmaktadır. Ara yüzey sıcaklığı değerleri beklenen üzere $\theta_{wi} = 1$ değerine asimptotik olarak ulaşmaktadır. Artan hacimsel konsantrasyon değerleriyle ısı transferinin artışı ara yüzey sıcaklık değerleri sayesinde görülmektedir. Artan hacimsel konsantrasyon değerleri, sürekli rejime erişme süresini azaltan yönde tesir etmektedir. Nguyen ve ark. (2007) - Mintsu ve ark. (2009) tarafından verilen termofiziksel özellik modelleri ile elde edilen sonuçlarda bu artış daha azdır.

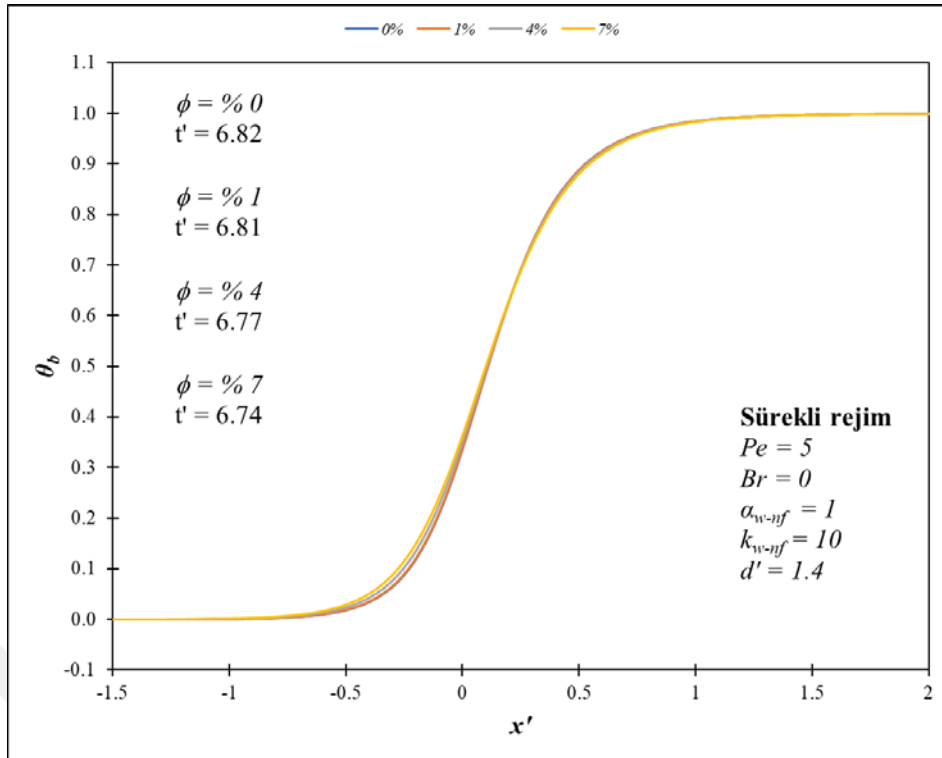
Yığık sıcaklık değerleriyle sürekli rejimde elde edilen sonuçlar Nguyen ve ark. (2007) - Mintsu ve ark. (2009) ile Vinodhan ve ark. (2016) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre sırasıyla Şekil 4.121'de ve Şekil 4.122'de cidar kalınlık oranının yüksek değerinde verilmiştir. Nguyen ve ark. (2007) - Mintsu ve ark. (2009) modelleri ile elde edilen sonuçlar için nanoakışkan açısından etki aralığı $-0.5 \leq x' \leq 0.5$ 'tür. Nanoparçacığın ısı transferine olan tesiri Vinodhan ve ark. (2016) modellerine göre $-1 \leq x' \leq 1$ aralığında gözlemlenebilir durumdadır. Bu yolla ısı transferi artışı, artan hacimsel konsantrasyon değerleriyle sağlanmaktadır. Sonuç anlamında yığık sıcaklık değerleri $\theta_b = 1$ değerine erişmektedir. Diğer sonuçlar için de belirtildiği üzere, hacimsel konsantrasyon oranı azaldıkça sürekli rejime ulaşma süresi daha fazla olmaktadır. Bunun yanı sıra artış gösteren hacimsel konsantrasyon ile bu süre de azalma eğilimi sergilemektedir ve bu azalış yüzdesi Vinodhan ve ark. (2016) tarafından kullanılan modellerle elde edilen sonuçlarda daha fazladır.



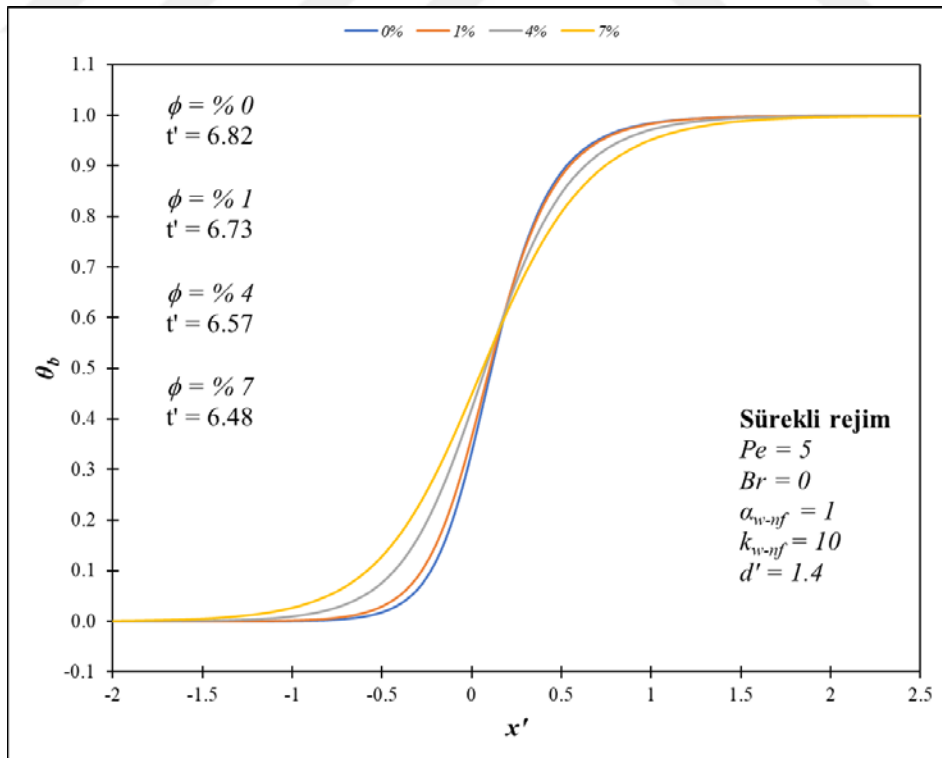
Şekil 4.119. Nguyen ve ark. (2007) – Mintsu ve ark. (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-CuO nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey sıcaklığına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



Şekil 4.120. Vinodhan ve ark. (2016) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-CuO nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey sıcaklığına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



Şekil 4.121. Nguyen ve ark. (2007) – Mintsu ve ark. (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-CuO nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin yığık sıcaklığa etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



Şekil 4.122. Vinodhan ve ark. (2016) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-CuO nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin yığık sıcaklığa etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması

Nanoparçacık olarak CuO kullanımına göre elde edilen sonuçlar birlikte sunulmuştur. Buna göre temel akışkan olan suyun mevcut ısıl özelliklerinin geliştirilmesi açısından nanoparçacık olarak CuO eklenmiştir. Bu durum açısından ilgili nanoparçacık suya % 1, % 4 ve % 7 hacimsel konsantrasyon değerlerinde ilave edilmiştir. Peclet sayısı, cidar kalınlık oranı, ısıl yayılım katsayısı, ısı iletim katsayısı ve Brinkman sayısı parametrelerinin etkisel değerlendirmesi ara yüzey ısı akısı, ara yüzey sıcaklığı, yığık sıcaklık değerleri kapsamında yapılmıştır. Buna göre belirtilen ısı transferi özelliklerinin zamana bağlı değişimi ilgili sonuçlarla sunulmuştur. Isı taşınım katsayısı ara yüzey ısı akısına, ara yüzey sıcaklığına ve yığık sıcaklığa bağlı olarak etkilenmektedir. Böylelikle ısı taşınım katsayısı temel akışkan olarak yalnızca suyun kullanıldığı durumla karşılaştırıldığında artmaktadır. Nanoparçacığın suya ilave edilmesi ile nanoakışkan elde edilmesi sonrasında göreceli olarak ısı iletim katsayısı artmaktadır. Nanoparçacık olarak CuO ilave edilmesinin ısıl performans açısından değerlendirilmesinde literatürde sunulan iki farklı model tercih edilmiştir. Termofiziksel özellik modelleri hususunda Nguyen ve ark. (2007) - Mints ve ark. (2009) ile Vinodhan ve ark. (2016) tarafından sunulan çalışmalar göz önüne alınmıştır. Sürekli rejime ulaşma süresinde azalma $Pe = 1$ 'den $Pe = 5$ 'e olan değer değişimiyle görülmektedir. Diğer Peclet sayısı değerleriyle sürekli rejime ulaşma süresinde önemli bir değişim gözlenmemektedir. Cidar kalınlık oranının artışı da sürekli rejime erişme süresini artıran bir faktör olarak ortaya çıkmaktadır. Belirtilen durum $d' = 1.4$ için oldukça belirgindir. Ek olarak, ara yüzey ısı akısı değerleri incelendiğinde ısı transferi de azalma göstermektedir. Öte yandan cidar kalınlık oranı arttıkça üst akış bölgesinde ısı transferinin azaldığı ve bu durumun $Pe = 1$ değerinde daha belirgin olduğu görülmektedir. Cidar kalınlık oranının değişmediği varsayıldığında ısı transferinin Peclet sayısı ile doğru orantı gösterdiği gözlemlenmektedir. Peclet sayısı artışı ile sürekli rejime aksel mesafe açısından daha erken erişildiği bir diğer sonuçtur. Daha yüksek akış hızının varlığında cidarla nanoakışkan arasındaki sıcaklık farkı beklendiği üzere artmaktadır, bu da ısı transferini artıran bir neticedir. Nanoparçacık ilavesi ile hacimsel konsantrasyon değerlerini artışı ile yığık sıcaklık değerlerinde artış meydana gelmektedir. Ara yüzey sıcaklığı ise kademeli bir azalma göstermektedir. Nusselt sayısı, ara yüzey sıcaklığı ile yığık sıcaklık arasındaki fark ile ters orantılıdır. Bu da doğal olarak hacimsel konsantrasyon artışı ile ara yüzey sıcaklığı ile yığık sıcaklık arasındaki farkı azaltıcı yönde bir etkiye neden olmaktadır. Dolayısıyla Nusselt sayısı artışı da ısı transferinin arttığını göstermektedir. Bu hususta Nguyen ve ark. (2007) - Mints ve ark. (2009) ile Vinodhan ve ark. (2016) tarafından önerilen termofiziksel

özelliklere ait sonuçlar birbiriyle karşılaştırıldığında, CuO nanoparçacığının temel akışkan olan suya eklenmesi neticesinde geçerli olan bu iki modelin birbirine yakın sonuçları düşük hacimsel konsantrasyon değerlerinde verdiği görülmektedir. Hacimsel konsantrasyon değerleri arttıkça sürekli rejime erişme süresi de artmaktadır. Bu duruma tek karşıt değerlendirme Nguyen ve ark. (2007) - Mints ve ark. (2009) tarafından sunulan modelle elde edilen % 1 hacimsel konsantrasyona aittir. Nitekim $\phi \leq \% 1$ değerleri için sürekli rejime ulaşma süresi değişmemektedir. Ancak bu artış eğilimi Vinodhan ve ark. (2016) tarafından verilen model kullanıldığında daha fazladır.

4.2.3. Su-TiO₂ nanoakışkanının etkisi

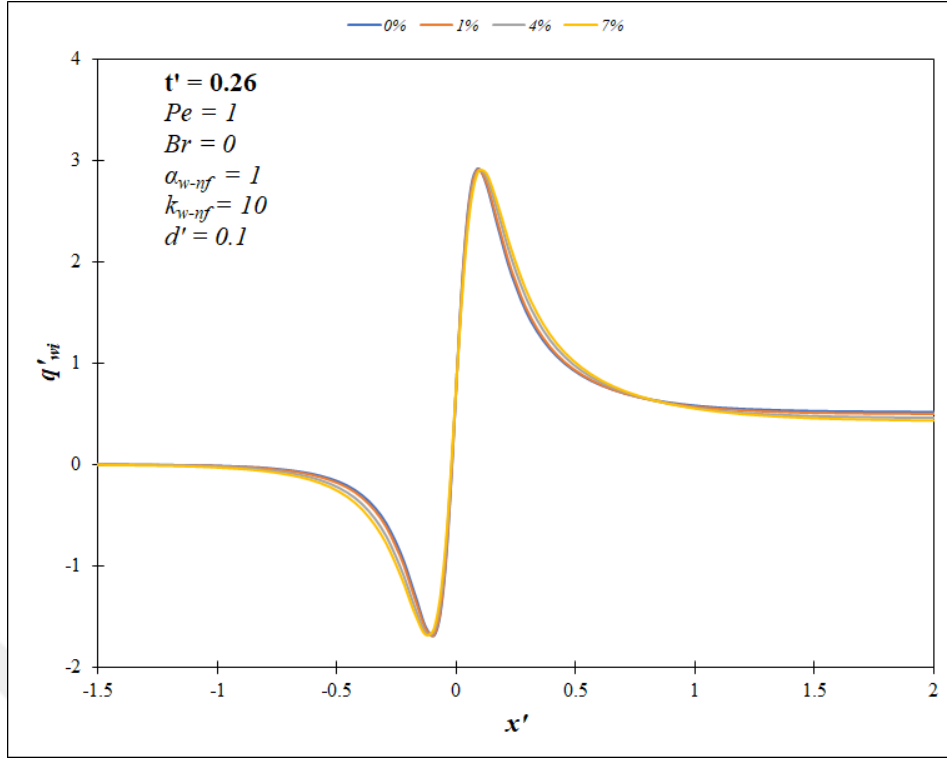
Nanoparçacık olarak TiO₂ ilavesi ile temel akışkan olarak kullanılan suyun ısı transferi açısından özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Buna göre ilgili nanoparçacık suya % 1, % 4 ve % 7 hacimsel konsantrasyon değerlerinde eklenmiştir. Ara yüzey ısı akısı, ara yüzey sıcaklığı, yığık sıcaklık değerleri kapsamında Peclet sayısı, cidar kalınlık oranı, ısı yayılım katsayısı, ısı iletim katsayısı ve Brinkman sayısı parametrelerinin çözüme etkisi değerlendirilmiştir. Bu amaçla zamana bağlı olarak belirtilen ısı transferi özelliklerinin değişimi açısından sonuçlar ortaya konmuştur.

Farklı hacimsel konsantrasyon değerleri için TiO₂ nanoparçacığının etkisi Buongiorno (2006) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre düşük Peclet sayısında incelenmiştir. Buna göre elde edilen ara yüzey ısı akısı değerleri Şekil 4.123'te $t' = 0.26$ anı için verilmiştir. Üst akış bölgesi açısından eksenel ısı iletiminin etkisi görülmektedir. Bu bölge içinde önemli anlamda ısı transferinin meydana geldiği saptanmaktadır. Isı transferi etkisinin akışa ters olacak şekilde belirli bir noktaya devam ettiği gözlemlenmektedir. Ayrıca radyal ısı iletimiyle ara yüzey ısı akısı değerleri de öncelikle artmaktadır. Bu etkiyle nanoakışkan için eksenel ısı iletimi artarak, ara yüzey ısı akısı değerleri bir müddet sonra azalma eğilimine girmektedir. Alt akış bölgesi için ise ara yüzey ısı akısı değerlerinin öncelikle artış göstererek maksimum bir değere geldiği ve sonra da akışla aynı yönde ilerledikçe de azaldığı gözlemlenmektedir. Bu durumun cidar ile nanoakışkan arasındaki sıcaklık farkından kaynaklanmaktadır. Genel olarak artan radyal ısı iletimi ile ortalama ısı transferi de yüksek değerlerin varlığıyla artmaktadır. İlgili sonuçlara ısı yayılma noktası üst akış bölgesinde $x' = -1$ iken, alt akış bölgesi için ısı gelişme noktası $x' = 1$ 'dir. Artan hacimsel konsantrasyon değerleri neticesinde ara yüzey ısı akısı değerleri artmaktadır. Bu durum da ısı transferi artışının göstergesidir. Aynı boyutsuz zaman değerinde hacimsel konsantrasyon etkisi TiO₂ nanoparçacığı için

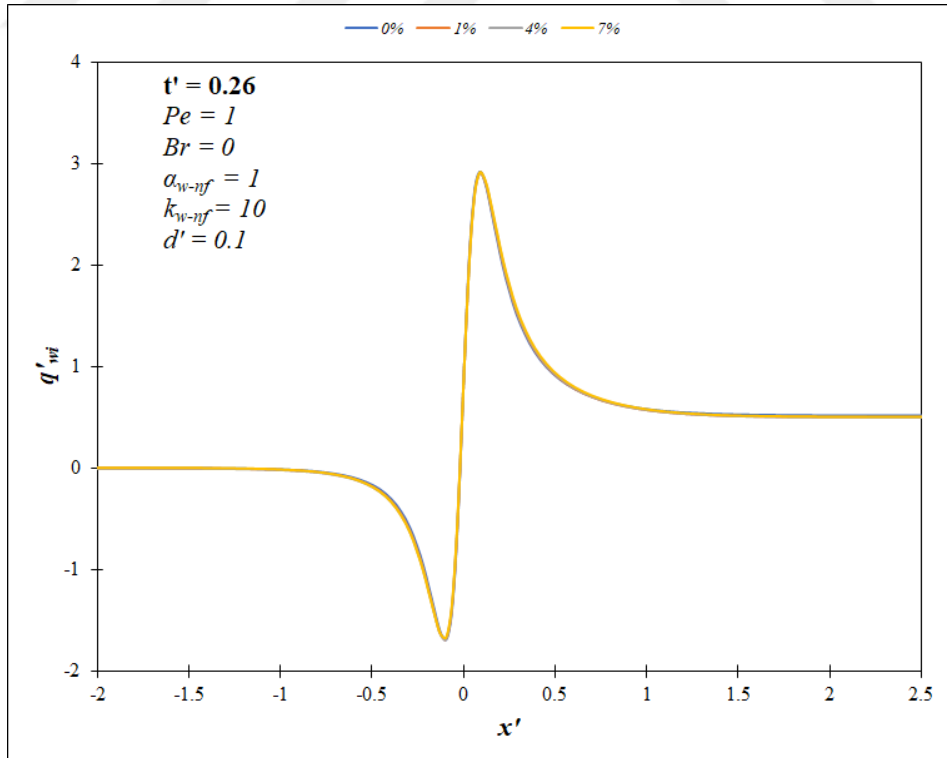
Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından kullanılan termofiziksel özellik modellerine göre de Şekil 4.124'te sunulmuştur. Isıl yayılma için üst akış bölgesinde $x' = -1$ 'den önce sağlanmaktayken, alt akış bölgesi için $x' = 1$ 'de ısıl gelişme gerçekleşmektedir. Isı transferi artışı da farklı oranlarda gözlemlenmiştir. Sürekli rejimde ara yüzey ısı akısı açısından bulunan sonuçlar Buongiorno (2006) ve Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından verilen termofiziksel özellik modelleri bakımından sırasıyla Şekil 4.125'de ve Şekil 4.126'da yer almaktadır. Nanoparçacık etkisi ısıl gelişme mesafeleri öncesinde net bir şekilde görülmektedir. Her iki model de artan hacimsel konsantrasyon değerlerine göre elde edilen ısı transferinin artma eğilimini net bir biçimde ortaya koymaktadır. Saptanan ısı transferi artışı değerleri nispeten aynıdır. İlave olarak artan hacimsel konsantrasyon etkisi sürekli rejime ulaşma süresi de artış göstermekte olup, bu etki Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modelleri ile sağlanan sonuçlarda daha azdır.

Ara yüzey sıcaklık değerleri açısından sürekli rejimde elde edilen sonuçlar Buongiorno (2006) ve Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından verilen termofiziksel özellik modellerine göre sırasıyla Şekil 4.127'de ve Şekil 4.128'de sunulmuştur. Üst akış bölgesindeki eksenel ısı iletimi geniş bir mesafeyi içermektedir. Bu etki neticesinde ara yüzey sıcaklığı değerleri ısıtma başlangıcını olan $x' = 0$ noktasından evvel artma göstermektedir. Düşük Peclet sayısındaki nanoparçacık etkisi Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından önerilen modeller için $x' = 0$ etrafında görülürken, Buongiorno (2006) tarafından verilen modellerle elde edilen sonuçlarda durum $-0.5 \leq x' \leq 0.5$ aralığını işaret etmektedir. Sonuç bazında ara yüzey sıcaklığı değerleri alt akış bölgesinde $\theta_{wi} = 1$ değerine asimptotik olarak erişmektedir. Artan hacimsel konsantrasyon değerleriyle ısı transferinin artış eğilimi ara yüzey sıcaklık değerleri ile görülmektedir. Artan hacimsel konsantrasyon etkisi sürekli rejime erişme süresini artırmaktadır.

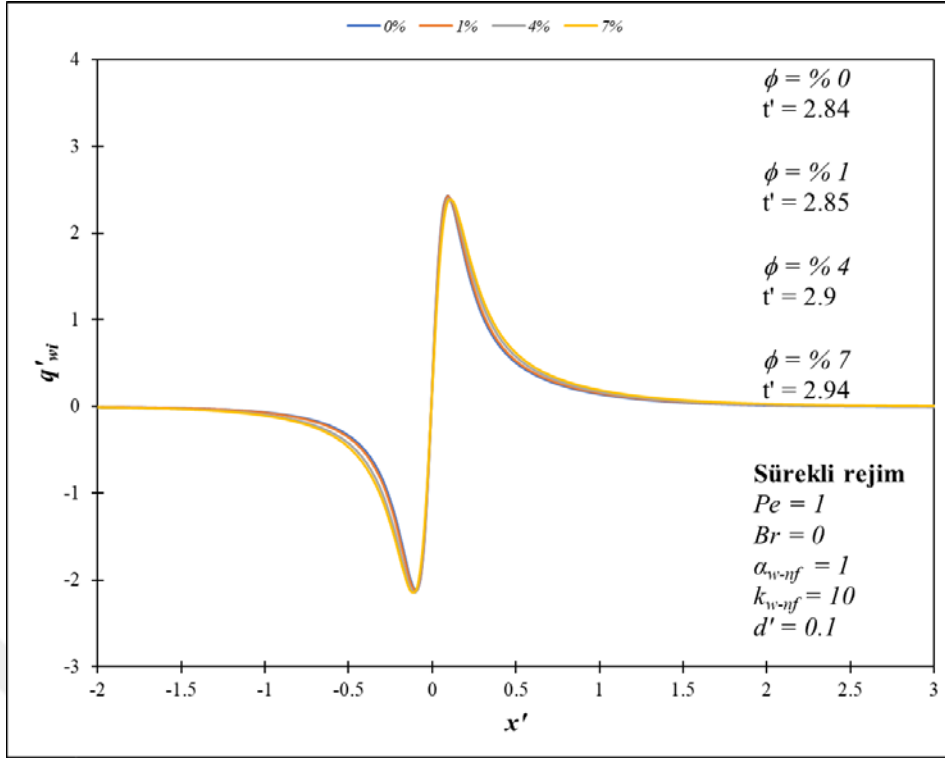
Sürekli rejimde yığık sıcaklık değerleriyle saptanan sonuçlar Buongiorno (2006) ve Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre sırasıyla Şekil 4.129'da ve Şekil 4.130'da düşük Peclet sayısı için verilmiştir. Isıl gelişimin sağlanmasından önce ara yüzey sıcaklık değerlerine göre aynı konum için daha düşük değerler elde edilmektedir. Bu durum sebebi belirtilen konumda ısı transferi etkisini mevcut olmaya devam etmesidir. Sürekli rejimde yığık sıcaklık değerleri alt akış bölgesinde $\theta_b = 1$ değerine varmaktadır. Nanoparçacığın ısı transferine yoğun etkisi Buongiorno (2006) modelleri için $-1.5 \leq x' \leq 1.5$ aralığında açık bir şekilde



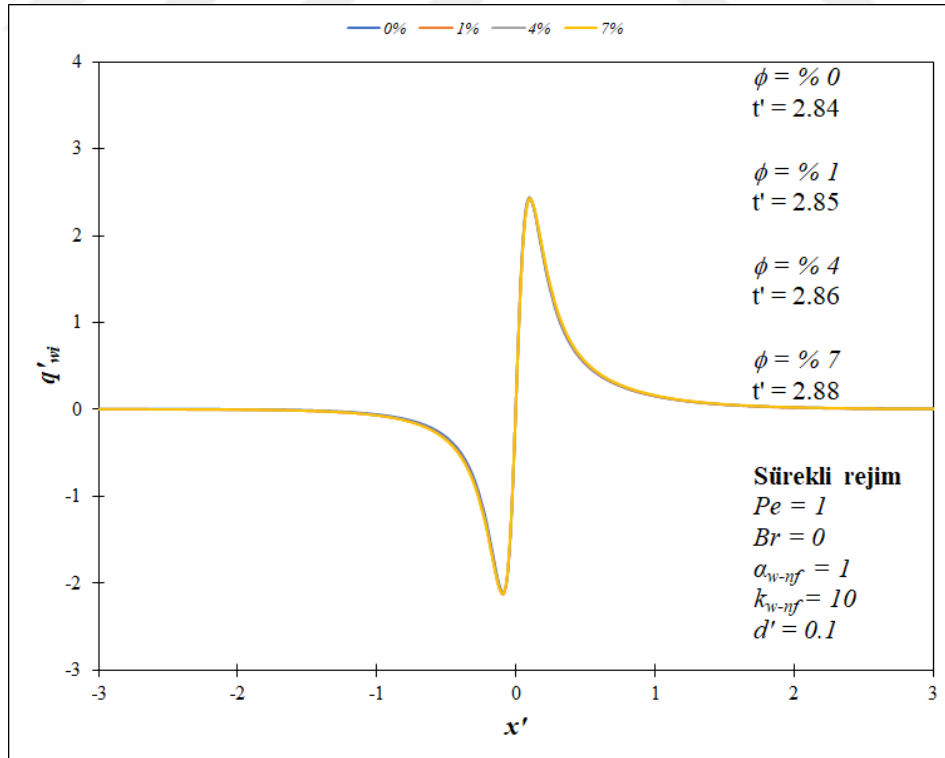
Şekil 4.123. Buongiorno (2006) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-TiO₂ nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin $t' = 0.26$ anındaki karşılaştırılması



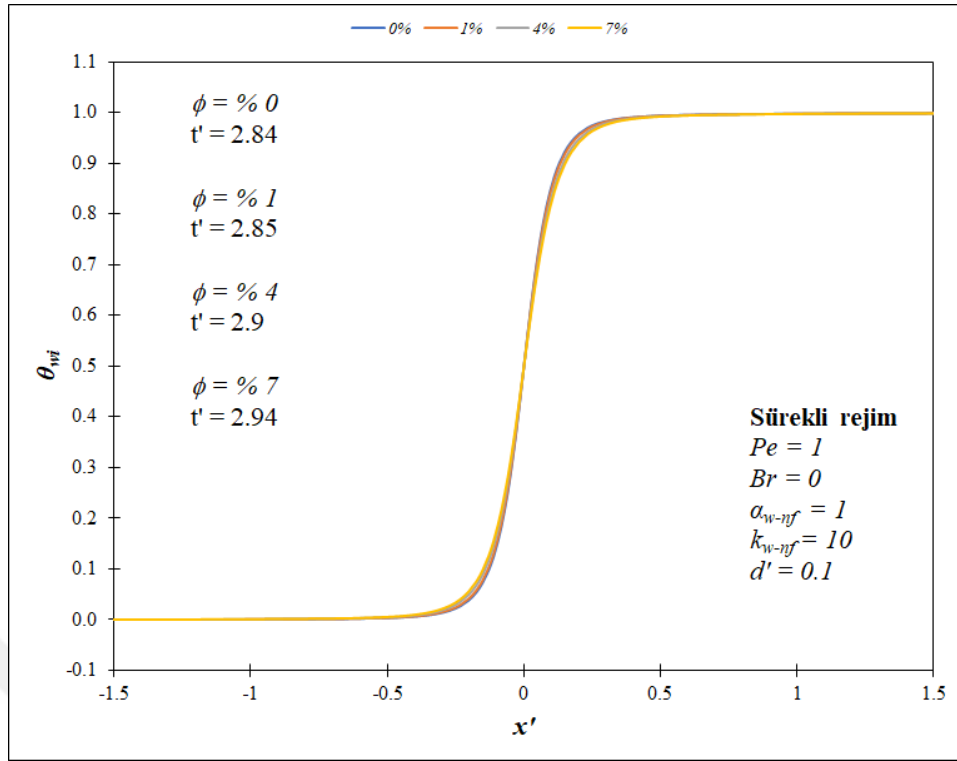
Şekil 4.124. Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-TiO₂ nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin $t' = 0.26$ anındaki karşılaştırılması



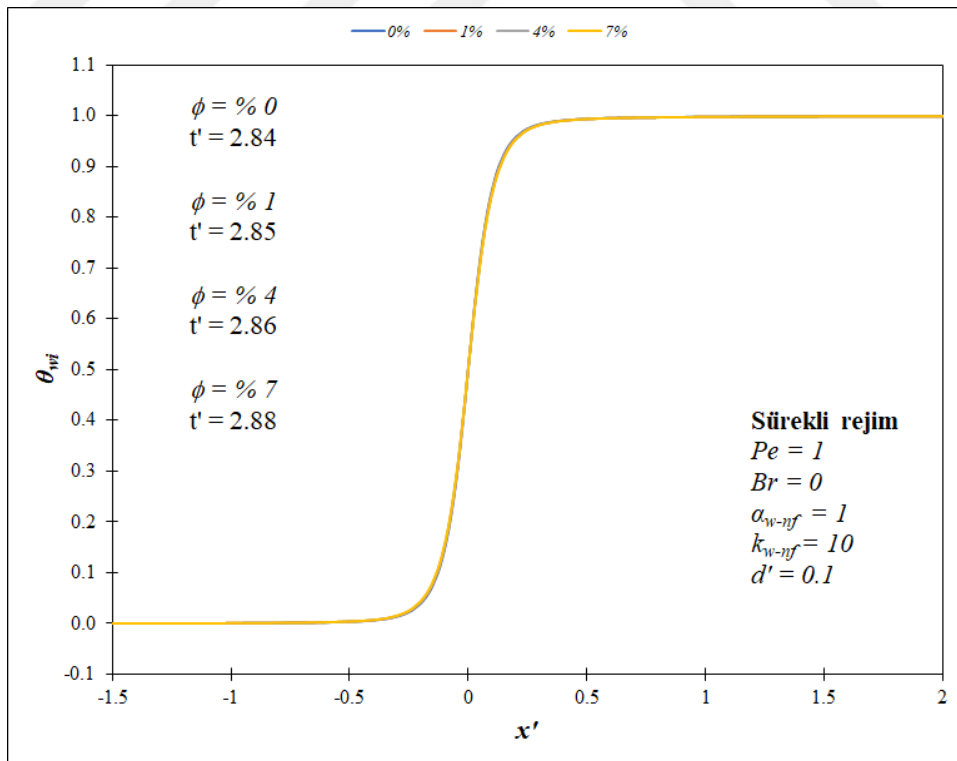
Şekil 4.125. Buongiorno (2006) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-TiO₂ nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



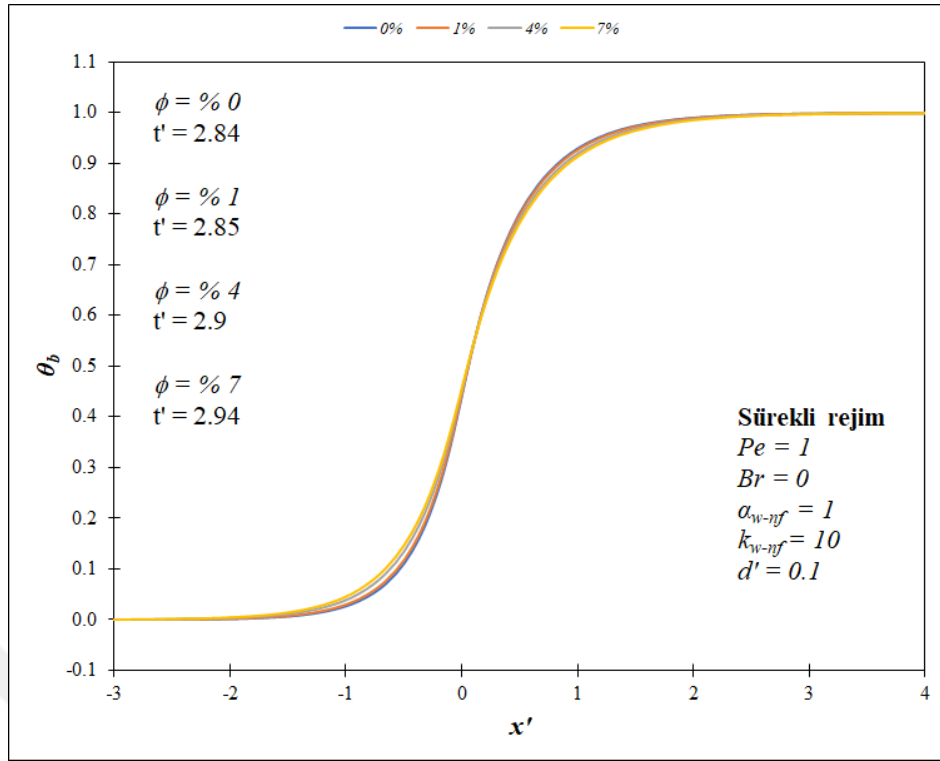
Şekil 4.126. Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-TiO₂ nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



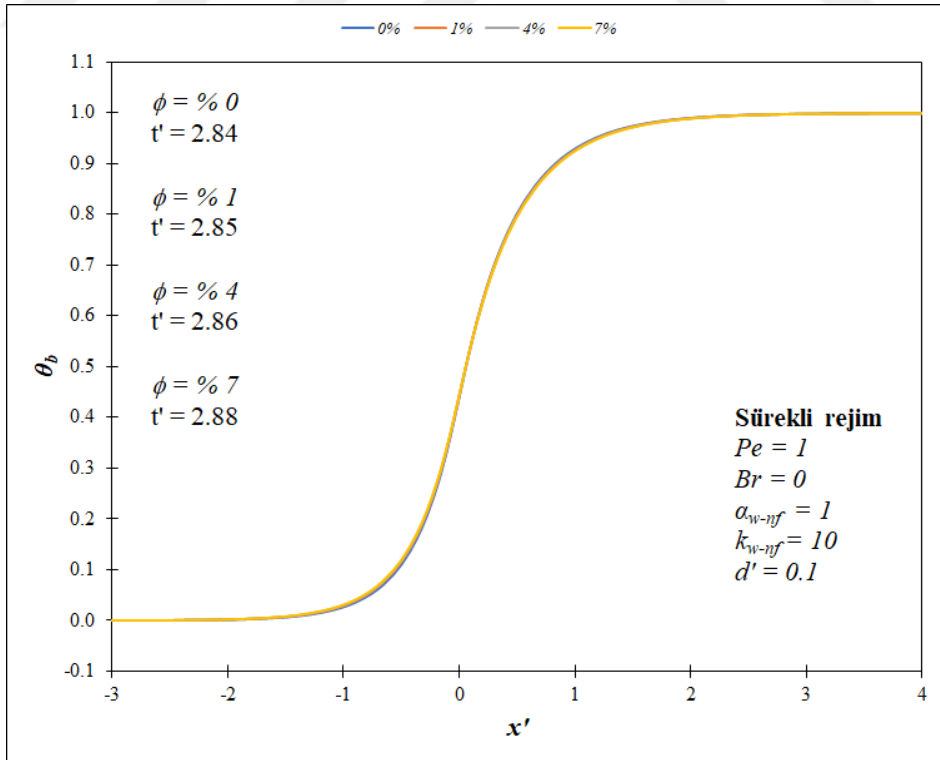
Şekil 4.127. Buongiorno (2006) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-TiO₂ nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey sıcaklığına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



Şekil 4.128. Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-TiO₂ nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey sıcaklığına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



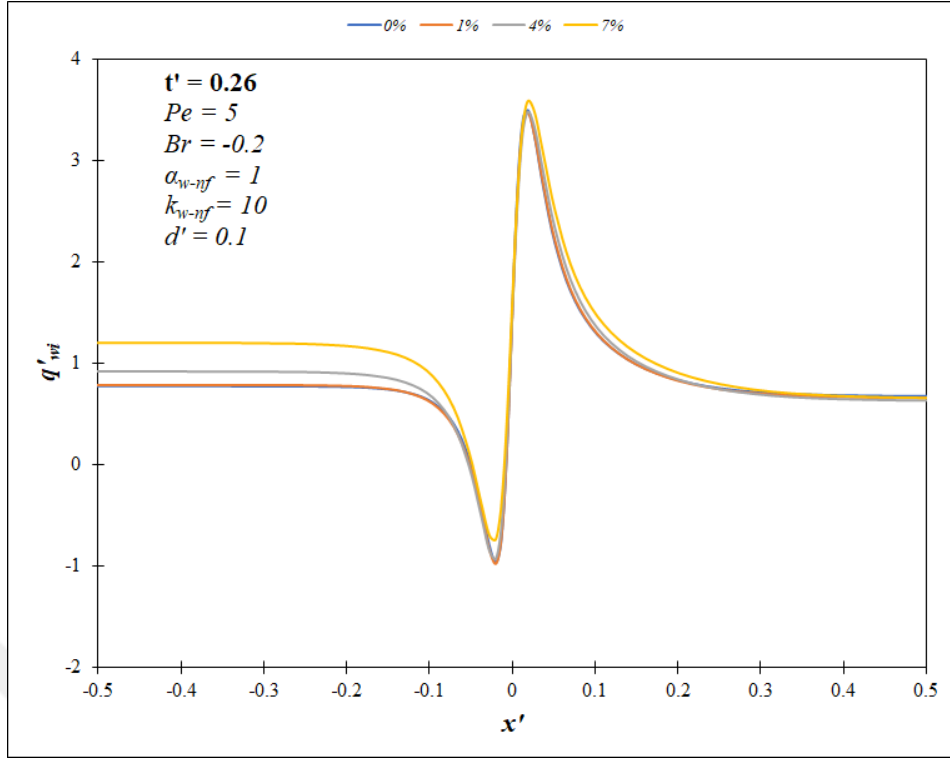
Şekil 4.129. Buongiorno (2006) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-TiO₂ nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin yığık sıcaklığa etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



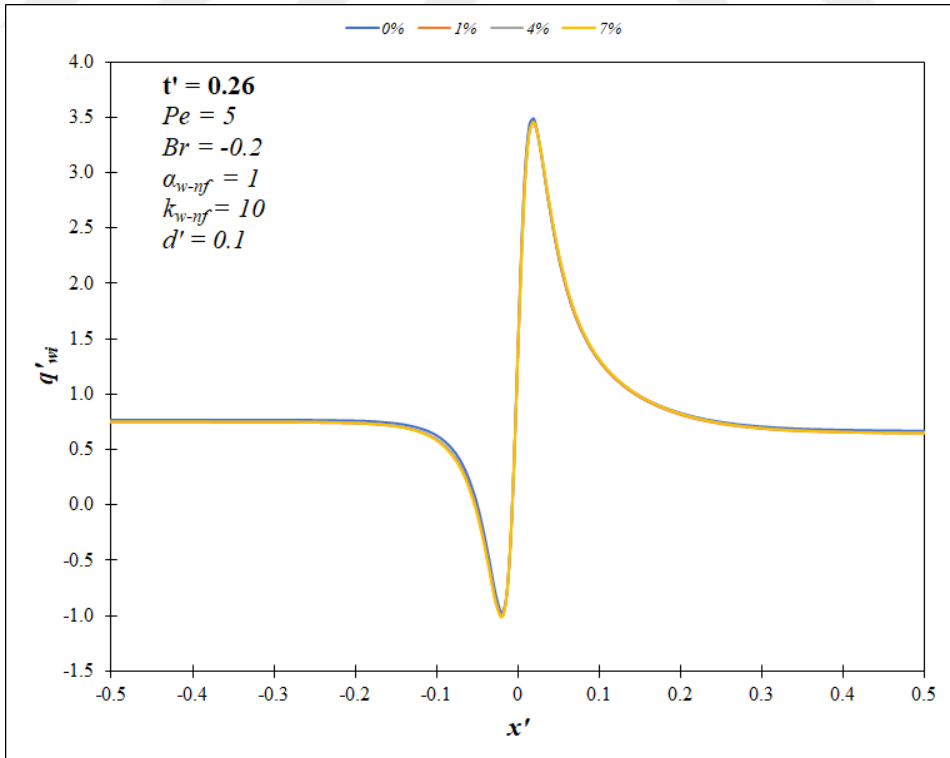
Şekil 4.130. Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-TiO₂ nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin yığık sıcaklığa etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması

ortaya çıkmaktayken, Duangthongsuk ve Wongwises (2009) modeller için $-1 \leq x' \leq 1$ aralığı söz konusudur. Bu da artış gösteren hacimsel konsantrasyon değerlerinin sonucu olarak ısı transferinin de artışı sağlanmaktadır. Diğer sonuçlarda da ifade edildiği üzere, hacimsel konsantrasyon oranı azaldıkça sürekli rejime ulaşma süresi de daha az olmaktadır. Ayrıca her iki model için $\phi \leq \% 1$ olan hacimsel konsantrasyon değerlerinde sürekli rejime ulaşma süresinin değişmediği görülmekteyse de artan hacimsel konsantrasyon etkisinde bu süre de artmaktadır ve bu artış Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından kullanılan modellerle elde edilen sonuçlarda daha da azdır.

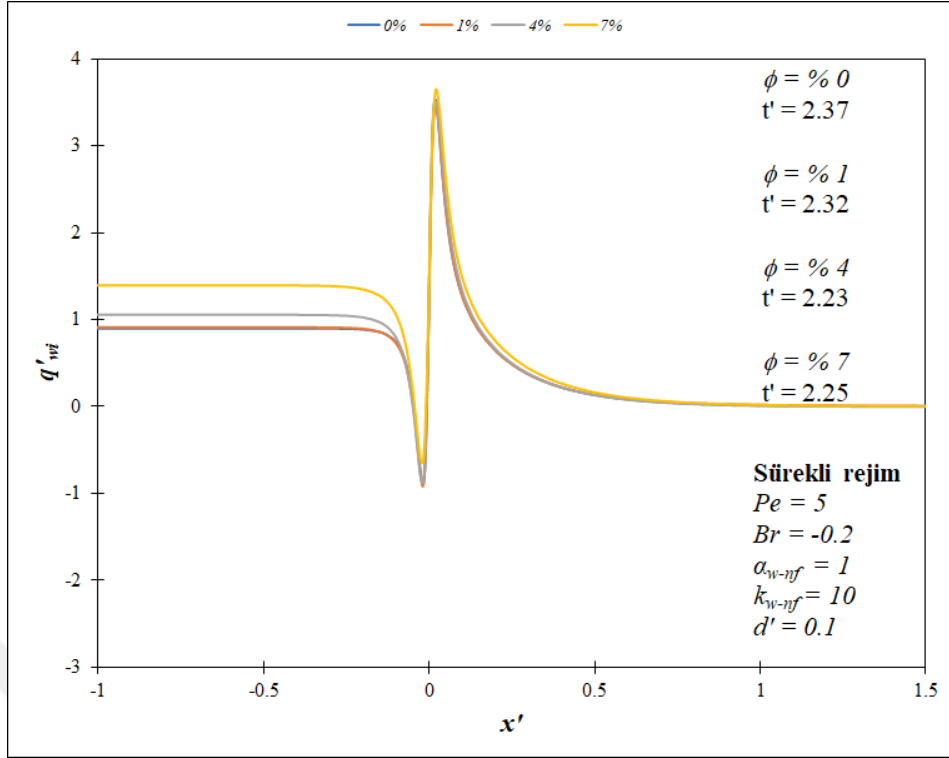
Farklı hacimsel konsantrasyonlar için Buongiorno (2006) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre TiO_2 nanoparçacığının etkisi viskoz yitim göz önüne alınarak incelenmiştir. Bu hususta elde edilen ara yüzey ısı akısı değerleri $t' = 0.26$ anı için Şekil 4.131'de verilmiştir. İlgili sonuçlar incelendiğinde ısı yayılma üst akış bölgesinde $x' = -0.2$ 'den önce sağlanmaktayken, alt akış bölgesi için $x' = 0.4$ 'ten sonrasındır. Hacimsel konsantrasyon değerlerinin artması neticesinde ara yüzey ısı akısı değerlerinde de artış gözlemlenmektedir. Saptanan bu durum ısı transferi iyileştirmesinin göstergesidir. Hacimsel konsantrasyon etkisi TiO_2 nanoparçacığı için aynı boyutsuz zaman değerinde Vinodhan ve ark. (2016) tarafından kullanılan termofiziksel özellik modellerine göre Şekil 4.132 sunulmuştur. İlgili sonuçlar incelendiğinde ısı gelişme uzunlukları birbirine yakın seyretmektedir. Isı transferi artışı da benzer değerlerde gözlemlenmiştir. Ayrıca ısı transferi yönünün Brinkman sayısına bağlı olarak etkilenmesi üst akış bölgesindeki sonuçlara yansımıştır. Sürekli rejimde elde edilen ara yüzey ısı akısı değerlerine Buongiorno (2006) ve Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından verilen termofiziksel özellik modelleri bakımından sırasıyla Şekil 4.133'te ve Şekil 4.134'te yer verilmiştir. Hem cidar hem de nanoakışkan bölgelerindeki aksel ısı iletimiyle üst akış bölgesine doğru etkin bir ısı transferinin gerçekleştiği görülmektedir. Boyutsuz zaman adımı olarak $t' = 0.26$ 'daki dağılımla karşılaştırıldığında, ısı yayılma mesafesine ulaşılmadan önce ısının akış yönüne ters yöndeki transferinin girişe doğru devam ederek, ön ısıtma uzunluğunun etkilendiği görülmektedir. Nanoparçacığın ısı transferine olan tesiri ısı gelişme öncesinde etkin bir şekilde görülmektedir. Ara yüzey ısı akısı değerleri alt akış bölgesinde $q'_{wi} = 0$ değerine asimptotik anlamda ulaşmaktadır. Artan hacimsel konsantrasyon değerlerine göre elde edilen ısı transferinin artma eğilimi her iki model yardımıyla bulunmaktadır. Ancak bu anlamda Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından önerilen modelle elde edilen sonuçlar önerilmemektedir.



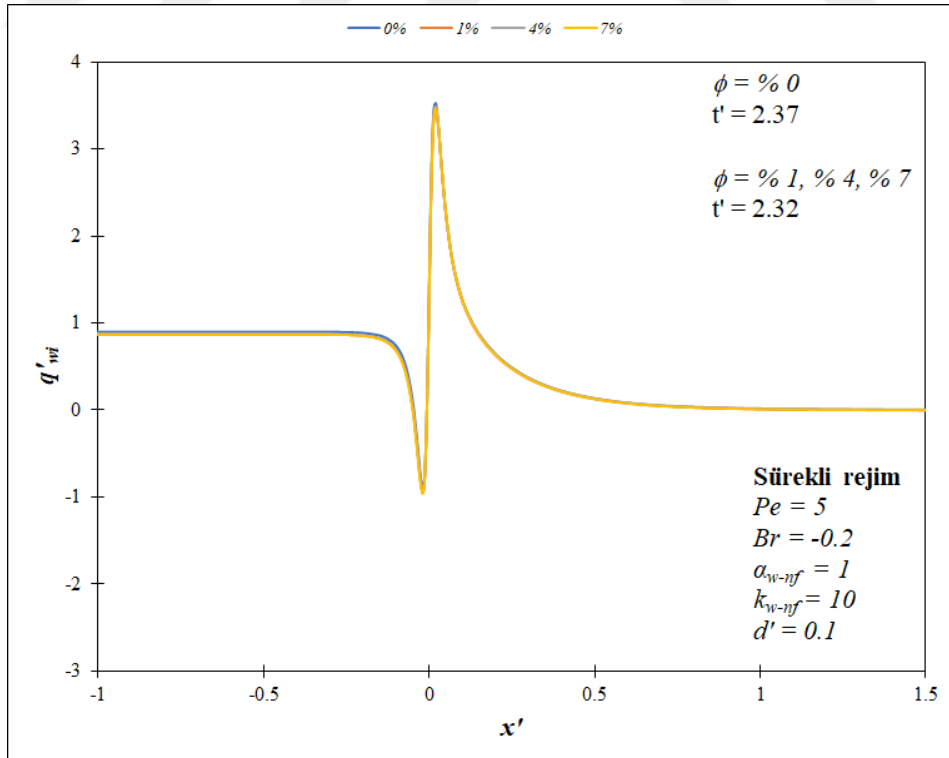
Şekil 4.131. Buongiorno (2006) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-TiO₂ nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin $t' = 0.26$ anındaki karşılaştırılması



Şekil 4.132. Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-TiO₂ nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin $t' = 0.26$ anındaki karşılaştırılması



Şekil 4.133. Buongiorno (2006) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-TiO₂ nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması

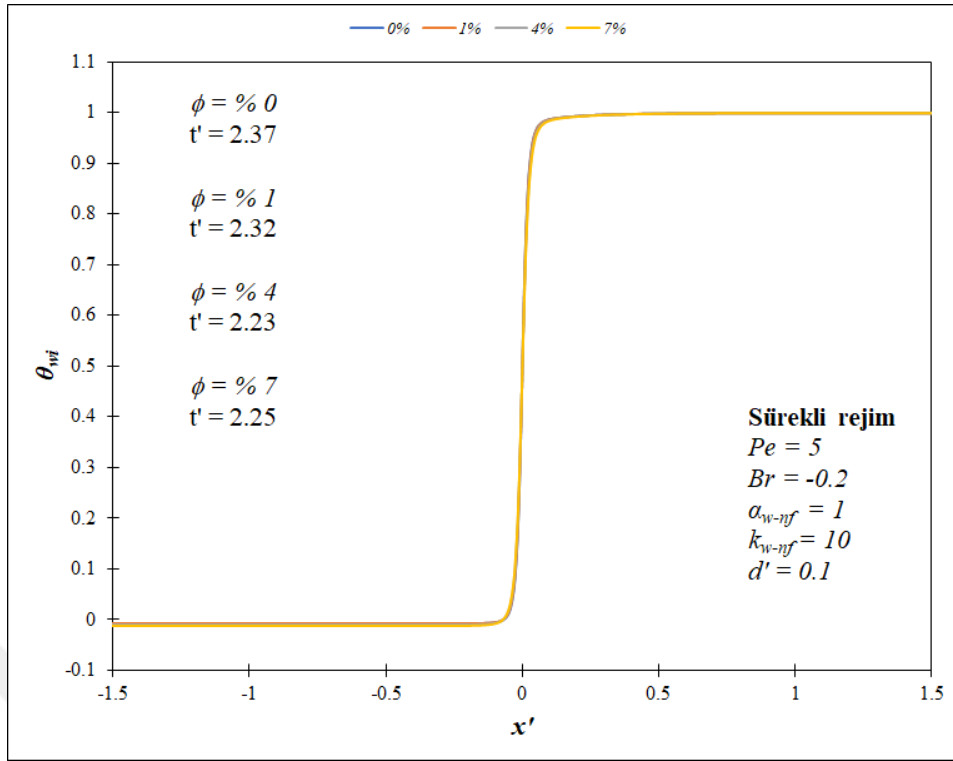


Şekil 4.134. Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-TiO₂ nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması

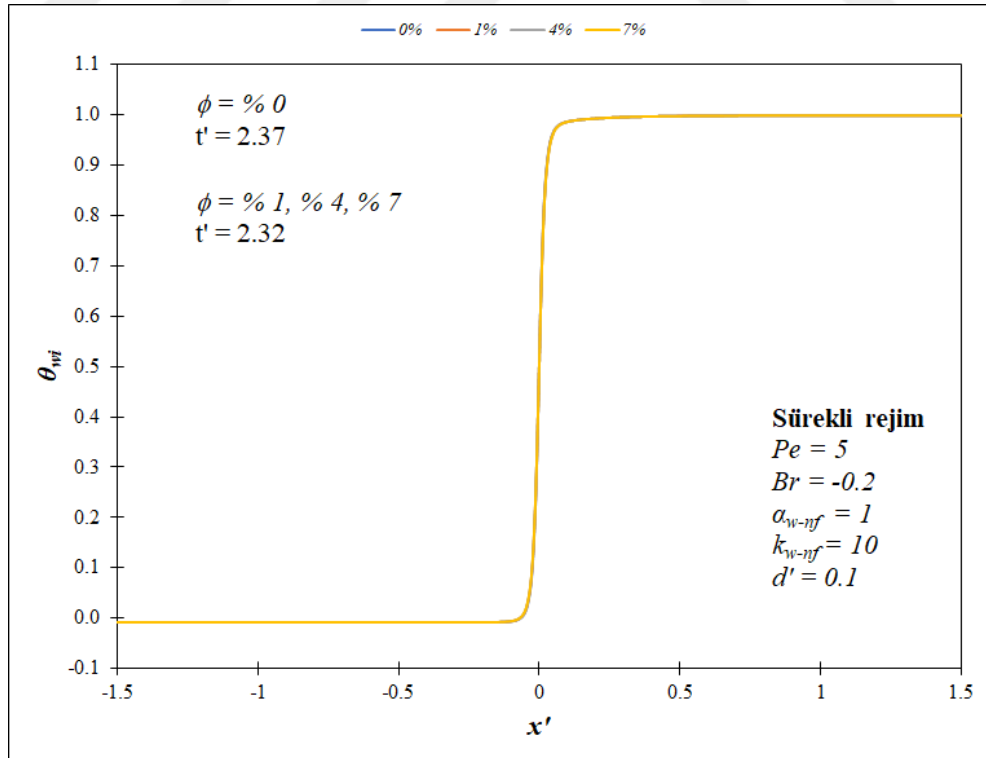
Brinkman sayısı etkisinde artan hacimsel konsantrasyon etkisi sürekli rejime ulaşma süresini azalmıştır. Bu etki Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından verilen termofiziksel özellik modelleri ile elde edilen sonuçlarda baskın olmayan bir eğilime neden olmaktadır.

Viskoz yitim etkisindeki ara yüzey sıcaklık değerleri açısından sürekli rejim sonuçları Buongiorno (2006) ve Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından verilen termofiziksel özellik modellerine göre sırasıyla Şekil 4.135'te ve Şekil 4.136'da gösterilmiştir. Nanoparçacık etkisi her iki modele ait sonuçlarda $x' = 0$ etrafında gözlemlenmektedir. Belirtilen etki çerçevesinde viskoz yitimin rolü ara yüzey ısı akısı değerlerindeki kadar bariz olmamakla birlikte hacimsel konsantrasyon değerlerindeki artışın bir sonucu olarak ısı transferinin artış eğilimi ara yüzey sıcaklık değerleri ile de görülmektedir. Fakat ısı transferi etkisi sürekli rejimde sıcaklık farkı azalması ile ortadan kalkmaktadır. Böylelikle ara yüzey sıcaklığı değerleri belirli bir eksenel mesafeden sonra $\theta_{wi} = 1$ değerine ulaşarak nihai durum ortaya çıkmaktadır. Hacimsel konsantrasyon değerlerindeki artışın bir sonucu olarak ısı transferinin artış eğilimi ara yüzey sıcaklık değerleri ile görülmektedir. Bu etki her iki modelde de belirgindir. Artan hacimsel konsantrasyon etkisi sürekli rejime erişme süresini azaltmaktadır. Buna göre Buongiorno (2006) tarafından önerilen termofiziksel özellik modelleri ile elde edilen sonuçlarda bu azalma göreceli olarak daha fazladır. Bunun yanı sıra % 4 ve % 7 hacimsel konsantrasyon değerleri için bu farklılık ortaya çıkmaktadır.

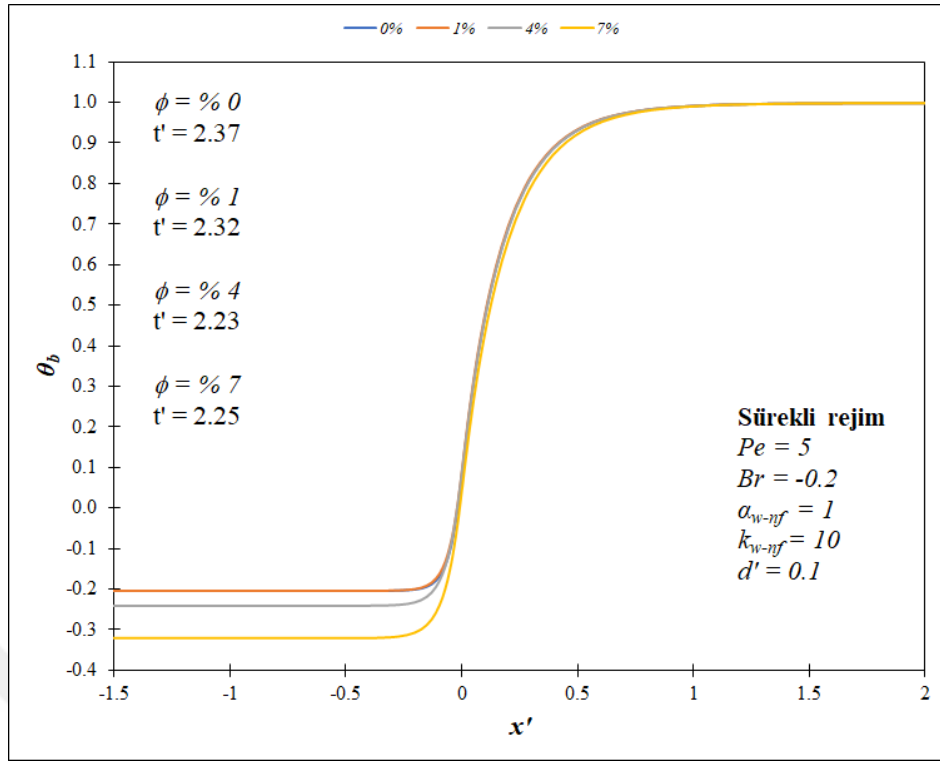
Yığık sıcaklık değerleri açısından sürekli rejimde saptanan sonuçlar Buongiorno (2006) ve Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre sırasıyla Şekil 4.137'de ve Şekil 4.138'de viskoz yitim tesirinde verilmiştir. Bu da artan hacimsel konsantrasyon değerleriyle ısı transferi iyileştirmesinin sağlanmasına neden olmaktadır. Sonrasında yığık sıcaklık değerleri $\theta_b = 1$ değerine erişmektedir. Nanoparçacığın ısı transferine olan etkisi $-0.5 \leq x' \leq 0.5$ aralığında belirgin bir şekildedir. Ancak Buongiorno (2006) modelleri ile elde edilen değerlerde üst akış bölgesi de etkilenmektedir. Bu da artış gösteren hacimsel konsantrasyon değerlerinin sonucu olarak nanoakışkan kullanımı sonrasındaki ısı transferi iyileştirmesini sağlamaktadır. Diğer durumlara ait sonuçlarda da ifade edildiği üzere, hacimsel konsantrasyon oranı azaldıkça sürekli rejime erişme süresi de daha fazla olmaktadır. Ayrıca bu azalma yüzdesi Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından kullanılan modellerle elde edilen sonuçlarda daha da azdır ve nanoparçacığın hacimsel konsantrasyonu sürekli rejime ulaşma süresini etkilememektedir.



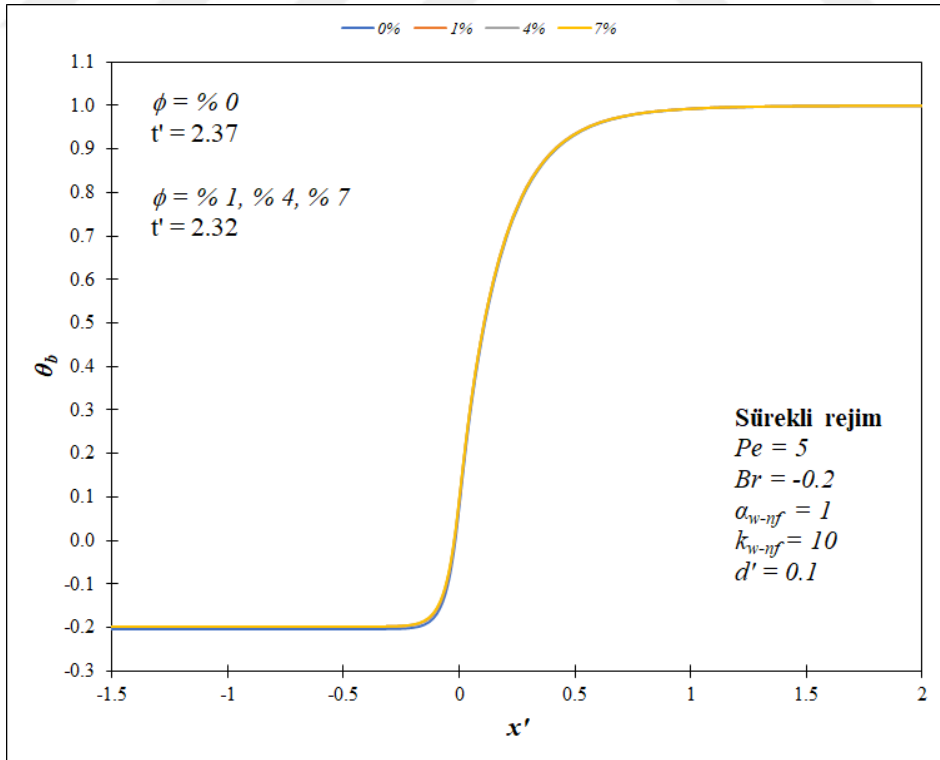
Şekil 4.135. Buongiorno (2006) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-TiO₂ nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey sıcaklığına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



Şekil 4.136. Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-TiO₂ nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey sıcaklığına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması

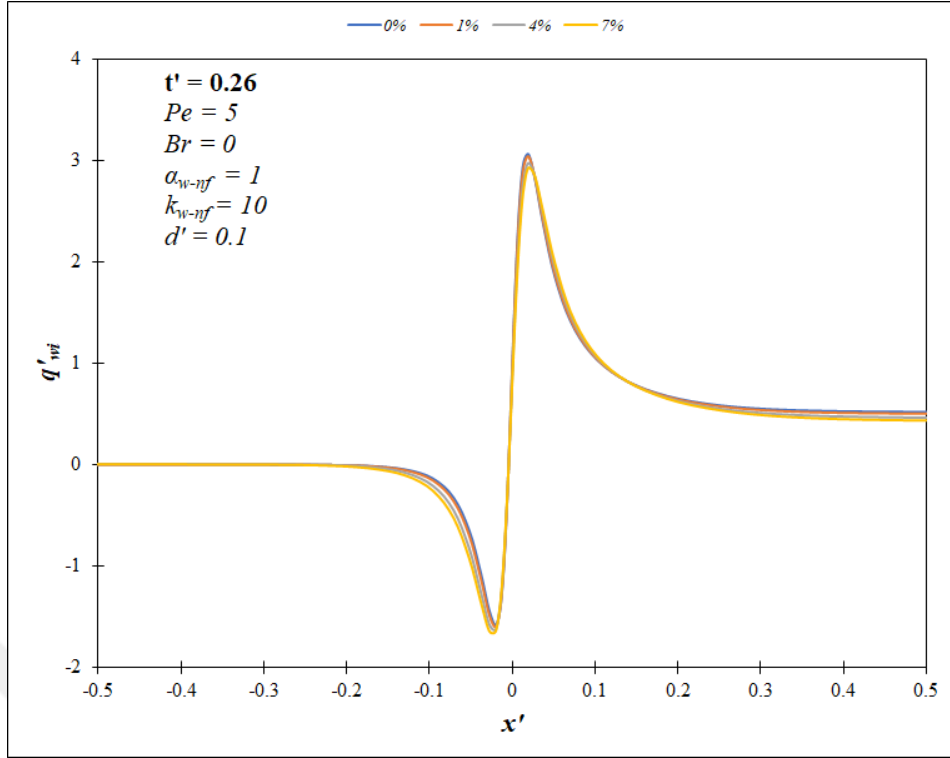


Şekil 4.137. Buongiorno (2006) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-TiO₂ nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin yığık sıcaklığa etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması

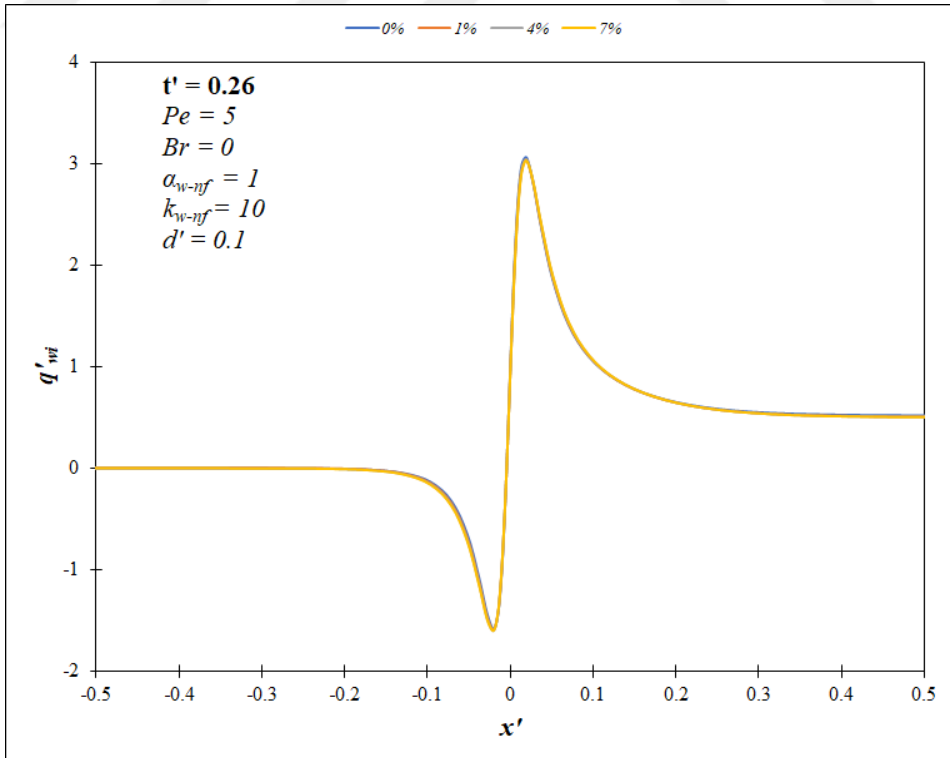


Şekil 4.138. Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-TiO₂ nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin yığık sıcaklığa etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması

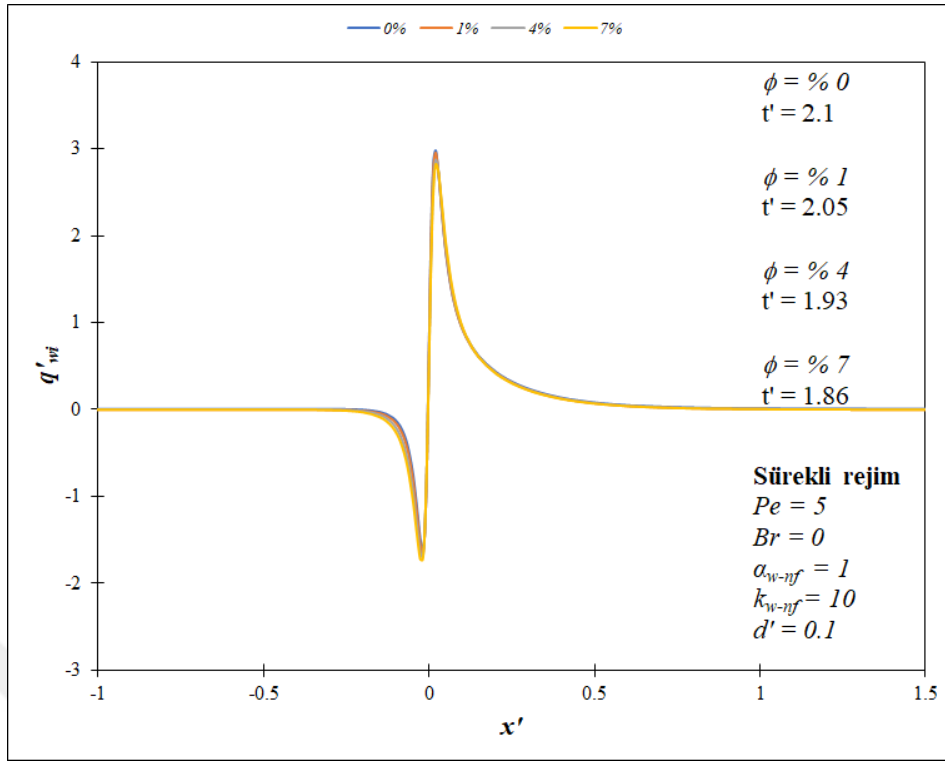
Eksenel ısı iletim etkisi bakımından kritik bir değer olan $Pe = 5$ için farklı hacimsel konsantrasyonlar için Buongiorno (2006) tarafından sunulan termofiziksel özellik modellerine göre TiO_2 nanoparçacığının etkisi araştırılmıştır. Elde edilen ara yüzey ısı akısı değerleri $t' = 0.26$ anı için Şekil 4.139'da verilmiştir. İlgili sonuçlar incelendiğinde ısı yayılmanın eriştiği nokta üst akış bölgesinde $x' = -0.2$ iken, alt akış bölgesi için ısı gelişmenin görüldüğü bu değer $x' = 0.4$ 'tür. Hacimsel konsantrasyonun artması sonucunda ara yüzey ısı akısı değerleri artmaktadır ve bu durum ısı performans artışının neticesidir. TiO_2 nanoparçacığı için hacimsel konsantrasyonun sonuçlara etkisi $t' = 0.26$ anı için Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından kullanılan termofiziksel özellik modellerine göre Şekil 4.140'ta sunulmuştur. İlgili sonuçlar incelendiğinde aynı ısı gelişme mesafeleri bu model için de geçerlidir. Isı transferi artış yüzdesi her iki modelde elde edilen sonuçlarda oldukça yakındır. Sürekli rejime ait ara yüzey ısı akısı değerleri Buongiorno (2006) ve Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından verilen termofiziksel özellik modelleri bakımından sırasıyla Şekil 4.141'de ve Şekil 4.142'de sunulmuştur. Isı transferine etki açısından nanoparçacık kullanımı ısı gelişme mesafeleri öncesinde net bir biçimde fayda sağlamaktadır. Üst akış bölgesinde eksenel ısı iletimi etkilidir. Ancak bu durum $Pe = 1$ 'deki dağılıma göre daha azdır. Eksenel ısı iletiminin etkisindeki bu aralıkta önemli oranda ısı transferinin gerçekleşmektedir. Akışa zıt yönde belirli bir noktaya kadar bu etki mevcuttur. Buna ek olarak ara yüzeyden eksene doğru olan iletimin etkisinde ara yüzey ısı akısı değerleri artmaktadır. Nanoakışkan için eksenel ısı iletimi ısı transferinin sonucu olarak artmaktadır. Isıtma başlangıcından sonra ara yüzey ısı akısı değerleri tekrardan artış göstererek maksimum bir değere erişmektedir. En yüksek değerden sonra ise eksenel yönde ilgili değerler azalması söz konusudur. Burada cidar ile nanoakışkan arasındaki sıcaklık farkının azalması etkilidir. Böylelikle ortalama ısı transferi de yükselme periyoduna girmektedir. Isı transferine etki açısından nanoparçacık kullanımı ısı gelişme mesafeleri öncesinde net bir biçimde fayda sağlamaktadır. Artan hacimsel konsantrasyon değerlerine göre ısı transferi artışı her iki modelde bulunsa da Buongiorno (2006) modellerine ait sonuçlar oransal olarak daha yüksektir. Artan hacimsel konsantrasyon etkisinde sürekli rejime ulaşma süresi de azalmıştır. Bahsedilen bu durum Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine ait sonuçları etkilememektedir. Ara yüzey sıcaklık değerleri açısından $Pe = 5$ 'teki sürekli rejim sonuçları Buongiorno (2006) ve Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından verilen termofiziksel özellik modelleri



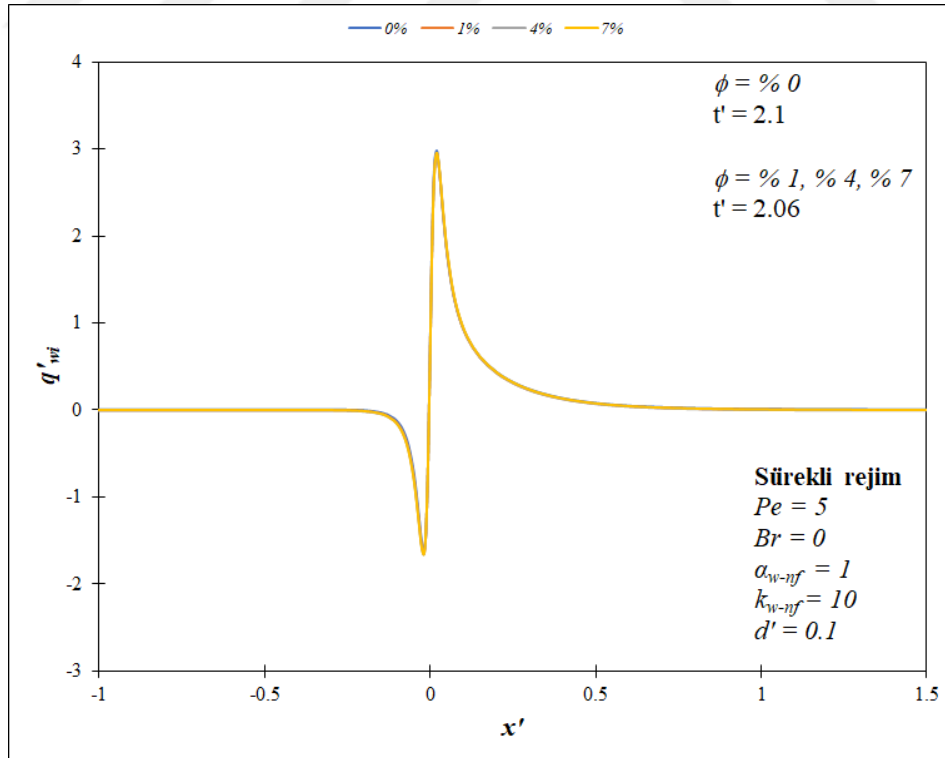
Şekil 4.139. Buongiorno (2006) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-TiO₂ nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin $t' = 0.26$ anındaki karşılaştırılması



Şekil 4.140. Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-TiO₂ nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin $t' = 0.26$ anındaki karşılaştırılması



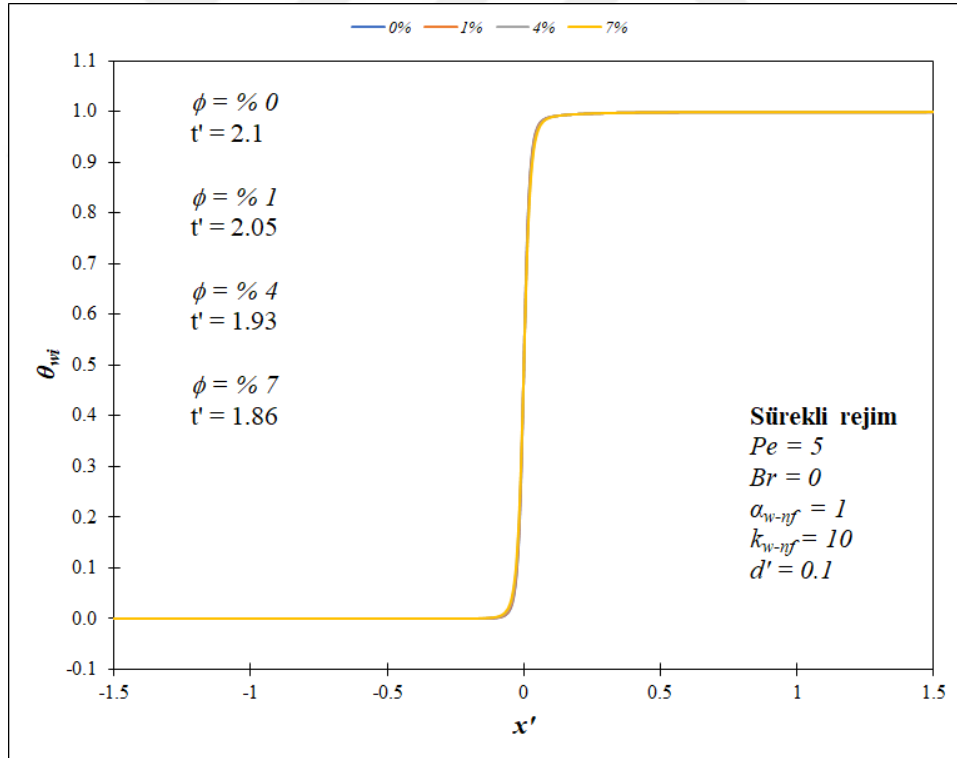
Şekil 4.141. Buongiorno (2006) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-TiO₂ nanoakışkan için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



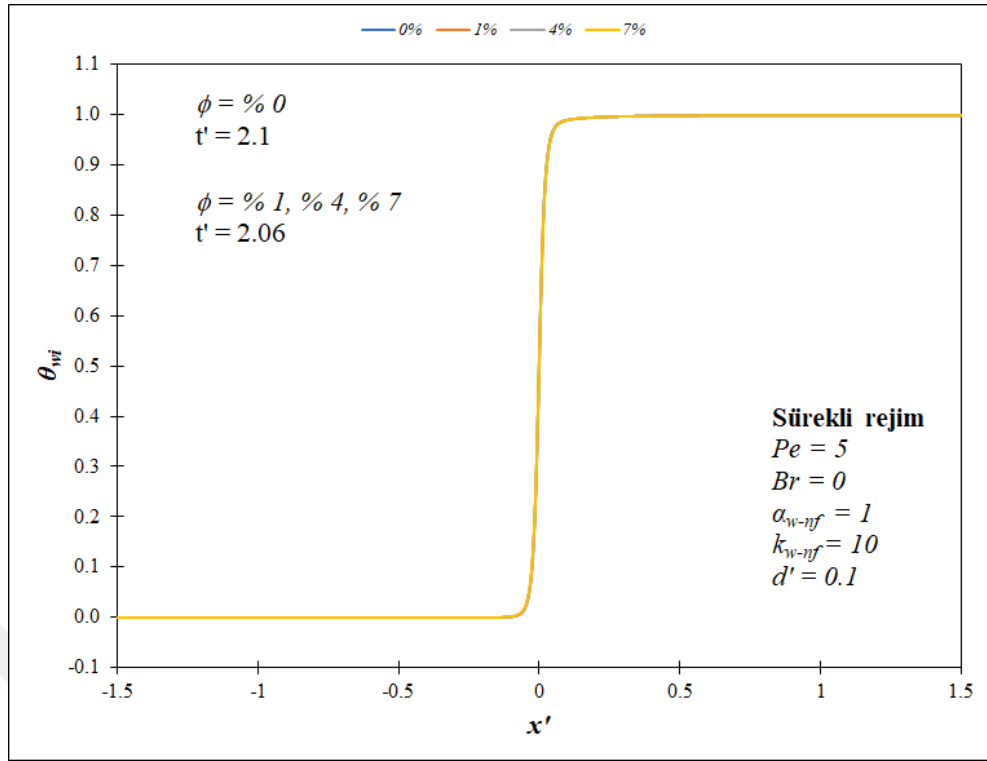
Şekil 4.142. Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-TiO₂ nanoakışkan için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması

açısından sırasıyla Şekil 4.143'te ve Şekil 4.144'te gösterilmiştir. Üst akış bölgesinde aksenal anlamdaki ısı iletimi $Pe = 1$ 'deki kadar geniş aralıkta değildir. Böylelikle ara yüzey sıcaklığı değerleri, sabit yüzey sıcaklığıyla asıl ısıtmanın başlangıcı olan $x' = 0$ noktasından önce artış eğilimine girmektedir. Neticede bu değerler alt akış bölgesinde $\theta_{wi} = 1$ 'e asimptotik bir eğilimle erişmektedir. Nanoparçacık etkisi her iki modele göre $x' = 0$ civarında gözlemlenmektedir. Hacimsel konsantrasyon değerlerindeki artışla beraber ısı transferi de artış eğilimine sahip olmaktadır ve bu sonuç ara yüzey sıcaklık değerleri ile görülmektedir. Artan hacimsel konsantrasyonla sürekli rejime ulaşma için gereken süre de azaltılmaktadır. Buongiorno (2006) tarafından verilen termofiziksel özellik modelleri ile elde edilen sonuçlarda bu azalma daha fazladır.

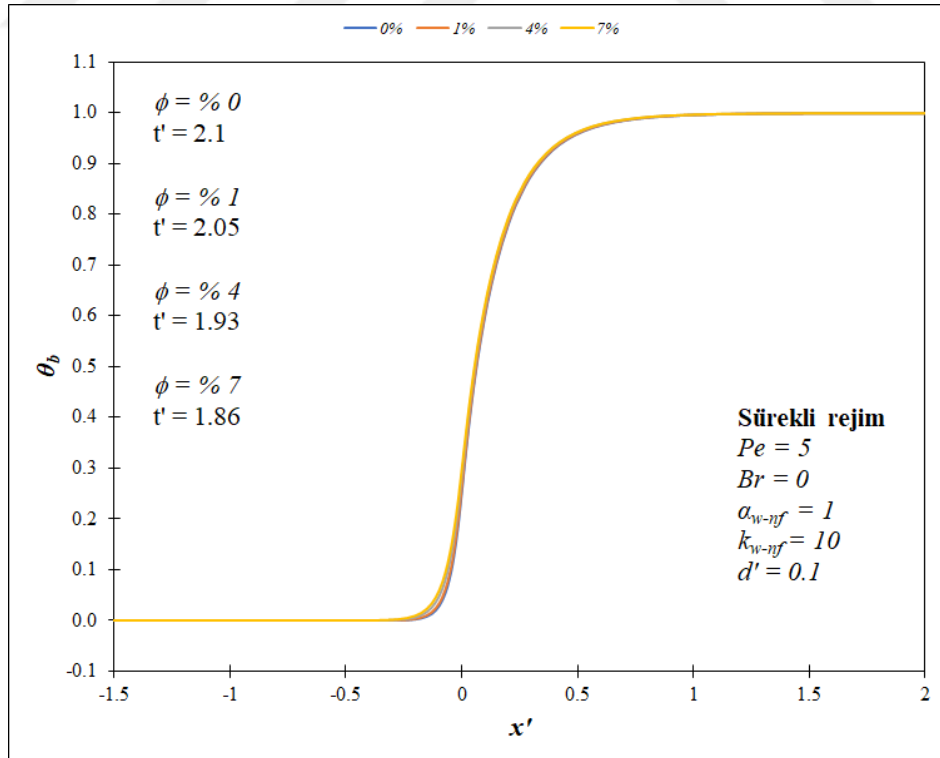
Yığık sıcaklık değerlerinin sürekli rejimdeki sonuçları Buongiorno (2006) ve Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modelleri için sırasıyla Şekil 4.145'te ve Şekil 4.146'da verilmiştir. Isıl gelişmenin öncesinde ara yüzey sıcaklık değerleri ile belirli bir aksenal konuma göre karşılaştırıldığında daha düşük



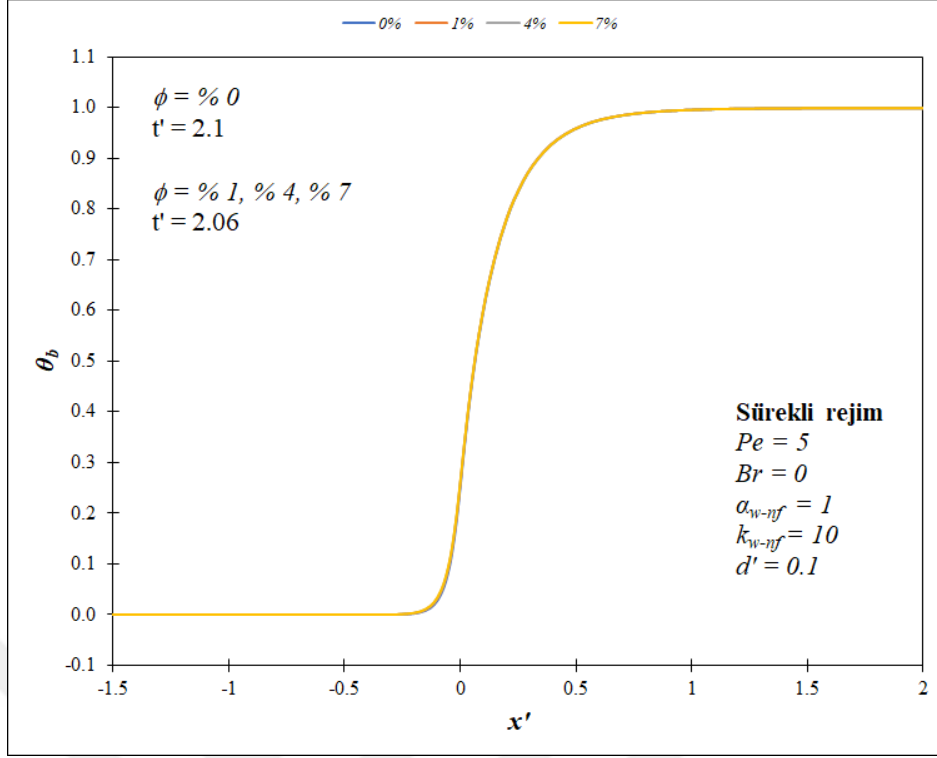
Şekil 4.143. Buongiorno (2006) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-TiO₂ nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey sıcaklığına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



Şekil 4.144. Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-TiO₂ nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey sıcaklığına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



Şekil 4.145. Buongiorno (2006) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-TiO₂ nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin yığık sıcaklığa etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



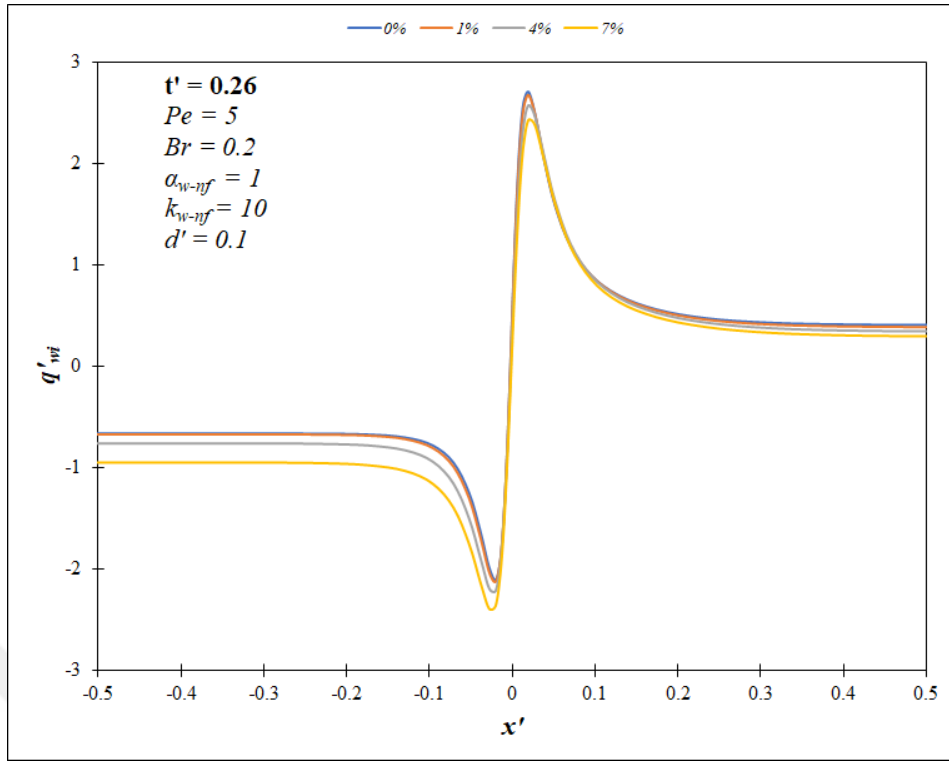
Şekil 4.146. Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-TiO₂ nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin yığık sıcaklığa etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması

değerler görülmektedir. Bunun sebebi ısı transferinin kıyaslama noktasında hala devam etmesidir. Bu sürecin tamamlanmasına takiben yığık sıcaklık değerleri beklendiği üzere alt akış bölgesinde $\theta_b = 1$ değerini sağlamaktadır. Her iki modele göre nanoparçacığın ısı transferine olan tesiri $-0.5 \leq x' \leq 0.5$ aralığı için daha belirgindir. Artan hacimsel konsantrasyon değerlerinin neticesi olarak nanoakışkan etkisiyle ısı transferi iyileştirmesi sağlanmaktadır. Hacimsel konsantrasyon oranı azaldıkça sürekli rejime erişme süresi de daha fazla elde edilmektedir. Buradaki azalma oranı Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından kullanılan modeller için geçerli değildir.

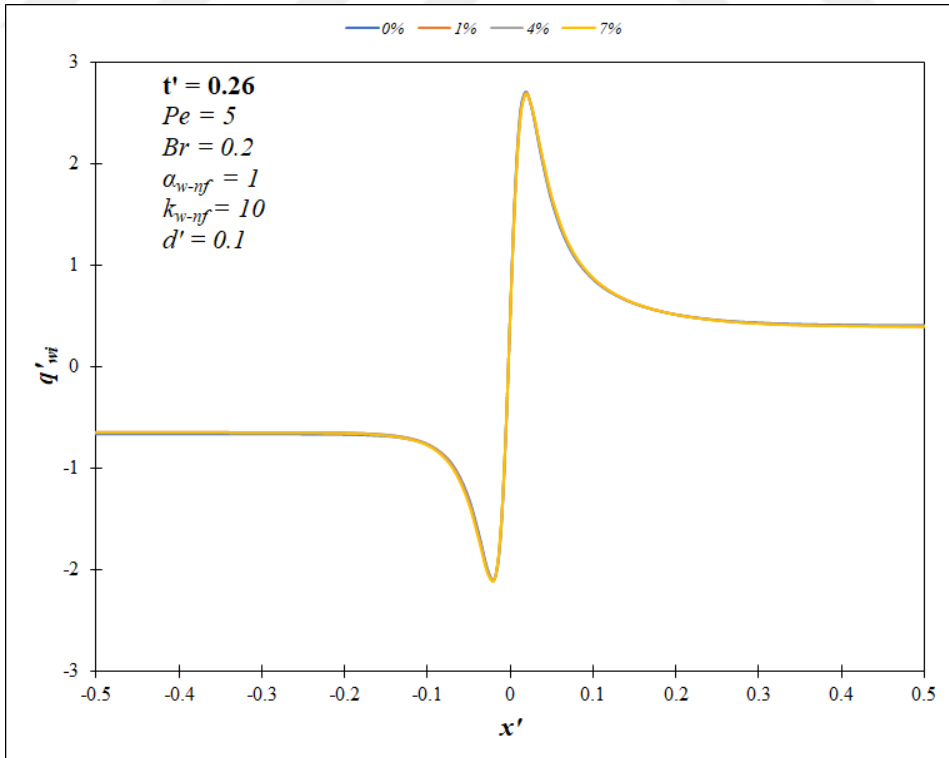
Buongiorno (2006) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre farklı hacimsel konsantrasyonlar için TiO₂ nanoparçacığının etkisi viskoz yitim göz önüne alınarak araştırılmıştır. Elde edilen ara yüzey ısı akısı değerleri $t' = 0.26$ anı için Şekil 4.147'de verilmiştir. Buna göre ısı yayılmanın üst akış bölgesinde $x' = -0.15$ 'e kadar etki gösterdiği görülmektedir. Alt akış bölgesi için $x' = 0.35$ 'ten öncesi ısı gelişme sürecidir. Isı transferi yönü Brinkman sayısına bağlı olarak değişmektedir. Bu durum da üst akış bölgesindeki sonuçlara yansımıştır. Cidar ve nanoakışkan kapsamında aksel ısı iletimiyle ısıtılmayan kısma doğru önemli bir ısı geçişi vardır. Sürekli rejim sağlanmadan

önce ısı transferinin akışa zıt istikamette ilerlemektedir. Ön ısıtma mesafesini artıran bir etkinin bu yolla oluşturulduğu gözlemlenmektedir. Nanoparçacığın ısı performansına olan önemli etkisi ilave olarak ısı gelişme mesafeleri öncesinde daha belirgindir. Hacimsel konsantrasyonun artmasıyla ara yüzey ısı akısı değerleri de artmaktadır. Bu durum ısı transferi artışından kaynaklanmaktadır. Hacimsel konsantrasyon etkisi TiO_2 nanoparçacığı için aynı boyutsuz zaman değerinde Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modelleri için Şekil 4.148'deki sonuçlar sunulmuştur. Isıl gelişme uzunluğu bakımında yakın değerler bulunmuştur. Aynı ısı gelişme uzunlukları bu model için de sağlanmaktadır. Isı transferi yönünün Brinkman sayısına bağlı olarak değişimi üst akış bölgesindeki sonuçlara yansımıştır. Sürekli rejim için elde edilen ara yüzey ısı akısı değerlerine Buongiorno (2006) ve Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından verilen termofiziksel özellik modelleri bakımından sırasıyla Şekil 4.151'de ve Şekil 4.152'de yer verilmiştir. Nanoparçacığın ısı performansına etkisi ısı gelişme uzunluklarının öncesinde net bir şekilde görülmektedir. Artan hacimsel konsantrasyonlar için elde edilen ısı transferinin artış eğilimi her iki model ile de gözlemlenmektedir. Viskoz yitim etkisinde artan hacimsel konsantrasyon sonrasında sürekli rejime ulaşma süresini azalma kaydetmiştir. Bu da Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modeller için uygun bir tanımlama olmamaktadır.

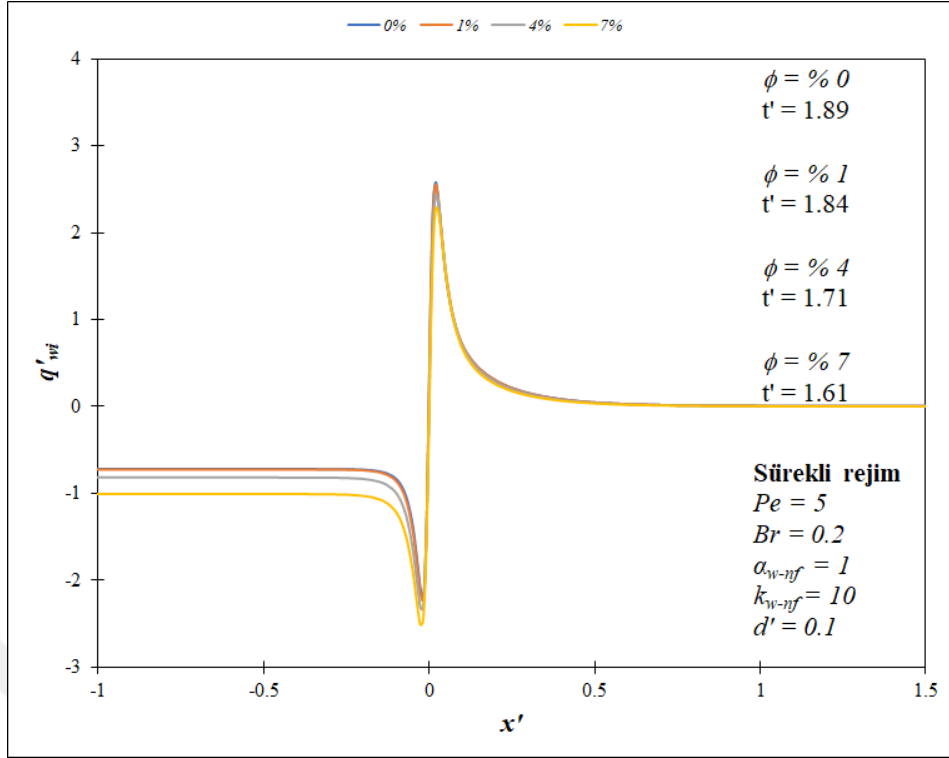
Ara yüzey sıcaklık değerleri açısından viskoz yitim etkisindeki sürekli rejim sonuçları Buongiorno (2006) ve Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından sunulan termofiziksel özellik modellerine göre sırasıyla Şekil 4.153'te ve Şekil 4.154'tedir. Yoğun şekilde olan nanoparçacık etkisi $x' = 0$ noktasının etrafında gözlemlenmektedir. Hacimsel konsantrasyon değerlerinde meydana gelen artışla ısı transferinin arttığı görülmektedir. Bu etki sürekli rejimdeki sıcaklık farkı azalması ile ortadan kaybolmaktadır. Bahsedilen sonuç, ara yüzey sıcaklığı değerlerinin belirli bir eksenel mesafeden sonra $\theta_{wi} = 1$ değerine erişimiyle görülmektedir. Önerilen modellerde nanoparçacık etkisi $-0.1 \leq x' \leq 0.1$ aralığında yoğunlaşmaktadır. Hacimsel konsantrasyon değerlerindeki artışla ısı transferinin de arttığı ara yüzey sıcaklık değerleri ile görülmektedir. Bu etki aynı anlamda sürekli rejime erişme süresini de azaltmaktadır. Ancak Buongiorno (2006) tarafından önerilen termofiziksel özellik modelleri ile elde edilen sonuçlar göz önüne alındığında, bu azalma oranı göreceli olarak daha fazladır.



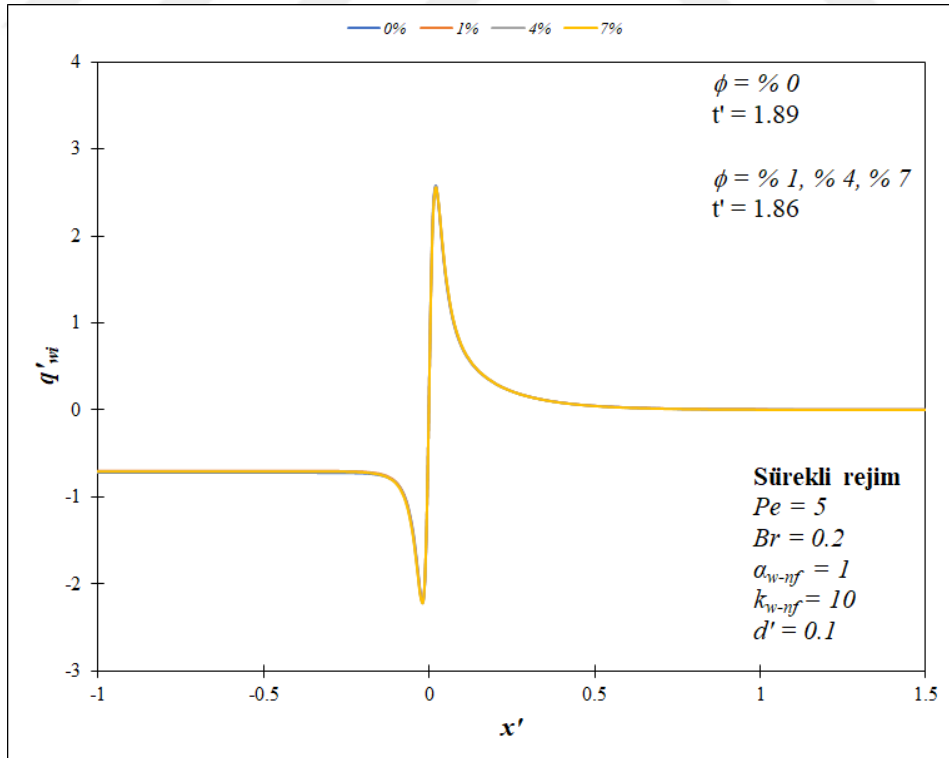
Şekil 4.147. Buongiorno (2006) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-TiO₂ nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin $t' = 0.26$ anındaki karşılaştırılması



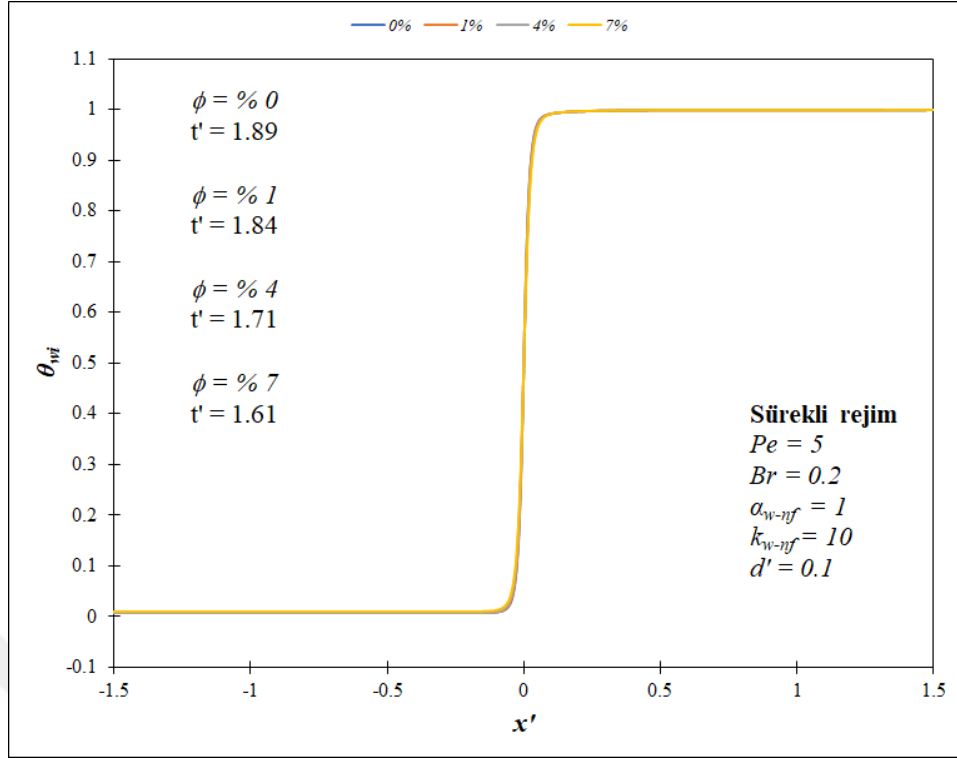
Şekil 4.148. Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-TiO₂ nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin $t' = 0.26$ anındaki karşılaştırılması



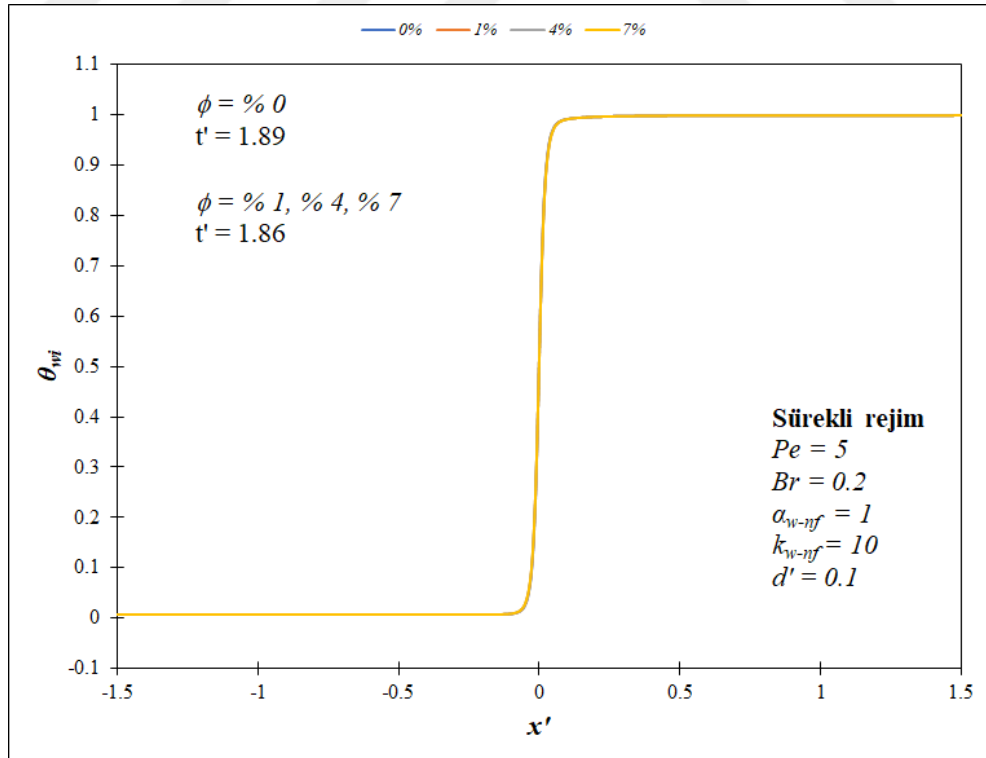
Şekil 4.149. Buongiorno (2006) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-TiO₂ nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



Şekil 4.150. Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-TiO₂ nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey ısı akısına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



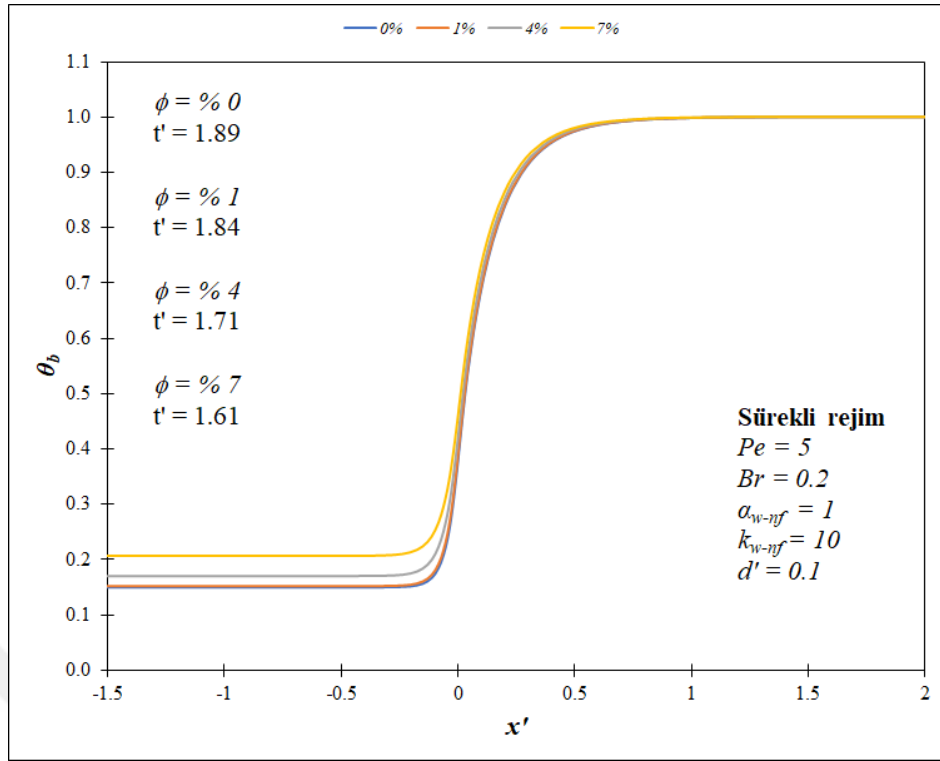
Şekil 4.151. Buongiorno (2006) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-TiO₂ nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey sıcaklığına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



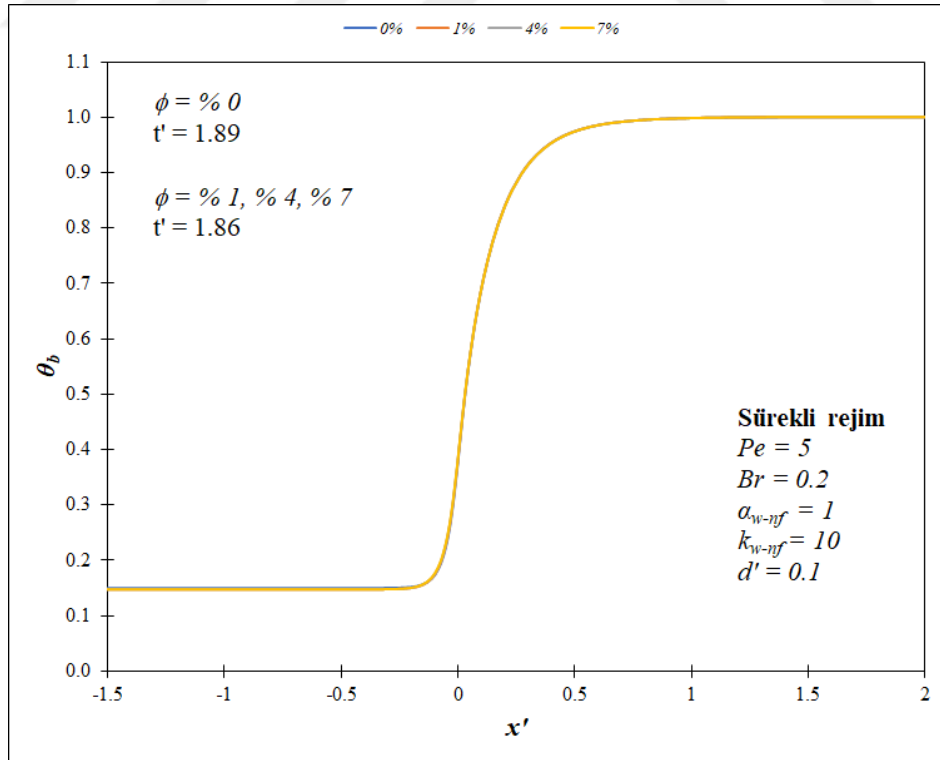
Şekil 4.152. Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-TiO₂ nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey sıcaklığına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması

Sürekli rejimde yığık sıcaklık değerleri açısından saptanan sonuçlar Buongiorno (2006) ve Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından verilen termofiziksel özellik modellerine göre sırasıyla Şekil 4.153'te ve Şekil 4.154'te viskoz yitim etkisinde sunulmuştur. Isıtma olmayan üst akış bölgesindeki ısı transferi yönü için değişim söz konusudur. Bu durumun nedeni pozitif Brinkman sayısıdır. Nanoparçacığın ısıl iyileştirmeye olan etkisi $-0.5 \leq x' \leq 0.5$ aralığında belirgindir. Bu durum Buongiorno (2006) modellerinde göreceli olarak daha belirgindir. Bu da artan hacimsel konsantrasyona sahip nanoakışkanın kullanımı ile ısı transferi artışına neden olmaktadır. Hacimsel konsantrasyon oranı azaldıkça sürekli rejime erişme süresi artmaktadır. Buradaki azalma yüzdesi Buongiorno (2006) tarafından kullanılan modellerle elde edilen sonuçlar için değişkendir.

Farklı hacimsel konsantrasyon değerleri için TiO_2 nanoparçacığının etkisi Buongiorno (2006) tarafından verilen termofiziksel özellik modellerine göre cidar kalınlık oranının yüksek olduğu durumda incelenmiştir. Ara yüzey ısı akısı değerlerine ait sonuçlarda ısıl yayılıma etkisi üst akış bölgesinde $x' = -0.4$ 'te sona ermekteyken, ısıl gelişmenin sağlandığı nokta ise alt akış bölgesi için $x' = 0.4$ 'tür. Artan hacimsel konsantrasyon değerleri neticesinde ara yüzey ısı akısı değerleri de artmaktadır. Isı transferi böylelikle artma eğilimine sahip olmaktadır. Aynı boyutsuz zaman değerinde hacimsel konsantrasyon etkisi TiO_2 nanoparçacığı Duangthongsuk ve Wongwises (2009) için tarafından kullanılan termofiziksel özellik modellerine göre ısıl gelişme uzunluklarına göre benzer değerler sağlanmıştır. Isıl yayılma ve ısıl gelişme mesafeleri oldukça yakın elde edilmiştir. Sürekli rejimdeki sonuçlar Buongiorno (2006) ve Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından verilen termofiziksel özellik modelleri ile ısıl gelişme mesafeleri açısından benzer değerler sağlanmıştır. Isı transferi artışı gözlemlenmiştir. Cidar kalınlık oranının yüksek oluşuna bağlı olarak cidar bölgesi için ısıl atalet fazladır. Ayrıca bu ısıl direnç ısıtma uygulanan cidardan ısının nanoakışkana transfer edilmesine engeldir. Bu durum da sonuç olarak ısıl gelişme mesafesinin kısalmaktadır. Nanoparçacık etkisi ısıl gelişme mesafeleri öncesinde net bir şekilde görülmektedir. Her iki model de artan hacimsel konsantrasyon değerlerine göre elde edilen ısı transferi artışını net bir şekilde ortaya koymaktadır. Hacimsel konsantrasyon etkisiyle sürekli rejime ulaşma süresi de azalmakta olup, bu durum Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından sunulan termofiziksel özellik modellerine ait sonuçlarda bu durum görülememektedir.



Şekil 4.153. Buongiorno (2006) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-TiO₂ nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin yığık sıcaklığa etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması

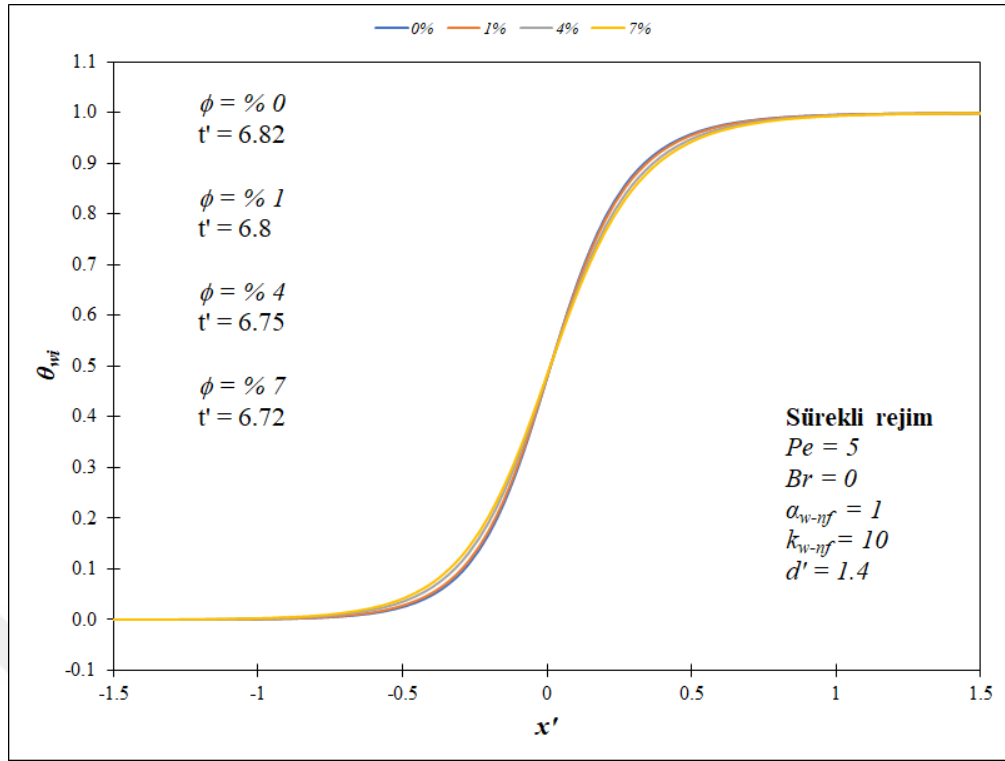


Şekil 4.154. Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-TiO₂ nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin yığık sıcaklığa etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması

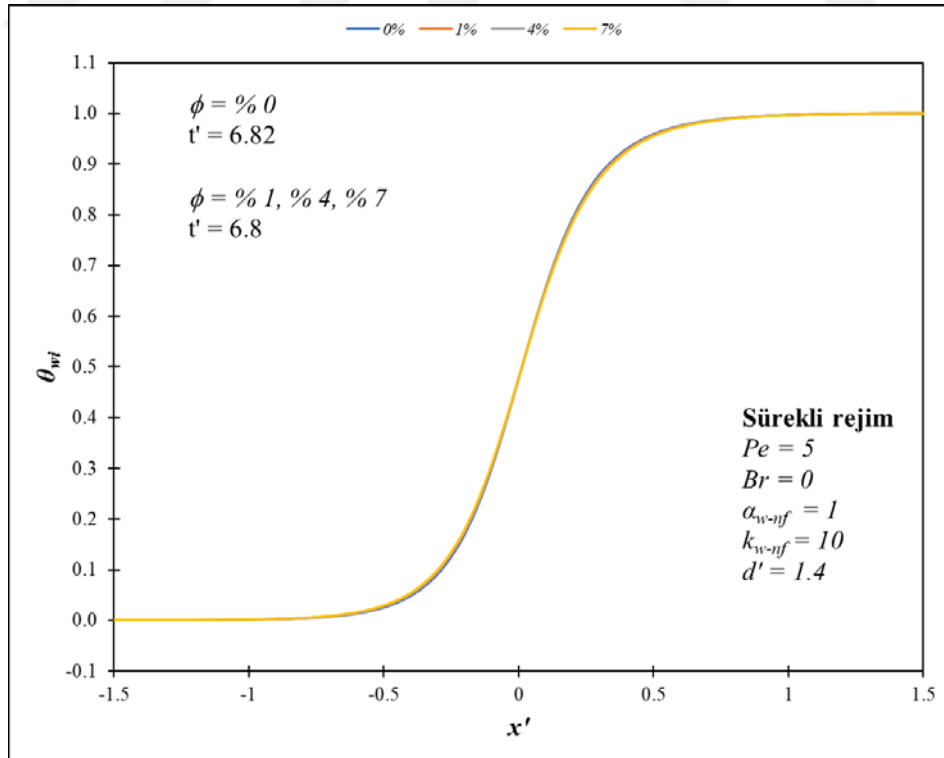
Ara yüzey sıcaklık değerleri açısından sürekli rejimde elde edilen sonuçlar Buongiorno (2006) ve Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından verilen termofiziksel özellik modellerine göre sırasıyla Şekil 4.155'te ve Şekil 4.156'da sunulmuştur. Buongiorno (2006) modellerine göre cidar kalınlık oranının yüksek değerinde nanoparçacık etkisi $-0.75 \leq x' \leq 0.75$ için açık bir şekilde gözlemlenmektedir. Bu aralık Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından verilen modellere göre ise $-0.5 \leq x' \leq 0.5$ 'tir. Artan hacimsel konsantrasyonun sağladığı ısı transferi artışı ara yüzey sıcaklık değerleri ile görülmektedir. Netice olarak kalınlık oranı yüksek olduğunda cidardaki ısıl ataletin yüksek olması sonrasında ısı transferi değerlerinin azalma eğilimi göstermesi söz konusudur. Bu durumdaki olumsuzluğu ortadan kaldıran nokta ise nanoakışkan etkisi olup, buna bağlı olarak ısı transferi önemli şekilde artmaktadır. Ara yüzey sıcaklığı değerleri $\theta_{wi} = 1$ değerine ulaşmaktadır. Artan hacimsel konsantrasyon değerleriyle ısı transferinin artışı ara yüzey sıcaklık değerleri sayesinde görülmektedir. Artan hacimsel konsantrasyon değerleri, sürekli rejime erişme süresini azaltan yönde tesir etmektedir. Buongiorno (2006) tarafından verilen termofiziksel özellik modelleri ile elde edilen sonuçlarda bu artış daha fazladır.

Yığık sıcaklık değerleriyle sürekli rejimde elde edilen sonuçlar Buongiorno (2006) ve Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre sırasıyla Şekil 4.157'de ve Şekil 4.158'de cidar kalınlık oranının yüksek değerinde verilmiştir. Buongiorno (2006) modelleri ile elde edilen sonuçlar için nanoakışkan açısından etki aralığı $-0.75 \leq x' \leq 0.75$ 'tür. Nanoparçacığın ısı transferine olan tesiri Duangthongsuk ve Wongwises (2009) modellerine göre $x' = 0$ civarındadır. Bu yolla ısı transferi artışı, artan hacimsel konsantrasyon değerleriyle sağlanmaktadır. Diğer sonuçlar için de belirtildiği üzere, hacimsel konsantrasyon oranı azaldıkça sürekli rejime ulaşma süresi daha fazla olmaktadır. Bunun yanı sıra artış gösteren hacimsel konsantrasyon ile bu süre de azalma eğilimi sergilemektedir ancak Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından kullanılan modellerde sürekli rejime erişme süresine göre herhangi bir konsantrasyon etkisi bulunmamaktadır. Sonuç anlamında yığık sıcaklık değerleri beklendiği biçimde $\theta_b = 1$ değerine asimptotik olarak varmaktadır.

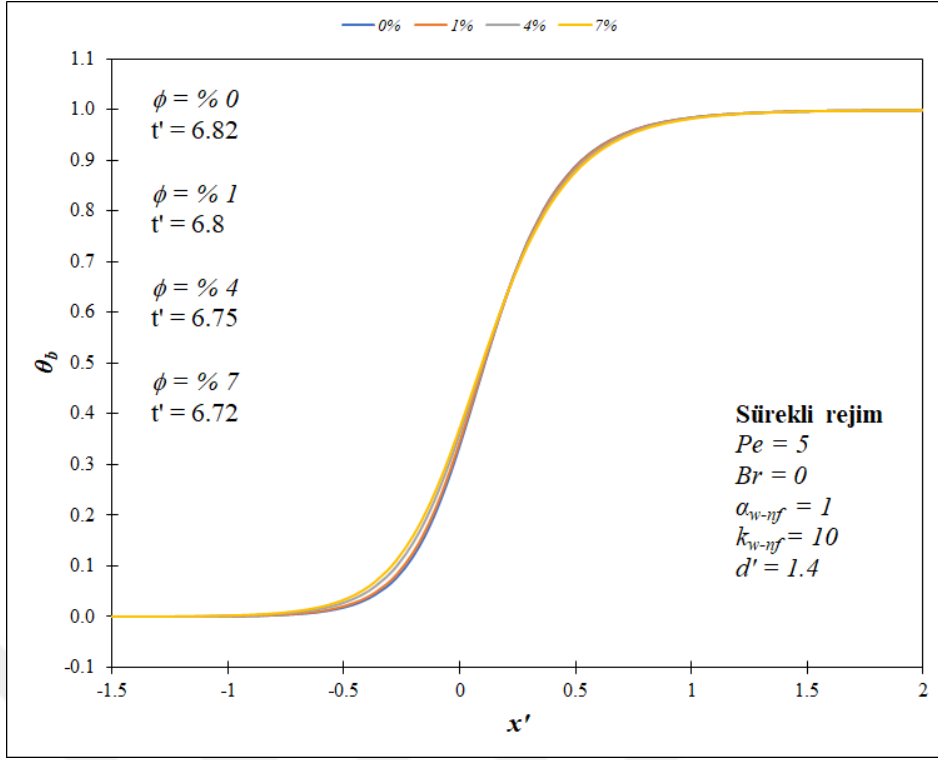
Nanoparçacık olarak TiO_2 eklenen durumları temsil eden sonuçlar birlikte değerlendirilmiştir. Bu anlamda mevcut ısıl karakteristiklerinin iyileştirilmesi amacıyla temel akışkan olan suya TiO_2 nanoparçacığı ilave edilmiştir. İlgili nanoparçacık temel akışkana % 1, % 4 ve % 7 hacimsel konsantrasyon değerlerinde eklenmiştir. Ara yüzey ısı akısı, ara yüzey sıcaklığı, yığık sıcaklık değerleri açısından Peclet sayısı, cidar kalınlık



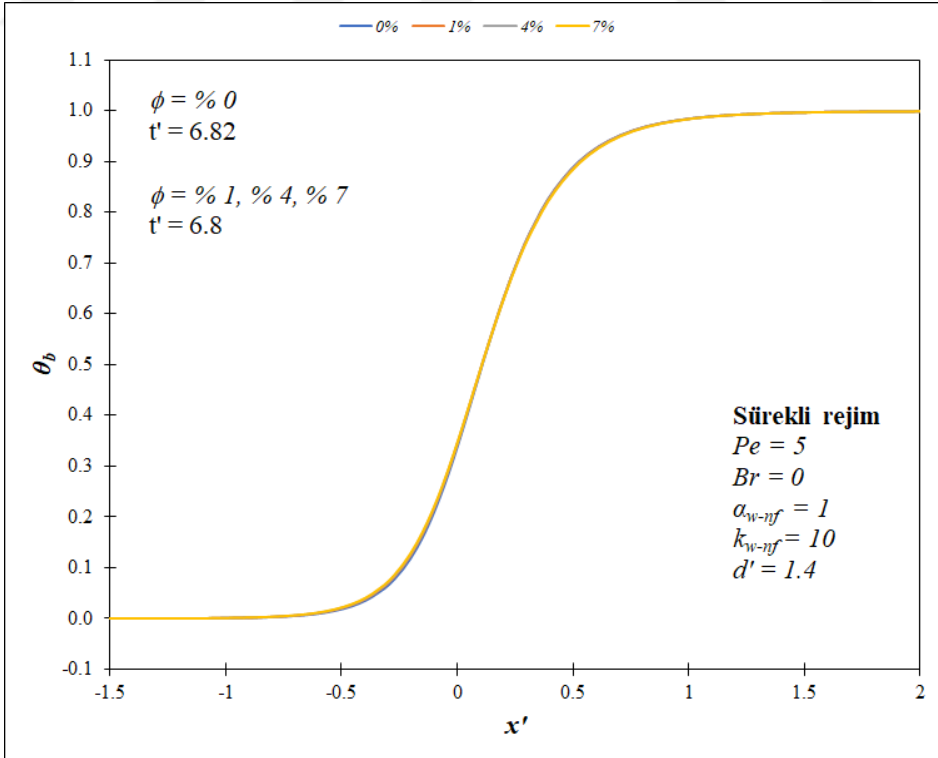
Şekil 4.155. Buongiorno (2006) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-TiO₂ nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey sıcaklığına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



Şekil 4.156. Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-TiO₂ nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin ara yüzey sıcaklığına etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



Şekil 4.157. Buongiorno (2006) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-TiO₂ nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin yığık sıcaklığa etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması



Şekil 4.158. Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından önerilen termofiziksel özellik modellerine göre su-TiO₂ nanoakışkanı için farklı hacimsel konsantrasyon değerlerinin yığık sıcaklığa etkisinin sürekli rejimdeki karşılaştırılması

oranı, ısı yayılım katsayısı, ısı iletim katsayısı ve Brinkman sayısı olarak farklı parametrelerde ilgili durumlar karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak bu ısı transferi özelliklerinin zamana bağlı olarak değişimine yer verilmiştir. Nanoakışkan için ısı taşınım katsayısı ara yüzey ısı akısına, ara yüzey sıcaklığına ve yığık sıcaklığa bağlıdır. Bu değer yalnızca temel akışkan olarak suyun kullanıldığı durumla kıyaslanmıştır ve buna göre ısı taşınımında artış görülmektedir. Nanoakışkan elde edilmesi sonrasında bu durum ısı iletim katsayısı artışından kaynaklanmaktadır. Nanoparçacık türü olarak TiO_2 ilavesine yönelik literatürdeki iki model göz önüne alınmıştır. Bu termofiziksel özellik modelleri, Buongiorno (2006) ve Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından sunulan çalışmalarda yer almaktadır. Peclet sayısının $Pe = 5$ 'ten $Pe = 1$ 'e doğru azalması sürekli rejime ulaşma süresini artıran bir yönde tesir etmektedir. Diğer Peclet sayısı değerleri için sürekli rejime erişme süresinde kayda değer değişimin olduğu belirtilememektedir. Ancak cidar kalınlık oranının artışı sürekli rejime ulaşma süresini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu durum açısından $d' = 1.4$ değeri oldukça belirgindir. Ayrıca, ara yüzey ısı akısı değerlerine göre ısı transferi de böylelikle azalmaktadır. Fakat cidar kalınlık oranı arttıkça üst akış bölgesinde ısı transferi azalmaktadır. Bu da $Pe = 1$ değerinde daha barizdir. Cidar kalınlık oranının aynı olduğu durumda ısı transferinin Peclet sayısı ile arttığı gözlemlenmektedir. Peclet sayısı azalması sonucunda sürekli rejime aksel mesafe açısından daha geç ulaşıldığı da vurgulanmaktadır. Bu etki çerçevesinde daha düşük akış hızının varlığı söz konusu olup, cidarla nanoakışkan arasındaki sıcaklık farkı beklendiği üzere azalmaktadır. Nanoparçacık için hacimsel konsantrasyon değerlerinin artışı ile yığık sıcaklık değerleri de artmaktadır. Ara yüzey sıcaklığı açısından azalma mevcuttur. Çünkü Nusselt sayısı bilindiği üzere ara yüzey sıcaklığı ile yığık sıcaklık arasındaki farkla ters orantı göstermektedir. Doğal olarak hacimsel konsantrasyon artışı bu farkı azaltmaktadır. Dolayısıyla Nusselt sayısı artışı da ısı transferi artışının bir göstergesidir. Bu hususta Buongiorno (2006) ve Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından literatüre kazandırılan termofiziksel özelliklere ait sonuçlar karşılaştırılmıştır. TiO_2 nanoparçacığının suya ilave edilmesine dayanan bu iki modelin birbirine yakın sonuçları daha düşük hacimsel konsantrasyon değerleri için sunduğu gözlenmektedir. Bir diğer sonuç olarak, hacimsel konsantrasyon değerleri arttıkça sürekli rejime ulaşma süresi de artmaktadır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlara ve bu konu ile ilgili tavsiyelere sırasıyla yer verilmiştir.

5.1 Sonuçlar

Mikrokanaldaki nanoakışkanların ısı performans etkisi laminar akış için geçici rejim problemi kapsamında sayısal olarak değerlendirilmiştir. Farklı hacimsel konsantrasyonlar ($\phi = \% 1, \% 4$ ve $\% 7$) için çalışmada temel akışkan olarak kullanılan suya Al_2O_3 , CuO ve TiO_2 nanoparçacıklarının ayrı ayrı olarak eklendiği durumlar ara yüzey ısı akısı, ara yüzey sıcaklığı, yığık sıcaklık ve radyal sıcaklık gibi ısı transferi sonuçları açısından kıyaslanmıştır. Ara yüzey ısı akısı için $q'_{wi} = 0$ değeri sağlanmıştır. Benzer şekilde sırasıyla ara yüzey sıcaklığı ve yığık sıcaklık da beklendiği üzere $\theta_{wi} = 1$ ve $\theta_b = 1$ değerlerine ulaşmıştır. Buna göre her bir nanoparçacık için literatürde yer alan iki farklı termofiziksel özellik modeli karşılaştırılmıştır. Sayısal çözüme Peclet sayısının ($Pe = 1, 5, 20$ ve 50), cidar kalınlık oranının ($d' = 0.02, 0.1, 0.2, 0.3, 0.6, 1$ ve 1.4), ısı yayılım katsayısı oranının ($\alpha_{w-nf} = 0.1, 1$ ve 10), ısı iletim katsayısı oranının ($k_{w-nf} = 0.1, 1$ ve 10) ve Brinkman sayısının ($Br = -0.2, -0.1, 0, 0.1$ ve 0.2) parametrik etkisi sonuç olarak sunulmuştur. Düşük Peclet sayılarında ($Pe \leq 5$) eksenel iletim etkisinin daha belirgin olduğu ve bunun aksine $Pe \geq 20$ için Peclet sayısının ısı transferini daha az etkilediği görülmüştür. Cidar kalınlık oranı artışının ve ısı iletim katsayısı oranı azalışının ısı transferini azaltıcı yönde tesir ettiği gözlemlenmiştir. Isıl yayılım katsayısı oranı değişiminin ise diğer parametrelerin etkisi ile kıyaslandığında ısı transferini sonuçlarını kayda değer bir şekilde etkilemediği sonucu ortaya çıkmıştır. Brinkman sayısının sıfırdan farklı olduğu viskoz yitim etkisini içeren durumlarda ısı transferi yönünün etkilendiği sonucu elde edilmiştir. Belirtilen parametrelerin değeri azaldıkça sürekli rejime erişme süresinin artma eğilimi gösterdiği de saptanmıştır. Bu hususta temel akışkan olan su için elde edilen parametrik sonuçlar nanoakışkanlar için de geçerlilik arz etmektedir. Nanoparçacık ilavesi sonrası elde edilen nanoakışkan kullanımı ile ısı transferinin artan hacimsel konsantrasyon değerleri ile artış gösterdiği bulunmuştur. Nanoakışkanının sabit hacimsel konsantrasyonda ısı performans etkisi açısından CuO , Al_2O_3 ve TiO_2 sıralaması meydana gelmektedir. Hacimsel konsantrasyon aralığı olarak $1 \leq \phi \leq 7$ değerleri için CuO nanoparçacığının ortalama etkisi $1.07 \leq Nu_{nf}/Nu_f \leq 1.52$ oranlarında elde edilmiştir. Bu nanoparçacıktan sonra Al_2O_3 nanoparçacığının suya eklenmesinin daha etkili olduğu gözlenmektedir. Bu nanoparçacığın kullanımıyla elde edilen $1.03 \leq$

$Nu_{nf}/Nu_f \leq 1.26$ ortalama oranları sırasıyla $1 \leq \phi \leq 7$ hacimsel konsantrasyon aralığı için geçerlidir. Bir diğer nanoparçacık olarak, $1 \leq \phi \leq 7$ hacimsel konsantrasyon aralığında TiO_2 malzemesinin ilave edilmesi durumunda $1.02 \leq Nu_{nf}/Nu_f \leq 1.08$ ortalama oranları sırasıyla sağlanmıştır. Her bir nanoparçacık türü için kıyaslanan termofiziksel özellik modelleri bakımından birbirine en yakın sonucu Al_2O_3 nanoparçacığına ait modellerin sunduğu görülmüştür. CuO ve TiO_2 nanoparçacıkları için birer modelin buna göre daha az etkili olduğu gözlemlenmiştir.

5.2 Öneriler

Mevcut çalışmadan elde edilen sonuçlar göz önüne alındığında, bu konudaki gelecek çalışmalarda hibrit nanoakışkan kullanımı, farklı nanoparçacık türlerinin tercihi, farklı sınır koşullarının değerlendirilmesi tavsiye edilmektedir.

KAYNAKLAR

- Adelaja, A. O., Dirker, J. ve Meyer, J. P., 2014, Effects of the thick walled pipes with convective boundaries on laminar flow heat transfer, *Applied Energy*, 130, 838-845.
- Akbari, M., Behzadmehr, A. ve Shahraki, F., 2008, Fully developed mixed convection in horizontal and inclined tubes with uniform heat flux using nanofluid, *International Journal of heat and fluid flow*, 29 (2), 545-556.
- Al Kumait, A. A., Ibrahim, T. K. ve Abdullah, M. A., 2019, Experimental and numerical study of forced convection heat transfer in different internally ribbed tubes configuration using TiO₂ nanofluid, *Heat Transfer—Asian Research*, 48 (5), 1778-1804.
- Alfaryjat, A., Mohammed, H., Adam, N. M., Stanciu, D. ve Dobrovicescu, A., 2018, Numerical investigation of heat transfer enhancement using various nanofluids in hexagonal microchannel heat sink, *Thermal Science and Engineering Progress*, 5, 252-262.
- Alloui, Z., Vasseur, P. ve Reggio, M., 2011, Natural convection of nanofluids in a shallow cavity heated from below, *International Journal of Thermal Sciences*, 50 (3), 385-393.
- Altun, A. H., 2013, Kalın cidarlı borularda zamanla periyodik olarak değişen dış yüzey sıcaklığı sınır şartı ile laminer akış ısı gelişme bölgesi geçici rejim birleşik ısı transferi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Ambreen, T. ve Kim, M.-H., 2017, Comparative assessment of numerical models for nanofluids' laminar forced convection in micro and mini channels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 115, 513-523.
- Ambreen, T. ve Kim, M.-H., 2018, Effects of variable particle sizes on hydrothermal characteristics of nanofluids in a microchannel, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 120, 490-498.
- Arici, M. ve Kaya, M., 2007, Conjugate heat transfer analysis for laminar flow in pipes having a step change in boundary conditions and wall conductivity, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 221 (8), 919-925.
- Atmaca, Ş. U., 2013, Çevresel olarak yarısı sabit yüzey sıcaklığı ile ısıtılmış kalın cidarlı bir boruda geçici rejim birleşik ısı transferi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Avcı, M., Aydın, O. ve Arıcı, M. E., 2012, Conjugate heat transfer with viscous dissipation in a microtube, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55 (19-20), 5302-5308.
- Azizi, Z., Alamdari, A. ve Malayeri, M., 2015, Convective heat transfer of Cu–water nanofluid in a cylindrical microchannel heat sink, *Energy conversion and management*, 101, 515-524.
- Barozzi, G. S. ve Pagliarini, G., 1985, A method to solve conjugate heat transfer problems: the case of fully developed laminar flow in a pipe, *Journal of heat transfer*, 107 (1), 77-83.
- Bianco, V., Chiacchio, F., Manca, O. ve Nardini, S., 2009, Numerical investigation of nanofluids forced convection in circular tubes, *Applied Thermal Engineering*, 29 (17-18), 3632-3642.

- Bilir, S., 1995, Laminar flow heat transfer in pipes including two-dimensional wall and fluid axial conduction, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 38 (9), 1619-1625.
- Bouhaleb, M. ve Abbassi, H., 2016, Numerical investigation of heat transfer by CuO–water nanofluid in rectangular enclosures, *Heat Transfer Engineering*, 37 (1), 13-23.
- Buongiorno, J., 2006, Convective transport in nanofluids, *Journal of heat transfer*, 128, 240-250.
- Canlı, E., 2020, Kalın cidarlı borularda türbülanslı akışta geçici rejim birleşik ısı transferinin sayısal çözümü, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Chandrasekar, M., Suresh, S. ve Bose, A. C., 2010, Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of Al₂O₃/water nanofluid, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34 (2), 210-216.
- Char, M.-I. ve Tai, B.-C., 2010, Effects of viscous dissipation on slip-flow heat transfer in a micro annulus, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53 (7-8), 1402-1408.
- Choi, S. U. ve Eastman, J. A., 1995, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, *Argonne National Lab., IL (United States)*.
- Chou, F.-C. ve Lien, W.-Y., 1991, Effect of wall heat conduction on laminar mixed convection in the thermal entrance region of horizontal rectangular channels, *Wärme-und Stoffübertragung*, 26 (3), 121-127.
- Cole, K. D. ve Çetin, B., 2017, Modeling of Joule heating and convective cooling in a thick-walled micro-tube, *International Journal of Thermal Sciences*, 119, 24-36.
- Corcione, M., 2011, Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids, *Energy conversion and management*, 52 (1), 789-793.
- Çetin, B., Yazıcıoğlu, A. G. ve Kakaç, S., 2008, Fluid flow in microtubes with axial conduction including rarefaction and viscous dissipation, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 35 (5), 535-544.
- Da Silva Miranda, B. M. ve Anand, N., 2004, Convective heat transfer in a channel with porous baffles, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 46 (5), 425-452.
- Dandoutiya, B. K. ve Kumar, A., 2022, Comparison of mathematical models to estimate the thermal conductivity of TiO₂-water based nanofluid: A review, *Thermal Science*, 26 (1 Part B), 579-591.
- Duangthongsuk, W. ve Wongwises, S., 2009, Measurement of temperature-dependent thermal conductivity and viscosity of TiO₂-water nanofluids, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33 (4), 706-714.
- Ebrahimnia-Bajestan, E., Niazmand, H., Duangthongsuk, W. ve Wongwises, S., 2011, Numerical investigation of effective parameters in convective heat transfer of nanofluids flowing under a laminar flow regime, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54 (19-20), 4376-4388.
- Ege, F., Turgut, O. ve Elibol, E. A., 2021, Flow and Heat Transfer in a Trapezoidal Cross-Sectional Microchannel Heat Sink Using Nanofluid, *Gazi University Journal of Science*, 34 (4).
- Elibol, E. A. ve Turgut, O., 2022, Heat transfer and fluid flow characteristics in a long offset strip fin channel by using TiO₂-water nanofluid, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47 (12), 15415-15428.
- Farsad, E., Abbasi, S., Zabihi, M. ve Sabbaghzadeh, J., 2011, Numerical simulation of heat transfer in a micro channel heat sinks using nanofluids, *Heat and Mass Transfer*, 47 (4), 479-490.

- Ganvir, R., Walke, P. ve Kriplani, V., 2017, Heat transfer characteristics in nanofluid—a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 451-460.
- Ghasemiasl, R., Hashemi, S., Armaghani, T., Tayebi, T. ve Pour, M., 2023, Recent studies on the forced convection of nano-fluids in channels and tubes: A comprehensive review, *Experimental Techniques*, 47 (1), 47-81.
- Heris, S. Z., Esfahany, M. N. ve Etemad, G., 2007, Numerical investigation of nanofluid laminar convective heat transfer through a circular tube, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 52 (11), 1043-1058.
- Heshmatian, S. ve Bahiraei, M., 2017, Numerical investigation of entropy generation to predict irreversibilities in nanofluid flow within a microchannel: effects of Brownian diffusion, shear rate and viscosity gradient, *Chemical Engineering Science*, 172, 52-65.
- Ho, C., Liu, W., Chang, Y. ve Lin, C., 2010, Natural convection heat transfer of alumina-water nanofluid in vertical square enclosures: An experimental study, *International Journal of Thermal Sciences*, 49 (8), 1345-1353.
- Hwang, Y., Park, H., Lee, J. ve Jung, W., 2006, Thermal conductivity and lubrication characteristics of nanofluids, *Current Applied Physics*, 6, e67-e71.
- Ismail, O. A., Ali, A. M., Hassan, M. A. ve Gamea, O., 2023, Geometric optimization of pin fins for enhanced cooling in a microchannel heat sink, *International Journal of Thermal Sciences*, 190, 108321.
- Izadi, M., Behzadmehr, A. ve Jalali-Vahida, D., 2009, Numerical study of developing laminar forced convection of a nanofluid in an annulus, *International Journal of Thermal Sciences*, 48 (11), 2119-2129.
- Jeong, H.-E. ve Jeong, J.-T., 2006, Extended Graetz problem including streamwise conduction and viscous dissipation in microchannel, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49 (13-14), 2151-2157.
- John, B., Senthilkumar, P. ve Sadasivan, S., 2019, Applied and theoretical aspects of conjugate heat transfer analysis: A review, *Archives of Computational Methods in Engineering*, 26, 475-489.
- Kamyar, A., Saidur, R. ve Hasanuzzaman, M., 2012, Application of computational fluid dynamics (CFD) for nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55 (15-16), 4104-4115.
- Kandlikar, S., Garimella, S., Li, D., Colin, S. ve King, M. R., 2005, Heat Transfer and Fluid Flow in Minichannels and Microchannels, Elsevier, p.
- Kandlikar, S. G., 2012, History, advances, and challenges in liquid flow and flow boiling heat transfer in microchannels: a critical review, *Journal of heat transfer*, 134 (3), 034001.
- Karimzadehkhoei, M., Sadaghiani, A. K., Motezakker, A. R., Akgönül, S., Ozbey, A., Şendur, K., Mengüç, M. P. ve Koşar, A., 2019, Experimental and numerical investigation of inlet temperature effect on convective heat transfer of γ -Al₂O₃/Water nanofluid flows in microtubes, *Heat Transfer Engineering*, 40 (9-10), 738-752.
- Kayhani, M., Soltanzadeh, H., Heyhat, M., Nazari, M. ve Kowsary, F., 2012, Experimental study of convective heat transfer and pressure drop of TiO₂/water nanofluid, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39 (3), 456-462.
- Keblinski, P., Phillpot, S., Choi, S. ve Eastman, J., 2002, Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids), *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45 (4), 855-863.

- Khanafer, K., Vafai, K. ve Lightstone, M., 2003, Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46 (19), 3639-3653.
- Kolade, B., Goodson, K. E. ve Eaton, J. K., 2009, Convective performance of nanofluids in a laminar thermally developing tube flow, *Journal of heat transfer*, 131 (5), 052402.
- Koo, J. ve Kleinstreuer, C., 2005, Laminar nanofluid flow in microheat-sinks, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48 (13), 2652-2661.
- Lee, J. ve Mudawar, I., 2007, Assessment of the effectiveness of nanofluids for single-phase and two-phase heat transfer in micro-channels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50 (3-4), 452-463.
- Lelea, D. ve Cioabla, A. E., 2010, The viscous dissipation effect on heat transfer and fluid flow in micro-tubes, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37 (9), 1208-1214.
- Lelea, D. ve Laza, I., 2014a, The water based Al₂O₃ nanofluid flow and heat transfer in tangential microtube heat sink with multiple inlets, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 69, 264-275.
- Lelea, D. ve Laza, I., 2014b, The particle thermal conductivity influence of nanofluids on thermal performance of the microtubes, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 59, 61-67.
- Li, J. ve Kleinstreuer, C., 2008, Thermal performance of nanofluid flow in microchannels, *International Journal of heat and fluid flow*, 29 (4), 1221-1232.
- Lodhi, M. S., Sheorey, T. ve Dutta, G., 2020, Single-phase fluid flow and heat transfer characteristics of nanofluid in a circular microchannel: Development of flow and heat transfer correlations, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 234 (18), 3689-3708.
- Loh, A., Chen, G. M. ve Lim, B. K., 2022, Viscous dissipation effect on forced convective transport of nanofluids in an asymmetrically heated parallel-plate microchannel, *Case Studies in Thermal Engineering*, 35, 102056.
- Mah, W. H., Hung, Y. M. ve Guo, N., 2012, Entropy generation of viscous dissipative nanofluid flow in microchannels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55 (15-16), 4169-4182.
- Maïga, S. E. B., Palm, S. J., Nguyen, C. T., Roy, G. ve Galanis, N., 2005, Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows, *International Journal of heat and fluid flow*, 26 (4), 530-546.
- Maïga, S. E. B., Nguyen, C. T., Galanis, N. ve Roy, G., 2004, Heat transfer behaviours of nanofluids in a uniformly heated tube, *Superlattices and Microstructures*, 35 (3-6), 543-557.
- Malvandi, A., Zamani, M., Hosseini, S. ve Moshizi, S., 2017, Figure of merit for optimization of nanofluid flow in circular microchannel by adapting nanoparticle migration, *Applied Thermal Engineering*, 118, 328-338.
- Minkowycz, W., Sparrow, E. M., Schneider, G. E. ve Pletcher, R. H., 1988, Handbook of numerical heat transfer.
- Mintsa, H. A., Roy, G., Nguyen, C. T. ve Doucet, D., 2009, New temperature dependent thermal conductivity data for water-based nanofluids, *International Journal of Thermal Sciences*, 48 (2), 363-371.
- Mirzaei, M. ve Dehghan, M., 2013, Investigation of flow and heat transfer of nanofluid in microchannel with variable property approach, *Heat and Mass Transfer*, 49 (12), 1803-1811.

- Mohammed, H., Gunnasegaran, P. ve Shuaib, N., 2010, Heat transfer in rectangular microchannels heat sink using nanofluids, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37 (10), 1496-1503.
- Mori, S., Inoue, T. ve Tanimoto, A., 1977, Heat transfer to laminar flow with temperature—dependent heat generation, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 55 (2), 138-144.
- Murshed, S., Leong, K. ve Yang, C., 2008, Thermophysical and electrokinetic properties of nanofluids—a critical review, *Applied Thermal Engineering*, 28 (17-18), 2109-2125.
- Narendran, G., Gnanasekaran, N. ve Perumal, D. A., 2020, Thermodynamic irreversibility and conjugate effects of integrated microchannel cooling device using TiO₂ nanofluid, *Heat and Mass Transfer*, 56, 489-505.
- Nguyen, C., Desgranges, F., Roy, G., Galanis, N., Maré, T., Boucher, e. ve Mintsa, H. A., 2007, Temperature and particle-size dependent viscosity data for water-based nanofluids—hysteresis phenomenon, *International Journal of heat and fluid flow*, 28 (6), 1492-1506.
- Nonino, C., Savino, S., Del Giudice, S. ve Mansutti, L., 2009, Conjugate forced convection and heat conduction in circular microchannels, *International Journal of heat and fluid flow*, 30 (5), 823-830.
- Özerinç, S., Yazıcıoğlu, A. ve Kakaç, S., 2012, Numerical analysis of laminar forced convection with temperature-dependent thermal conductivity of nanofluids and thermal dispersion, *International Journal of Thermal Sciences*, 62, 138-148.
- Öztop, H. F. ve Abu-Nada, E., 2008, Numerical study of natural convection in partially heated rectangular enclosures filled with nanofluids, *International Journal of heat and fluid flow*, 29 (5), 1326-1336.
- Pagliarini, G., 1988, Effects of axial conduction in the wall and the fluid on conjugate heat transfer in thick-walled circular tubes, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 15 (5), 581-591.
- Pak, B. C. ve Cho, Y. I., 1998, Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, *Experimental Heat Transfer an International Journal*, 11 (2), 151-170.
- Patankar, S. V., 1980, Numerical heat transfer and fluid flow, Hemisphere Publishing Corporation, p.
- Rahimi, M. ve Mehryar, R., 2012, Numerical study of axial heat conduction effects on the local Nusselt number at the entrance and ending regions of a circular microchannel, *International Journal of Thermal Sciences*, 59, 87-94.
- Ramadan, K., 2017, Effects of pressure work, viscous dissipation, shear work and axial conduction on convective heat transfer in a microtube, *Case Studies in Thermal Engineering*, 10, 370-381.
- Ramadan, K., Kamil, M. ve Bataineh, M., 2019, Conjugate heat transfer in a microchannel simultaneously developing gas flow: a vorticity stream function-based numerical analysis, *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 11 (6).
- Renksizbulut, M., Niazmand, H. ve Tercan, G., 2006, Slip-flow and heat transfer in rectangular microchannels with constant wall temperature, *International Journal of Thermal Sciences*, 45 (9), 870-881.
- Rimbault, B., Nguyen, C. T. ve Galanis, N., 2014, Experimental investigation of CuO–water nanofluid flow and heat transfer inside a microchannel heat sink, *International Journal of Thermal Sciences*, 84, 275-292.

- Roache, P. J., 1994, Perspective: a method for uniform reporting of grid refinement studies.
- Roy, G., Nguyen, C. T. ve Lajoie, P.-R., 2004, Numerical investigation of laminar flow and heat transfer in a radial flow cooling system with the use of nanofluids, *Superlattices and Microstructures*, 35 (3-6), 497-511.
- Schutte, D. J., Rahman, M. ve Faghri, A., 1992, Transient conjugate heat transfer in a thick-walled pipe with developing laminar flow, *Numerical Heat Transfer*, 21 (2), 163-186.
- Shalchi-Tabrizi, A. ve Seyf, H. R., 2012, Analysis of entropy generation and convective heat transfer of Al₂O₃ nanofluid flow in a tangential micro heat sink, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55 (15-16), 4366-4375.
- Sharma, J. P., Sharma, A., Jilte, R. D., Kumar, R. ve Ahmadi, M. H., 2020, A study on thermohydraulic characteristics of fluid flow through microchannels, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 140, 1-32.
- Sheikholeslami, M. ve Ganji, D., 2016, Nanofluid convective heat transfer using semi analytical and numerical approaches: a review, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 65, 43-77.
- Sohel, M., Saidur, R., Sabri, M. F. M., Kamalisarvestani, M., Elias, M. ve Ijam, A., 2013, Investigating the heat transfer performance and thermophysical properties of nanofluids in a circular micro-channel, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 42, 75-81.
- Sparrow, E. ve Faghri, M., 1980, fluid-to-fluid conjugate heat transfer for a vertical pipe—internal forced convection and external natural convection, *Journal of heat transfer*, 102 (3), 402-407.
- Şen, S., 2016, Dairesel mikro kanallarda geçici rejim birleşik ısı transferinin sayısal incelenmesi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Teng, T.-P., Hung, Y.-H., Teng, T.-C., Mo, H.-E. ve Hsu, H.-G., 2010, The effect of alumina/water nanofluid particle size on thermal conductivity, *Applied Thermal Engineering*, 30 (14-15), 2213-2218.
- Ting, T. W., Hung, Y. M. ve Guo, N., 2014a, Field-synergy analysis of viscous dissipative nanofluid flow in microchannels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 73, 483-491.
- Ting, T. W., Hung, Y. M. ve Guo, N., 2014b, Effects of streamwise conduction on thermal performance of nanofluid flow in microchannel heat sinks, *Energy conversion and management*, 78, 14-23.
- Topuz, A., Engin, T., Özalp, A. A., Erdoğan, B., Mert, S. ve Yeter, A., 2018, Experimental investigation of optimum thermal performance and pressure drop of water-based Al₂O₃, TiO₂ and ZnO nanofluids flowing inside a circular microchannel, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 131 (3), 2843-2863.
- Trinavee, K., Gogoi, T. ve Pandey, M., 2016, Laminar convective heat transfer characteristic of Al₂O₃/water nanofluid in a circular microchannel, *J Phys Conf Ser*, 012088.
- Vajjha, R. S. ve Das, D. K., 2012, A review and analysis on influence of temperature and concentration of nanofluids on thermophysical properties, heat transfer and pumping power, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55 (15-16), 4063-4078.
- Vinodhan, V. L., Suganthi, K. ve Rajan, K., 2016, Convective heat transfer performance of CuO–water nanofluids in U-shaped minitube: potential for improved energy recovery, *Energy conversion and management*, 118, 415-425.

- Wang, X.-D., An, B. ve Xu, J.-L., 2013, Optimal geometric structure for nanofluid-cooled microchannel heat sink under various constraint conditions, *Energy conversion and management*, 65, 528-538.
- Wang, X.-Q. ve Mujumdar, A. S., 2007, Heat transfer characteristics of nanofluids: a review, *International Journal of Thermal Sciences*, 46 (1), 1-19.
- Williams, W., Buongiorno, J. ve Hu, L.-W., 2008, Experimental investigation of turbulent convective heat transfer and pressure loss of alumina/water and zirconia/water nanoparticle colloids (nanofluids) in horizontal tubes, *Journal of heat transfer*, 130 (4).
- Xuan, Y. ve Roetzel, W., 2000, Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43 (19), 3701-3707.
- Xuan, Y. ve Li, Q., 2003, Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids, *Journal of heat transfer*, 125 (1), 151-155.
- Yan, W.-M., 1993, Transient conjugated heat transfer in channel flows with convection from the ambient, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 36 (5), 1295-1301.
- Yang, Y.-T. ve Lai, F.-H., 2011, Numerical study of flow and heat transfer characteristics of alumina-water nanofluids in a microchannel using the lattice Boltzmann method, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38 (5), 607-614.
- Zarringhalam, M., Karimipour, A. ve Toghraie, D., 2016, Experimental study of the effect of solid volume fraction and Reynolds number on heat transfer coefficient and pressure drop of CuO–water nanofluid, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 76, 342-351.
- Zhang, H., Shao, S., Xu, H. ve Tian, C., 2013, Heat transfer and flow features of Al₂O₃–water nanofluids flowing through a circular microchannel–Experimental results and correlations, *Applied Thermal Engineering*, 61 (2), 86-92.
- Zhang, S.-X., He, Y.-L., Lauriat, G. ve Tao, W.-Q., 2010, Numerical studies of simultaneously developing laminar flow and heat transfer in microtubes with thick wall and constant outside wall temperature, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53 (19-20), 3977-3989.
- Zhu, D., Li, X., Wang, N., Wang, X., Gao, J. ve Li, H., 2009, Dispersion behavior and thermal conductivity characteristics of Al₂O₃–H₂O nanofluids, *Current Applied Physics*, 9 (1), 131-139.