



NANOAKIŞKAN VİSKOZİTESİNİN KARŞILAŞTIRMALI DEĞERLENDİRMESİ

Elif Begüm ELÇİOĞLU *, Almila GÜVENÇ YAZICIOĞLU ** ve Sadık KAKAÇ ***

* Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 06800 Çankaya, Ankara,
elcioglu.begum@metu.edu.tr

** Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 06800 Çankaya, Ankara, yalmila@metu.edu.tr

*** TOBB ETÜ, Makine Mühendisliği Bölümü, 06560 Söğütözü, Ankara, sadikkakac@yahoo.com

(Geliş Tarihi: 28.01.2013 Kabul Tarihi: 02.05.2013)

Özet: Nanoakışkanlar, yüksek termofiziksel özellikleri ile saf akışkanlara kıyasla avantajlıdır. Nanoakışkan içerisindeki nanoparçacık konsantrasyonu arttıkça, termofiziksel özelliklerdeki artış büyümektedir. Ancak viskozitedeki artış, akış kanalındaki basınç düşümünü ve gerekli pompa gücünü arttırdığından, nanoakışkan uygulamalarını sınırlandırabilmektedir. Literatür gözden geçirildiğinde, nanoakışkanlarla elde edilen ısı transferi artışı ve ısı iletkenlik ile ilgili çalışmaların, viskozite çalışmalarından sayıca fazla olduğu ve viskozite tahmininde kullanılabilecek yüksek güvenilirlikte bir modelin bulunmadığı görülmüştür. Konunun yeni oluşu, nanoakışkanların kullanılacağı sistemlerin karmaşıklığı ve nanoakışkan viskozitesinin pek çok parametreden etkileniyor oluşu, konuyu daha karmaşık hale getirmektedir. Bu çalışmada nanoakışkan viskozitesi geniş kapsamda ele alınmış ve bahsedilen viskozite modelleri etkili bazı parametreler temelinde karşılaştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Nanoakışkan, nanoakışkan viskozitesi, nanoakışkanların reolojik özellikleri.

A COMPARATIVE EVALUATION ON NANOFLUID VISCOSITY

Abstract: Nanofluids are advantageous due to their superior thermophysical properties compared to base fluids. Increasing nanoparticle concentration increases thermophysical properties. However, viscosity enhancement results in increased pressure drop and pumping power requirement in the flow channel, which may limit the potential nanofluid applications. Because nanofluids is a relatively new subject, complexity of the nanofluid systems and nanofluid viscosity being affected by many parameters make the subject even more complicated. When literature is overviewed, lack of a general model for nanofluid viscosity is observed. In this study, nanofluid viscosity was investigated and given viscosity models were compared based on some effective parameters.

Keywords: Nanofluid, nanofluid viscosity, rheological properties of nanofluids.

Semboller

c	özgül ısı [J kg ⁻¹ K ⁻¹]
d	çap [nm]
D	fraktal indeks
V	Hız [m s ⁻¹]

Yunan harfleri

[η]	saf viskozite
ρ	yoğunluk [kg m ⁻³]
μ	viskozite [cP]
ϕ	(nano)parçacık konsantrasyonu
δ	nanoparçacıklar arası mesafe

k	ısı iletkenlik katsayısı [W m ⁻¹ K ⁻¹]
M	baz akışkan moleküler ağırlığı [kgmol ⁻¹]
N	Avogadro sayısı [6.022 x 10 ²³ mol ⁻¹]
T	sıcaklık [°C, °K]

Altsimgeler

a	küme
B	Brownian hareketi
bf	baz akışkan
m	maksimum
nf	nanoakışkan
p	(nano)parçacık, özgül ısı için: sabit basınç
r	bağlı
w	su

GİRİŞ

Nanoakışkanlar

Isı transferi uygulamalarında araştırmacıların en büyük hedefi, kütleler arasındaki ısı transferini en verimli

şekilde gerçekleştirmektir. Bu amaçla, ısı transfer yüzey alanını arttırmak, ısı transferinin gerçekleştiği yüzeyde kanatçıklar kullanmak, ısı transfer yüzeyinin üzerine yapay pürüzler eklemek ve mikrokanallar kullanmak (Incropera vd, 2007) gibi pek çok uygulama denenmiş, ancak bu metotlar ile istenilen ölçüde ısı transferi

iyileşmesi elde edilememiştir. Yüzey alanının artırılması, bütün olarak sistemin boyutunun büyümesi anlamına gelmektedir. Bu durum sistemin maliyetini arttırmaktadır. Bahsedilen diğer uygulamalar da özellikli uygulamalardır ve belirli koşullarda uygulanabilirliği mevcuttur. Ayrıca, ısı transferinde kullanılan akışkanların yetersiz termofiziksel özellikleri de, bazı durumlarda ısı transferi veriminin yüksek olamamasında pay sahibidir.

Bu noktadan hareketle, ısı transferinin daha verimli gerçekleştirilebilmesi amacıyla, endüstride sıklıkla kullanılan saf akışkanlara, termofiziksel özellikler bakımından daha üstün olan metal ya da metal olmayan parçacıkların eklenmesi ile daha üstün özelliklere sahip bir karışım elde edilmesi düşünülmüştür. Bahsi geçen bazı malzemelerin ısı iletkenlik değerleri, Tablo 1’de verilmiştir (Kakaç ve Pramuanjaroenkij, 2009).

Tablo 1. Bazı malzemelerin ısı iletkenlik değerleri (Kakaç ve Pramuanjaroenkij, 2009)

Katılar/sıvılar	Malzeme	Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)
Metalik katılar	Gümüş	429
	Bakır	401
	Alüminyum	237
Metalik olmayan katılar	Elmas	3300
	Karbon nanotüpler (CNT)	3000
	Silikon	148
	Alümina (Al ₂ O ₃)	40
Metalik sıvılar	Sodyum (T = 644°K’de)	72.3
Metalik olmayan sıvılar	Su (H ₂ O)	0.613
	Etilen glikol (EG)	0.253
	Motor yağı (EO)	0.145

Bu amaçla, daha önceki çalışmalarda mikrometre (1µm = 10⁻⁶m) ya da daha büyük boyutta parçacıkların saf akışkanlara eklenmesi yöntemi denenmiş, ancak saf akışkana eklenen mikro parçacıklar, akışın gerçekleştiği kanallarda tıkanma ve aşınma (erozyon) gibi istenmeyen durumlara neden olmuştur (Das vd, 2008). Mikro parçacıkların amaçlanan ısı transferi iyileşmesini vermemesi sonucunda, bu konudaki çalışmalar devam etmiş ve nanometre (1nm = 10⁻⁹m) boyutundaki parçacıkların (*nanoparçacıklar*) baz akışkanlara eklenmesi gündeme gelmiştir.

Nanoakışkan kavramı, ilk kez Stephen U. S. Choi ve arkadaşları tarafından Argonne Ulusal Laboratuvarı, ABD’de yapılan çalışmalar sonucunda tanımlanmıştır. Choi ve Eastman’ın çalışmasında nanoakışkanlar; “*nano boyutta metalik parçacıkların, su, etilen glikol (EG) veya motor yağı (EO) gibi endüstriyel ısı transferi akışkanları içerisinde dağıtılmasıyla oluşturulmuş, yaklaşık 10 nm büyüklüğünde metalik parçacıklar içeren ve günümüzde kullanılan nano boyut teknolojisi ile üretilebilecek, yüksek ısı iletkenliğine sahip yeni tür*

akışkanlar” olarak tanımlanmıştır (Choi ve Eastman, 1995).

Endüstride ısı transferi uygulamalarında kullanılan saf akışkanlara (baz akışkanlar) eklenen nanoparçacıklar ile, ilgili akışkanın termofiziksel özelliklerinde artış ve sonuç olarak ısı transferinde önemli miktarlarda iyileşme elde edilebilmektedir. Nanoakışkanlar ile ısı iletkenlikte elde edilen artış konusunda kapsamlı bir derleme makalesi literatürde bulunmaktadır (Özerinç vd, 2010). Nanoakışkanlarla elde edilen ısı transferindeki artışın ana nedenlerinden biri, akışkanın ısı transfer katsayısındaki artıştır. Bunun dışında, nanometre mertebesindeki boyutta ortaya çıkan diğer mekanizmalar (parçacıklar arasındaki ara yüzeysel tabaka (Yu ve Choi, 2003), Brownian hareketi (Renn, 2005) olarak adlandırılan parçacıkların rastgele hareketi, Kapitza rezistansı vb.) da sağlanan ısı transferi artışında önemli rol oynamaktadır.

Nanoakışkan kullanımı ile elde edilen ısı transferi artışı nedeniyle, nanoakışkanlar konusunda yapılan çalışmaların büyük bir kısmı, nanoakışkanların ısı iletkenlik katsayısı ve nanoakışkanlarla elde edilen ısı transferi iyileşmesi (artışı) üzerinedir. Nanoakışkanların akış özellikleri ve viskozitesi, ısı iletkenliğe göre daha az incelenmiştir. Ancak, nanoakışkanların viskozitesi de, nanoakışkanların potansiyel uygulamaları açısından büyük önem taşımaktadır. Baz akışkan içerisine eklenen nanoparçacık konsantrasyonu arttıkça, karışımın (nanoakışkan) ısı iletkenlik katsayısı artmaktadır (Özerinç vd, 2010). Ancak, baz akışkan içerisindeki nanoparçacık konsantrasyonu arttıkça, nanoakışkanın viskozitesinde de artış meydana gelmektedir. Ayrıca viskozite artışı, akışın gerçekleştiği kanalda basınç düşümünün ve akış için gerekli pompa gücünün artmasına neden olmaktadır. Bu amaçla, uygulamada “maksimum ısı iletkenlik katsayısı & minimum viskozite” değerlerinin sağlanabilmesi önem taşımaktadır. Nanoakışkanların “*kullanılabilirliğinin*” (nanoakışkan kullanımının baz akışkana göre avantajlı olup olmadığını) değerlendirilebilmesi, nanoakışkanların ısı iletkenlik katsayısı ve bağlı viskozitesinin eş zamanlı ölçümü ile mümkündür (Tavman ve Turgut, 2010).

NANOAKIŞKAN VİSKOZİTESİ

Viskozite, nanoakışkanların endüstriyel uygulamaları için önemli bir parametredir. Çünkü akışkanın viskozite değeri, akışın gerçekleştiği kanaldaki basınç düşümü, akış için gerekli pompa gücü, kanal yüzeyinde aşınma (erozyon) gibi olaylarla doğrudan ilişkilidir ve kontrol altına alınmalıdır.

Bu amaçla, nanoakışkan viskozitesi konusunda teorik ve deneysel çalışmalar yapılmaktadır. Deneysel çalışmalarda, viskozitenin, nanoakışkan içerisindeki nanoparçacık hacimsel konsantrasyonu (ϕ : bu parametre bazı çalışmalarda ağırlıkça olarak verilmektedir, bu durum yeri geldiğinde belirtilecektir.), sıcaklık (T), nanoparçacık çapı (d_p), nanoparçacık şekli

(küresel, silindirik, vb), nanoparçacık kümeleşmesi (aggregation) ve pH değeri gibi parametrelerle ilişkisi incelenmektedir. Bunlara ek olarak, nanoakışkan viskozitesinin kayma oranı ile ilişkisine bakılarak, akışkanın Newtonyen ya da Newtonyen olmayan (kayma incelmeye (shear thinning), kayma kalınlaşması (shear thickening) vb.) özellikte oluşu da, incelenen bir diğer önemli konudur. Ancak bu çalışmada nanoakışkan bağlı viskozitesinin nanoparçacık materyali, nanoparçacık şekli, sıcaklık, nanoparçacık konsantrasyonu ve nanoparçacık kümeleşmesi ile ilişkisi incelenmiş, nanoakışkanların Newtonyen ya da Newtonyen olmayan davranışları incelenmemiştir.

Teori: Nanoakışkan Viskozitesinin Tahmininde Kullanılan Modeller

Nanoakışkanlar, içerisinde katı ve sıvı fazda (katı: nanoparçacıklar, sıvı: baz akışkan) malzemelerin bulunduğu, iki fazlı akışkanlar olarak ele alınabilir (Yu ve Xie, 2012). Bu anlamda, iki fazlı akışkanların viskozitelerinin hesaplanmasında kullanılan formüller, bazı önemli noktalar dikkate alınarak nanoakışkanlar için de kullanılabilir. Bu önemli noktalara bu başlık altında değinilecektir.

Nanoakışkan viskozite modelleri, modellerin oluşturulduğu akışkan türüne göre ve modelin oluşturulduğu metodolojiye göre iki ayrı grupta sınıflandırılabilir. Modellerin oluşturulduğu akışkan türüne göre viskozite modelleri, mikro ve daha büyük boyutta katı tanecikler içeren iki fazlı akışkanlar için

oluşturulmuş modeller (Klasik Modeller) ve nanoakışkanlar için oluşturulmuş korelasyonlar olarak ikiye ayrılırken, modellerin oluşturulduğu metodolojiye göre ise teorik ve deneysel olarak ikiye ayrılmaktadır. Nanoakışkanlar ile elde edilen viskozite artışının belirlenmesinde, nanoakışkan viskozitesinin baz akışkan viskozitesine oranı ($\mu_{nf} / \mu_{bf} = \mu_r$) olarak tanımlanan “bağlı viskozite” kavramı kullanılmaktadır. Nanoakışkan viskozitesi ve bağlı viskozite tahmininde kullanılan bazı Klasik Modeller (Eş. (1)- Eş. (5)) ve teorik korelasyonlar, ilgili notlar ile birlikte Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2’de verilen modellere ek olarak, Frankel ve Acrivos Modeli (Frankel ve Acrivos, 1967), Graham Modeli (Graham, 1981) ve Hosseini vd’nin sunduğu korelasyon (Hosseini vd, 2010) de literatürde verilmektedir. Tablo 2’deki Klasik Modeller ve teorik korelasyonlara bakıldığında, Einstein, Brinkman, Lundgren ve Batchelor Modelleri’nin bağlı viskoziteyi sadece parçacık hacimsel konsantrasyonun bir fonksiyonu olarak tanımladığı görülmektedir. Bahsi geçen Graham Modeli (Graham, 1981) bağlı viskoziteyi parçacık boyutu ve parçacıklar arası mesafe temelinde tanımlarken, Hosseini vd’nin sunduğu korelasyon (Hosseini vd, 2010) nanoakışkan viskozitesini termodinamik özellikler temelinde tanımlamaktadır. İleriki bölümlerde yapılacak açıklama ve karşılaştırmalara istinaden, bahsi geçen bazı Klasik Modellerin parçacık hacimsel konsantrasyonuna bağlı olarak aldıkları değerler Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 2. Bazı Klasik Modeller ve teorik korelasyonlar

Referans	Model	Kabuller
Einstein, 1906	$\mu_r = 1 + 2.5\varphi$ (1)	Eş. (1), parçacık hacimsel konsantrasyonunun düşük değerleri için daha doğru sonuçlar vermektedir. Modelde, parçacıkların küresel olduğu ve aralarında etkileşim olmadığı kabulü vardır.
Brinkman, 1952	$\mu_r = (1 - \varphi)^{-2.5}$ (2)	Eş. (2), Einstein Modeli’nin orta büyüklükte parçacık hacimsel konsantrasyonlarına uyarlanmış halidir.
Lundgren, 1972	$\mu_r = 1 + 2.5\varphi + \left(\frac{25}{4}\right)\varphi^2 + O(\varphi^3)$ (3)	Eş. (3), Einstein Modeli’nin parçacık hacimsel konsantrasyonuna göre Taylor serisi açılımıdır.
Batchelor, 1977	$\mu_r = 1 + 2.5\varphi + 6.5\varphi^2$ (4)	Eş. (4), Einstein Modeli’nin parçacıkların Brownian hareketinin de hesaba katılarak genişletilmiş şeklidir.
Krieger ve Dougherty, 1959	$\mu_r = \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_m}\right)^{-[\eta]\varphi_m}$ (5)	Eş. (5), Kümelerin maksimum dolgulama oranını (maksimum packing fraction - φ_m) da dikkate alan yarı deneysel bir modeldir.
Masoumi vd, 2009	$\mu_{nf} = \mu_{bf} + \frac{\rho_p V_B d_p^2}{72C\delta}$ (6) $C = \mu_{bf}^{-1}[(c_1 d_p + c_2)\varphi + (c_3 d_p + c_4)]$	Eş. (6)’da verilen C, düzeltme katsayısıdır. Bu terimin hesabında kullanılan katsayıların değerleri: $c_1 = -1.133 \times 10^{-6}$, $c_2 = -2.771 \times 10^{-6}$, $c_3 = 9 \times 10^{-8}$, $c_4 = -3.93 \times 10^{-7}$ olarak verilmiştir.
Corcione, 2011	$\mu_r = \frac{1}{1 - 34.87(d_p/d_f)^{-0.3}\varphi^{1.03}}$ (7) $d_f = 0.1 \left[\frac{6M}{N\pi\rho_{f0}} \right]$	Eş. (7), literatürdeki çok sayıda deneysel veri kullanılarak oluşturulmuş bir korelasyondur. Eş. (7)’de verilen f ve f0 altsimgeleri sırasıyla, baz akışkan molekülünü ve baz akışkanın 293°K’deki özelliğini ifade etmektedir.

Tablo 3’te, modellerin benzer sonuçlar verdiği görülmektedir. Ek olarak, Tablo 2’de bahsedildiği gibi,

Einstein Modeli (Einstein, 1906) düşük hacimsel konsantrasyonlarda daha doğru sonuçlar vermektedir,

bu yüzden, Tablo 3'te tahmin değerleri verilen Einstein Modeli'nin, en azından $\varphi < 0.05$ için kullanımının daha doğru olacağı unutulmamalıdır (bu değer bazı kaynaklarda $\varphi \lesssim 0.01$ olarak da verilmektedir (Chen vd, 2007-a)). Bunlardan dolayı, Bölüm 3'te yapılan karşılaştırmalarda, Klasik Modellerden sadece Einstein Modeli'ne, $\varphi \leq 0.05$ için yer verilmiştir. Daha önce de değinildiği gibi, nanoakışkanlar ile ilgili bir diğer önemli araştırma konusu da, nanoakışkanların Newtonyen ya da Newtonyen olmayan özellikte olması üzerinedir. Newtonyen akışkanlarda kayma gerilmesi, kayma oranı ile doğru orantılıdır, dolayısıyla değişken kayma gerilmesi değerlerinde sabit viskozite elde edilir. Newtonyen olmayan akışkanlarda ise, kayma gerilmesi değişince viskozite de değişmektedir. Aşağıda, Tablo 2'de Eş. (5) ile verilen Krieger-Dougherty Modeli'nin farklı kayma gerilmeleri için kullanımı ile ilgili bazı önemli noktalara değinilecektir. Nanoakışkan viskozitesinin, kayma gerilmesi dahil olmak üzere pek çok parametre ile ilişkisinin detaylı olarak incelendiği bir makale (Chen vd, 2007-a) literatürde bulunmaktadır.

1. Krieger-Dougherty Modeli'nde, φ_m parametresi, durağan (quiescent) koşullarda 0.495 ile 0.54 arasında değer alırken, yüksek kayma oranlarında yaklaşık 0.605 olarak alınır. $[\eta]$ parametresinin değeri ise, küresel parçacıkların tekil dağılımlı (mono disperse) süspansiyonları için 2.5'tir. Düşük ve yüksek kayma gerilmelerindeki durumu temsil etmek açısından, $\varphi_m = 0.5$ ve $\varphi_m = 0.605$ olduğu durumlarda, Krieger-Dougherty Modeli, tekil dağılımlı süspansiyonlar için sırasıyla Eş. (8) ve Eş. (9)'daki gibi verilmektedir.

$$\mu_r = \frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \frac{\mu(0)}{\mu_{bf}} = \left(1 - \frac{\varphi}{0.5}\right)^{-1.25} \quad (8)$$

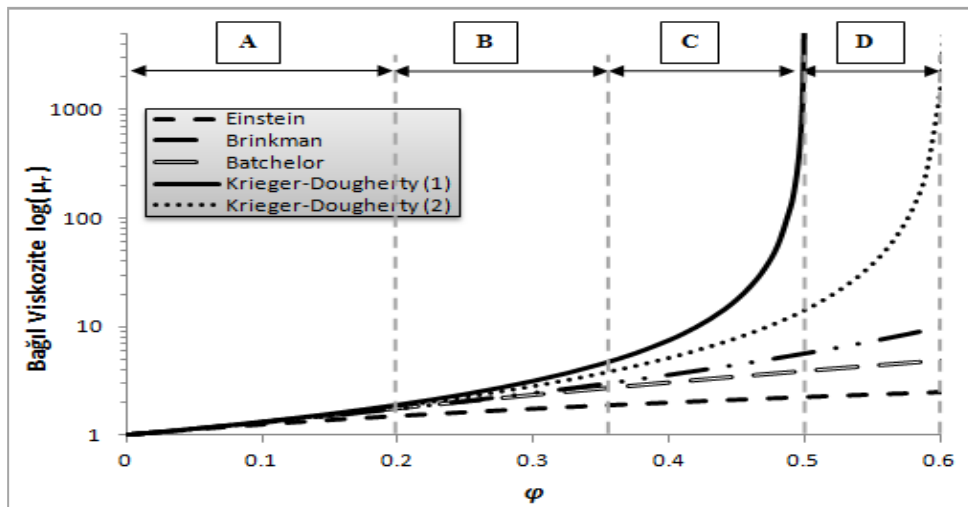
$$\mu_r = \frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \frac{\mu(\infty)}{\mu_{bf}} = \left(1 - \frac{\varphi}{0.605}\right)^{-1.5125} \quad (9)$$

Eş. (8) ve Eş. (9)'da bulunan $\mu(0)$ ve $\mu(\infty)$ parametreleri sırasıyla, düşük ve yüksek kayma gerilmelerindeki viskoziteleri ifade etmektedir.

2. Şekil 1'de Krieger-Dougherty Modeli (1) (Eş. (8)) ve Krieger-Dougherty Modeli (2) (Eş. (9)) ile gösterilen eğriler, sırasıyla $\varphi_m = 0.5$ ve $\varphi_m = 0.605$ durumlarını göstermektedir. Grafik üzerinde, parçacık hacimsel konsantrasyonuna bağlı olarak A, B, C ve D ile belirtilen 4 farklı bölge tanımlanmıştır. A bölgesinde, akışkanın viskozitesi kayma oranına bağlı değildir [$\mu(0) = \mu(\infty)$] ve dolayısıyla akışkan Newtonyen özelliktedir. B bölgesinde, Krieger-Dougherty Modeli (2), Krieger-Dougherty Modeli (1)'den büyük değer aldığından [$\mu(\infty) > \mu(0)$], kayma incelmeleri özelliği gözlemlenebilir. C bölgesinde mümkün olan yüksek ve düşük kayma viskozitelerinde, sıvı benzeri viskoelastik davranış görülmektedir. C bölgesinde, Krieger-Dougherty Modeli (2), Krieger-Dougherty Modeli (1)'den çok daha düşüktür [$\mu(0) \gg \mu(\infty)$], bu nedenle güçlü kayma incelmeleri özelliği beklenebilir. Düşük kayma viskozitesi, artık D bölgesinde ulaşılabilir değildir ve bu bölgede akma gerilmesi ile birlikte, akışkanın özelliği viskoelastik katı özelliğine benzerdir. Yine de, yüksek kayma viskozitelerine ulaşılabilir ve eğer akma gerilmesi değeri aşılsa, yapı eriyerek akış meydana gelebilir (Chen vd, 2007-a).

Tablo 3. Klasik Modellerin farklı nanoparçacık hacimsel konsantrasyonları için aldığı değerler

φ	Einstein, 1906	Brinkman, 1952	Batchelor, 1977	Krieger ve Dougherty, 1959
0	1.000	1.000	1.000	1.000
0.02	1.050	1.052	1.053	1.052
0.04	1.100	1.107	1.110	1.110
0.06	1.150	1.167	1.173	1.173
0.08	1.200	1.232	1.241	1.244
0.1	1.250	1.301	1.315	1.322



Şekil 1. Bazı Klasik Modeller (bkz. Tablo 2) ile elde edilen bağıl viskozite değerlerinin parçacık hacimsel konsantrasyonu ile değişimi (Chen vd, 2007-a'dan uyarlanmıştır.)

3. Krieger-Dougherty Modeli ile ilgili sonuçlara ek olarak, Şekil 1’de Einstein Modeli, Brinkman Modeli ve Batchelor Modeli’ne ilişkin sonuçlar da gösterilmiştir. Şekil 1’de gösterilen 5 modelin de $\varphi < 0.1$ için uyumlu sonuçlar verdiği görülmektedir. Ayrıca, $\varphi = 0$ ’a yaklaşırken, Krieger-Dougherty Modeli tek terimli açılım yapıldığında Einstein Modeli’ne, binom açılımı yapıldığında ise Batchelor Modeli’ne dönüşmektedir (Chen *vd.*, 2007-a). Krieger-Dougherty Modeli’nin tek terimli açılımı, nanoakışkan içerisinde nanoparçacık kümeleşmesinin olmadığı varsayımını desteklemektedir. Kümeleşme, nanoparçacıkların aralarındaki elektrostatik kuvvetler sonucu bir araya gelerek akışkan içinde birlikte hareket etmeleri durumudur. Literatürdeki pek çok çalışmada bu davranıştan bahsedilerek, nanoparçacık kümeleşmesinin nanoakışkanların termofiziksel özellikleri üzerindeki etkileri yorumlanmıştır. İleriki bölümlerde nanoparçacık kümeleşmesinin viskoziteye etkilerinden detaylı bir biçimde bahsedilecektir.

Deneysel Nanoakışkan Viskozite Çalışmaları

Bölüm 2.1’de bir kısmı özetlenen Klasik viskozite Modelleri ve diğer teorik viskozite korelasyonlarına ek olarak, yapılan deneysel çalışmalarda da nanoakışkan viskozitesi ve bağıl viskozite tahmini için bazı korelasyonlar oluşturulmuştur. Bunun temel nedenlerinden biri, Klasik Modellerin nispeten az sayıda parametreyi hesaba katmasıdır, dolayısıyla bu modeller kullanılarak nanoakışkan viskozitesi ve bağıl viskozite yüksek hassasiyetle tahmin edilememektedir. Diğer yandan, deneysel çalışmalar viskozitenin nanoparçacık hacimsel konsantrasyonu dışında nanoparçacık malzemesi, nanoparçacık boyutu, nanoparçacık şekli, sıcaklık, nanoakışkanın stabilitesi (Bu parametre nanoparçacıkların kümeleşmeye yatkınlığını gösteren bir parametredir ve karışımın pH ve zeta potansiyeli değerlerine, ve nanoparçacık boyutu gibi parametrelere bağlıdır.) ve baz akışkan özellikleri gibi pek çok parametreye bağlı olduğunu göstermiştir. Deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçları daha detaylı özetleyebilmek için, literatürden seçilmiş çalışmalara ilişkin deney koşulları Tablo 4’te verilmiştir. İlgili deneysel çalışmalarda elde edilen bulgular, bu çalışmanın “Tartışma ve Sonuçlar” başlığı altında özetlenmiştir. Ayrıca Tablo 4’te deney parametreleri temelinde özetlenen çalışmalarda verilen nanoakışkan viskozitesi ve bağıl viskozite korelasyonları, Tablo 5’te verilmiştir. Korelasyonlarda, baz akışkanın özel olarak tanımlandığı durumlarda (örneğin su) bu ifade açık şekilde belirtilmiştir. Tablo 5’te verilen korelasyonların deneysel korelasyonlar olduğuna ve yapılan deney koşullarında elde edilen veriler temel alınarak oluşturulduklarına dikkat edilmelidir.

Chen *vd.*’nin çalışmasında (Chen *vd.*, 2007-b) önerilen viskozite ve bağıl viskozite korelasyonları, Eş. (11), Eş. (12) ve Eş. (13) ile Tablo 5’te verilmektedir. Eş. (11)’de bulunan deneysel A ve B katsayılarının değerleri, Tablo 6’da verilmiştir.

Duangthongsuk ve Wongwises’in çalışmalarında (Duangthongsuk ve Wongwises, 2009) önerdikleri bağıl viskozite korelasyonu, Eş. (20) ile Tablo 5’te verilmiştir. Eş. (20)’de bulunan a, b ve c katsayılarının farklı sıcaklıklar için aldığı değerler, Tablo 7’de verilmiştir.

Timofeeva *vd.*’nin çalışmasında önerilen nanoakışkan bağıl viskozitesi korelasyonu, Tablo 5’te Eş. (21) ile verilmektedir. Çalışmada, bağıl viskozite tahmini için kullanılması gereken korelasyonun, Eş. (21)’in formunda olması gerektiği belirtilerek, A_1 ve A_2 katsayıları nanoparçacık şekline bağlı olarak sunulmuştur. A_1 ve A_2 katsayılarının değerlerinin, çalışmada verilen Einstein-Batchelor Modeli’ndeki ($\mu_r = 1 + 2.5 \varphi + 6.2 \varphi^2$) katsayılardan daha büyük olduğuna dikkat çekilmiştir. Eş. (21)’de bulunan A_1 ve A_2 katsayılarının değerleri Tablo 8’de verilmektedir.

Deneyler sonucunda, elde edilen viskozite artışları, 25°C sıcaklıkta nanoparçacık şekline bağlı olarak azdan çoğa doğru: pale < tuğla << silindir < platelet olarak verilmiştir. Çalışmada ayrıca, nanoakışkanların soğutucu olarak kullanımının avantajlı olup olmadığını belirlemek için, tam gelişmiş laminer akış (Eş. (28)) ve türbülanslı akış (Eş. (29)) durumları için kullanılan “verim” formülleri de aşağıda verilmiştir.

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} \approx 1 + C_\mu \varphi, \quad \frac{k_{nf}}{k_{bf}} = 1 + C_k \varphi \quad (28)$$

$$Mo = \text{Mouromtseff değeri} = \frac{\rho^{0.8} k^{0.67} C_p^{0.33}}{\mu^{0.47}} \quad (29)$$

Eş. (28)’de C_μ ve C_k sırasıyla viskozite ve ısı iletkenlik artış katsayılarıdır. Buna göre, nanoakışkanların soğutucu olarak kullanımının avantajlı olması için, viskozitedeki artış oranının ısı iletkenlikteki artış oranının 4 katından daha az olması gerekmektedir. Eş. (29)’da tanımlanan Mouromtseff sayısı ise, soğutucu akışkanların türbülanslı akış koşulunda ısı transferi kapasitelerini gösteren bir performans katsayısı olarak tanımlanmaktadır. Eş. (29)’da görüldüğü üzere, türbülanslı akışta ısı transferi oranı, ısı iletkenlik katsayısı dışında, akışkanın diğer termofiziksel özelliklerine de bağlıdır. Türbülanslı akış için, verilen bir akış kanalı geometrisinde ve sabit hızda, en yüksek Mouromtseff değerine sahip olan akışkanın, en yüksek ısı transferini sağlayacağı belirtilmiştir. Bu noktadan hareketle, nanoakışkan seçiminde ısı iletkenlik artışının tek başına bir ölçüt olarak kullanılmasının doğru olmayacağı, viskozitedeki artışın da hesaba katılması gerektiği, hatta bazı durumlarda ısı iletkenliğindeki artışın az olduğu numunenin (viskozitedeki artış da az olduğu için) seçiminin, (çoğunlukla) tercih edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu konuda önemli bir nokta olarak, karışımın pH’ını değiştirerek, ısı iletkenlikte önemli bir azalmaya neden olmaksızın viskozite değerinin düşürülebileceği belirtilmiştir (Timofeeva *vd.*, 2009).

Tablo 4. Deneysel nanoakışkan viskozite çalışmalarına ilişkin parametreler bazında literatür özeti

Referans	Nanoakışkan türü		T (°C)	Parçacık boyutu (nm)	ϕ^{**}
	Parçacık malzemesi*	Baz akışkan malzemesi**			
Tseng ve Lin, 2003	TiO ₂	H ₂ O	25	$d_p = 7 - 20$	% 5 - 12
Prasher vd, 2006	Al ₂ O ₃	Propilen Glikol (PG)	30, 40, 50, 60	$d_p = 27, 40, 50$	% 0.5, 2, 3
Chen vd, 2007-b	TiO ₂	EG	20-60	$d_p = 25$	% 0 - 1.8 (~)
Nguyen vd, 2007	Al ₂ O ₃ , CuO	H ₂ O+yüzeysel aktif madde	22 - 75	$d_p = 36, 47$ (Al ₂ O ₃); $d_p = 29$ (CuO)	% 1 - 12
Namburu vd, 2007	CuO	EG & H ₂ O (60:40) (**)	-35 - 50	$d_p = 29$	% 0 - 6.12
Chevalier vd, 2007	SiO ₂	Etanol	Ortam sıcaklığı	$d_p = 35\pm3, 94\pm5, 190\pm8$	% 1.1 - 7
Lee vd, 2008	Al ₂ O ₃	H ₂ O (de-iyonize-(DI))	21 - 39	$d_p = 30 \pm 5$	% 0.01 - 0.3
Garg vd, 2008	Cu	EG	25	$d_p = 200$	% 0.4 - 2
Chen vd, 2008	TNT (titanat nanotüp) (silindir)	(H ₂ O (damıtılmış))+ pH ayarlayıcı (sodyum hidroksit)	25 - 50	$d_p = 10$ (yaklaşık) $uzunluk=100$ (yaklaşık)	% 0.12, 0.24, 0.60
Duangthongsuk ve Wongwises, 2009	TiO ₂	H ₂ O	15 - 35	$d_p = 21$	% 0.2, 0.6, 1, 1.5, 2
Timofeeva vd, 2009	Al ₂ O ₃ (platelet, pale, silindir, tuğla)	(EG& H ₂ O (50:50)) + yüzeysel aktif madde (monovalan asit: nitrik, asetik veya formik)	15 - 85	platelet $d_p = 9$, pale $d_p = 60$, $uzunluk = 10$, silindirik $d_p = 10$, $uzunluk = 80$, tuğla 40 (tüm kenarlar)	% 1 - 8.4
Turgut vd, 2009	TiO ₂	H ₂ O (DI)	13 - 55	$d_p = 21$	% 0.2 - 3
Chen vd, 2009	TNT (silindir)	EG	20 - 60	$d_p = 10$, $uzunluk = 100$	% 0 - 1.8 (~)
Zhao vd, 2009	SiO ₂	H ₂ O (DI)	25	$d_p = 7, 12, 16, 20, 40$	% 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2
Turgut, 2010	SiO ₂ , TiO ₂ , Al ₂ O ₃ ; Al ₂ O ₃	(H ₂ O (DI); EG)+ sodyum dodesil benzen sülfonat (SDBS) (yüzeysel aktif madde)	20-50; 13-55; 20-50; 20-50;	$d_p = 12; 21; 25; 25$	% 0.45, 1.85, 4.0; % 0.2, 1, 2, 3; % 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4, 5; % 1, 2, 3, 4, 5
Tavman ve Turgut, 2010	SiO ₂ , TiO ₂ , Al ₂ O ₃	(H ₂ O (DI); EG))	20 - 50	$d_p = 12$ (SiO ₂), 21 (TiO ₂), 30 (Al ₂ O ₃)	% 0.45, 1.85 (SiO ₂); % 0.2, 1, 2 (TiO ₂); % 0.5, 1.5 (Al ₂ O ₃)
Chandrasekar vd, 2010	Al ₂ O ₃	H ₂ O (damıtılmış)	Oda sıcaklığı	$d_p = 43$	% 0.33 - 5
Kole ve Dey, 2010	Al ₂ O ₃	PG & H ₂ O (50:50)	10 - 50	$d_p < 50$	% 0.1 - 1.5
Naik vd, 2010	CuO	PG& H ₂ O (60:40) (**)	-15 - 60	$d_p < 50$	% 0.025, 0.1, 0.4, 0.8, 1.2
Godson vd, 2010	Ag	H ₂ O (DI)	50 - 90	$d_p = 60$	% 0.3, 0.6, 0.9
Aladağ, 2011	DWCNT (çift duvarlı karbon nanotüp)	H ₂ O (damıtılmış) + yüzeysel aktif madde (SDBS)	0, 10, 20, 30, 40, 50	-	%0.5, %0.2, %0.1, %0.05, %0.01 (**)
Dilek vd, 2011	Al ₂ O ₃ ; CuO	H ₂ O (DI)	15, 25, 35, 45, 55, 65	-	% 0.5, 1, 2, 4
Turgut vd, 2011	Al ₂ O ₃	H ₂ O (DI), EG	20 - 50	$d_p = 25$	% 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4, 5
Yu vd, 2011	AlN	EG, PG	20 - 60	$d_p = 50$	% 1 - 10
Duan vd, 2011	Al ₂ O ₃	(H ₂ O (DI)) + yüzeysel aktif madde (setil trimetil amonyum bromür)	-	$d_p = 25$	% 1 - 5
Lee vd, 2011	SiC	(H ₂ O (DI)) + pH ayarlayıcı (HCl ve NaOH)	28 - 72	$d_p < 100$	% 0.001, 0.1, 1, 2, 3
Pastoriza-Gallego vd, 2011	CuO	H ₂ O	10 - 50	$d_p = 33\pm13$, $d_p = 11\pm3$	% 0.16 - 1.7
Kole ve Dey, 2011	CuO	Dişli yağı + yüzeysel aktif madde (oleik asit)	10 - 80	$d_p = 40$	% 0.5 - 2.5
Aladağ vd, 2012	Al ₂ O ₃ ; MWCNT	H ₂ O+yüzeysel aktif madde	2, 5, 7, 10	$d_p = 30$; $d_p = 9000$ (yaklaşık), $uzunluk = 200000$ (yaklaşık)	% 1 (**); % 1 (**)
Vakili-Nezhaad ve Dorany, 2012	SWCNT (tek duvarlı karbon nanotüp) (silindir)	Motor yağı	25 - 100	$d_p = 2$ (yaklaşık), $uzunluk = 10000 - 15000$ (yaklaşık)	% 0.01 - 0.2 (**)

* Parantez içinde verilenler parçacık şeklini ifade etmektedir. Parantez içinde bilgi verilmemiş olan diğer tüm durumlarda parçacıklar küreseldir.

** Konsantrasyonun ağırlıkça olduğunu belirtmektedir. Diğer tüm durumlarda, değerler hacimsel konsantrasyon cinsindedir.

Tablo 5. Tablo 4’te verilen deneysel viskozite çalışmalarında oluşturulan korelasyonlar

Referans	Korelasyon	Notlar
Tseng ve Lin, 2003	$\mu_r = 13.47 \exp(35.98\varphi)$ (10)	Nanoparçacıklar arasındaki etkileşimin nanoparçacık hacimsel konsantrasyonu ile bariz artışı, üstel formdaki Eş. (10) ile verilmiştir.
Chen vd, 2007-b	$\ln \mu_{nf} = A + 1000. B/(T + C)$ (11)	Eş. (11)’de sıcaklık Kelvin cinsindedir. Nanoparçacık konsantrasyonunun (ağırlıkça) fonksiyonu olan A, B ve C deneysel katsayılarının farklı nanoparçacık konsantrasyonları için aldığı değerler, Tablo 6’da verilmiştir.
	$\mu_r = \left(1 - \frac{\varphi_a}{\varphi_m}\right)^{-[\eta]\varphi_m}$; $\varphi_a = \varphi \left(\frac{d_a}{d_p}\right)^{3-D}$ (12)	Çalışmada, Eş. (12)’de bulunan D parametresinin değeri, küresel nanoparçacıklar içeren nanoakışkanlar için 1.8 olarak verilmiştir.
	$\mu_r = 1 + 10.6\varphi + (10.6\varphi)^2$ (13)	
Nguyen vd, 2007	$\mu_r = 0.904 \exp(0.148\varphi)$ (14)	Eş. (14), Eş. (15) ve Eş. (16) sırasıyla Al ₂ O ₃ -H ₂ O ($d_p = 47$ nm), Al ₂ O ₃ -H ₂ O ($d_p = 36$ nm) ve CuO-H ₂ O için; Eş. (17) ve Eş. (18) her üç numune için sırasıyla $\varphi = 0.01$ ve $\varphi = 0.04$ durumları için verilmiştir. Eş. (18) ve Eş. (19)’da sıcaklıklar Celcius cinsindedir.
	$\mu_r = 1 + 0.025\varphi + 0.015\varphi^2$ (15)	
	$\mu_r = 1.475 - 0.319\varphi + 0.051\varphi^2 + 0.009\varphi^3$ (16)	
	$\mu_r = (1.1250 - 0.0007 \cdot T)$ (17)	
	$\mu_r = (2.1275 - 0.0215 \cdot T + 0.0002 \cdot T^2)$ (18)	
Namburu vd, 2007	$\log(\mu_{nf}) = A \exp(-BT)$ (19) $A = 1.8375(\varphi)^2 - 29.643(\varphi) + 165.56$ $B = 4 \times 10^{-6}(\varphi)^2 - 0.001(\varphi) + 0.0186$	Eş. (19)’da sıcaklık Kelvin cinsindedir.
Duangthongsuk ve Wongwises, 2009	$\mu_r = \frac{\mu_{nf}}{\mu_w} = (a + b\varphi + c\varphi^2)$ (20)	Eş. (20)’de bulunan a, b ve c katsayıları sıcaklığa bağlı olarak Tablo 7’de verilmiştir.
Timofeeva vd, 2009	$\mu_r = 1 + A_1\varphi + A_2\varphi^2$ (21)	Eş. (21)’de bulunan A ₁ ve A ₂ katsayılarının parçacık şekline bağlı olarak aldığı değerler Tablo 8’de verilmiştir.
Chandrasekar vd, 2010	$\mu_r = 1 + b \left(\frac{\varphi}{1-\varphi}\right)^n$ (22)	Eş. (22)’de bulunan parametrelerin değerleri $b = 5300$ ve $n = 2.8$ olarak verilmiştir.
Godson vd, 2010	$\mu_r = \frac{\mu_{nf}}{\mu_w} = (1.005 + 0.497\varphi - 0.1149\varphi^2)$ (23)	
Vakili-Nezhaad ve Dorany, 2012	$\mu_r = (1 + 1.59\varphi - 16.36\varphi^2 + 50.4\varphi^3)$ (24)	Eş. (24) ve Eş. (25) sırasıyla $T=25^\circ\text{C}$ ve $\varphi = 0.001$ (ağırlıkça) için verilmiştir.
	$\mu_r = (0.2 T^2 - 30.3 T + 1048)$ (25)	
Maïga vd, 2004	$\mu_r = \frac{\mu_{nf}}{b_f} (123\varphi^2 + 7.3\varphi + 1)$ (26)	Dikkat edilirse, Eş. (26) ve Eş. (27) ile verilen bu iki korelasyon aynıdır (Maïga vd’nin çalışmasında da (Maïga vd, 2004) baz akışkan olarak su kullanılmıştır.). Ancak bu iki korelasyon literatürde farklı iki çalışmada ayrı ayrı sunulmaktadır.
Wang ve Mujumdar, 2007	$\mu_r = \frac{\mu_{nf}}{\mu_w} = (1 + 7.3\varphi + 123\varphi^2)$ (27)	

Tablo 6. Eş. (11)'deki A, B ve C katsayılarının nanoparçacık konsantrasyonuna bağlı aldığı değerler

% ϕ **	A	B	C
0.0	-3.2114	0.86973	-154.57
0.5	-3.1820	0.86285	-155.13
1.0	-3.3289	0.91603	-150.35
2.0	-3.5126	0.98375	-144.48
4.0	-3.2517	0.91226	-150.74
8.0	-3.7005	1.08082	-138.30

** Konsantrasyonun ağırlıkça olduğunu belirtmektedir.

Tablo 7. Eş. (20)'deki a, b ve c katsayılarının sıcaklığa bağlı aldığı değerler

Sıcaklık (°C)	a	b	C
15	1.0226	0.0477	-0.0112
25	1.013	0.092	-0.015
35	1.018	0.112	-0.0177

Tablo 8. Eş. (21)'deki A_1 ve A_2 katsayılarının farklı parçacık şekilleri için aldığı değerler

Parçacık şekli / katsayı	Platelet	Pale	Silindir	Tuğl
A_1	37.1	14.6	13.5	1.9
A_2	612.6	123.3	904.4	471.

Chen *vd*'nin çalışmasında (Chen *vd*, 2009), Krieger-Dougherty Modeli ve Chen *vd*'nin sunduğu değiştirilmiş Krieger-Dougherty Modeli (Eş. (12)) (Chen *vd*, 2007-b) hesaplamalarında kullanılmak üzere, silindirik nanoparçacıklar olan nanotüpler için $\phi_m = 0.3$, $D = 2.1$ (D değeri, kümeleşme mekanizmasının türüne göre farklı değerler almaktadır, bu değerler Chen *vd*'nin çalışmasında (Chen *vd*, 2009) verilmiştir.) olarak verilmiştir. $[\eta]$ parametresinin değeri, yüksek kayma gerilmelerinin olduğu akışlar için Eş. (30) ile hesaplanmıştır. Eşitlikteki r parametresi, parçacık yarıçapını ifade etmektedir.

$$[\eta] = \frac{0.312r}{\ln 2r - 1.5} + 2 - \frac{0.5}{\ln 2r - 1.5} - \frac{1.872}{r} \quad (30)$$

Tavman *vd*'nin çalışmasında, Einstein ve Batchelor Modelleri, nanoparçacık konsantrasyonu (ϕ) yerine Chen *vd*'nin (Chen *vd*, 2007-b) sunduğu değiştirilmiş Krieger-Dougherty Modeli'ndeki (Eş. (12)) küme hacimsel konsantrasyonu (efektif hacimsel konsantrasyon) $\phi_a = \phi(d_a/d_p)^{3-D}$ konularak, yani nanoparçacık kümeleşmesi etkileri de hesaba katılarak yeniden düzenlenmiştir. Çalışmada, nanoparçacık kümeleşmesi dikkate alınarak düzenlenen modellerin deneysel sonuçlar ile daha uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır. Dolayısıyla, elde edilen yüksek viskozite değerlerinin nanoparçacık kümeleşmesinden kaynaklandığı söylenebilir.

TEORİK VE DENEYSEL VİSKOZİTE MODELLERİNİN İLGİLİ PARAMETRELER TEMELİNDE KARŞILAŞTIRILMASI VE ANALİZİ

Nanoakışkan viskozitesi konulu deneysel çalışmaların sonuçları ve deneysel sonuçlar ile Klasik Modellerden elde edilen sonuçlar arasında genel anlamda bir uyumsuzluk görülmektedir. Etkisi anlamlı bazı parametrelerin Klasik Modellerde hesaba katılmaması, bu durumun nedenlerinden biri olarak gösterilebilir. Klasik Modellerde etkisi hesaba katılmayan parametreleri dikkate alınmanın bir yolu da, deneysel korelasyonlar elde etmektir. Nanoakışkan viskozitesi ve bağıl viskozite tahmininde kullanılacak korelasyonların, viskoziteyi mümkün olan en az hatayla, yani uygulamadaki değere mümkün olduğunca yakın olarak vermesi, nanoakışkanların potansiyel uygulamaları açısından önemlidir. Çünkü viskozite artışı, basınç düşümü ve gerekli pompa gücünde artış gibi istenmeyen sonuçlara neden olabilmektedir. Dolayısıyla, nanoakışkan viskozitesinin mümkün olduğunca kontrol altına alınması istenmektedir. Bu da, uygulamanın yapılacağı belirli koşullarda nanoakışkan viskozitesinin alacağı değerleri doğru tahmin etmekle mümkün olacaktır. Bu başlık altında, nanoakışkan viskozitesi ve bağıl viskozite hesabında kullanılan deneysel korelasyonlar ve Klasik Modellerin belirli parametreler bazında karşılaştırılması ve analizi yapılmıştır.

Nanoparçacık şekli temelinde karşılaştırma

Nanoparçacık şeklinin (küre, silindir, tuğla, vb.) nanoakışkan viskozitesini etkilediği, deneysel çalışmalar (Timofeeva *vd*, 2009) ile elde edilen önemli sonuçlardan biridir. Bu nedenle, nanoparçacık şeklinin, nanoparçacıkların üretim safhasında kontrol altına alınması istenmektedir. Şekil 2'de sunulan nanoparçacık şekli temelindeki karşılaştırma, bir Klasik Model olan Einstein Modeli ile Al_2O_3 nanoparçacıkları için oluşturulmuş deneysel bağıl viskozite korelasyonları kullanılarak yapılmıştır. Analizde Al_2O_3 nanoparçacıkları dışındaki parçacıklar için eşzamanlı inceleme yapılmaması, nanoparçacık şekli parametresine odaklanarak, analizin duyarlılığını arttırmak amacını taşımaktadır.

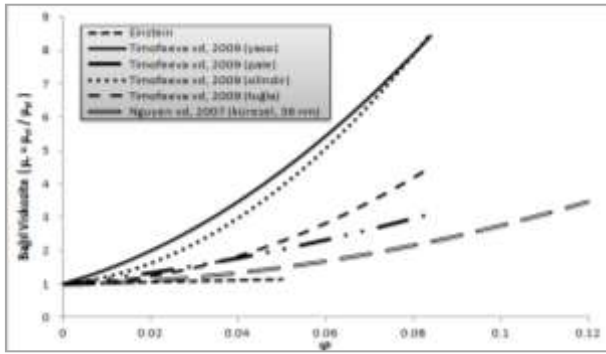
Şekil 2'de görüldüğü gibi, nanoparçacık şekli, bağıl viskozite üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. İncelenen durumlar için, nanoakışkanlarla, kullanılan baz akışkanlara göre daha yüksek viskozite değerleri elde edilmiştir (yani, bağıl viskozite değeri 1'in üzerindedir). Silindirik nanoparçacıkların kullanıldığı çalışmada (Timofeeva *vd*, 2009) elde edilen bağıl viskozite değeri, $\phi = 0.082$ için yaklaşık 8.51 olarak hesaplanmıştır ve bu değer Klasik Modellerden, parçacıkların küresel olduğu kabulü ile oluşturulmuş Einstein Modeli kullanılarak, aynı nanoparçacık hacimsel konsantrasyonu için elde edilen değerden daha yüksektir. Yani, Klasik modeller ile hesaplanan bağıl viskozite değerleri (diğer Klasik Modellerden elde edilen değerler Tablo 3'te verilmiştir),

deneysel çalışmalar sonucu elde edilen değerlerden daha düşüktür.

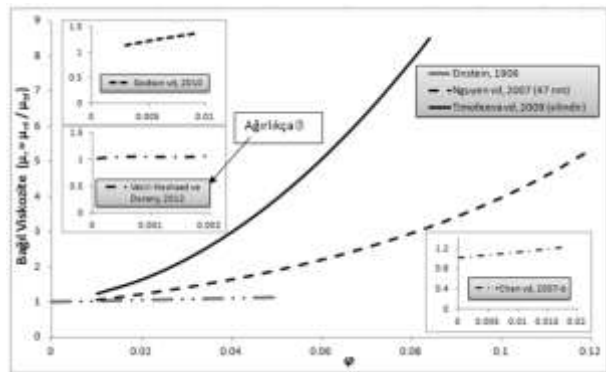
Nanoparçacık malzemesi temelinde karşılaştırma

Nanoparçacık malzemesinin nanoakışkan viskozitesi üzerine etkisi de, deneysel çalışmalar ile elde edilen önemli sonuçlardandır. Şekil 3'te sunulan nanoparçacık malzemesi temelinde karşılaştırma, bir Klasik Model olan Einstein Modeli ile Al_2O_3 (küresel ve silindirik), TiO_2 , Ag ve SWCNT nanoparçacıkları içeren numunelerin kullanıldığı deneyler sonucu elde edilen bağlı viskozite korelasyonları kullanılarak yapılmıştır.

Şekil 3'te görüldüğü gibi, nanoparçacık malzemesi, bağlı viskozite üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu analizde de, nanoakışkanlarla daha yüksek viskozite değerleri elde edilmiştir. Silindirik nanoparçacıkların (nanotüpler), baz akışkanın termofiziksel özelliklerini başka şekle sahip nanoparçacıklara kıyasla (küresel vb.) daha fazla arttırdığı bilinmektedir ve bu eğilim, Şekil 3'te de açıkça görülmektedir. Silindirik TiO_2 nanoparçacıkların kullanıldığı çalışmada (Timofeeva vd, 2009), $\phi = 0.082$ için bağlı viskozite yaklaşık 8.51 olarak hesaplanırken, küresel Al_2O_3 nanoparçacıkların



Şekil 2. Bir Klasik Model (Einstein Modeli) ile farklı nanoparçacık şekilleri için verilen deneysel bağlı viskozite korelasyonları ile elde edilen değerlerin nanoparçacık hacimsel konsantrasyonu ile değişimi



Şekil 3: Bir Klasik Model (Einstein Modeli) ile Al_2O_3 (küresel ve silindirik), TiO_2 , Ag, SWCNT nanoparçacıkları içeren nanoakışkanlar için sunulan deneysel bağlı viskozite korelasyonları ile elde edilen değerlerin nanoparçacık hacimsel konsantrasyonu ile değişimi kullanıldığı çalışmada (Nguyen vd, 2007) deneyler sonucu elde edilen bağlı viskozite değeri $\phi = 0.10$ 'da 3.97 ($d_p = 47$ nm) olarak bulunmuştur. Bahsedilen

değerler, bir Klasik Model olan Einstein Modeli ile elde edilen değerlerden daha yüksektir.

Nanoparçacık hacimsel konsantrasyonu temelinde karşılaştırma

Nanoakışkanların viskozite hesabında kullanılan Klasik Modellerin ve deneysel korelasyonların çoğunluğu, bağlı viskoziteyi sadece nanoparçacık konsantrasyonunun (ϕ) bir fonksiyonu olarak tanımlar. Bu açıdan, bu genel kabul ile bağlantılı olarak, bağlı viskoziteyi nanoparçacık konsantrasyonu temelinde karşılaştırmak yararlı olacaktır. Ancak, deneysel çalışmalar nanoakışkan viskozitesinin nanoparçacık konsantrasyonu dışında pek çok parametreye bağlı olduğunu göstermiştir. Nanoparçacık konsantrasyonu temelinde yapılan karşılaştırmada, farklı deney koşullarında ve farklı numunelerle yapılan deneylerden elde edilen korelasyonlar ve bir Klasik Model (Einstein Modeli) ile hesaplanan bağlı viskozite değerleri, Tablo 9 ve Şekil 4'te sunulmuştur.

Tablo 9. Bir Klasik Model (Einstein Modeli) ve deneysel bazı nanoakışkan bağlı viskozite korelasyonları ile elde edilen değerlerin nanoparçacık hacimsel konsantrasyonu ile değişimi

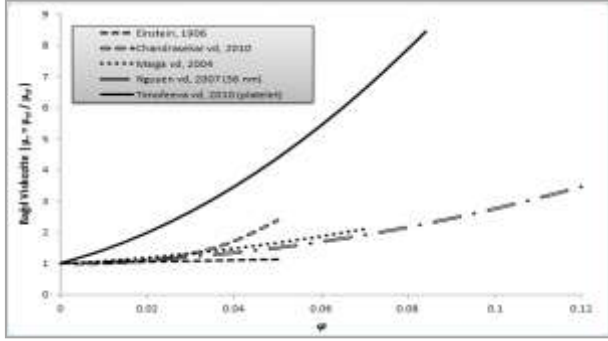
ϕ	Einstein 1906	Godson vd, 2010	Vakili-Nezhaad ve Dorany, 2012**	Maïga vd, 2004	Tseng ve Lin, 2003
0	1.000	1.005	1.000	1.000	13.470
0.02	1.050	1.015	1.026	1.195	27.662
0.04	1.100	1.025	1.041	1.489	56.807
0.06	1.150	1.034	1.047	1.881	116.660
0.08	1.200	1.044	1.048	2.371	239.575
0.1	1.250	1.054	1.046	2.960	491.993

** Konsantrasyonun ağırlıkça olduğunu belirtmektedir. Diğer tüm durumlarda, değerler hacimsel konsantrasyon cinsindedir.

Tablo 9'da verilen değerlere bakıldığında, Tseng ve Lin'in çalışmasında sunulan korelasyonun (Tseng ve Lin, 2003) özellikle yüksek nanoparçacık konsantrasyonlarında gerçekçi sonuçlar vermediği görülmektedir. Bu eğilimden, bir tarama makalesinde (Mahbulul vd, 2012) de bahsedilmiştir. Tablo 5'te Eş. (10) ile verilen korelasyon (Tseng ve Lin, 2003), üstel bir korelasyondur, dolayısıyla nanoparçacık konsantrasyonu arttıkça, bağlı viskozite çok hızlı artmaktadır. Bu korelasyon ile hesaplanan anormal derecede yüksek ve gerçekçi olmayan bağlı viskozite değerlerden dolayı, Şekil 4'te nanoparçacık konsantrasyonu temelinde sunulan karşılaştırmada bu modele yer verilmemiştir.

Genel bir kural olarak nanoparçacık konsantrasyonu, nanoakışkan viskozitesi ve bağlı viskozite üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve bu eğilim, Şekil 4'te de açıkça görülmektedir. Bu analizde de, benzer olarak, incelenen durumlar için, nanoakışkanlar ile, kullanılan

baz akışkanlara göre daha yüksek viskozite değerleri elde edilmiştir. Literatür araştırması ışığında, nanoakışkan viskozitesinin tahmininde, nanoparçacık konsantrasyonuna ek olarak başka parametrelerin de göz önüne alınması gerektiği söylenebilir.



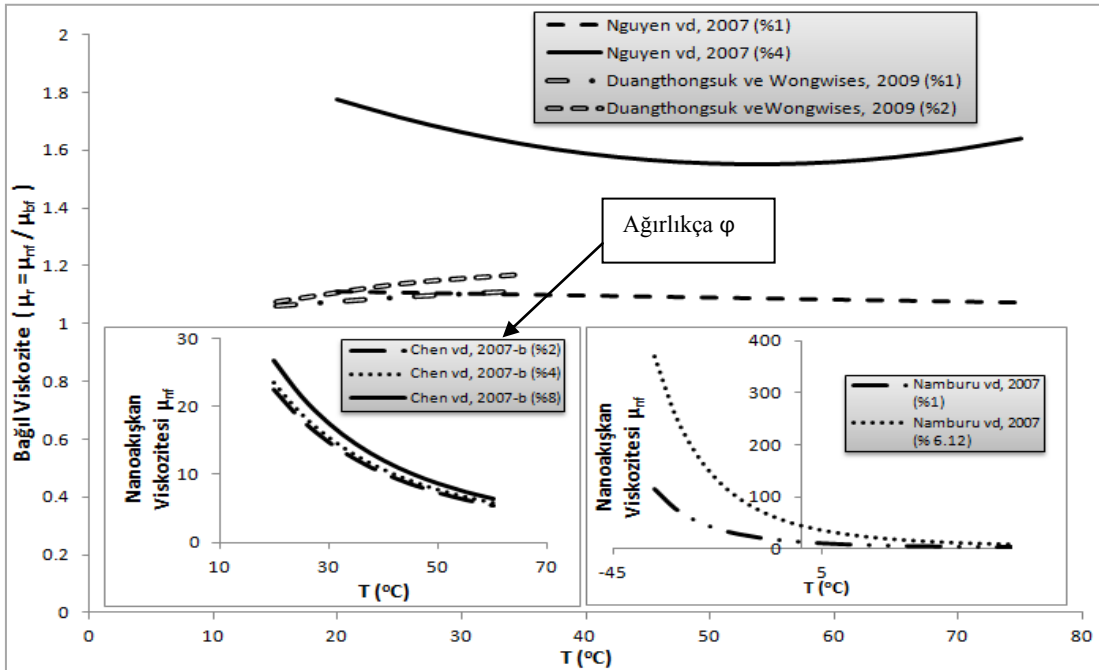
Şekil 4. Bir Klasik Model (Einstein Modeli) ve bazı deneysel bağlı viskozite korelasyonları ile elde edilen değerlerin nanoparçacık hacimsel konsantrasyonu ile değişimi

Sıcaklık temelinde karşılaştırma

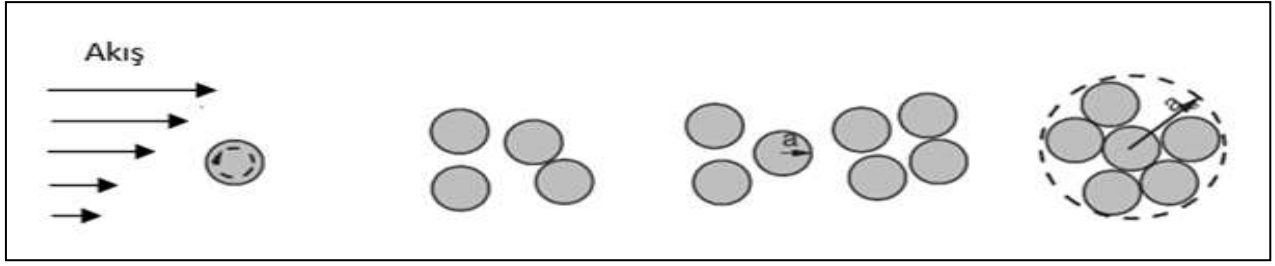
Sıcaklık, (nano)akışkanların viskozitesi üzerinde baskın bir etkiye sahiptir. Bir saf akışkan olan suyun viskozitesinin sıcaklıkla üstel değişimi, bu konuda açıklayıcı bir örnektir (Tavman ve Turgut, 2010). Yani, bu eğilim, nanoakışkanlar dışında diğer akışkanların viskozitelerinde de gözlemlenebilmektedir. Şekil 5'te görüldüğü gibi sıcaklık, nanoakışkan viskozitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu durum, viskozitenin $\mu = \mu(T, P, \phi \text{ ve kayma gerilmesi})$ olarak tanımlandığı genel yaklaşım ile de uyumludur. Şekil 5'te karşılaştırılan çalışmalardan biri olan Nguyen vd'nin çalışmasında (Nguyen vd., 2007), nanoakışkanın reolojik davranışının değiştiği kritik bir sıcaklıktan bahsedilmiştir. Sonuç olarak, viskozite ölçümlerinde ve viskozite korelasyonları elde etme noktasında sıcaklığın deneysel olanaklar dahilinde, mümkün olduğunca hesaba katılması gerektiği sonucuna varılabilir.

Nanoparçacık kümeleşmesi temelinde karşılaştırma

Bazı çalışmalarda nanoparçacıkların kümeleşme davranışından ve bu davranışın viskoziteye etkilerinden bahsedilmiştir. Nanoparçacık kümelerinin boyutu "küme çapı (d_a)" olarak adlandırılmıştır. Kümeleşme davranışı, Şekil 6'da gösterilmiştir. "Deneysel Nanoakışkan Viskozite Çalışmaları" başlığı altında Tablo 5'te özetlenen çalışmalarda verilen küme çapı / nanoparçacık çapı (d_a / d_p) değerleri Tablo 10'da özetlenmiştir.



Şekil 5. Farklı nanoparçacık şekli ve malzemeleri için verilen deneysel bağlı viskozite korelasyonları ve nanoakışkan viskozitesi korelasyonları ile elde edilen değerlerin sıcaklık ile değişimi



Şekil 6. Soldan sağa: nanoparçacık, nanoparçacık çiftleri, çoklu nanoparçacıklar, nanoparçacık kümeleşmesi (Chen vd, 2007-a)'den uyarlanmıştır. İlgili çalışmada (Chen vd, 2007-a), gösterimde kullanılan a ve a_s , sırasıyla parçacık yarıçapını ve küme yarıçapını ifade etmektedir.)

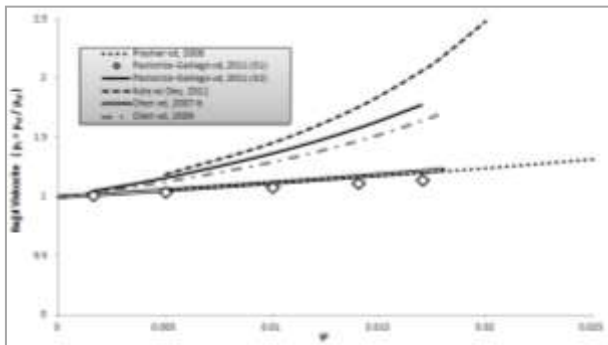
Tablo 10. Tablo 5'te özetlenen bazı makalelerde verilen (d_a / d_p) değerleri

	Prasher vd, 2006	Chen vd, 2007-b**	Chen vd, 2009*, **	Pastoriza-Gallego vd, 2011	Kole ve Dey, 2011
d_a / d_p	3.17	3.34	9.46	2.5 (S1), 7.5 (S2)	7.15

* Sadece bu çalışmada silindirik olan TNT kullanılmıştır; diğer tüm çalışmalarda nanoparçacıklar küreseldir.

**Konsantrasyonun ağırlıkça olduğunu belirtmektedir. Diğer tüm durumlarda, değerler hacimsel konsantrasyon cinsindedir.

Şekil 7'de, nanoparçacık kümeleşmesi temelinde yapılan bağıl viskozite değerleri karşılaştırması, Tablo 10'da verilen d_a / d_p değerleri temelinde, yüksek kayma gerilmesi ($\phi_m = 0.605$) koşulu altında verilmiştir. Bağıl viskozite değerleri, Chen vd'nin çalışmasında (Chen vd, 2007-b) verilen değiştirilmiş Krieger-Dougherty Modeli (Eş. (12)) kullanılarak hesaplanmıştır. Karşılaştırmalarda, Chen vd'nin çalışması (Chen vd, 2009) için ϕ_m ve D parametreleri ilgili çalışmada önerildiği üzere, nanoparçacık şekline bağlı olarak sırasıyla 0.3 ve 2.1 olarak alınmış, $[\eta]$ değeri ise Eş. (30) ile hesaplanmıştır. Kole ve Dey'in çalışmasında (Kole ve Dey, 2011), ϕ_m ve D parametreleri ilgili çalışmada önerildiği üzere sırasıyla 0.5 ve 1.7 olarak alınmıştır. Diğer tüm durumlarda, $D = 1.8$, $[\eta] = 2.5$ 'tir.



Şekil 7. d_a / d_p değerlerine bağlı olarak hesaplanan nanoakışkan bağıl viskozitesi değerlerinin nanoparçacık hacimsel konsantrasyonu ile değişimi ($\phi_m = 0.605$ için)

Chen vd'nin 2007 yılında yayınlanan çalışmasında (Chen vd, 2007-b), Eş. (12)'ün yüksek kayma gerilmeleri için ($\phi_m = 0.605$) kullanılabileceği belirtilmiş, ancak düşük kayma gerilmeleri durumunda

kullanımı ile ilgili ($\phi_m = 0.5$) bir açıklama yapılmamıştır. Bu nedenle, karşılaştırmalar, ilgili çalışmalarda aksi belirtilmediği sürece, sadece yüksek kayma gerilmesi koşulu için yapılmıştır. Şekil 7'de görüldüğü gibi, nanoparçacık kümeleşmesi, nanoakışkan viskozitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu analizde de, benzer olarak, nanoakışkanlar ile, kullanılan baz akışkanlara göre daha yüksek viskozite değerleri elde edilmiştir ve elde edilen değerler, Klasik Modeller ile elde edilen değerlerden (bkz. Tablo 3) çok daha yüksektir.

4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Nanoakışkanların ısı transferi uygulamalarında avantajlı olmasının en önemli nedenlerinden biri, saf akışkana eklenen nanoparçacıkların yüksek termofiziksel özellikleridir. Bu termofiziksel özelliklerden biri de viskozitedir ve viskozitedeki artış, akış kanalındaki basınç düşümünde ve akış için gerekli pompa gücünde artışlara neden olabilmektedir. Bu anlamda, nanoakışkan viskozitesi üzerinde etkisi önemli parametrelerin etkilerinin belirlenmesi ve nanoakışkan viskozitesinin doğru tahmini büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada özetlenen deneysel çalışmalar temelinde, aşağıdaki sonuçlardan söz edilebilir:

- Nanoakışkan viskozitesinin ve bağıl viskozitenin, nanoparçacık konsantrasyonu arttıkça arttığı gözlenmiştir. İncelenen çalışmaların sadece birinde, bağıl viskozitenin nanoparçacık hacimsel konsantrasyonu ile artışının üstel olduğu (Tseng ve Lin, 2003) belirtilmiştir. Dilek vd'nin çalışmasında (Dilek vd, 2011), nanoakışkan viskozitesinin nanoparçacık hacimsel konsantrasyonu ile artışının yaklaşık olarak doğrusal olduğu belirtilmiştir. Diğer birçok çalışmada, viskozite ve bağıl viskozitenin hacimsel konsantrasyonla doğrusal veya üstel olmayan bir eğilimle arttığı belirtilmiştir (Prasher vd, 2006; Chen vd, 2007-b; Nguyen vd, 2007; Namburu vd, 2007; Chevalier vd, 2007; Lee vd, 2008; Garg vd, 2008; Chen vd, 2008; Duangthongsuk ve Wongwises, 2009; Timofeeva vd, 2009; Turgut vd, 2009; Chen vd, 2009; Zhao vd, 2009; Turgut, 2010; Tavman vd, 2010; Turgut vd, 2011; Aladağ, 2011; Chandrasekar vd, 2010; Kole ve Dey, 2010; Naik vd, 2010; Yu vd, 2011; Duan vd, 2011; Godson vd, 2010; Won Lee vd, 2011; Pastoriza-Gallego vd,

2011; Kole ve Dey, 2011; Vakili-Nezhaad ve Dorany, 2012.).

- Nanoakışkan viskozitesinin sıcaklıkla azaldığı gözlenmiştir. Bu azalma üstel (Chen *vd*, 2007-b; Namburu *vd*, 2007; Chen *vd*, 2009; Turgut *vd*, 2009; Turgut, 2010; Tavman *vd*, 2010; Kole ve Dey, 2010; Naik *vd*, 2010; Kole ve Dey, 2011) ya da başka bir eğilim ile (Nguyen *vd*, 2007; Lee *vd*, 2008; Chen *vd*, 2008; Duangthongsuk ve Wongwises, 2009; Timofeeva *vd*, 2009; Godson *vd*, 2010; Aladağ, 2011; Dilek *vd*, 2011; Yu *vd*, 2011; Aladağ *vd*, 2012; Vakili-Nezhaad ve Dorany, 2012) ifade edilmiştir.
- Genel olarak, nanoakışkan bağlı viskozitesinin Klasik Modeller ile tahmininin orta ve yüksek nanoparçacık konsantrasyonları için başarılı olmadığı (Chevalier *vd*, 2007; Garg *vd*, 2008; Duangthongsuk ve Wongwises, 2009; Timofeeva *vd*, 2009; Chen *vd*, 2009; Turgut, 2010; Kole ve Dey, 2010; Duan *vd*, 2011; Won Lee *vd*, 2011; Pastoriza-Gallego *vd*, 2011; Kole ve Dey, 2011; Aladağ *vd*, 2012; Vakili-Nezhaad ve Dorany, 2012), düşük konsantrasyonlar için başarılı olduğu (Nguyen *vd*, 2007; Prasher *vd*, 2006; Chen *vd*, 2008; Turgut *vd*, 2009; Tavman *vd*, 2010; Turgut *vd*, 2011; Chandrasekar *vd*, 2010; Dilek *vd*, 2011) sonuçlarına varılabilir. Çünkü Klasik Modeller ile elde edilen bağlı viskozite değerleri, deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlardan oldukça küçüktür. Ayrıca, Elçioğlu *vd*'nin çalışmasında (Elçioğlu *vd*, 2012) Einstein Modeli'nin nanoakışkan bağlı viskozitesini düşük olarak tahmin ettiği ve Einstein Modeli'nden elde edilen sonuçlardaki bu eğilimin, yüksek nanoparçacık konsantrasyonlarında arttığı gösterilmiştir. Bu çalışmada özetlenen makalelerden sadece birinde (Naik *vd*, 2010) Klasik Modellerin (ör. Einstein Modeli) nanoakışkan bağlı viskozitesinin tahmininde başarılı olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, özetlenen çalışmalardan birinde (Aladağ, 2011) Klasik Modellerin, deneysel verilerden daha yüksek sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Bu bulgunun araştırılan nanoakışkanlardaki nanoparçacık hacimsel oranının düşük oluşu ile açıklanabileceği düşünülmektedir. Pastoriza-Gallego *vd*'nin çalışmasında, Klasik Modellerin verileri sunma noktasında kullanışlı olabileceği ancak viskozite artışının nedenlerini tartışmada kullanımının sınırlı olduğu belirtilmiştir (Pastoriza-Gallego *vd*, 2011).
- Ayrıca, Klasik Modellerin nanoakışkan bağlı viskozitesi tahmininde hassas olmamalarının nedenleri araştırılmış, pek çok çalışmada (Tseng ve Lin, 2003; Prasher *vd*, 2006; Chen *vd*, 2007-b; Nguyen *vd*, 2007; Chevalier *vd*, 2007; Lee *vd*, 2008; Chen *vd*, 2008; Timofeeva *vd*, 2009; Turgut *vd*, 2009; Chen *vd*, 2009; Zhao *vd*, 2009; Turgut, 2010; Turgut *vd*, 2011; Chandrasekar *vd*, 2010; Duan *vd*, 2011; Pastoriza-Gallego *vd*, 2011; Kole ve Dey, 2011; Aladağ *vd*, 2012; Vakili-Nezhaad ve Dorany, 2012) nanoakışkanlar ile

elde edilen yüksek viskozite değerlerinin nanoparçacık kümeleşmesinden dolayı olabileceği belirtilmiştir.

Konu ile ilgili deneysel çalışmalar gözden geçirildiğinde, elde edilen sonuçlar arasında önemli farklılıklar olduğu görülmüştür. Deneysel çalışmalarda kullanılan numunelerin özellikleri ve üretim metodları dahil olmak üzere, pek çok parametre (Nanoakışkanların termofiziksel özellikleri nanoparçacık çapı, nanoparçacık şekli, nanoparçacık malzemesi, pH değeri gibi pek çok parametreye bağlıdır (Godson *vd*, 2010).) çalışmaların sonuçlarında arasındaki farklılıklara neden olabilmektedir.

Bu çalışmada; nanoparçacık şekli, nanoparçacık malzemesi, nanoparçacık hacimsel (ya da ağırlıkça) konsantrasyonu, sıcaklık ve nanoparçacık kümeleşmesinin nanoakışkan viskozitesi ve nanoakışkan bağlı viskozitesi üzerine etkileri, çalışmalarda verilen korelasyonlar bazında değerlendirilmiş, sonuç olarak bu parametrelerin nanoakışkan viskozitesi ve nanoakışkan bağlı viskozitesi üzerindeki etkilerinin önemli olduğu sonucuna varılmıştır. Bu bağlamda, viskoziteyi mümkün olduğunca etkili parametreleri hesaba katarak tanımlamanın, nanoakışkanların viskozite değerlerinin doğru tahmini için gerekli olduğu söylenebilir. Ayrıca, nanoakışkanlar ile makro ve mikro kanallarda zorlanmış konveksiyonla ısı transferi analizlerinde, termofiziksel özelliklerin uygun seçilmesi gerekmektedir. Isıl ve hidrodinamik analizlerde, özellikle iki parametre, ısı iletkenlik ve viskozite modellerinin uygun seçilmesi ile doğru analizler yapılabilir ve deneysel sonuçlar ile analizlerin doğruluğu saptanabilir (Kakaç *vd*, 2013). Nanoakışkanlarda söz konusu olan rastlantısal hareketlerin modellenmesinde ve korelasyon elde etme noktasında multidisipliner yaklaşımların uygun şekilde kullanımı doğru olacaktır.

Bu çalışmada nanoakışkan viskozitesi geniş kapsamda incelenmiştir. Yazarların bilgisi çerçevesinde, bu makale nanoakışkan viskozitesi konusunda Türkçe yazılmış ilk derleme çalışması olacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu makale, TÜBİTAK tarafından desteklenen 110M057 no'lu proje kapsamında hazırlanmıştır. Yazarlar, desteklerinden ötürü TÜBİTAK'a teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

Aladağ, B., 2011, *Karbon Nanotüp/Su Nanoakışkanların Reolojik Özelliklerinin Deneysel Olarak İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, Türkiye.

Aladağ, B., Halefadi, S., Döner, N., Maré, T., Duret, S. and Estellé, P., 2012, Experimental investigations of the viscosity of nanofluids at low temperatures, *Applied Energy*, 97, 876-880.

- Batchelor, G. K., 1977, The Effect of Brownian Motion on the Bulk Stress in a Suspension of Spherical Particles, *J. Fluidmech*, 83, 97-117.
- Brinkman, H. C., 1952, The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solutions, *J. Chemistry Phy*, 20, 571-581.
- Chandrasekar, M., Suresh, S. and Chandra Bose, A., 2010, Experimental Investigations and Theoretical Determination of Thermal Conductivity and Viscosity of Al₂O₃/Water Nanofluid, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34, 210-216.
- Chen, H., Ding, Y. and Tan, C., 2007-a, Rheological Behaviour of Nanofluids, *New Journal Of Physics*, 9, 367, 1-24.
- Chen, H., Ding, Y., He, Y. and Tan, C., 2007-b, Rheological Behaviour of Ethylene Glycol Based Titania Nanofluids, *Chemical Physics Letters*, 444, 333-337.
- Chen, H., Ding, Y., Lapkin, A. and Fan, X., 2009, Rheological Behaviour of Ethylene Glycol-Titanate Nanotube Nanofluids, *J Nanopart Res*, 11, 1513-1520.
- Chen, H., Yang, W., He, Y., Ding, Y., Zhang, L., Tan, C., Lapkin, A. A. and Bavykin, D. V., 2008, Heat Transfer and Flow Behaviour of Aqueous Suspensions of Titanate Nanotubes (Nanofluids), *Powder Technology*, 183, 63-72.
- Cheng, N-S. and Law, A. W-K., 2003, Exponential Formula for Computing Effective Viscosity, *Powder Technology*, 129(1-3), 156-160, 1-24.
- Chevalier, J., Tillement, O. and Ayela, F., 2007, Rheological Properties of Nanofluids Flowing Through Microchannels, *Applied Physics Letters*, 91, 233103, 1-3.
- Choi, S. U. S. and Eastman, J.A., 1995, Enhancing Thermal Conductivity of Fluids With Nanoparticles, *ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, San Fransisco, CA.
- Corcione, M., 2011, Empirical Correlating Equations for Predicting the Effective Thermal Conductivity and Dynamic Viscosity of Nanofluids, *Energy Conversion and Management*, 52, 789-793.
- Das, S. K., Choi, S. U. S., Yu, W. and Pradeep, T., 2008, *Nanofluids Science and Technology*, ISBN 978-0-470-07473-2 (cloth), John Wiley & Sons, Inc., USA.
- Dilek, E.F., Şahin, B., Çomaklı, K. ve Kaya, M., 2011, CuO Ve Al₂O₃ Nanoakışkanlarının Sıcaklığa Ve Hacimsel Orana Bağlı Viskozitelerinin İncelenmesi, 18. *Ulusal Isı Bilimi Ve Tekniği Kongresi*, Zonguldak, *Bildiriler Kitabı*.
- Duan, F., Kwek, D. and Crivoi, A., 2011, Viscosity Affected by Nanoparticle Aggregation in Al₂O₃-Water Nanofluids, *Nanoscale Research Letters*, 6, 248, 1-5.
- Duangthongsuk, W. and Wongwises, S., 2009, Measurement of Temperature-Dependent Thermal Conductivity and Viscosity of TiO₂-Water Nanofluids, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33, 706-714.
- Einstein, A., 1906, A New Determination of Molecular Dimensions, *Annalen der Physik*, Vol. 19, No. 4, p. 289-306. Corrections, *ibid.*, Vol. 34, 1911, 591-592.
- Elçioğlu, E.B., Yazıcıoğlu, A.G. and Kakaç, S., 2012, Nanofluid viscosity: A comparative summary of experimental work in literature, 8. *Nanobilim ve Nanoteknoloji Kongresi (NanoTR-8)*, Ankara, Türkiye, *Book of the Abstract, Accepted Poster Presentations*, 508-509.
- Frankel, N.A. and Acrivos, A., 1967, On the viscosity of a concentrate suspension of solid spheres, *Chem. Eng. Sci*, 22, 847-853.
- Garg, J., Poudel, B., Chiesa, M., Gordon, J. B., Ma, J. J., Wang, J. B., Ren, Z. F., Kang, Y. T., Ohtani, H., Nanda, J., McKinley, G. H. and Chen, G., 2008, Enhanced Thermal Conductivity and Viscosity of Copper Nanoparticles in Ethylene Glycol Nanofluid, *Journal of Applied Physics*, 103, 074301, 1-6.
- Godson, L., Raja, B., Lal, D. M. and Wongwises, S., 2010, Experimental Investigation on the Thermal Conductivity and Viscosity of Silver-Deionized Water Nanofluid, *Experimental Heat Transfer*, 23, 317-332.
- Graham, A.L., 1981, On the viscosity of suspensions of solid spheres, *Appl. Sci. Res*, 37, 275-286.
- Hosseini, M. S., Mohebbi, A. and Ghader, S., 2010, Correlation of Shear Viscosity of Nanofluids Using the Local Composition Theory, *Thermodynamics and Chemical Engineering*, 18(1), 102-107.
- Incropera, F. P., Dewitt, D. P. and Bergman T. L., Lavine A. S., 2007, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (Sixth Ed), John Wiley & Sons, Inc., ABD.
- Kakaç, S. and Pramuanjaroenkij, A., 2009, Review of Heat Transfer Enhancement With Nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, 3187-3196.
- Kakaç, S., Yazıcıoğlu, A.G., Sezer Uzol, N., Sert, İ.O., Kirez, O., Elçioğlu, E.B., Apaçoğlu, B. and Pramuanjaroenkij, A., Nanoakışkanlarla Zorlanmış Taşınım İle Isı Transferinin Sayısal Analizi, *TÜBİTAK Raporu*, Proje No: 110M057, 1 Şubat 2013, Ankara.
- Kole, M. and Dey, T. K., 2010, Viscosity of Alumina Nanoparticles Dispersed in Car Engine Coolant, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34, 677-683.

- Kole, M. and Dey, T. K., 2011, Effect of Agregation on the Viscosity of Copper Oxide-Gear Oil Nanofluids, *Int. Journal of Thermal Sciences*, 50, 1741-1747.
- Krieger, I. M. and Dougherty, T. J., 1959, A Mechanism for Non-Newtonian Flow in Suspensions of Rigid Spheres, *Trans. of The Society of Rheology*, 3, 137-152.
- Lee, J-H., Hwang, K. S., Jang, S. P., Lee, B. H., Kim, J. H., Choi, S. U. S. and Choi, C. J., 2008, Effective Viscosities and Thermal Conductivities of Aqueous Nanofluids Containing Low Volume Concentrations of Al₂O₃ Nanoparticles, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51, 2651-2656.
- Lee, S. W., Park, S. D., Kang, S., Bang, I. C. and Kim, J. H., 2011, Investigation of Viscosity and Thermal Conductivity of SiC Nanofluids for Heat Transfer Applications, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54, 433-438.
- Lundgren, T. S., 1972, Slow Flow Through Stationary Random Beds and Suspensions of Spheres, *J. Fluid Mechanics*, 51, 847-853.
- Mahbubul, I.M., Saidur, R. and Amalina, M.A., 2012, Latest Developments on the Viscosity of Nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 874-885.
- Maïga, S. E. B., Nguyen, C. T., Galanis, N. and Roy, G., 2004, Heat Transfer Behaviours of Nanofluids in a Uniformly Heated Tube, *Superlattices and Microstructures*, 35, 543-557.
- Masoumi, N., Sohrabi, N. and Behzadmehr, A., 2009, A New Model for Calculating The Effective Viscosity of Nanofluids, *J. Phys. D: Appl. Phys*, 42, 055501, 1-6.
- Naik, M. T., Janardhana, G. R., Reddy, K. V. K. and Reddy, B. S., 2010, Experimental Investigation into Rheological Property of Copper Oxide Nanoparticles Suspended in Propylene Glycol-Water Based Fluids, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 5, No. 6, 29-34.
- Namburu, P. K., Kulkarni, D. P., Misra, D. and Das, D. K., 2007, Viscosity of Copper Oxide Nanoparticles Dispersed in Ethylene Glycol and Water Mixture, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32, 397-402.
- Nguyen, C. T., Desgranges, F., Roy, G., Galanis, N., Maré, T., Boucher, S. and Angue Mintsa, H., 2007, Temperature and Particle-Size Dependent Viscosity Data for Water-Based Nanofluids – Hysteresis Phenomenon, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 28, 1492-1506.
- Özerinç, Ö., Kakaç, S. and Yazıcıoğlu, A.G, 2010, Enhanced Thermal Conductivity of Nanofluids: A state-of-the-art Review, *Microfluid Nanofluid*, 8, 145-170.
- Pastoriza-Gallego, M. J., Casanova, C., Legido, J. L. and Piñeiro M. M., 2011, CuO in Water Nanofluid: Influence of Particle Size and Polydispersity on Volumetric Behaviour and Viscosity, *Fluid Phase Equilibria*, 300, 188-196.
- Prasher, R., Song, D., Wang, J. and Phelan, P., 2006, Measurements of Nanofluid Viscosity and Its Implications for Thermal Applications, *Applied Physics Letters*, 89, 133108, 1-3.
- Renn, J. 2005., Einstein's Invention of Brownian Motion, *Ann. Phys. (Leipzig)*, 14, Supplement, 23-37.
- Tavman, I., Turgut, A., 2010, An Investigation on thermal conductivity and viscosity of water based nanofluids, *Microfluids Based Microsystems*, NATO Science for Peace and Security Series A: Chemistry and Biology, 0, 139-162, DOI : 10.1007/978-90-481-9029-4_8.
- Timofeeva, E. V., Routbort, J. L. and Singh, D., 2009, Particle Shape Effects on Thermophysical Properties of Alumina Nanofluids, *Journal of Applied Physics*, 106, 014304, 1-10.
- Tseng, W. J. and Lin, K-C., 2003, Rheology and Colloidal Structure of Aqueous TiO₂ Nanoparticle Suspensions, *Materials Science and Engineering A*, 355, 186-192.
- Turgut, A., 2010, *Investigation Of Thermophysical Properties Of Nanofluids*, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye.
- Turgut, A., Tavman, I., Cetin, L., Chirtoc, M. and Fudym, O., 2011, Preparation and Characterization of Nanofluids Containing Alumina Nanoparticles, *ICHMT DIGITAL LIBRARY ONLINE, Volume 0, 2011 Issue - TMNN-2010. Proceedings of the Int. Symposium on Thermal and Materials Nanoscience and Nanotechnology - 29 May–3 June, 2011, Antalya, Turkey.*
- Turgut, A., Tavman, I., Chirtoc, M., Schuchmann, H. P., Sauter, C. and Tavman, S., 2009, Thermal Conductivity and Viscosity Measurements of Water-Based TiO₂ Nanofluids, *Int J Thermophys*, 30, 1213-1226.
- Vakili-Nezhaad, G. and Dorany, A., 2012, Effect of Single-Walled Carbon Nanotube on the Viscosity of Lubricants, *Energy Procedia*, 14, 512-517.
- Wang, X. Q. and Mujumdar A. S., 2007, Heat Transfer Characteristics of Nanofluids : A Review, *Int. J. Thermal Sci.*, 46, 1-19.
- Yu, W. and Choi, S. U. S., 2003, The Role of Interfacial Layers in the Enhanced Thermal Conductivity of Nanofluids: A Renovated Maxwell Model, *Journal of Nanoparticle Research*, 5, 167-171.

Yu, W., Xie, H., Li, Y. and Chen, L., 2011, Experimental Investigation on Thermal Conductivity and Viscosity of Aluminum Nitride Nanofluid, *Particuology*, 9, 187-191.

Zhao, J-F., Luo, Z-Y., Ni, M-J. and Cen, K-F., 2009, Dependence of Nanofluid Viscosity on Particle Size and pH Value, *Chin. Phys. Lett.*, 26, No. 6, 066202, 1-3.

Yu, W. and Xie, H., 2012, A Review on Nanofluids: Preparation, Stability Mechanisms and Applications, *Journal of Nanomaterials*, 2012, 1-17.



Elif Begüm ELÇİOĞLU

Elif Begüm Elçioğlu, 1989'da Eskişehir'de doğmuştur. Lisans derecesini Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü'nden (ana dal) ve Endüstri Mühendisliği Bölümü'nden (yan dal) almıştır (2011). Şu anda Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde nanoakışkan viskozitesi konusunda Yüksek Lisans çalışmasını sürdürmektedir. İlgi alanları; nanoakışkan viskozitesi, nanoakışkanlar kullanılarak ısı transferi iyileştirmesi, deney tasarımında istatistiksel yöntemlerin kullanımı ve nanomalzemelerin biyomedikal uygulamalarda kullanımınıdır.



Almila GÜVENÇ YAZICIOĞLU

Dr. Almila Güvenç Yazıcıoğlu, 1975 yılında İzmir'de doğmuştur. Lisans (1997) ve Yüksek Lisans (1999) derecelerini Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü'nden, Doktora derecesini (2004) ise, University of Illinois, Makine Mühendisliği Bölümü'nden almıştır. Şu anda Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü'nde Doç. Dr. olarak görev yapmaktadır. 2011 yılında ODTÜ Genç Araştırmacı Başarı Ödülü'nü, ve 2011 ve 2012 yıllarında Prof. Dr. Mustafa N. Parlar Eğitim ve Araştırma Vakfı ODTÜ Yılın Eğitimcisi Ödülü'nü almıştır. İlgi alanları; mikro ölçekte ısı transferi ve akışkanlar dinamiği, nanoakışkanlar kullanılarak ısı transferi iyileştirmesi ve karbon nanotüplerde akışkanlar dinamiği olaylarıdır.



Sadık KAKAÇ

Dr. Sadık Kakaç, 1932'de Çorum'da doğmuştur. Lisans derecesini İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü'nden almıştır (1955). Yüksek lisans derecelerini Massachusetts Institute of Technology'de Makine Mühendisliği (1959) ve Nükleer Enerji (1960) alanlarından; doktora derecesini (1963-1965) University of Manchester'da Makine-Nükleer Mühendisliği Bölümü'nden almıştır. Dr. Kakaç, Çin'deki Shang-hai Elektrik Enerjisi Enstitüsü Onur Profesörü, Xian Jiatong Üniversitesi Onur Danışmanı, Rusya Federasyonu Bilimler Akademisi yabancı üyesi, Türkiye Bilimler Akademisi Şeref Üyesi'dir ve kendi konusunda birçok Uluslararası bilimsel derginin editörüdür. 1989 yılı Alexander von Humboldt Bilim Ödülü (Almanya), 1994 yılı Türk-Amerikan Bilim Adamları Birliği Bilim Ödülü, 1997 yılı Amerika Makina Mühendisleri Birliği (ASME) Isı Transferi Ödülü, 1997 yılı Uluslararası Isı ve Kütle Transferi Merkezi (ICHMT) Hizmet Ödülü, 1999 yılı ODTÜ Prof. Dr. Mustafa N. Parlar Eğitim ve Araştırma Vakfı Hizmet Ödülü sahibi olan Dr. Kakaç'a 1998 yılında Ovidius Üniversitesi (Romanya), 1999 yılında Reims Üniversitesi (Fransa), 2007 yılında Odessa State Academy of Refrigeration (Ukrayna) tarafından Onur Doktorası verilmiştir. Dr.Kakaç, 2000 yılı TÜBİTAK Hizmet Ödülü sahibidir. Dr.Kakaç, 2007'den bu yana TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesinde görev yapmaktadır.