

**Araştırma / Research**

## NANOAKIŞKANLARDA KARARLILIĞIN ISI TRANSFERİNİ İYİLEŞTİRME AÇISINDAN ÖNEMİ

Fevzi ŞAHİN<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0002-4808-4915)\*  
Lütfü NAMLI<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0001-9758-0889)

<sup>1</sup>Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun, Türkiye

Geliş / Received: 10.10.2017  
Kabul / Accepted: 18.01.2018

### ÖZ

Son yıllarda ısı transferini iyileştirme çalışmalarının nano boyutlardaki parçacıkların etkisi ile oluşturulan nanoakışkanlar üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Nanoakışkanların ısı transferini artırdığını gösteren birçok çalışma bulunmasına rağmen geleneksel ısı transfer akışkanlarının yerini almasının önünde birçok engel bulunmaktadır. Bunlardan en önemlisi nanoakışkanlarda kararlılık konusudur. Bu konuda yapılan çalışmalar arasındaki çelişkiler, nanoakışkanlara bakış açısının değiştirilmesi gerektiği sonucunu ortaya koymaktadır. Nanoakışkanlar ısı transferini artırmanın yanında yüksek kararlılığa sahip olmalıdır. Sonuç olarak, nanoakışkanın ısı transferini iyileştirme oranının, kararlılık sağlandıktan sonra ölçülmesinin gerekliliği fikri ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada nanoakışkanlarda kararlılık konusunda yapılan çalışmalar detaylı bir şekilde incelenerek ısı transferi üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Nanoakışkan, kararlılık, ısı transferi uygulamaları, termal iletkenlik, ısı iletimi

## THE IMPORTANCE OF NANOFLUIDS STABILITY IN TERNS OF HEAT TRANSFER ENHANCEMENT

### ABSTRACT

In recent years, efforts to improve heat transfer seem to have concentrated on the nanofluids created by the effects of nanoparticle powders. There are many studies showing that nanofluids increase heat transfer. There are many obstacles in front of that nanofluids can replace conventional heat transfer fluids. The most important of these is the nanofluids stability concept. Due to the contradictions in the works done in this issue, the outcome of the change of the angle of view to the nanofluids is revealed. In addition to increasing the heat transfer of the nanofluids, the stability must be high. As a result, idea that the heat transfer values of the nanofluids must be measured after stabilization is achieved emerges. In this study, studies on stability in nanofluids were studied and the effects on heat transfer were investigated.

**Keywords:** Nanofluids, stability, heat transfer applications, thermal conductivity, heat transfer

### 1. GİRİŞ

Enerji kaynaklarının sınırlı olmasından ve yüksek maliyetlerden dolayı endüstriyel alanlarda enerji verimliliğini geliştirmek için çalışmalar yapılmaktadır. Isı transferi, endüstride birçok alanı doğrudan etkileyen önemli bir çalışma konusudur. Isı transferinde meydana getirilebilecek iyileştirmelerin enerji verimliliğini artırmanın yanı sıra, endüstriyel uygulamalarda çalışma sürelerini azaltarak malzemelerin kullanım ömürlerini

\*Corresponding Author/Sorumlu Yazar, Tel.: +90 362 312 19 19/1008; e-mail / e-posta: fevzi.sahin@omu.edu.tr

## F. ŞAHİN, L. NAMLI

artırdığı belirtilmektedir [1]. Isı transferinin kullanıldığı sistemlerde ısı geçişinin artırılması için uygulanan birçok yöntem vardır. Bunlardan en yaygın olanı, ısı transfer alanının artırılması ve ısı transfer akışkanının termo-fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi çalışmalarıdır. Isı değiştiricilerinin yüzey alanının artırılmasıyla ısı transferinde belirgin artışlar görülmektedir. Ancak ısı değiştiricisinin geometrik yapısının ve boyutunun artmasından dolayı uygulanabilirliği sınırlı kalmaktadır. Bu yüzden ısı transfer akışkanının termo-fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi seçeneği daha uygun görülmektedir. Bunu sağlayabilmek için ise nano boyutlarda partiküller akışkan içerisine eklenmektedir.

Son yirmi yıl içerisinde ısı transferini artırma çalışmaları, teknolojik gelişmelerle birlikte nano boyutlarda üretilen metal, metal oksit ve grafen gibi malzemeler eklenerek ısı transfer akışkanlarının termo-fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi üzerinde yoğunlaşmıştır. Nanoakışkan olarak tanımlanan bu akışkanlar, temel akışkan içerisine 100 nm'den küçük nanopartiküllerin belirli teknikler ve yöntemler kullanılarak ilave edilmesiyle elde edilen ısı transfer akışkanlarıdır. Nanoakışkanlar kullanılarak ısı transferinde iyileşmelerin elde edildiği birçok çalışma literatürde mevcuttur [2-8]. Nanopartiküllerin ısı transfer akışkanlarında oluşturduğu bu etkinin nedenlerini şu şekilde sıralayabiliriz [9, 10];

- Homojen şekilde dağıtılan nanopartiküllerin sahip olduğu yüksek yüzey alanı, akışkanın ısı geçiş alanını artırmaktadır.
- Nanopartiküller akışkanda türbülans etkisini artırmakta ve karışık dalgalanmalara neden olabilmektedir.
- Temel akışkandan daha yüksek ısı iletim katsayısına sahip nanopartiküller, akışkanın ısı iletim katsayısını artırmaktadır.
- Nanopartiküllerin akışkan içerisindeki hareketliliği ve partiküller arası oluşan etkileşimler sonucu mikro-konveksiyon gerçekleşmektedir.

Isı transferinde elde edilen bu iyileştirmeler nanopartiküllerin hacimsel oranı, malzemesi ve şekli, temel akışkanın türü, sıcaklık, pH değeri, yüzey aktif madde ve kararlılık gibi birçok faktöre bağlıdır.

Nanoakışkanların termo-fiziksel özelliklerini etkileyen önemli parametrelerden biri olan hacimsel oranın değişiminin sonuçlarını inceleyen birçok çalışma yapılmıştır [11-14]. Bu çalışmaların ilki, nanoakışkanlarda ısı iletimini iyileştirme çalışması yapan Masuda ve arkadaşlarının çalışmasıdır [13].  $Al_2O_3$  (13 nm),  $SiO_2$  (12 nm), ve  $TiO_2$  (27 nm) boyutlarındaki nanopartikülleri kullanarak su tabanlı nanoakışkan hazırlayarak ısı iletiminde % 32,4 iyileştirme sağlamışlardır. Maksimum iyileştirmeyi % 4,3 hacimsel oranda  $Al_2O_3$  kullanarak elde etmişler ve hacimsel oranın artmasıyla ısı transferindeki iyileşmenin arttığını gözlemlemişlerdir. Benzer şekilde Lee ve ark. [11] yapmış oldukları çalışmada su ve glikol tabanlı akışkanlar kullanarak  $Al_2O_3$  ve  $CuO$  nanopartikülleri ile nanoakışkan hazırlamışlar ve artan hacimsel oran ile ısı iletim katsayısının arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca % 5 oranına kadar artırılan hacimsel oran değerleri için ısı transfer katsayısında lineer bir artış tespit etmişlerdir. Bu çalışmayı destekler nitelikte Wei ve ark. [14] alümina nanopartikül kullanarak % 45 etilen glikol ve % 55 su tabanlı ve % 1, % 2, % 3, % 3,8, % 7,7 ve % 11,6 hacimsel oranlarda hazırlamış oldukları nanoakışkanlarda ısı transfer katsayısında lineer bir artış olduğunu belirlemişlerdir. % 1 ve % 2 hacimsel oranları için ısı transferindeki artışı yaklaşık %57 ve % 106 olarak kaydetmişlerdir. Hacimsel oranın artışıyla oksit nanopartiküllerin kullanıldığı nanoakışkanlarda ısı transferinde lineer bir artış olduğu görüşüyle ilgili kanı daha geneldir [2, 3, 15]. Ancak bu çalışmaların aksi yönünde de çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalar özellikle küçük hacimsel oranda, artan hacimsel oran ile ısı transfer katsayısının lineer bir artış sağlamadığı yönündedir. Bununla ilgili olarak Murshed ve ark. [12],  $TiO_2$  ve diyonize su kullanarak nanopartikül hacimsel oranını % 0,5-5,0 aralığında değiştirerek nanoakışkanlar hazırlamışlardır. Hazırlanan nanoakışkanlarda ölçülen ısı transfer katsayısının hacimsel oran ile özellikle de düşük hacimsel oranlarda lineer bir artış göstermediği gözlenmiştir.

Nanoakışkanların ısıl özelliklerini akışkana ilave edilen partikül ve kullanılan akışkan çeşidine göre inceleyen çalışmalar da literatürde mevcuttur. Aynı hacimsel oran ve şartlarda oluşturulan, farklı nanopartikül kullanılan nanoakışkanların ısıl özelliklerini etkileyen faktörün nanopartiküllerin ısıl özellikleri olduğu görülmüştür. Isı transfer katsayısı yüksek olan nanopartikül ile hazırlanan nanoakışkanlarda temel akışkana göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir [6, 11, 16]. Yu ve ark. [16] yaptıkları çalışmada, metal ve oksit içeren nanoakışkanları ısıl özelliklerine göre karşılaştırmışlardır. Metal ve oksit nanoakışkanların ısı transferinde gerçekleşen aynı orandaki artışlarına farklı hacimsel oranlarda hazırlanan metal ve oksit miktarları ile ulaşıldığı görülmektedir. Aynı şartlarda oluşturulan farklı akışkanların ısıl özelliklere etkisini inceleyen Wang ve ark. [17],  $Al_2O_3$  ve  $CuO$  nanopartiküllerini su, etilen glikol, vakum pompa sıvısı ve motor yağı gibi farklı akışkanlarda kullanmışlardır. Isıl özelliklerdeki en yüksek iyileştirmeyi  $Al_2O_3$  ve etilen glikol ile hazırlanan nanoakışkanda tespit etmişlerdir. Benzer bir çalışmada ise Xie ve ark. [13], alümina nanopartikülü kullanarak su, gliserol, etilen glikol, pompa yağı ve ayrıca etilen glikol-su, gliserol-su karışımları gibi farklı akışkanlar ile nanoakışkanlar hazırlamışlar ve ısı iletim katsayısı daha düşük olan temel akışkan ile hazırlanan nanoakışkanlarda daha yüksek iyileşme olduğunu belirlemişlerdir.

*NANOAKIŞKANLARDA KARARLILIĞIN ISI TRANSFERİNİ İYİLEŞTİRME AÇISINDAN ÖNEMİ*

Akışkanlara ilave edilen partikül boyutlarının da ısıl özelliklere önemli bir etkisi bulunmaktadır. Partikül boyutu nanoakışkanın kararlılığını etkileyerek topaklanmalara neden olmaktadır. Partikül boyutu ile ilgili akışkan içerisinde meydana gelen topaklanma boyutlarına bakılmaksızın sadece akışkana karıştırılan nanopartiküllerin boyutlarına göre yapılan çalışmalar literatürde mevcuttur. Chopkar ve ark. [7], partikül boyutlarının nanoakışkanlarda ısıl iletme olan etkisini araştırmışlardır.  $Al_2Cu$  nanopartiküllerini su ve etilen glikol içerisinde farklı boyutlarda ve hacimsel oranlarda kullanarak nanoakışkan hazırlamışlar ve partikül boyutlarının artmasıyla ısı transferindeki iyileşmenin düştüğü sonucuna ulaşmışlardır. Benzer olarak Ravikanth ve Debendra [18], 29 ve 77 nm boyutlarındaki ZnO nanopartiküllerini etilen glikol-su karışımındaki akışkana ilave ederek partikül boyutlarının etkisinin ısı transferindeki iyileşmeye olan etkisini gözlemlemişlerdir. Partikül boyutu küçüldükçe ısı transferindeki iyileşme oranının daha yüksek olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Bununla birlikte partikül boyutunun artmasıyla iyileşmenin artacağını gösteren çalışmalar da mevcuttur [19-22]. Ayrıca partikül boyutlarının yanı sıra partiküllerin geometrik şekillerinin de nanoakışkanların ısı transferi üzerinde etkileri olduğunu gösteren çalışmalar vardır. Nanopartiküllerin literatürde geçen şekilleri genel olarak silindir, küre, trombosit, bıçak ve tuğla olarak isimlendirilmektedir [23]. Timofeeva ve ark. [23] yaptıkları çalışmada partikül şekillerinin ısı iletim katsayısı üzerindeki iyileştirme etkisini büyükten küçüğe doğru sırası ile dizi trombosit=bıçak, tuğla, silindir olarak belirlemişlerdir. Xie ve ark. [22] ise çalışmalarında hazırladıkları küresel 26 nm boyutlarında SiC nanoakışkanın, silindirik 600 nm boyutlarında SiC nanoakışkanına göre ısı iletim katsayısını daha fazla artırdığı sonucunu elde etmişlerdir. Diğer bir çalışmada Murshed ve ark.[12] hazırladıkları % 5 hacimsel oranda çubuk şeklindeki 10x40 nm boyutlarındaki  $TiO_2$  ve aynı hacimsel orandaki küresel şekilde 15 nm boyutlarındaki  $TiO_2$  nanoakışkanlarının ısı iletim katsayılarında artışı sırasıyla % 29,7 ve % 32,8 olarak ölçmüşlerdir. Chen ve ark. [24] ise etilen glikol temel akışkanlı  $TiO_2$  nanoakışkanı hazırlamışlardır. Nanopartiküllerin küresel ve nanotüp şekillerine sahip olan nanoakışkanların aynı hacimsel oranda ısı iletim katsayısı ölçümlerinde hemen hemen aynı artışları gösterdiklerini belirlemişlerdir.

Nanoakışkanların ısı iletimini etkileyen diğer bir önemli parametre de sıcaklıktır. Bununla ilgili olarak Yu ve ark. [25] farklı hacimsel oranda etilen glikol tabanlı bakır nanopartikül içeren nanoakışkan hazırlamışlardır. Nanoakışkanların sıcaklık ile hassas bir ilişkisi olduğunu düşünerek artan sıcaklık altında ısı transferinde meydana gelen iyileşmeleri ölçmüşlerdir. Gözlemlerinde sıcaklığın artışıyla ısı iletiminde artış oranının yükseldiğini belirlemişlerdir. Başka bir çalışmada ise hacimsel oranı % 0,2-5,0 aralığında hazırlanan  $Al_2O_3$  nanopartiküllerinden oluşan etilen glikol tabanlı nanoakışkanların sıcaklık artışına gösterdikleri etki incelenmiş ve 24-50 °C sıcaklık aralığında değişen artışla birlikte ısı iletiminde artış olduğu bulunmuştur [26]. Sıcaklığın artışı ile ısı iletiminde iyileşmenin görüldüğü bir diğer çalışma ise, gümüş nanopartikül içeren su tabanlı nanoakışkanda hacimsel oran % 0,001 kullanılmıştır. Akışkanın 30°C ve 60°C ısı tranfer iyileşmeleri sırasıyla % 3,2 ve % 4,5 olmuştur [27]. Shima ve ark. [28], demir oksit nanopartikülleri kullanarak temel akışkanı su olan ve su olmayan iki tür nanoakışkan üretmişlerdir. Bu çalışmada, nanoakışkanların ısı iletiminde sıcaklığın etkileri incelenmiştir. Nanoakışkanlarda sıcaklığın artması ile ısı iletkenliğinin sabit kaldığı görülmüştür.

Nanoakışkanlarda nanopartiküllerin topaklanması ve çökmesi, çözülmesi gereken en önemli sorunlardan birisi olan kararlılık sorununu ortaya çıkarmaktadır. Çöküntü ve topaklanmaların ısıl sistemde tıkanmalara ve beklenmeyen sorunların yaşanmasına neden olabileceği bilinmektedir. Bu sorunu önlemek veya çöküntünün başladığı süreyi uzatmak için birçok çalışma yapılmıştır [5, 29-33]. Nanoakışkanlarda çökme ve topaklanmanın oluşması ısı transferini olumsuz yönde etkilemektedir. Nanoakışkan kararlılığı kullanılan teknikler ve ölçme yöntemleri gibi kendi içerisinde birçok etkene bağlıdır. Bunun yanında kararlılık konusu, ısı transferini doğrudan etkileyen ve nanoakışkanların endüstriyel bir ürün olabilmesi ve ısıl sistemlerde yaygın olarak kullanılabilmesinin önündeki en önemli aşamadır.

Nanoakışkanların termo-fiziksel özelliklerini etkileyen birçok parametre bulunmasının yanı sıra, bu parametrelerin araştırıldığı deneysel çalışmalar arasında çelişkiler olduğu görülmektedir. Nanoakışkanların üretim çıktısı olarak, ısı transferi, ısı iletim katsayısı veya ısıl yükü artırmasının yanında üretilen nanoakışkanın kararlılık değerlerinin de belirgin bir şekilde verilmesi ve yorumlanması gerektiği sonucu ortaya çıkmaktadır. Üretilen nanoakışkanın kararlılık süresinin belirlenmesi ve bu süre içerisinde ısı transfer katsayısının değişiminin verilmesi gerekmektedir. Yapılan birçok deneysel çalışmada, üretimden sonra ölçülen ısıl değerler paylaşılmasına rağmen bu değerlerin hangi üretim aşamasında veya ne zaman ölçüldüğü ile ilgili bilgi verilmediği görülmüştür.

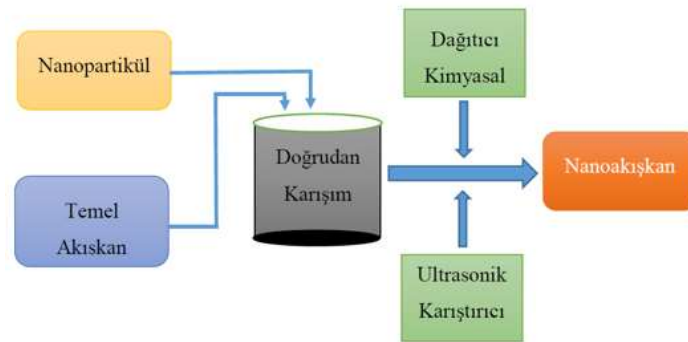
Bu araştırmada nanoakışkanların endüstriyel bir ürün olabilmelerinin önündeki en büyük engellerden biri olan kararlılık konusu ve kararlılık ile ilgili yapılmış çalışmalar ayrıntılı bir şekilde taranmıştır. Çalışmalarda kararlılık süreleri ile ısı transferinde oluşan iyileşmeler arasındaki ilişki incelenmiştir. Ayrıca kararlılığı etkileyen en önemli aşamalardan olan nanoakışkan hazırlama yöntemleri gözden geçirilmiştir. Buna ek olarak nanoakışkanlarda kararlılığı artırma ve ölçme yöntemleri özetlenmiştir. Nanoakışkan kararlılığının kimyasal ve fiziksel işleyişini konu alan çalışmalar incelenerek açıklanmıştır.

## 2. NANOAKIŞKANLARIN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Nanoakışkanlar, nanopartiküllerin temel akışkan ile karıştırılmasıyla elde edilir. Ancak bu karıştırma işlemi, sıradan katı-sıvı karıştırması gibi değildir. Nano boyutlardaki tozlar, kütlelerine oranla çok yüksek yüzey alanlarına sahip oldukları için yüzey enerjileri fazladır. Bu yüzey gerilmelerinin sebep olduğu enerji, tozların hidrofobik özelliklerini artırır ve akışkan ile karıştırılması zorlaşır. Nanoakışkanlarda nanopartiküllerin iyi bir dağılım göstermesini ve birbirleri ile topaklanma yapmadan askıda, süspansen kalarak homojen bir dağılım göstermesi beklenir. Nanoakışkan hazırlama yöntemi olarak kabul görmüş iki genel metot bulunur. Bunlar tek adım yöntemi ve iki adım yöntemidir.

Tek adım yönteminde nanoakışkanlar, nanopartiküllerin eş zamanlı olarak temel akışkan ile sentezlenmesi sonucu tek bir işlemle elde edilir. Bu yöntem için kimyasal ıslatma yöntemi (wet-chemical method), vakum buharlaştırma yöntemi (Vacuum Evaporation onto a Running Oil Substrate, VEROS), lazer ablyasyon yöntemi ve tozaltı nanoparçacık sentez yöntemi (Submerged Arc Nanoparticle Synthesis System, SANSS) yaygın olarak kullanılmaktadır. Tek adım yönteminde genel olarak ısı iletim katsayısı yüksek ve hızlı oksitlenme özelliklerine sahip bakır, gümüş ve altın gibi metal malzemeler üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Bu yöntemde metal nanopartiküller akışkan ile birlikte sentezlenerek havayla teması engellenmiş olur. Bu nedenle, tek adım yöntemi metal nanopartikül içeren nanoakışkanları üretebilmek için daha uygun bir yöntemdir [13]. Ayrıca, akışkan içerisinde üretilen nanopartiküller sayesinde yüksek homojenlik sağlanarak nanoakışkanlardan istenilen süspansen durum elde edilmiş olur [34-37].

İki adım yöntemi en yaygın kullanılan nanoakışkan hazırlama yöntemidir ve bu yöntem ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır [3, 5, 7, 13, 38, 39]. Nanopartiküllerin fiziksel veya kimyasal yollarla kuru toz halinde üretilmesi ilk aşamasını oluştururken, ikinci aşama üretilen nanopartiküllerin akışkana karıştırılması kısmını oluşturmaktadır. Nano boyutlarda üretilen nanopartiküller topaklanma eğilimleri gösterirler ve bu istenilmeyen bir durumdur. Topaklanmış nanopartiküllerin tekrar ayrıştırılması ve parçalanması gerekmektedir. Bu yöntemin ikinci aşaması olan akışkan içerisinde partiküllerin ayrıştırılması ve dağıtılması ile ilgili bazı yöntemler uygulanabilmektedir. Bu işlemler şekil 1'de görüldüğü gibi, ultrasonik dağıtıcılar ile yapılan fiziksel müdahaleler ve dağıtıcı kullanılarak yapılan veya nanopartiküllere uygulanan yüzey modifikasyonları gibi kimyasal müdahaleler olarak sıralanabilir. Yapılan fiziksel veya kimyasal işlemlerden birisi kullanılabilir gibi iki işlem birlikte de uygulanabilir. İki adım yönteminde uygulanan fiziksel veya kimyasal işlemlerde ultrasonik karıştırma süresi ve kimyasal eklentilerin miktarı kararlılığı etkileyen önemli faktörlerdir. Literatüre bakıldığında, araştırmacıların sadece uygun sürede ultrasonik karıştırma işlemi yaparak uzun süreler nanoakışkan kararlılığı sağladığı çalışmaların yanı sıra, ultrasonik karıştırma ve yüzey aktif madde eklentisi ile yapılan uzun süreli kararlılığın sağlandığı çalışmalar da görülmektedir. Yüzey aktif madde ile yapılan kararlılık çalışmalarında eklenen kimyasalın nanoakışkanın morfolojik özelliklerini doğrudan etkilemesi bu yöntemi kısıtlamaktadır. Bu kısıtlamalar, oluşan kimyasal etki ile nanoakışkanın ısı transfer özelliklerinin kötüleşmesidir. Ayrıca nanoakışkanın sıcaklık artışına karşı duyarlılığını artırarak kullanım aralığını sınırlandırmaktadır. İki adım yöntemi, tek adım yöntemine göre partiküllerin akışkan içerisindeki süspansen durumları ve kararlılığı bakımından daha zayıf bir yöntemdir [13]. Ancak, iki adım yöntemi, tek adım yöntemine göre çok daha ekonomiktir. Ayrıca bu yöntemin çok daha büyük miktarlarda nanoakışkan üretilme imkânı olmakla birlikte ticarileşme potansiyeli daha yüksektir.

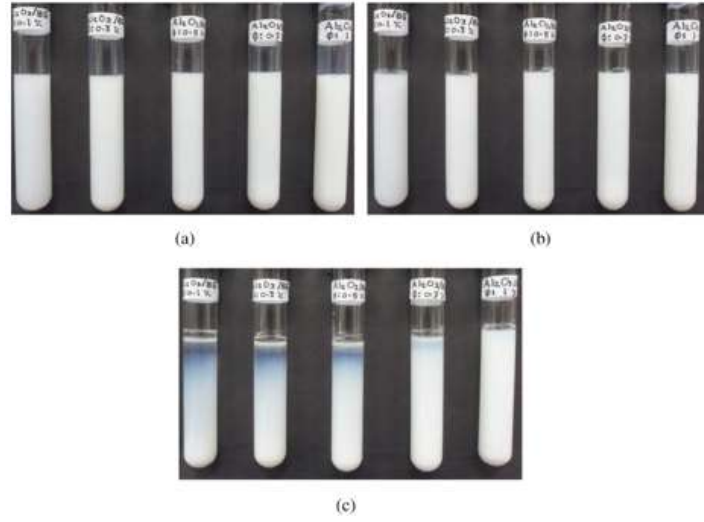


Şekil 1. İki adım yönteminin şematik gösterimi

## NANOAKIŞKANLARDA KARARLILIĞIN ISI TRANSFERİNİ İYİLEŞTİRME AÇISINDAN ÖNEMİ

## 3. NANOAKIŞKAN KARARLILIĞININ YAPISI

Nanoakışkan kararlılığı, temel akışkan içerisine dağıtılan nanopartiküllerin süspansiyon olarak oluşan yeni akışkanın viskozitesi, ısı iletkenliği, partiküllerin ortalama çapı ve partikülün temel akışkan içerisindeki hacimsel oranı gibi fiziksel özelliklerini zamanla değişmeden koruması olarak tanımlanabilir. Nanoakışkanın kararlılığı, temelde süspansiyon edilen partikül ve temel akışkanın karakteristik özelliklerine bağlıdır [40]. Nanoakışkanların kabul gören genel bir tanımına göre kullanılacak nanopartikül boyutlarının yaklaşık 100 nm'den küçük olması istenmektedir [41]. Temel akışkan içerisinde asılı halde kalması istenilen bu tanecikler üzerine etki eden yerçekimi kuvveti ihmal edilecek kadar küçüktür [42]. Akışkan içerisine dağıtılan partiküller birbirleri ile etkileşerek yapışma ve topaklaşma eğilimi gösterirler. Topaklaşmanın artmasıyla birlikte yerçekimi kuvveti etkili olur ve çöküntüler meydana gelmeye başlar. Şekil 2 ve 3'te görüleceği üzere, nanoakışkan hazırlandıktan belirli bir süre sonra homojenlik bozulmuş ve renk farklılıkları ortaya çıkmıştır. Bu durum nanoakışkan içerisinde çöküntü ve topaklanmaların oluştuğunu göstermektedir.



**Şekil 2.** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve glikol ile hazırlanan ve sıra ile hacimsel oranları % 0.1, % 0.3, % 0.5, % 0.7 ve % 1 olarak belirlenen nanoakışkan örneklerinin (a) nanoakışkanlar hazırlandıktan sonra, (b) bir hafta sonra ve (c) bir ay sonra çekilmiş fotoğrafları [43]

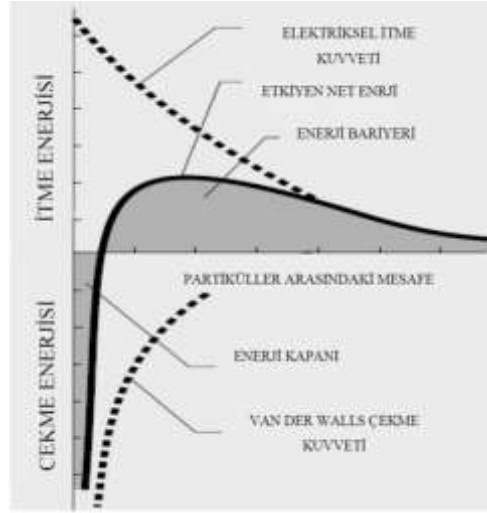


**Şekil 3.** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve su ile hazırlanan nanoakışkanda zamanla oluşan çöküntüler [44]

Topaklanma ve çöküntüler ısı transferini ve nanoakışkanın kararlılığını olumsuz yönde etkiler. Nanopartiküllerin yüzey alanı/ hacim oranları çok yüksektir. Bu oranın yüksek olmasıyla nano boyutta partiküller üzerine etkiyen kuvvetlerin kütsel kuvvetlerden çok yüzey alanının etkisiyle alansal kuvvetlere kaydığı bilinmektedir.

F. ŞAHİN, L. NAMLI

Dejaguin, Verway, Landau ve Overbeek (DLVO) tarafından kolloidlerin kararlılığı için bir teori geliştirilmiştir [45]. Bu teori akışkan içerisindeki partiküller üzerine etki eden kuvvetleri, Van der Walls bağ kuvvetlerine ve yüzeylerin sahip olduğu elektriksel kuvvete bağlı olarak tanımlamıştır. Van der Walls bağ kuvvetleri, aynı cins moleküller arasında oluşan, aralarındaki mesafenin azalmasıyla artan ve molekülleri bir arada tutan kuvvettir. Van der Walls kuvvetleri partiküller arasındaki çekim kuvvetinin en baskın sebebidir. Nanoakışkanların kararlılığı için partiküller arasında etkileşimi azaltmak ve itme kuvvetlerini etkin hale getirmek için Van der Walls kuvvetlerinin yenilmesi gerekmektedir [46]. Şekil 4'te elektrostatik kuvvet ile Van der Walls kuvvetlerinin partiküller arası mesafeye bağlı olarak dengelenmesi şematik olarak verilmiştir.



**Şekil 4.** Elektrostatik kuvvet ile Van der Walls kuvvetlerinin partiküller arası mesafeye bağlı olarak dengelenmesinin grafiksel gösterimi

Elektro kinetik kuvvetler, hareketli yüklü taneciklerin arasında meydana gelen, aynı cins yüklü taneciklerin birbirine itme kuvveti uygularken, farklı cins yüklü taneciklerin birbirine çekme kuvveti uygulamasıdır. Nanopartiküller yüzey yüklerine sahiptir. Bu elektriksel yükler partiküllerin davranışlarında etkindir [42]. Yüzey enerjisini artıran ya da azaltan bu etki, tanecik yüküne bağlı olarak yakın çevresini tanecik yükü ile zıt yüklü iyonlarla çevreler. Elektriksel çift tabaka denilen bu yapı taneciklerin birbirine yaklaşmasıyla etkin hale gelerek itme kuvveti oluşturur [47]. Kararlılığın sağlanması için çekme kuvvetlerini dengelemesi ve itme kuvvetlerinin baskın olması beklenmektedir [32, 39]. Nanoakışkanların kararlılığı, partiküllerin elektrokinetik özelliklerine önemli derecede bağlıdır. Nanoakışkan içerisinde nanopartiküllerin yüzeylerinde yüksek yüzey yüklerine sahip olması iyi bir kararlılık oluşturmak için gereklidir [48].

#### 4. NANOAKIŞKANLARIN KARARLILIĞINI ARTIRMA YÖNTEMLERİ

Nanoakışkan kararlılığını artırmak için literatürde en sık kullanılan yöntemler ultrasonik karıştırıcı kullanımı, yüzey aktifleştirici madde veya dağıtıcı kimyasal kullanımı ve su tabanlı nanoakışkanlar için pH değerlerinin değiştirilmesidir. Nanoakışkanlar hazırlanırken bu yöntemlerden ultrasonik karıştırıcı kullanımı tek başına uygulanabildiği gibi diğer yöntemlerle birlikte de uygulanabilmektedir.

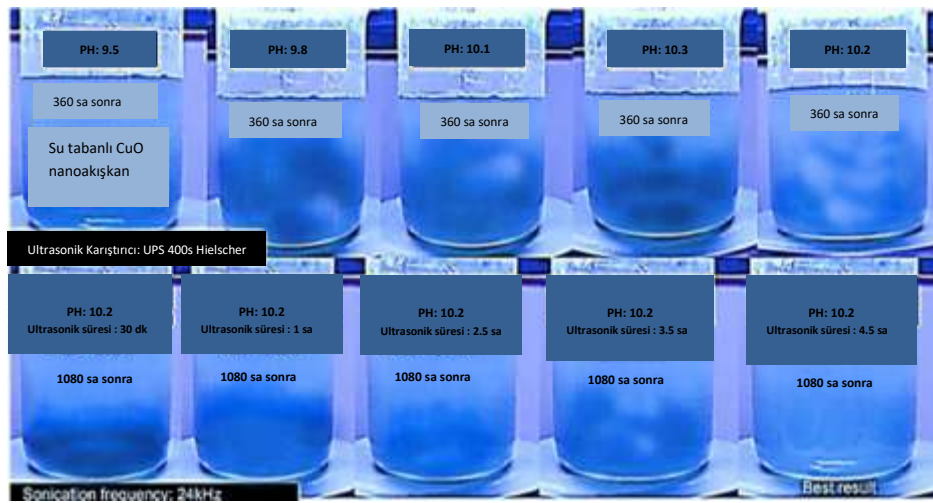
Ultrasonik karıştırma, homojenleştirme olarak da geçmektedir. Ultrasonik etki iki farklı şekilde uygulanmaktadır. En yaygın kullanılan yöntem bir prop yardımıyla belirli bir güç ve frekans değerindeki cihazların ayarlanabilir genlikte ses dalgası göndermesidir [49-51]. Diğer bir uygulama yöntemi ise ultrasonik banyodur. Benzer şekilde belirli güçte ve frekandaki cihazlar uygun genlik değerleriyle ses dalgası ile toplanmış nanopartikülleri ayrıştırmayı amaçlar [52-54]. Bu uygulamalar aynı proseslerde kullanıldığı gibi üretim aşamasında sadece belirli bir uygulamanın seçildiği literatür örnekleri de bulunmaktadır [55, 56].

Nanoakışkan hazırlanırken nanopartiküller ile temel akışkan arasında yüzey gerilimleri meydana gelir. Oluşan yüzey gerilimleri partiküllerin temel akışkan içerisinde dağılmasını önemli ölçüde etkiler. Yüzey aktif maddeler bu gerilimleri azaltıcı yönde etki yapan kimyasal moleküllerdir. Bu yöntem ile birbirini çekme eğiliminde olan nanopartiküllerin temel akışkan içerisinde dağılmaları için sıvı tarafından itilen ve ıslanmayan (hidrofobik) oksit yüzeylerin yüzey aktif maddeyi absorbe etmesi istenir. Yüzey aktif madde nanopartiküllerin arasında meydana

**NANOAKIŞKANLARDA KARARLILIĞIN ISI TRANSFERİNİ İYİLEŞTİRME AÇISINDAN ÖNEMİ**

gelen çekme kuvvetlerini perdeleyerek birbirlerini itme doğrultusunda olan kuvvetleri açığa çıkarır. Yüze emilen yüzey aktif madde nanoakışkan üretim sürecinde nanopartiküllerin ve temel akışkanın yapısına göre belirlenir. Belirlenen yüzey aktif maddenin nanoakışkan sentezinde kullanılması gereken miktarın iyi belirlenmesi uzun süreli kararlılık sağlamak için gereklidir [39]. Nanoakışkan üretiminde kullanılacak yüzey aktif madde miktarının deneysel yöntemler ile belirlenmesi ve gözlenmesi gerekmektedir.

Sulu bir çözeltinin asitlik veya bazlık derecesini belirten ölçüye pH değeri denilmektedir. İki partikülün etkileşim şiddeti yüzeylerde bulunan yüklerin yoğunluğuna ve türüne bağlı olarak değişmektedir. Nanopartikül yüzeyinden asidik grupların ayrışmasıyla yüzey negatif yükle ve yüzeyden bazik grupların ayrışmasıyla yüzey pozitif yükle yüklenmektedir. Oluşan bu yükler partikülün yüzey yükünü meydana getirmektedir. Yüzey yükünün büyüklüğü ise akışkanın asidik ve bazik değerlerinin ölçütlü olan pH değerine bağlıdır. Nanopartiküller arasındaki itme kuvvetinin elektriksel potansiyel değerine zeta potansiyeli denilmektedir. Nanoakışkanların kararlılığının doğrudan ifadesi zeta potansiyel değerinin mutlak büyüklüğü ile ifade edilmektedir. Bu değer büyük olduğu akışkanın kararlılığını belirlemektedir. Zeta potansiyelini etkileyen ve zeta potansiyel değerinin değiştirilmesine olanak veren en önemli parametre ise pH değeridir [30, 31].



**Şekil 5.** CuO/su ile hazırlanan nanoakışkanın pH değerleri değiştirilerek uygun kararlılık durumu mavi ışık altında çöküntü durumlarına göre tespit edilmeye çalışılmıştır [57].

Şekil 5'te görüldüğü gibi, nanoakışkan kararlılığını sağlamak amacıyla yapılan çalışmada, pH değerleri değiştirilerek nanoakışkanlar hazırlanmıştır. Çöküntünün en az olduğu pH değerine sahip nanoakışkan belirlenmiştir. Daha sonra diğer bir parametre olan ultrasonik karıştırma süreleri değiştirilerek yapılan çalışma sonucunda uygun kararlılık değeri sağlanmıştır. Uygun pH değerinin belirlendiği 10,2 değerinde zeta potansiyel değerinin en yüksek değere ulaşmış olduğu düşünülmektedir.

## 5. NANOAKIŞKANLARDA KARARLILIĞI ÖLÇME YÖNTEMLERİ

Nanoakışkanların kararlılığını ölçmek için sedimentasyon yöntemi, zeta potansiyel ölçme yöntemi, UV-spektral analiz yöntemi, dinamik ışık saçılım spektrometresi yöntemi (DLS) ve elektron mikroskobu ölçüm yöntemi (SEM, TEM) literatürde en sık kullanılan yöntemlerdir.

Nanoakışkanların kararlılığının çökeltme karakteristikleri belirli sürelerde gözlenerek yapılan yöntemle sedimentasyon yöntemi denir. Sedimentasyon yöntemi en basit nanoakışkan kararlılık belirleme yöntemlerinden birisidir. Derecelendirilmiş bir tüp içerisine hazırlanmış nanoakışkan doldurularak zamanla çökeltme hacminin veya miktarının ölçülmesiyle yapılır [31, 36, 39, 55, 58]. Manjula ve ark. [31], çalışmalarında farklı pH değerlerinde yüzey aktif madde kullanmadan alümina nanopartiküllerin su temel akışkanında çökeltmesini inceleyerek kararlılık için uygun pH değerini belirlemişlerdir. Nanoakışkan için uygun pH değerini sedimentasyon yöntemiyle belirlemişlerdir. Zhu ve ark. [36] sedimentasyon yöntemi kullanarak grafit katkılı saf su içerisinde nanoakışkan hazırlamışlardır. Farklı pH değerlerinde iki gün boyunca dağıtıcı kullanmadan sedimentasyon yöntemiyle çökeltmeyi gözlemlemişlerdir. Karimian ve ark. [58], yapmış oldukları çalışmada belirledikleri alümina oranlarını farklı pH değerlerindeki su içerisinde çökme davranışlarını inceleyerek uygun pH oranını belirlemişlerdir.

Akışkan içerisinde dağıtılan nanopartiküllerin arasında oluşan elektriksel itme potansiyelinin bir ölçüsü olan zeta potansiyel değeri, nanoakışkanların kararlılığını değerlendirmek için kullanılan önemli yöntemlerdendir. Zeta potansiyel değeri partikül yüzey yüküne göre negatif veya pozitif değerler alabilmektedir. Literatürde birçok çalışmada zeta potansiyelinin belirlenmesi ile kararlılık değerlendirilmesi yapılmıştır [30, 59-64]. Tablo 1'de zeta potansiyel değerinin kararlılık ve partiküllerin çöküntü durumları arasındaki ilişki özetlenmiştir. Nanoakışkanlar için ölçülen zeta potansiyel değerinin mutlak 40-60 mV aralığında sağlandığı ve mutlak 60 mV değerinden yüksek değerlerde kararlı kabul edildiği belirtilmektedir [39].

**Tablo 1.** Zeta potansiyel değerinin kararlılık üzerindeki etkisi [65]

Zeta Potansiyel Değeri (mV)	Kararlılık Durumu
0	Kararlılık çok kısa süre sağlanır veya hiç sağlanamaz.
15	Kararlılık kısa süreli sağlansa dahi, çöküntü oluşumu gözlenir.
30	Kararlılık orta düzeyde sağlanır.
45	İyi bir kararlılık durumu ve çok az çöküntü oluşumu sağlanır.
60	Çok iyi kararlılık durumu gözlenir.

Işığın yapısını, özelliklerini ve yoğunluğunu kullanarak nanoakışkan içerisindeki partiküller hakkında bilgi sahibi olunmasını sağlayan bir diğer yöntem ise UV-spektral analiz yöntemidir. Spektroskopik çalışmalar, maddenin elektromanyetik dalganın veya fotonun etkileşimi sonucu madde tarafından elektromanyetik dalganın veya fotonun absorpsiyonu ya da emisyonu olarak yapılmaktadır. Nanoakışkan içerisinde homojen dağılmış veya topaklanmış partiküller farklı foton absorpsiyon ya da emisyon değerlerine sahiptir [66]. Kararlılığı ölçülmek istenen nanoakışkan hazırlandıktan sonra sedimantasyon yöntemi ile bekletilmektedir. Belirli zamanlarda yapılan spektral ölçümler nanoakışkan içerisinde topaklanmaların oluşumu hakkında bilgi vermektedir [67]. Spektral analiz nanoakışkanların kararlılığını belirlemek için literatürde sıkça kullanılmaktadır [33, 67-71].

Bir diğer yaygın kullanılan yöntem, dinamik ışık saçılım spektrometresi yöntemidir. Bu yöntem, bir çözelti içerisinde bulunan partiküllerin difüzyon katsayısı, dağılım indeksi ve parçacık büyüklüğü gibi özellikleri hakkında bilgi sahibi olunmasına yardımcı olmaktadır. Işık çözeltiye gönderildikten sonra partiküllerden saçılan ışığın şiddetinin ölçülmesi ve ışık şiddetinde meydana gelen değişim belirlenerek ölçümler yapılmaktadır. Işık şiddetindeki değişim nanoakışkan içerisindeki partiküllerin boyutuna ve hızına, çözeltinin viskozitesine ve sıcaklığına bağlıdır. DLS yöntemi hazırlanan nanoakışkanla zamanla oluşacak topaklanma etkisini belirleyerek kararlılığın değerlendirilmesinde etkin bir yöntemdir. Bu yöntem partikül boyutlarının belirlenmesi ve zamanla boyutlarda oluşan değişim hakkında bilgi vermektedir. Literatürde sıkça kullanılan bir yöntemdir [71-74].

Elektron mikroskobu ölçüm yöntemi, transmisyon elektron mikroskobu (TEM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) en çok kullanılan iki teknikle yapılır. Diğer yöntemlerden farklı olarak doğrudan çöken partiküllerin dijital fotoğraflarını görüntüler. Dijital fotoğraflar partikül boyutlarının topaklanma davranışları ve şekilleri hakkında bilgi verir. Elektron mikroskobu ölçüm yöntemlerinde incelenecek nanoakışkan numunelerinin hazırlanması için kurutma işlemi uygulanmaktadır. Bu işlemin dikkatli yapılması gerekmektedir. Aksi halde fotoğraflanan partiküllerin kararsızlığın bir göstergesi mi olduğuna, yoksa kurutma işlemi sırasında mı oluştuğuna karar vermenin zor olabileceği belirtilmektedir [66].

## 6. NANOAKIŞKANLARDA KARARLILIK VE ISIL İYİLEŞME

Nanoakışkan çalışmalarında temel akışkan olarak su ve yağ gibi geleneksel ısı transfer akışkanları kullanılmaktadır. Nanopartiküllerin temel akışkan içerisinde çökmeden asılı halde kalarak ısı transferini artırması ve nanopartiküllerin topaklanmadan ve çökmeden uzun süre özelliklerini koruması beklenmektedir. Sıvıların ısı iletim katsayısı katılara (metal, metal oksit vb.) göre ciddi oranda düşüktür [75]. Tablo 2'de görüldüğü gibi metallerin ısı iletim katsayısı akışkanlarınkine göre yaklaşık 700 kat ve metal oksitlerin ise ısı iletim katsayısı akışkanlarınkine göre yaklaşık 60 kat fazladır.

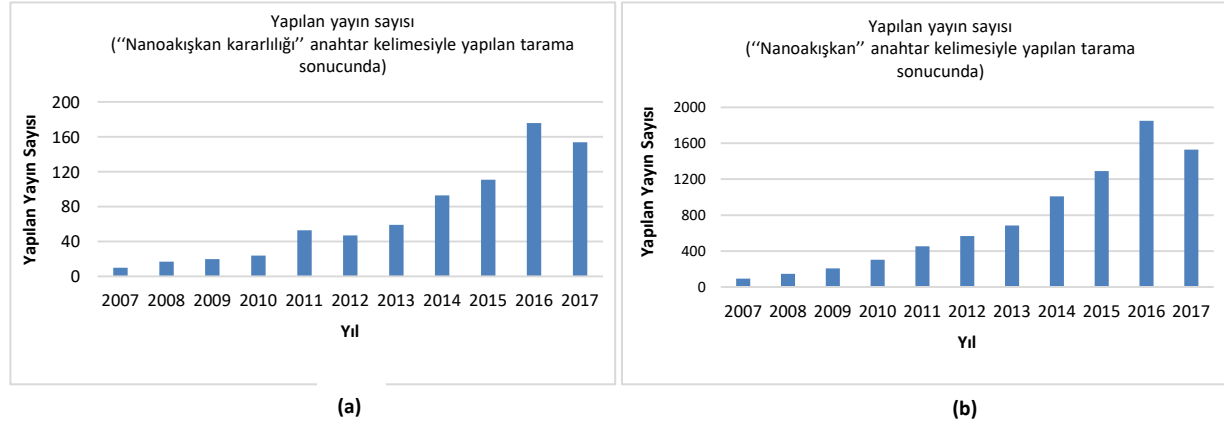


## NANOAKIŞKANLARDA KARARLILIĞIN ISI TRANSFERİNİ İYİLEŞTİRME AÇISINDAN ÖNEMİ

**Tablo 2.** Metal, metal oksit ve akışkanların ısı iletim katsayısı değerleri [76]

Metal Oksitler	Isı İletim Katsayısı (W/mK)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Alüminyum Oksit	36.0
TiO <sub>2</sub> , Titanyum Oksit	8.4
SiO <sub>2</sub> , Silisyum Oksit	10.4
MgO, Magnezyum Oksit	48.4
<b>Metaller</b>	
Ag, Gümüş	429
Cu, Bakır	401
Al, Alüminyum	237
<b>Akışkanlar</b>	
Su	0.613
Etilen Glikol	0.253
Motor Yağı	0.145

Bir katı ve sıvının karıştırılması sonucu oluşturulan çözeltinin ısı iletim katsayısının ölçülebildiği düşünülürse, sonucun başlangıçtaki sıvının ısı iletim katsayısından fazla olması yüksek ihtimaldir. Karıştırılacak olan katının boyutlarının nanometre düzeylerinde olması ile elde edilen karışımın ısı iletim katsayısındaki artış, basit bir katı sıvı karışımından elde edilebilecek ısı iletim katsayısındaki artıştan farklı olacaktır [77]. Nanoakışkanlar konusu son yıllarda araştırılmaya değer görülen önemli çalışmalar arasındadır. Nanoakışkanların termo-fiziksel özelliklerini etkileyen birçok parametrenin bulunması çalışmaların sayısını önemli derecede artırmaktadır. Bu etkenlerden kararlılık konusunun nanoakışkan çalışmalarındaki önemi gün geçtikçe artmaktadır. Bu durum için son yıllarda yapılan yayın sayıları belirleyici bir ölçüt olabilir. Şekil 6'da "nanofluid" ve "nanofluid stability" anahtar kelimeleri ile son on yıl içinde yapılan taramanın sonuçları görülmektedir. Ayrıca yıllara göre yapılan yayın sayıları verilmiştir. Nanoakışkanlar konusuna ilginin artmasının yanında son yıllarda kararlılık konusuna gereken önemin verilmeye başlandığı anlaşılmaktadır. Kararlılık ile ilgili yapılan yayınların büyük bir kısmının son birkaç yılda yapılması dikkat çeken başka bir göstergedir.



**Şekil 6.** a) "nanoakışkan" anahtar kelimesiyle yapılan tarama sonucunda 2007-2017 Eylül arasında yapılan yayın sayıları, b) "nanoakışkan kararlılığı" anahtar kelimesiyle yapılan tarama sonucunda 2007-2017 Eylül arasında yapılan yayın sayıları [78].

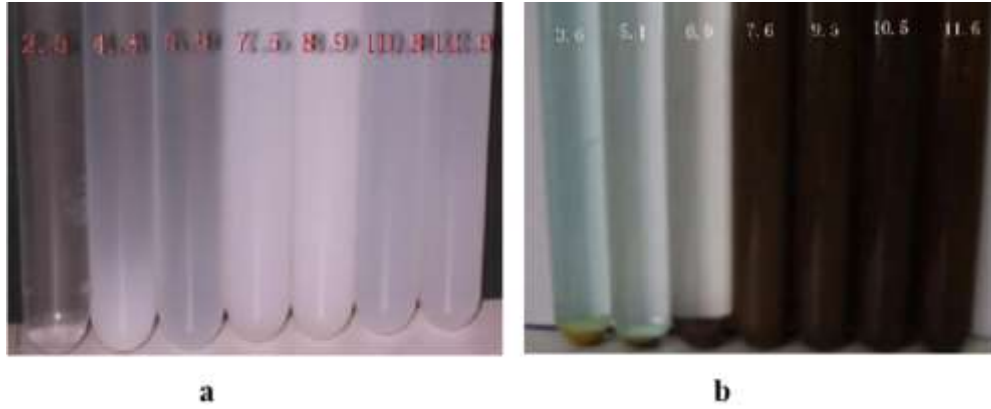
Literatürde, üretilen nanoakışkanın temel akışkana göre ısıl özelliklerin iyileştirildiği sonucuna ulaşan çok sayıda deneysel çalışma bulunmaktadır. Nanoakışkan konusu kapsamında yapılan bu çalışmaları kararlılık ve ısı transferindeki iyileşme arasındaki ilişkinin anlaşılması bakımından üç gruba ayırmak mümkündür.

Birinci gruptaki çalışmalar ısı transferindeki iyileşmeye odaklanan çalışmalardır. Bu çalışmalarda, nanoakışkan üretildikten sonra ısıl özelliklerine ve temel akışkan ile karşılaştırılmasına odaklanılmıştır [10, 14, 22, 26, 79-81]. Bu çalışmalar nanoakışkanların ısıl özelliklerini etkileyen nanopartiküllerin hacimsel oranı, malzemesi ve şekli, temel akışkanın türü, sıcaklık gibi parametrelerin değişiminin incelendiği deneysel çalışmalardır. Ancak bu tür çalışmalarda nanoakışkanların endüstriyel bir ürün özelliği kazanabilmelerinin

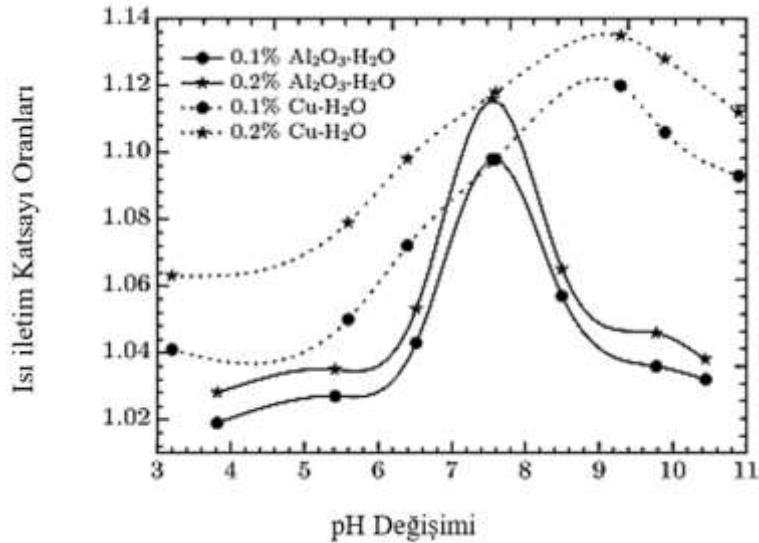
F. ŞAHİN, L. NAMLI

önündeki en önemli sorunlardan biri olan kararlılık çalışmalarına gereken ilgi gösterilmemiştir. Tablo 3'te görüleceği gibi birçok çalışmada nanoakışkanlar için kararlılık süreleri belirtilmemektedir. Bu çalışmalarda nanoakışkanlar üretildikten sonra ısı özelliklerinin ölçümleri yapılmış, ancak nanoakışkanın belirlenmeyen kararlılığı sonucu sürekli değişim halinde olan nanoakışkanın fiziksel ve kimyasal yapısının zamanla ısı özellikleri üzerinde oluşturacağı etki göz ardı edilmiştir. Bu çalışmalarda kritik öneme sahip bir parametrenin göz ardı edilmesinden dolayı nanoakışkanların geleceği açısından sınırlı ölçüde katkı sağlanmıştır.

İkinci gruptaki çalışmalar ise kararlılık konusuna odaklanan deneysel çalışmalar olarak tanımlanabilir. Bu çalışmalar, iki adım yöntemiyle üretilen nanoakışkanların kararlılığının sağlanması için kullanılan ultrasonik karıştırma, su temelli nanoakışkanlar için pH değişimleri ve yüzey aktif madde kullanımı gibi yöntemlerin deneysel uygulamasının yapıldığı çalışmalardır. Bu tür çalışmalarda, kararlılığın artırılmasına veya viskozite değişimlerine odaklanılmasına rağmen nanoakışkanlarda ısı transferindeki iyileşme konusu eksik kalmıştır. Nanoakışkanlarda kararlılığın sağlanması için en sık kullanılan yöntemlerden olan yüzey aktif madde yönteminde kullanılan kimyasalların temel akışkanların yapısını değiştirmemesi istenmektedir [82]. Kararlılık çalışmalarında oluşturulan kimyasal etkilerin sonucunda, nanoakışkanların temel akışkandan daha yüksek ısı iletimine sahip olması beklentisi belirsizleşmektedir. Yapılan kararlılık çalışmalarıyla birlikte nanoakışkanların ısı özelliklerinin nasıl değiştiğinin bilinmemesi, nanoakışkanların kullanımı için önemli bir sorun teşkil etmektedir. Bu çalışmalar, önemli katkılar sağlamasına rağmen ısı özelliklerinin belirtilmemesiyle nanoakışkanlar konusunun özünden uzaklaşmıştır [33, 57, 67, 83, 84].



Şekil 7. a) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Su ile oluşturulan nanoakışkan için pH değerinin 2,5'ten 12,6'ya kadar yükseltilerek kararlılık için uygun pH değerinin gözlenmesi b) Cu/Su ile oluşturulan nanoakışkan için pH değerinin 3,6'dan 11,6'ya kadar yükseltilerek kararlılık için uygun pH değerinin gözlenmesi [85]



Şekil 8. Farklı pH değerlerinde Nanoakışkanların ısı iletim katsayılarındaki değişim [85]

*NANOAKIŞKANLARDA KARARLILIĞIN ISI TRANSFERİNİ İYİLEŞTİRME AÇISINDAN ÖNEMİ*

Üçüncü gruptaki deneysel çalışmalarda ise nanoakışkanların kararlılık sorunu göz önünde bulundurularak kararlılık artırma yöntemleri uygulanmış ve ısı iletim katsayıları ölçülerek temel akışkan ile karşılaştırma verileri sunulmuştur [43, 85-89]. Ancak ısı özelliklerin kararlılık ile değişiminden bahsedilmemektedir. Şekil 2 ve şekil 3'te görüldüğü gibi, zamanla nanoakışkanlarda fiziksel ve kimyasal değişimler olmaktadır. Bu nedenle zamanla izlenen kararlılık ile birlikte ısı özelliklerin değişiminin de belirlenmesi son derece önemlidir.

Şekil 7'de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ Su ve Cu/Su ile hazırlanan nanoakışkanların kararlılığının sağlanması için en uygun pH aralığı deneysel olarak gözlenmiştir. Çalışmada Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ Su için en uygun pH aralığının 7,5 - 8,9 ve Cu/Su için en uygun pH değerinin ise 7,6'dan büyük değerler olduğu gözlenmiştir. Üretilen nanoakışkanların pH ve ısı iletim katsayısı değişimlerinin verildiği şekil 8'de ise Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ Su için en yüksek ısı iletim katsayısı değeri pH değerinin 7-8 aralığında olduğu açıkça görülmektedir. Yine aynı şekilde Cu/su için en yüksek ısı iletim katsayısı 7,6 pH değerinden büyük olan kısım dır. Bu çalışmada kararlılığın sağlanmasıyla en yüksek ısı özelliklere ulaşılabilirdiği ortaya koyulmuştur. Nanoakışkanların kararlılığı ile ısı transfer iyileşmesi arasında önemli bir ilişki vardır. Kimyasal bir etkinin kullanılmadığı kararlılık çalışmaları kapsamında, yüksek kararlılık ile hazırlanmış nanoakışkanlarda, kararsız olarak hazırlanmış nanoakışkanlara göre daha yüksek ısı transfer iyileşme elde edilebilmektedir [90].

Nanoakışkan kararlılık çalışmalarında iki adım yöntemi ile hazırlanan numunelerde yapılan kararlılık ölçümlerinde çok uzun sürelere ulaşılammıştır. Tamamen kararlı nanoakışkan elde etmek için çalışmalar sürdürülmektedir. Nanoakışkanların enerji ve ısı transferinde oluşturduğu heyecanın kaybolmaması ve artarak devamı için kararlılık çalışmalarına gereken önem verilmelidir. Bu kapsamda kararlılığın sağlanmadığı nanoakışkanlarda iki farklı zamanda elde edilen birbirinden farklı iki ısı iletim katsayısı [91], nanoakışkan çalışmalarında görülmektedir. Deneysel olarak ölçüldüğü iddia edilen ısı iletim katsayısı değerlerinin hangi zaman aralığında yapıldığının bilinmesi son derece önemli bir hale gelmiştir.

**Tablo 3.** Nanoakışkanlarda yapılan kararlılık çalışmaları sonucu elde edilen kararlılık süreleri ve ısı transferindeki değişim

Nanopartikül/Temel akışkan	Kararlılık Artırma Yöntemi	Kararlılık süresi	Isı Transferindeki Artış	Referans
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Su	Ultrasonik Karıştırma, Yüzey aktif madde:SDBS ( sodyum dodesil benzen sülfonat)	Belirtilmemiş	Belirtilmemiş	[67]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Su	Ultrasonik Karıştırma, pH, Yüzey aktif madde:SDBS ( sodyum dodesil benzen sülfonat)	Belirtilmemiş	% 10,1	[33]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Su	Ultrasonik Karıştırma	Belirtilmemiş	% 9,7	[92]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Su	Ultrasonik Karıştırma, Yüzey aktif madde:SDBS ( sodyum dodesil benzen sülfonat)	Belirtilmemiş	% 13	[85]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Su	Ultrasonik Karıştırma	Belirtilmemiş	% 1,44	[93]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Su	Ultrasonik Karıştırma	Belirtilmemiş	% 20	[94]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Su	Ultrasonik Karıştırma, Yüzey aktif madde:SDS ( sodyum dodesil sülfonat) Ultrasonik Karıştırma, Yüzey aktif madde:PVP	Belirtilmemiş	% 9 % 9	[95]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / Su	Ultrasonik Karıştırma, Yüzey aktif madde:SDBS ( sodyum dodesil benzen sülfonat)	Belirtilmemiş	Belirtilmemiş	[51]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / Su	Ultrasonik Karıştırma, Yüzey aktif madde:polivinilpirolidon	Belirtilmemiş	% 5	[79]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / Su	Ultrasonik Karıştırma	1 Ay	% 26	[87]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Etilen glikol Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Propil glikol	Ultrasonik Karıştırma	İki aydan fazla	Belirtilmemiş	[84]

F. ŞAHİN, L. NAMLI

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Mineral Yağ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Isoparaffinic polyalphaolefin	Ultrasonik Karıştırma, Yüzeysel aktif madde	Birkaç gün	% 7 % 5	[86]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Etilen glikol	Ultrasonik Karıştırma	Belirtilmemiş	% 19	[19]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Etilen glikol	Ultrasonik Karıştırma	Belirtilmemiş	% 28	[26]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Etilen glikol + Su	Ultrasonik Karıştırma	Belirtilmemiş	% 29	[96]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Etilen glikol + Su	Ultrasonik Karıştırma	Belirtilmemiş	% 11,6	[14]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Etilen glikol + Su	Ultrasonik Karıştırma	Belirtilmemiş	% 29	[18]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TransferYağı AlN/TransferYağı	Ultrasonik Karıştırma, Yüzeysel aktif madde: n-hekzan, Oleik asit	Belirtilmemiş	% 20 % 8	[5]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Amonyak + Su	Ultrasonik Karıştırma, Yüzeysel aktif madde:SDBS ( sodyum dodesil benzen sülfonat)	Belirtilmemiş	Belirtilmemiş	[83]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / Metanol	Ultrasonik Karıştırma	Belirtilmemiş	% 29,41	[80]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Biyoglikol Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Etilen glikol Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Propilen glikol	Ultrasonik Karıştırma	1 Ay Belirtilmemiş Belirtilmemiş	% 17 % 9 % 3,6	[43]
Cu/ Etilen Glikol	Ultrasonik Karıştırma	Belirtilmemiş	% 41	[91]
Cu/ Therminol-59	Ultrasonik Karıştırma, Yüzeysel aktif madde:Benzelkonyum klorür-oktadesil tiol	Belirtilmemiş	% 46	[97]
Cu/ Su	Ultrasonik Karıştırma, Yüzeysel aktif madde:Polioksietilen nonilfenil eter Ultrasonik Karıştırma, Yüzeysel aktif madde:CTAB Ultrasonik Karıştırma, Yüzeysel aktif madde:SDBS ( sodyum dodesil benzen sülfonat)	Belirtilmemiş	Belirtilmemiş	[30]
Cu/ Su	Ultrasonik Karıştırma, Yüzeysel aktif madde:SDBS ( sodyum dodesil benzen sülfonat)	Belirtilmemiş	Belirtilmemiş	[67]
Cu/ Su	Ultrasonik Karıştırma, Yüzeysel aktif madde:SDBS	Belirtilmemiş	% 15	[85]
Cu/ Su	Ultrasonik Karıştırma, Yüzeysel aktif madde:Polyoxyethylene nonylphenyl ether	Belirtilmemiş	Belirtilmemiş	[30]
CuO/ Su CuO/ Etilen glikol+su CuO/ Etilen glikol	Ultrasonik Karıştırma, pH	45 Gün 55 Gün 75 Gün	Belirtilmemiş	[57]
CuO/ Etilen glikol+su	Ultrasonik Karıştırma	Belirtilmemiş	%21,4	[18]
CuO/ Etilen glikol	Ultrasonik Karıştırma	Belirtilmemiş	%22,4	[98]
CuO/ Su CuO/ Su	Ultrasonik Karıştırma, Yüzeysel aktif madde:Rokanol K7 Ultrasonik Karıştırma, Yüzeysel aktif madde:Rokacet O7	Belirtilmemiş	Belirtilmemiş	[99]

*NANOAKIŞKANLARDA KARARLILIĞIN ISI TRANSFERİNİ İYİLEŞTİRME AÇISINDAN ÖNEMİ*

TiO <sub>2</sub> / Su	Ultrasonik Karıştırma, Yüzey aktif madde:SDS ( sodyum dodesil sülfonat)	Belirtilmemiş	% 1	[48]
TiO <sub>2</sub> / Su	Ultrasonik Karıştırma	Belirtilmemiş	% 5	[94]
TiO <sub>2</sub> / Su	Ultrasonik Karıştırma, pH	Belirtilmemiş	% 32	[12]
TiO <sub>2</sub> / Propil glikol + Su TiO <sub>2</sub> / Etilen glikol + Su	Ultrasonik Karıştırma	İki aydan fazla	Belirtilmemiş	[84]
TiO <sub>2</sub> / Su	Ultrasonik Karıştırma, Yüzey aktif madde:polivinilpirolidon	Belirtilmemiş	% 6,5	[79]
TiO <sub>2</sub> / Metanol	Ultrasonik Karıştırma	Belirtilmemiş	% 24,51	[80]
SiO <sub>2</sub> /Su	Ultrasonik Karıştırma	3 Hafta	% 12	[87]
SiO <sub>2</sub> /Metanol	Ultrasonik Karıştırma	Belirtilmemiş	% 23,03	[80]
SiO <sub>2</sub> /Su	Ultrasonik Karıştırma	Belirtilmemiş	% 23	[100]
SiC/ Diatermik Yağ	Ultrasonik Karıştırma, Yüzey aktif madde: Oleik asit	3 Gün	% 7,36	[89]
SiC/ Mineral Yağ SiC/ İzoparafınik polialfaolefin Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / İzoparafınik polialfaolefin	Ultrasonik Karıştırma	Birkaç gün	% 10 % 5,5 % 3,2	[86]
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /Su	Ultrasonik Karıştırma, Yüzey aktif madde:polivinilpirolidon	Kararlılık sağlanamamıştır.	Belirtilmemiş	[87]
ZnO Propil glikol ZnO/ Propil glikol + Su ZnO/ Etilen glikol ZnO/Etilen + Su	Ultrasonik Karıştırma	İki aydan fazla	Belirtilmemiş	[84]
ZnO/Su	Ultrasonik Karıştırma, Yüzey aktif madde:polivinilpirolidon	2 Hafta	% 51	[87]
ZnO/Etilen glikol + su	Ultrasonik Karıştırma	Belirtilmemiş	% 18	[18]
ZrO <sub>2</sub> /Su	Ultrasonik Karıştırma	Belirtilmemiş	% 28	[94]
Paslanmaz Çelik/ Su	Ultrasonik Karıştırma, pH, Yüzey aktif madde:SDBS ( sodyum dodesil benzen sülfonat)	10 Gün	% 8,3	[101]
Karbon nanotüp/Sentetik motor yağı	Ultrasonik Karıştırma, Yüzey aktif madde:N-hydroxysuccinimide	Belirtilmemiş	% 30,3 % 12,4	[81]
Karbon nanotüp/Etilen glikol	Ultrasonik Karıştırma			
Karbon nanotüp/Etilen glikol	Ultrasonik Karıştırma, Yüzey aktif madde:Arabic gum	Belirtilmemiş	% 79	[102]
Karbon nanotüp/Su	Ultrasonik Karıştırma, Yüzey aktif madde:Karboksilat	1 Ay	% 32	[68]

Grafen/Su	Ultrasonik Karıştırma, Trietanolamin ile işleme	100 gün	% 11,7	[88]
Ag/Su	Ultrasonik Karıştırma	Belirtilmemiş	% 30	[103]
Ag/Etilen glikol	Ultrasonik Karıştırma, Yüzey aktif madde: Poliakrilamid-koakrilikasit	15 Gün	% 18	[104]

## 7. SONUÇLAR

Nanoakışkanlar, ısı transfer akışkanlarının yerini alma iddiasıyla, enerji ve ısı alanlarında çok önemli bir potansiyele sahiptir. Ancak yirmi yılı aşkın süredir yoğun şekilde çalışılan bu alandan nihai bir endüstriyel ürün çıkmamıştır. Yapılan deneysel çalışmalar ve teorik çalışmalar arasındaki tutarsızlıkların yanında en önemli sorun nanoakışkanların kararlılığı olarak görülmektedir. Bu alanda yapılan çalışmaların son yıllarda artması dikkat çekmektedir.

Bu çalışmada nanoakışkanların ısı iletim katsayısı ve kararlılık özelliklerini inceleyen çalışmalar araştırılmıştır. Nanoakışkanlarda en sık kullanılan hazırlanma yöntemleri ve uygulanan yöntemler sunulmuştur. Nanoakışkanlarda kararlılık konusunun mekanizması incelenmiş ve kararlılığın geliştirilmesi için yapılan çalışmalar gözden geçirilerek kararlılık süreleri araştırılmıştır. Deneysel olarak yapılan nanoakışkan çalışmalarında ısı iletim katsayı artışları incelenerek kararlılık süreleri ile ilişkileri ortaya koyulmuştur. Yapılan literatür çalışmasında elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

- Nanoakışkanların önemli derecede kullanım potansiyeli olmasına rağmen, ticari bir ürün haline gelmesinin önünde bazı ciddi sorunlar olduğu görülmüştür. Bu sorunların en dikkat çekenini ise nanoakışkanın kullanıma hazır hale gelmesinden sonra, eklenen nanopartiküllerin çökmeden homojen bir şekilde kalmasının bir ölçüsü olan kararlılıktır.
- Son yıllarda nanoakışkanların kararlılığı konusuna verilen önem artmasına rağmen, yapılan çalışmaların birçoğunda kararlılığının sağlanması ve ısı transfer iyileşmesi konularına bir bütünlük içerisinde bakılmadığı görülmüştür. Nanoakışkanların ısı iletim katsayılarının ölçülmesi, nanoakışkanlar hazırlandıktan sonra gerçekleşmektedir. Zamanla değişen bir sistemde tek bir verinin alınması ve zamanla değişimin incelenmemesi, nanoakışkanların geleceği açısından sınırlı ölçüde katkı sağlamaktadır. Bu yüzden nanoakışkan kararlılığının zamana bağlı olarak cam tüplerle ve uygun şartlarda bekletilerek ölçülmesi ve izlenmesi kararlılığı belirlemede en nihai çözüm yolu olarak görülmektedir. Bu şekilde elde edilen sonuçlar kesin ve belirleyici olmaktadır.
- Deneysel olarak yapılan kararlılık çalışmalarının bazılarında önemli sürelerle ulaşıldığı görülmüşse de, nanoakışkanların ısı iletim katsayılarının ölçülmemesinin, bu çalışmaların nanoakışkanlar konusu için önemini tartışılmalı hale getirdiği düşünülmektedir.
- Aynı tür akışkan ve partikül çeşidi ile yapılan deneysel çalışmalarda seçilen kararlılık yöntemine bağlı olarak ısı iletim katsayısındaki iyileşmelerin farklı olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle nanoakışkanların ısı transferindeki iyileştirmelerinin daha verimli ve kalıcı olması için kararlılık konusuna daha fazla önem verilmesi gerekmektedir.
- Düşük ısı transfer iyileşme oranlarının elde edildiği deneysel çalışmalarda uygun kararlılık yöntemlerinin seçilmesine dikkat edilmelidir. Ultrasonik karıştırma zamanı, yüzey aktif madde miktarı ve çeşidi gibi parametrelerin nanoakışkanların termo-fiziksel özelliklerini önemli derecede etkileyeceği göz önünde bulundurulmalıdır.
- Tablo 3'te bazı deneysel çalışmalar incelendiğinde, aynı partikül ve akışkan türüne sahip nanoakışkanların ısı transferini iyileştirme oranları arasında belirgin farkların olduğu görülmüştür. Bu çalışmalar arasında oluşan tutarsızlığın en önemli nedeni nanoakışkan kararlılığı olarak düşünülmektedir. Bu sonuçlar doğrultusunda, nanoakışkanlarda iyi bir ısıl iyileşme kararlılıktan bağımsız olarak düşünülmemelidir.

## KAYNAKLAR

- [1] BABITA, S.K.S., GUPTA, S.M., "Preparation and evaluation of stable nanofluids for heat transfer application: A review". *Experimental Thermal and Fluid Science*, Cilt 79, 202-212, 2016.
- [2] ABU-NADA, E., ZIYAD, K., SALEH, M., ALI, Y., "Heat Transfer Enhancement in Combined Convection Around a Horizontal Cylinder Using Nanofluids". *Journal of Heat Transfer*, Cilt 130. 8, 084505, 2008.
- [3] ALBADR, J., S. TAYALM. ALASADI, "Heat transfer through heat exchanger using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid at different concentrations". *Case Studies in Thermal Engineering*, Cilt 1. 1, 38-44, 2013.

*NANOAKIŞKANLARDA KARARLILIĞIN ISI TRANSFERİNİ İYİLEŞTİRME AÇISINDAN ÖNEMİ*

- [4] CHANG, M.H., H.S. LIUC.Y. TAI, "Preparation of copper oxide nanoparticles and its application in nanofluid". Powder Technology, Cilt 207. 1-3, 378-386, 2011.
- [5] CHOI, C., H.S. YOOJ.M. OH, "Preparation and heat transfer properties of nanoparticle-in-transformer oil dispersions as advanced energy-efficient coolants". Current Applied Physics, Cilt 8. 6, 710-712, 2008.
- [6] CHOI, S.U.S., ZHANG, Z.G., YU, W., LOCKWOOD, F.E., GRULKE, E.A., "Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions". Applied physics letters, Cilt 79. 14, 2252-2254, 2001.
- [7] CHOPKAR, M., SUDARSHAN, S., DAS, P. K., MANNA, I., "Effect of Particle Size on Thermal Conductivity of Nanofluid". Metallurgical and Materials Transactions A, Cilt 39. 7, 1535-1542, 2008.
- [8] CHUNG, S.J., LEONARD, J.P., NETTLESHIP, I., LEE, J.K., SOONG, Y., MARTELLO, D.V., CHYU, M.K., "Characterization of ZnO nanoparticle suspension in water: Effectiveness of ultrasonic dispersion". Powder Technology, Cilt 194. 1-2, 75-80, 2009.
- [9] DAS, S.K., S.U.S. CHOI.H.E. PATEL, "Heat Transfer in Nanofluids—A Review". Heat Transfer Engineering, Cilt 27. 10, 3-19, 2006.
- [10] XUAN, Y., LI, Q., "Heat transfer enhancement of nanofluids ". International Journal of Heat and Fluid Flow, Cilt 21. 1, 58-64, 2000.
- [11] LEE, S., CHOI, S. U. S., LI, S., EASTMAN, J. A., "Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles". Journal of Heat Transfer, Cilt 121. 2, 280, 1999.
- [12] MURSHED, S.M.S., LEONG, K. C., YANG, C., "Enhanced thermal conductivity of TiO<sub>2</sub>—water based nanofluids". International Journal of Thermal Sciences, Cilt 44, 367-373, 2005.
- [13] ÖZERİNÇ, S., KAKAÇ, S., YAZICIOĞLU, A.G. "Enhanced thermal conductivity of nanofluids: a state-of-the-art review". Microfluidics and Nanofluidics, Cilt 8. 2, 145-170, 2009.
- [14] WEI, Y., HUAQING, X., YANG, L., LIFEI, C., QIANG, W., "Experimental on the heat transfer properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids using the mixture of ethylene glycol and water". Powder Technology, Cilt 230, 14-19, 2012.
- [15] MOGHADASSI, A.R., MASOUD HOSSEINI, S., HENNEKE, D., ELKAMEL, A., "A MODEL OF NANOFLUIDS EFFECTIVE THERMAL CONDUCTIVITY BASED ON DIMENSIONLESS GROUPS". Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Cilt 96, 81-84, 2009.
- [16] YU, W., FRANCE, D. M., ROUTBORT, J. L., CHOI, S.U. S., "Review and Comparison of Nanofluid Thermal Conductivity and Heat Transfer Enhancements". Heat Transfer Engineering, Cilt 29 (5), 432-460, 2008.
- [17] WANG, X., CHOI, S. U. S., XU, X., "Thermal Conductivity of Nanoparticle - Fluid Mixture". Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Cilt 13. 4, 474-480, 1999.
- [18] VAJJHA, R.S., DAS, D.K., "Experimental determination of thermal conductivity of three nanofluids". International Journal of Heat and Mass Transfer, Cilt 52 4675–4682, 2009.
- [19] BECK, M.P., YANHUI, Y., PRAMOD, W., AMYN S.T., "The effect of particle size on the thermal conductivity of alumina nanofluids". Journal of Nanoparticle Research, Cilt 11. 5, 1129-1136, 2008.
- [20] BECK, M.P., Y. YUAN, P. WARRIERA.S. TEJA, "The thermal conductivity of alumina nanofluids in water, ethylene glycol, and ethylene glycol + water mixtures". Journal of Nanoparticle Research, Cilt 12. 4, 1469-1477, 2009.
- [21] SHALKEVICH, N., W. ESCHER, T. BURGI, B. MICHEL, L. SI-AHMEDD. POULIKAKOS, "On the thermal conductivity of gold nanoparticle colloids". Langmuir, Cilt 26. 2, 663-70, 2010.
- [22] XIE, H., WANG, J., XI, T., LIU, Y., "Thermal Conductivity of Suspensions Containing Nanosized SiC Particles". International Journal of Thermophysics, Cilt 23. 2, 2001.
- [23] TIMOFEEVA, E.V., ROUTBORT, J. L., SINGH, D., "Particle shape effects on thermophysical properties of alumina nanofluids". Journal of Applied Physics, Cilt 106. 1, 2009.
- [24] CHEN, H., S. WITHARANA, Y. JIN, C. KIMY. DING, "Predicting thermal conductivity of liquid suspensions of nanoparticles (nanofluids) based on rheology". Particuology, Cilt 7. 2, 151-157, 2009.
- [25] YU, W., H. XIE, L. CHENY. LI, "Investigation on the thermal transport properties of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles". Powder Technology, Cilt 197. 3, 218-221, 2010.
- [26] ESFE, M.H., KARIMPOUR, A., YAN, W. M., AKBARI, M., "Experimental study on thermal conductivity of ethylene glycol based nanofluids containing Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle". International Journal of Heat and Mass Transfer, Cilt 88 (2015) 728–734. 2015.
- [27] PATEL, H.E., S.K. DAS, T. SUNDARARAJAN, A. SREEKUMARAN NAIR, B. GEORGET. PRADEEP, "Thermal conductivities of naked and monolayer protected metal nanoparticle based nanofluids: Manifestation of anomalous enhancement and chemical effects". Applied Physics Letters, Cilt 83. 14, 2931, 2003.
- [28] SHIMA, P.D., PHILIP, J., RAJ, B., "Iron Oxide Nanofluids and Study of Temperature Dependence on Thermal Conductivity and Viscosity". The Journal of Physical Chemistry C, Cilt 114, 18825-18833, 2010.

- [29] HABIBZADEH, S., A. KAZEMI-BEYDOKHTI, A.A. KHODADADI, Y. MORTAZAVI, S. OMANOVICM. SHARIAT-NIASSAR, "Stability and thermal conductivity of nanofluids of tin dioxide synthesized via microwave-induced combustion route". *Chemical Engineering Journal*, Cilt 156. 2, 471-478, 2010.
- [30] LI, X., ZHU, D., WANG, X., "Evaluation on dispersion behavior of the aqueous copper nano-suspensions". *Journal of Colloid and Interface Science*, Cilt 310. 2, 456-463, 2007.
- [31] MANJULA, S., MAHESH, S. K., RAICHUR, A. M., MADHU, G. M., SURESH, R., RAJ, M. A. L., "A sedimentation study to optimize the dispersion of alumina nanoparticles in water". *Ceramica*, Cilt 51. 121-127, 2005.
- [32] SATO, T., RUCH, R., *stabilization of colloidal dispersion by polymer adsorption*. 1980, New York,: Marcel Dekker Inc.
- [33] ZHU, D., LI, X., WANG N., WANG X., GAO, J., LI H., "Dispersion behavior and thermal conductivity characteristics of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O nanofluids". *Current Applied Physics*, Cilt 9. 131-139, 2008.
- [34] ZHU, H.T., LIN, Y. S., YIN, Y. S., "A novel one-step chemical method for preparation of copper nanofluids". *Journal of Colloid and Interface Science*, Cilt 277. 100-103, 2004.
- [35] SINGH, A.K., RAYKAR, V. S., "Microwave synthesis of silver nanofluids with polyvinylpyrrolidone (PVP) and their transport properties". *Colloid and Polymer Science*, Cilt 286. 14-15, 1667-1673, 2008.
- [36] ZHU, H., ZHANG, C., TANG, Y., WANG, J., REN, B., YIN, Y., "Preparation and thermal conductivity of suspensions of graphite nanoparticles". *Carbon*, Cilt 45. 1, 226-228, 2007.
- [37] ZHU, H., HAN, D., MENG, Z., WU, D., ZHANG, C., "Preparation and thermal conductivity of CuO nanofluid via a wet chemical method". *Nanoscale Res Lett*, Cilt 6. 1, 181, 2011.
- [38] MAHBUBUL, I.M., SAIDUR, R., AMALINA, M.A, ELICIOGLU, E.B., OKUTUCU-OZYURT, T., "Effective ultrasonication process for better colloidal dispersion of nanofluid". *Ultrasonics Sonochemistry*, Cilt 26 361-369, 2015.
- [39] WEI, Y., HUAQING, X., "A Review on Nanofluids: Preparation, Stability Mechanisms, and Applications". *Journal of Nanomaterials*, Cilt 2012. 1-17, 2012.
- [40] HWANG, Y., J.K. LEE, C.H. LEE, Y.M. JUNG, S.I. CHEONG, C.G. LEE, B.C. KUS.P. JANG, "Stability and thermal conductivity characteristics of nanofluids". *Thermochimica Acta*, Cilt 455. 1-2, 70-74, 2007.
- [41] CHOI, S., ZHANG, ZG, YU, WU, LOCKWOOD, FE, GRULKE, EA, "Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions". *Applied physics letters*, Cilt 79. 14, 2252-2254, 2001.
- [42] GÖNÜL, N., "Çok Fazlı Sistemler 1 Yüzey Kimyası ve Kolloidler" 2000, Ankara Üniversitesi Eczacılık Fakültesi Yayınları: ANKARA.
- [43] KHDHER, A.M., SIDIK, N.A.C, HAMZAH, W.A.W., MAMAT, R., "An experimental determination of thermal conductivity and electrical conductivity of bio glycol based Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids and development of new correlation". *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Cilt 73. 75-83, 2016.
- [44] KOULOULIAS, K., A. SERGISY. HARDALUPAS, "Sedimentation in nanofluids during a natural convection experiment". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Cilt 101. 1193-1203, 2016.
- [45] MISSANA, T., ADELL, A., "On the Applicability of DLVO Theory to the Prediction of Clay Colloids Stability". *J Colloid Interface Sci*, Cilt 230. 1, 150-156, 2000.
- [46] MISSANA, T., ADELL, A., *Steric Stabilization*. 2002, ABD: The Ohio State University.
- [47] HIEMENZ, P.C., RAJAGOPALAN, R., *Principles of Colloid and Surface Chemistry*. 3th ed. 1997: MARCEL DEKKER, INC.
- [48] GHADIMI, A., METSELAAR, I.H., "The influence of surfactant and ultrasonic processing on improvement of stability, thermal conductivity and viscosity of titania nanofluid". *Experimental Thermal and Fluid Science*, Cilt 51. 1-9, 2013.
- [49] KAMATCHI, R., R., VENKATACHALAPATHY, S., ABHINAYA S. B., "Synthesis, stability, transport properties, and surface wettability of reduced graphene oxide water nanofluids". *International Journal of Thermal Sciences*, Cilt 97. 17-25, 2015.
- [50] MOSTAFIZUR, R.M., A.R. ABDUL AZIZ, R. SAIDUR, M.H.U. BHUIYANI.M. MAHBUBUL, "Effect of temperature and volume fraction on rheology of methanol based nanofluids". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Cilt 77. 765-769, 2014.
- [51] ZAWRAH, M.F., KHATTAB, R.M., GIRGIS, L.G., EL DAIDAMONY, H., REHAB E. ABDEL AZIZ, "Stability and electrical conductivity of water-base Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids for different applications". *Housing and Building National Research Center*, Cilt, 2014.
- [52] CHINNAM, J., D.K. DAS, R.S. VAJJHAJ.R. SATTI, "Measurements of the surface tension of nanofluids and development of a new correlation". *International Journal of Thermal Sciences*, Cilt 98. 68-80, 2015.
- [53] HSIEH, S.-S., H.-H. LIUY.-F. YEH, "Nanofluids spray heat transfer enhancement". *International Journal of*



*NANOAKIŞKANLARDA KARARLILIĞIN ISI TRANSFERİNİ İYİLEŞTİRME AÇISINDAN ÖNEMİ*

- Heat and Mass Transfer, Cilt 94. 104-118, 2016.
- [54] PENKAVOVA, V., J. TIHONO. WEIN, "Stability and rheology of dilute TiO<sub>2</sub>-water nanofluids". Nanoscale Res Lett, Cilt 6. 1, 273, 2011.
- [55] ILYAS, S.U., PENDYALA, R., MARNENI, N., "Preparation, Sedimentation, and agglomeration of nanofluids". Chemical Engineering Technology, Cilt 37. 12, 2011.
- [56] RIEHL, R.R.N.D. SANTOS, "Water-copper nanofluid application in an open loop pulsating heat pipe". Applied Thermal Engineering, Cilt 42. 6-10, 2012.
- [57] KAMALGHARIBI, M., F. HORMOZI, S.A.H. ZAMZAMIANM.M. SARAFRAZ, "Experimental studies on the stability of CuO nanoparticles dispersed in different base fluids: influence of stirring, sonication and surface active agents". Heat and Mass Transfer, Cilt 52. 1, 55-62, 2015.
- [58] KARIMIAN, H., BABALUO, A. A., "Halos mechanism in stabilizing of colloidal suspensions: Nanoparticle weight fraction and pH effects". Journal of the European Ceramic Society, Cilt 27. 1, 19-25, 2007.
- [59] CHANG, H.M.J. KAO, "An innovative nanofluid manufacturing system". Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers, Cilt 28. 2, 187-193, 2007.
- [60] CHANG, H.S.C. LIN, "Fabrication method for a TiO<sub>2</sub> nanofluid with high roundness and superior dispersion properties". Materials Transactions, Cilt 48. 4, 836-841, 2007.
- [61] CHANG, H., TSAI, K.L., TSUNG, T.T., A study on dynamic stability of the Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> magnetorheological fluid, in Pricm 6: Sixth Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing, Pts 1-3, Y.W. Chang, N.J. KimC.S. Lee, Editors. 2007. p. 2175-2178.
- [62] HWANG, Y.J., AHN, Y. C., SHIN, H. S., LEE, C. G., KIM, G. T., PARK, H. S., LEE, J. K., "Investigation on characteristics of thermal conductivity enhancement of nanofluids". Current Applied Physics, Cilt 6. 6, 1068-1071, 2006.
- [63] JUNG, C.W., LEE, K., KANG, Y.T., KIM, J.K., An experimental study on the distribution stability of binary nanofluids by neta potential measurement for absorption application. Proceedings of the 3rd Asian Conference on Refrigeration and Air-Conditioning Vols I and II. 2006. 311-314.
- [64] LAI, W. Y., PHELAN, P. E., VINOD, S., PRASHER, R.L., Convective heat transfer for water-based alumina nanofluids in a single 1.02-mm tube, in 2008 11th Ieee Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, Vols 1-3. 2008. p. 970-978.
- [65] VANDSBURGER, L., Synthesis and covalent surface modification of carbon nanotubes for preparation of stabilized nanofluid suspensions, in Departman of Chemical Engineering. 2009, McGill University.
- [66] YU, F., Y. CHEN, X. LIANG, J. XU, C. LEE, Q. LIANG, P. TAOT. DENG, "Dispersion stability of thermal nanofluids". Progress in Natural Science: Materials International, Cilt, 2017.
- [67] HUANG, J., WANG, X., LONG, Q., WEN, X., ZHOU, Y., LI, L., "Influence of pH on the stability characteristics of nanofluids". In Proceedings of the Symposium on Photonics and Optoelectronics (SOPO '09), Cilt, 2009.
- [68] KARAMI, M., M.A.A. BAHABADI, S. DELFANIA. GHOZATLOO, "A new application of carbon nanotubes nanofluid as working fluid of low-temperature direct absorption solar collector". Solar Energy Materials and Solar Cells, Cilt 121. 114-118, 2014.
- [69] YADAV, D.M.C. KIM, "The onset of transient soret-driven buoyancy convection in nanoparticle suspensions with particle-concentration-dependent viscosity in a porous medium". Journal of Porous Media, Cilt 18. 4, 369-378, 2015.
- [70] FARBOD, M., R. KOUHPEYMANI ASLA.R. NOGHREH ABADI, "Morphology dependence of thermal and rheological properties of oil-based nanofluids of CuO nanostructures". Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, Cilt 474. 71-75, 2015.
- [71] SADEGHI, R., ETEMAD, S. G., KESHAVARZI, E., HAGHSHENASFARD, M., "Investigation of alumina nanofluid stability by UV-vis spectrum". Microfluidics and Nanofluidics, Cilt 18. 5-6, 1023-1030, 2014.
- [72] LEE, J., K. HANJ. KOO, "A novel method to evaluate dispersion stability of nanofluids". International Journal of Heat and Mass Transfer, Cilt 70. 421-429, 2014.
- [73] PATRICIA, A.C., ROSA, M., LEONOR H., RAUL, M. C., LUIS C., ENRIQUE, J., "Increment of specific heat capacity of solar salt with SiO<sub>2</sub> nanoparticles". Nanoscale Research Letters, Cilt 9. 1, 582, 2014.
- [74] CABALEIRO, D., COLLA, L., AGRESTI, F., LUGO, L., FEDELE, L., "Transport properties and heat transfer coefficients of ZnO/(ethylene glycol+water) nanofluids". International Journal of Heat and Mass Transfer, Cilt 89. 433-443, 2015.
- [75] CHOI, S.U.S. "Nanofluid Technology: Current Status and Future Research", in Korea-U.S. Technical Conference on Strategic Technologies Conference. 1998.
- [76] NAZIFIFARD, M., NEMATOLLAHI, M., JAFARPUR, K., SUH, K. Y., "Numerical Simulation of Water-

- Based Alumina Nanofluid in Subchannel Geometry". Science and Technology of Nuclear Installations, Cilt 2012. 1-12, 2012.
- [77] SINGH, A.K., "Thermal Conductivity of Nanofluids". Defence Science Journal, Cilt 58. 5, 600-607, 2008.
- [78] <http://apps.webofknowledge.com>. (Erişim Tarihi 28.09.2017)
- [79] XIA, G.D., LIU, R., WANG, J., DU, M., "The characteristics of convective heat transfer in microchannel heat sinks using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and TiO<sub>2</sub> nanofluids". International Communications in Heat and Mass Transfer, Cilt 76. 256-264, 2016.
- [80] MOSTAFIZUR, R.M., M.H.U. BHUIYAN, R. SAIDURA.R. ABDUL AZIZ, "Thermal conductivity variation for methanol based nanofluids". International Journal of Heat and Mass Transfer, Cilt 76. 350-356, 2014.
- [81] LIU, M.S., LIN, C.C.M., HUANG, I.T., WANG, C.C., "Enhancement of thermal conductivity with carbon nanotube for nanofluids". International Communications in Heat and Mass Transfer, Cilt 32. 9, 1202-1210, 2005.
- [82] S.K. DAS, N.P., P. THIESEN, W. ROETZEL, "Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for Nanofluids". J. Heat Transfer, Cilt 125. 567– 574, 2003.
- [83] YANG, L., DU, K., NIU, X., LI, Y., ZHANG, Y., "An experimental and theoretical study of the influence of surfactant on the preparation and stability of ammonia-water nanofluids". International Journal of Refrigeration, Cilt 34. 8, 1741-1748, 2011.
- [84] WITHARANA, S., PALABIYIK, I., MUSINA, Z., DING, Y., "Stability of glycol nanofluids — The theory and experiment". Powder Technology, Cilt 239. 72-77, 2013.
- [85] WANG, X.J., LI, X.F., "Influence of pH on Nanofluids' Viscosity and Thermal Conductivity". Energy Fuels Cilt 23. 2684–2689, 2009.
- [86] CHIESA, M., DAS, S.K., "Experimental investigation of the dielectric and cooling performance of colloidal suspensions in insulating media". Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, Cilt 335. 1-3, 88-97, 2009.
- [87] SHAHRUL, I.M., MAHBUBUL, I. M., SAIDUR, R., SABRI, M.F.M., "Experimental investigation on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–W, SiO<sub>2</sub>–W and ZnO–W nanofluids and their application in a shell and tube heat exchanger". International Journal of Heat and Mass Transfer, Cilt 97. 547-558, 2016.
- [88] SARSAM, W.S., AMIRI, A., ZUBIR, M.N.M., YARMAND, H., KAZI, S. N., BADARUDIN, A., "Stability and thermophysical properties of water-based nanofluids containing triethanolamine-treated graphene nanoplatelets with different specific surface areas". Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, Cilt 500. 17-31, 2016.
- [89] LI, X., ZOU, G., ZHOU, L., QI, A., "Experimental study on the thermo-physical properties of diathermic oil based SiC nanofluids for high temperature applications". International Journal of Heat and Mass Transfer, Cilt 97. 631-637, 2016.
- [90] SIDIK, N.A.C., H.A. MOHAMMED, O.A. ALAWIS. SAMION, "A review on preparation methods and challenges of nanofluids". International Communications in Heat and Mass Transfer, Cilt 54. 115-125, 2014.
- [91] EASTMAN, J.A., CHOI, S. U. S., LI, S., YU, W., THOMPSON, L.J., "Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles". Applied Physics Letters, Cilt 78. 6, 2001.
- [92] CHANDRASEKAR, M., SURESH, S., SENTHILKUMAR, T., "Mechanisms proposed through experimental investigations on thermophysical properties and forced convective heat transfer characteristics of various nanofluids – A review". Renewable and Sustainable Energy Reviews, Cilt 16. 6, 3917-3938, 2012.
- [93] LEE, J.-H., K.S. HWANG, S.P. JANG, B.H. LEE, J.H. KIM, S.U.S. CHOIC.J. CHOI, "Effective viscosities and thermal conductivities of aqueous nanofluids containing low volume concentrations of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles". International Journal of Heat and Mass Transfer, Cilt 51. 11-12, 2651-2656, 2008.
- [94] ZHANG, X., GU, H., FUJII, M., "Experimental Study on the Effective Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Nanofluids". International Journal of Thermophysics, Cilt 27. 2, 569-580, 2006.
- [95] XIA, G., JIANG, H., LIU, R., ZHAI, Y., "Effects of surfactant on the stability and thermal conductivity of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/de-ionized water nanofluids". International Journal of Thermal Sciences, Cilt 84. 118-124, 2014.
- [96] XIE, H., WANG, J., XI, T., LIU, Y., AI, F., "Dependence of the thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture on the base fluid". JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE LETTERS, Cilt 21. 1469-1471, 2002.
- [97] YU, W., E.V. TIMOFEEVA, D. SINGH, D.M. FRANCER.K. SMITH, "Investigations of heat transfer of copper-in-Therminol 59 nanofluids". International Journal of Heat and Mass Transfer, Cilt 64. 1196-1204, 2013.
- [98] LIU, M.S., LIN, M.M.C.,HUANG, I.T., WANG, C.C., "Enhancement of Thermal Conductivity with CuO

*NANOAKIŞKANLARDA KARARLILIĞIN ISI TRANSFERİNİ İYİLEŞTİRME AÇISINDAN ÖNEMİ*

- for Nanofluids". Chem. Eng. Technol. , Cilt 29. 72-77, 2006.
- [99] DRZAZGA, M., DZIDO, G., LEMANOWICZ, M., GIERCZYCKI, A., " Influence of nonionic surfactant on nanofluid properties". 14th European Conference on Mixing, Cilt, 2012.
- [100] JAHANSHAHI, M., HOSSEINIZADEH, S. F., ALIPANAH, M., DEHGHANI, A., VAKILINEJAD, G. R., "Numerical simulation of free convection based on experimental measured conductivity in a square cavity using Water/SiO<sub>2</sub> nanofluid". International Communications in Heat and Mass Transfer, Cilt 37. 6, 687-694, 2010.
- [101] SONG, Y.Y., BHADESHIA, H. K. D. H., SUH, D.W., "Stability of stainless-steel nanoparticle and water mixtures". Powder Technology, Cilt 272. 34-44, 2015.
- [102] DING, Y., H. ALIAS, D. WENR.A. WILLIAMS, "Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids)". International Journal of Heat and Mass Transfer, Cilt 49. 1-2, 240-250, 2006.
- [103] GODSON, L., B. RAJA, D.M. LALS. WONGWISES, "Experimental Investigation on the Thermal Conductivity and Viscosity of Silver-Deionized Water Nanofluid". Experimental Heat Transfer, Cilt 23. 4, 317-332, 2010.
- [104] SHARMA, P., BAEK, I.H, CHO, T., PARK, S., LEE, K.B., "Enhancement of thermal conductivity of ethylene glycol based silver nanofluids". Powder Technology