

NANOAKIŞKANLAR ve GÜNEŞ ENERJİLİ SICAK SU SİSTEMLERİNDE KULLANIMI

İbrahim ATMACA^{1*}
Sezgi KOÇAK SOYLU²
Osman Samet ÖZDEMİR¹
Meltem ASİLTÜRK³

¹Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü

²Antalya Bilim Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü

³Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü

*atmaca@akdeniz.edu.tr

ÖZET

Nanoakışkanlar en genel tanımıyla; nanometrik boyuttaki (1-100 nm) katı partiküllerin bir temel akışkan içerisinde dağıtılması ile oluşturulan akışkanlardır. Böyle bir yapı oluşturmaktaki amaç, ısı iletkenliği temel akışkanın ısı iletkenliğinden daha yüksek olan bir nanomalzemeyi (metal, metal oksit veya yüksek yüzey alanlı karbonik yapılar) akışkan içerisine karıştırarak, akışkanın ısı iletkenliğini arttırmaktır. Günümüzde bu akışkanın birçok ısı uygulama alanı bilimsel olarak çalışılmaktadır. Bu çalışmada nanoakışkan sentezi ve nanoakışkanların hazırlama yöntemleri, nanoakışkanların termofiziksel özellikleri ve nanoakışkan uygulama alanları ve özellikle de güneş enerjili sistemleride kullanımını üzerine literatür araştırması yapılmış olup, bu akışkanların gerek güneş enerjili sistemler gerekse diğer ısı sistemlerde ticari olarak kullanılabilmesi için araştırılması gereken konular ve aşılması gereken problemler tespit edilmeye çalışılmıştır.

Anahtar kelimeler: Nanoakışkan, Güneş, Uygulama alanları

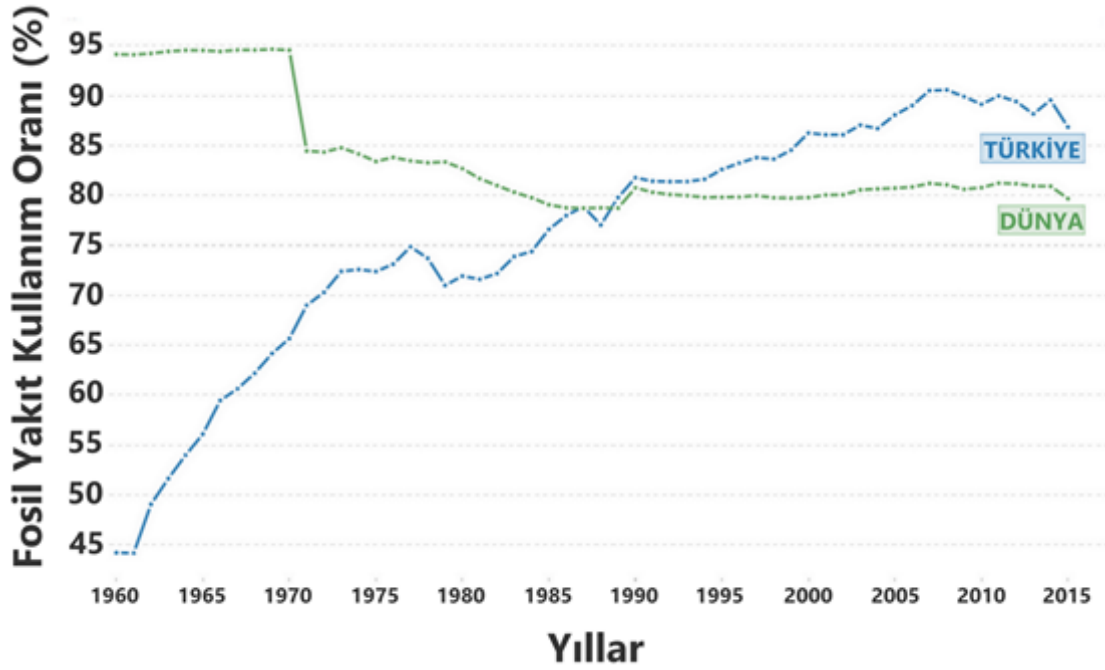
ABSTRACT

Nanofluids are the fluids formed by dispersing the solid particles of nanometric size (1-100 nm) in a base fluid. The purpose of forming such a structure is to increase the thermal conductivity of the fluid by mixing a nanomaterial (metal, metal oxide or high surface area carbonic structures) into the fluid whose thermal conductivity is higher than the thermal conductivity of the base fluid. Today, many applications of this fluid are scientifically studied. In this study, nano-fluid synthesis and preparation methods of nano-fluids, thermophysical properties of nano-fluids and application areas of nano-fluids and especially the use of solar energy systems have been investigated in the literature. In order to use these fluids commercially in both solar energy systems and other thermal systems, the issues that need to be investigated and the problems to be overcome have been tried to be determined.

Key words: Nanofluid, Solar, Application areas

1. GİRİŞ

Dünya toplumundaki enerji ihtiyacı hızlı nüfus artış oranı ile birlikte her geçen gün artmaktadır. Fosil yakıtların kullanımı atmosferde bulunan karbon miktarının artışını tetiklemekle birlikte küresel ısınmaya yol açmaktadır. Bu nedenle, fosil yakıtların sebep olduğu olumsuz etkileri önlemek için son yıllarda tüm dünya genelinde yenilenebilir enerjiye olan ilgi sürekli artmaktadır. Günümüzde IEA'nın verilerine göre dünya genelinde üretilen enerjinin yaklaşık yüzde 79'u fosil yakıtlardan elde edilmektedir. Türkiye'de ise fosil yakıtlardan elde edilen enerjinin oranı yaklaşık %86 olarak verilmiştir (International Energy Agency 2014). Şekil 1.'de fosil yakıtlardan elde edilen enerjinin dünyada ve ülkemizde değişimi yer almaktadır. Geçmiş 50 yılda dünyada fosil yakıtların kullanımı nispeten azalırken, ülkemizde 1960 yılından 2015 yılına kadar artış eğilimi görülmüştür. Karbon salınımı dışında ülkemiz fosil yakıtlar bakımından zengin olmaması sebebiyle tükettiği fosil yakıtların büyük bir bölümünü ithal etmektedir. Dünya genelindeki fosil yakıtlardan kaçınma eğilimine ülkemizin de ayak uydurması, yakın gelecekte yenilenebilir enerji kaynaklarının faydalı kullanımı ile mümkün olacaktır. Yenilenebilir enerjiden elde edilen enerjinin artması hem çevresel açıdan hem de ekonomik açıdan ülkemiz için önem arz etmektedir.



Şekil 1. Türkiye ve dünyada fosil yakıt kullanımı oranlarının yıllara göre değişimi (IEA 2014)

Hidroelektrik, jeotermal enerji, dalga enerjisi, rüzgâr enerjisi, biyoenerji gibi yenilenebilir enerji kaynağı türlerinin yanında güneş enerjisi küresel bazda kolay bulunabilen ve tükenmesi ön görülmeyen bir enerji türüdür. Güneş enerji sistemleri temel olarak güneşin ışınım enerjisini ısı enerjisiye dönüştürmeye yarayan sistemlerdir. Güneşten alınan enerji bir tür ısı eşanjörü ile kullanım amacına göre çeşitli şekillerde kullanılabilir. Güneş enerjisi,

temelde evlerde sıcak su ihtiyacı, ortam ısıtması, yemek pişirme, elektrik üretimi, sokak aydınlatması gibi pek çok alanda aktif olarak kullanılmaktadır.

Genel anlamda güneş ısı enerjisi sistemleri yüzeyde meydana gelen güneş ışınımını emer ve ısıyı içinden akan bir başka akışkana aktarır. Hemen hemen her ısı sistemde olduğu gibi güneş kolektörlerinde de ısı verim oldukça büyük önem taşır. Bu sistemlerde ısı veriminin artırılması için panelin önü, arkası ve sistemin geri kalanından ısı kaybı yalıtım ile azaltılabilir. Verim artışını sağlamak için yapılabilecek çözümlerden bir diğeri de ısı transfer yüzey alanını arttırmaktır. Akışkanın ısı çekeceği yüzey alanının artırılması verimi de olumlu etkilemektedir (Ho vd. 2005). Tüm bu tasarımsal kriterler en optimum koşula getirildiği durumda sistemin verimini ısı transferi akışkanının termofiziksel özellikleri etkiler. Akışkanın debisi, hızı, ısı iletim katsayısı kolektör verimini etkileyen temel parametrelerdendir. Güneş enerjisi sistemlerinde çalışma akışkanının birim zamanda sistemden çekebildiği ısı miktarını arttırmak sistemin verimini de arttırmak anlamına gelmektedir. Bu sebeple farklı pek çok kullanım alanı da bulunan nanoakışkanlar, güneş enerjisi sistemlerinde de kullanılarak sistem veriminde pozitif bir değişim amaçlanmaktadır (Tyagi vd. 2009).

Nanoakışkanlar, ısı transferinde kullanılan akışkanların ısı iletkenliğinin artırılması amacıyla içerisine nanopartiküller eklenerek elde edilen seyreltik süspansiyonlardır. Nanoakışkanlarda kullanılan partiküllerin boyutları genellikle 1-100 nm aralığındadır (Choi ve Eastman 1995). Sıvıların içerisinde katı parçacıklar karıştırılması fikri öncelerden düşünülmüş bir fikirdir. Ancak partikül hazırlanması teknolojik imkanlar gerektirdiğinden nano boyutlardaki partiküllerin hazırlanarak nanoakışkan ismini alması ancak son dönemde mümkün olmuştur (Maxwell 1881; Abdelrahman 1979; Gupte vd. 1995).

Nanoakışkanlar genel olarak metrenin yüz binde birinden daha küçük (100 nm) boyuttaki nanopartiküllerin, nispeten daha düşük ısı iletme sahip çalışma akışkanları ile karıştırılması sonucu oluşan süspansiyonların genel adıdır. Nanopartiküllerin bağl olarak çok küçük olması akışkanın küçük, hatta mikro ölçekteki kanallarda dahi kabul edilebilir basınç düşüşleri ile akmasına olanak tanır (Jang ve Choi 2006). Oluşan yeni karışım ile nispeten daha düşük ısı iletkenliğe sahip olan çalışma akışkanının akışkanlık özelliğinden ve daha yüksek ısı iletim katsayısına sahip olan nanopartiküllerin ısıyı iletme özelliğinden faydalanılır. Nanoakışkanlarda bakır, altın, gümüş gibi metallerin yanı sıra alüminyum oksit, bizmut oksit, silisyum dioksit, zirkonyum dioksit gibi metal oksitleri de kullanılabilir. Ayrıca grafen, tek veya çok duvarlı karbon nanotüpler gibi karbon yapıları da nanoakışkanlarda kullanılır.

Seramik nanoakışkanlar; Tarihi en eski nanoakışkan türleri arasında seramik nanoakışkanlar yer alır. Xuan ve Li (2000) tarafından yapılan çalışmada CuO ve Al₂O₃ esaslı nanoakışkanlar kullanılarak baz akışkanın nanopartikül eklenmemiş haline oranla ısı iletkenliğinin önemli ölçüde arttığı sonucuna varılmıştır. Seramik nanoakışkanlar ayrıca, oksitli veya oksitsiz olmalarına göre kategorize edilebilir. Bunların başlıcaları; Al₂O₃, CuO, TiO₂, SiO₂, Fe₂O₃ olarak gösterilebilir (Das vd. 2006).

Metalik nanoakışkanlar; Nanopartikül olarak saf metallerin kullanıldığı nanoakışkanlar metalik nanoakışkanlar olarak anılır. Ag, Al, Fe, Cu esaslı nanopartikül içeren nanoakışkanlar metalik nanoakışkanlardır. Yapılan çalışmalarda aynı hacimsel orandaki metal oksit nanoakışkanlara kıyasla daha yüksek ısı iletkenlik sağladıkları saptanmıştır (Ali vd. 2011). Ayrıca bazı metal alaşımları da nanoakışkanlarda kullanılmaktadır (Nithyadevi vd. 2017).

Polimer ve karbon nanotüp nanoakışkanlar; Polimer ve karbon nanotüpler ile yapılan çalışmalar ile, bu tür nanoakışkanların metal veya metal oksit esaslı nanoakışkanlara oranla aynı hacimsel oranda çok daha yüksek ısı iletkenlik sağladığı sonucuna varılmıştır. Karbon nanotüplerinin yaklaşık 3000 W/mK'den daha yüksek ısı iletkenliğe sahip olduğu göz önüne alındığında bu artışın nedeni anlaşılmaktadır. Nanoakışkanlar üzerinde yapılan çalışmalar en boy oranının ısı iletkenlik üzerinde etkili olduğunu göstermiştir. Nanotüpler, diğer nanoakışkanlar arasında en boy oranı konusunda ısı iletkenliğe en çok katkıda bulunacak yapıya sahiptir (Das vd. 2006).

Sahip oldukları yüksek ısı iletkenlik, bu akışkanları birçok farklı mühendislik alanındaki uygulamalar ve özellikle ısı transferini iyileştirmeye yönelik çalışmalar için çekici hale getirmektedir. Nanoakışkanların yüksek ısı iletkenliklerinin yanında, farklı uygulamalara göre değiştirilebilen özellikleri de en önemli avantajlarından biridir. Nanoakışkanlar üzerine yapılan araştırmalar 2000'li yıllardan itibaren ivme kazanmış olup uygulandığı alanlarda hala incelenmesi gereken kısımlar bulunan ve henüz uygulamalarının yapılmadığı birçok sistemin bulunduğu bir araştırma konusudur.

Bu çalışmada nanoakışkan sentezi ve nanoakışkanların hazırlama yöntemleri, nanoakışkanların termofiziksel özellikleri ve nanoakışkan uygulama alanları ve özellikle de güneş enerjili sistemlerde kullanımı üzerine literatür araştırması yapılmış olup, bu akışkanların gerek güneş enerjili sistemler gerekse diğer ısı sistemlerde ticari olarak kullanılabilmesi için araştırılması gereken konular ve aşılması gereken problemler tespit edilmeye çalışılmıştır.

2. NANOAKIŞKANLAR

2.1. Nanopartikül sentezi ve nanoakışkan hazırlama yöntemleri

Nanoakışkanların ısı transfer kabiliyetlerini belirleyen termofiziksel özellikleri hem temel akışkanın hem de partiküllerin özelliklerine bağlıdır ve bu özellikler malzemelerin üretim yöntemlerinden doğrudan etkilenir. Nanopartiküller genellikle katı bir çekirdek ve bu çekirdeğin yüzeyine kimyasal olarak bağlanmış veya adsorbe edilmiş şekilde bulunan bir kabuk veya kaplamadan oluşur. Çekirdek kısım; ısı, elektriksel, manyetik ve optik gibi temel özellikleri belirlerken kaplama; nanopartikülün kararlılığını ve hidrofilik veya hidrofobik davranışını belirler (Bigdeli vd. 2016). Kararlı akışkanların hazırlanması nanoakışkanların ısı uygulamaları için büyük önem taşır. Nanoakışkanlar yalnızca basit bir katı – sıvı karışımı değildir. Nanometre boyutundaki katı partiküllerin akışkan içerisinde iyi bir şekilde dağılması gerekir. Doğru şekilde hazırlanmayan nanoakışkanlar katı – sıvı formunda çok fazlı ısı transfer davranışı gösterebilecekleri gibi, aşırı kümeleşerek nanometrik boyutlardan

mikrometrik boyutlara doğru büyüyerek nanoakışkan davranışından da çıkabilirler. Akışkanda oluşabilecek bu kararsızlıklar sistem içerisinde tortu oluşumuna neden olarak borular, pompalar ve diğer sistem elemanlarına zarar verebilirler (Wang ve Mujumdar 2007). Nanoakışkanların hazırlanmasında genellikle tercih edilen iki yöntem aşağıda kısaca açıklanmıştır.

i. Tek aşamalı metot

Bu metotta nanopartiküllerin sentezi ve temel akışkan içerisinde disperse edilme işlemi eş zamanlı olarak gerçekleştirilir. Yani partiküller doğrudan temel akışkan içerisinde sentezlenir. Yöntemin avantajı, sentezlenen parçacıkların oksidasyonuna engel olmasıdır. Bu nedenle metalik partiküller için uygun olduğu söylenebilir. Aynı zamanda kurutma, depolama, taşıma ve partiküllerin dispersiyon aşamaları olmadığından hem maliyetler azalır hem de kümeleşme sorunu daha az olur ve akışkanın kararlılığı artar (Ganvir vd. 2017). Ancak bu metot ile üretilen nanoakışkan miktarı sınırlıdır. Çünkü yalnızca düşük buhar basıncına sahip akışkanlar bu proses ile nanoakışkan hazırlamaya uygundur.

ii. İki aşamalı metot

İki aşamalı metotta partiküller ayrı olarak sentezlenir ve temel akışkana istenilen oranlarda fiziksel olarak eklenerek nanoakışkanlar oluşturulur. Nanopartiküllerin sentezinde kimyasal buhar çökeltme, soy gaz yoğunlaştırma, fiziksel gaz çökeltme veya mekanik alaşımlama gibi metotlar kullanılır. Bu yöntemlerin biri ile elde edilen nano tozlar, temel akışkan içerisinde disperse edilir. Bu metot genellikle seramik esaslı (çeşitli oksitler ve karbürler) malzemeler için tercih edilir. Mevcut durumda iki aşamalı yaklaşım büyük miktarlarda nanoakışkan üretimi için daha düşük maliyetlidir (Bigdeli vd. 2016).

2.2. Nanoakışkanların termofiziksel özellikleri

Isı transfer analizlerinde akışkanların termofiziksel özellikleri performansın belirlenmesinde önemli yer tutar. Bu durum klasik akışkanlarda olduğu gibi nanoakışkanlarda da geçerlidir. Akışkanların Reynolds Re, Prandtl (Pr) ve Nusselt (Nu) sayıları termofiziksel özelliklerinin fonksiyonudur ve bu boyutsuz sayılar akışkanların taşınım katsayılarını doğrudan etkiler. Bu duruma ek olarak bir sistemde belirli bir ısı transferi sonucu meydana gelen basınç kayıpları ve sistemde ihtiyaç duyulan pompalama güçleri de kullanılan akışkanın Re sayısına, dolayısıyla da termofiziksel özelliklerine bağlıdır.

Nanoakışkanlarda termofiziksel özellikler genel olarak kullanılan nanopartikülün kimyasal yapısı, büyüklüğü, şekli, temel akışkan içerisindeki miktarı ile beraber kullanılan temel akışkanın özelliklerine bağlı olarak değişir. Bu özellikler aynı zamanda geleneksel ısı transfer akışkanlarında olduğu gibi sıcaklığa da bağlıdır. Dolayısıyla nanoakışkanlar ile yapılan ısı analizlerin sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için, bu akışkanların termofiziksel özelliklerinin hangi parametrelere bağlı olduğu ve akışkan özelliklerinin ilgili parametrelere nasıl etkilendiğinin bilinmesi önemlidir.

i. Isıl iletkenlik

Isıl iletkenlik akışkanların öncelikli olarak belirlenen termofiziksel özelliğidir ve temel akışkana göre ısı iletkenliğinin artırılması nanoakışkanların hazırlanmasında ana prensiptir. Nanoakışkanların yüksek ısı iletkenliğine sahip olmasına neden olan en temel mekanizmanın, partiküllerin “*Brownian Hareketi*” olduğu düşünülmektedir (Jang ve Choi 2004). Brownian hareketi, bir sıvıda yüzen veya asılı duran mikroskobik parçacıkların etraflarını çevreleyen ortamın moleküllerinden kaynaklanan rastgele hareketidir. Bu konuyu 1827 yılında ilk kez çalışan İskoçyalı botanikçi Robert Brown’ın ismiyle anılmaktadır. Bu mekanizma temel akışkan içerisindeki nanopartiküller düşünüldüğünde oldukça benzerdir. İkinci olarak ara yüzey katmanlarının (yani nanokatmanların) ısı iletkenlik üzerinde etkin bir mekanizma olduğu tespit edilmiştir. Bu katmanlar partiküllerin yüzeyine yakın yerlerde bulunurlar ve nanopartikül ile akışkan kütlesi arasında bir ısı köprü oluştururlar (Gupta vd. 2017). Birçok farklı parametreye bağlı olarak ısı iletkenliğinin hangi mertebelere kadar artırılacağı değişmektedir. Bu parametreler; partikül ve temel akışkan malzemesi, partikül boyut ve şekli, sıcaklık, asitlik değeri (pH), kümeleşme ve ek kimyasallar olarak sıralanabilir. Nanopartiküller 100 nanometrenin altında olacak şekilde farklı boyutlarda sentezlenebilirler. Nanopartikül boyutunun ısı iletkenlik üzerine etkisinin araştırıldığı çalışmalarda (Paul vd. 2010; Teng vd. 2010), partikül boyutu küçüldükçe iletkenliğin arttığı gözlenmiştir. Nanopartiküllerin boyutu kadar şekilleri de ısı iletkenliklerini önemli oranda etkiler. Argonne Ulusal Laboratuvarı tarafından gerçekleştirilen proje kapsamında şekil etkisi detaylı olarak araştırılmış, ısı iletkenliğinin nanopartikül şekline bağlı olarak değiştiği ancak değişimin klasik teorilerin tahmin ettiği şekilde olmadığı belirlenmiştir. Çalışmada karşılaştırılan nanopartikül şekilleri, deneysel ısı iletkenliklerine göre yüksekten düşüğe doğru şu şekilde sıralanmıştır; silindir, tuğla, yassı tanecik \approx yassı silindir (Timofeeva vd. 2009). Nanoakışkanların sıcaklığı, nanopartiküllerin Brownian hareketini ve kümeleşme davranışlarını etkilediğinden, ısı iletkenliklerini de doğrudan etkiler. Parametrenin önemi nedeniyle bu alanda birçok deneysel ve sayısal çalışma gerçekleştirilmiş ve nanoakışkanların sıcaklığa karşı ısı iletkenlikleri anlaşılmasına çalışılmıştır. Oldukça geniş bir literatürün olduğu bu konu, başlı başına bir araştırma alanıdır. İlgili çalışmaların derlendiği bir çalışmada bir araya getirilen bilgiler incelendiğinde (Gupta vd. 2017), bazı çalışmalarda sıcaklık artışının ısı iletkenliği arttırdığı, bazılarında ise olumsuz etki ettiği görülmüştür. Yani sıcaklık etkisi, literatürde henüz üzerine ortak yargıya varılamamış ve değerlendirilmesi gereken bir parametredir. Nanoakışkanların pH değerlerinin çözeltinin kararlılığını ve termofiziksel özelliklerini etkilediği bilinmektedir. Partiküllerin aşırı kümeleşmesini önlemek adına genellikle akışkanların izoelektrik noktadan uzak olmasını sağlayan bir pH değerine sahip olması istenir. Nanoakışkanların uzun dönem kararlılıklarını sağlamak ve nanopartiküllerin çökmesini engellemek üzere kullanılan çeşitli kimyasallar, çözeltinin kimyasal ve fiziksel yapısını değiştirerek özelliklerini önemli oranda etkilemektedir. Kullanılan yüzey etken maddelerin konsantrasyonuna bağlı olarak akışkanların ısı iletkenlikleri önemli oranda etkilenir. Kullanılan nanopartikülün ve temel akışkanın çeşidine göre doğru kimyasalın uygun miktarda eklenmesi önemlidir.

Literatürdeki çalışmalarda, yukarıda açıklanan parametrelere ilişkin zaman zaman bazı çelişkiler ve açıklanması zor durumlar ile de karşılaşmıştır. Örneğin partikül boyutunun

küçülmesine bağı olarak bazı çalışmalarda artan katı-sıvı ara yüzey etkilerinden dolayı iletkenliğin azaldığı gözlenirken, diğer çalışmalarda partiküllerin rastgele hareketindeki artış gerekçe gösterilerek ısıl iletkenlikte de artış olduğu iddia edilmiştir. (Bigdeli vd. 2016). Bu durumların belirtilmesinde de yarar olduğu düşünülmektedir. Çalışmalarda bu ve benzeri çelişkilerin olmasının nedeni, nanoakışkan teknolojisinin gelişmekte olan bir konu olması ve nanopartiküllerin fiziksel davranışlarının henüz çözülememiş olmasıdır. Fiziksel mekanizmanın tam olarak anlaşılabilmesi, elde edilen sonuçların da çoğu zaman iyi anlaşılabilmesine yol açmaktadır.

ii. Viskozite

Viskozite, ısı transfer uygulamaları için bir diğer önemli özelliktir. Akışkanların neden olduğu basınç düşüşleri ve bu akışkanları pompalamak için gerekli pompalama güçleri, akışkanların viskozitelerine bağlıdır. Nanoakışkanların viskoziteleri, boyut, şekil ve katı fazın konsantrasyonu gibi partikül özellikleri ile beraber kullanılan temel akışkanın özellikleri ve sıcaklık gibi ortam şartlarından da etkilenir. Sayılan özellikler içerisinde nanopartikül konsantrasyonu, viskoziteyi doğrudan etkilediği için en önemli parametrelerden bir tanesidir. 10 nm'den daha büyük nanopartiküllerden oluşturulan nanoakışkanlarda konsantrasyon arttıkça viskozite artmakta, sıcaklık yükseldikçe ise düşmektedir. Bununla birlikte nanoakışkanın sahip olduğu viskozite değeri her zaman temel akışkana kıyasla daha yüksek olmaktadır. Belirli bir konsantrasyon için nanopartiküllerin boyutlarının küçültülmesi, daha yüksek katı yüzey alanı oluşturduğu için viskoziteyi arttırmaktadır. Akışkanların viskoziteleri üzerinde önemli etkileri olan kayma gerilmesi davranışları incelendiğinde, %4'den daha az konsantrasyona sahip nanoakışkanların Newton tipi akışkanlar oldukları belirlenmiştir (Azmi vd. 2016). İlgili özelliklerin akışkan viskozitesini ne yönde değiştirdiği üzerine yapılan çalışmalarda gerek farklı nanoakışkan hazırlama teknikleri gerekse farklı ölçüm yöntemleri kullanılmasına bağlı olarak sonuçlarda çelişkiler bulunmaktadır. Örneğin bazı araştırmacılar partikül boyutunun viskoziteyi arttırdığını söylerken bir grup araştırmacı ise bunun tam tersini iddia etmektedir (Bigdeli vd. 2016).

iii. Yoğunluk

Yoğunluk, akışkanların Re ve Nu sayıları ile sürtünme faktörleri ve buna bağlı olarak basınç kayıplarını ilgilendiren bir özelliktir. Nanoakışkanların yoğunluklarının belirlenmesinde kullanılan eşitlik ilk kez Pak ve Cho (1998) tarafından önerilmiştir. Araştırmacıların önerdiği eşitlik, nanoakışkanın yoğunluğunu akışkan içerisindeki katı partikül ve temel akışkan konsantrasyonlarına bağlı olarak belirlenmesi prensibine dayanır. Katıların yoğunluğunun sıvılardan fazla olduğu düşünüldüğünde, akışkan içerisindeki nanopartikül konsantrasyonun artması, doğal olarak süspansiyonun da yoğunluğunu arttıracaktır. Bu durum çeşitli deneysel çalışmalarda yapılan ölçümler ile de desteklenmiştir (Vajjha vd. 2009). Nanoakışkanların yoğunluğu üzerine literatürde daha fazla araştırma yapılmasına ihtiyaç vardır. Pak ve Cho (1998)'in önerdiği karışım teorisinin hangi durumlar için en uyumlu sonuçları verdiği daha detaylı olarak araştırılmalı ve diğer fiziksel özelliklerin yoğunluğa olan etkisi de bu teoriye dahil edilmelidir.

iv. Özgül ısı

Viskozite ve ısı iletkenlik ile kıyaslandığında, akışkanların özgül ısıları belki de araştırmacılar tarafından en az ilgi gören konulardan biri olmuştur. Ancak bu özellik nanoakışkanların soğutma uygulamalarındaki performansları konusunda çok önemli bilgiler verir. Nanoakışkanların özgül ısıları, diğeri termofiziksel özelliklerine benzer olarak nanopartiküllerin boyut ve şekil özellikleri ile partikül malzemesinden ve nanoakışkanın konsantrasyonu ve sıcaklığından etkilenir. Nanoakışkanların özgül ısılarının araştırıldığı birçok teorik ve deneysel çalışma mevcuttur. İlgili çalışmalardan derlenerek farklı özelliklerin özgül ısı üzerine etkisinin karşılaştırmalı olarak açıklandığı Shahrul vd. (2014)'e ait değerli çalışmada, çeşitli parametrelerin etkisi ile ilgili önemli bilgiler sunulmuştur. İlgili çalışmaya göre, nanopartikül konsantrasyonunun artması özgül ısıyı düşürmekte, aynı nanoakışkan için artan nanopartikül çapı ve dağıtıcı kimyasallar eklenmesi ise özgül ısıyı arttırmaktadır. Özgül ısı üzerine sıcaklığın etkisi ise literatürde yine oldukça tartışmalı bir durum olarak kalmış ve tek bir cümle ile açıklanamayacak kadar karmaşık bir yapıya sahiptir. Ancak araştırmacılar özetle řu yargıya varabilmişlerdir; eğer nanopartiküllerin özgül ısısı temel akışkandan daha düşükse, o zaman sıcaklık artışı nanoakışkanın özgül ısısını düşürecektir. Tersini durumda ise özgül ısıda artış beklenmelidir.

2.3. Nanoakışkanların uygulama alanları

Nanoakışkanlar, geleneksel ısı transfer akışkanlarına kıyasla gelişmiş termofiziksel özellikleri ve ısı transfer performansları ile birçok farklı ısı transfer uygulamasında kullanılmak üzere araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Bu uygulamalardan bazıları nanoakışkanların ilgili kullanım alanına özgü sağlayabilecekleri faydalar ile beraber aşağıda örneklenmeye çalışılmıştır.

i. Güneş enerjisi uygulamaları; güneş enerjisinin ısı ı uygulamalarında nanoakışkan kullanımı, fosil yakıt kullanımına bağı yaşanan problemler dolayısı ile alternatif enerji kaynaklarına yönelimin bir sonucu olarak ortaya çıkan yöntemlerden biridir. Nanoakışkanlar güneş enerjisinin ısı ı uygulamalarında çoğunlukla güneş kolektörlerinde ve güneş enerjili sıcak su sistemlerinde tercih edilmiştir. Bunun haricinde birkaç enerji depolama ve güneş pili uygulaması da literatürde mevcuttur. Güneş kolektörleri ile yapılan uygulamalarda nanoakışkan kullanımının ısı ı performansı arttırdığı tespit edilmiştir. Ekonomik ve çevresel bakış açısı ile değerlendirildiğinde bu uygulamanın CO_2 emisyonlarını düşürmeye yardımcı olduğu, yıllık elektrik ve yakıt tasarruflarını arttırdığı görülmüştür (Mahian vd. 2013).

ii. Elektronik soğutma; elektronik uygulamalarda soğutma sisteminin performansını arttırırken bunun için gerekli yüzey alanını azaltmak önemli bir zorluktur. Bu ihtiyaç, işlemci güçlerinin sürekli olarak artması ancak elektronik cihazların buna karşın küçültülmeye çalışılmasından doğmaktadır. Bu kısıtlı koşullar altında nanoakışkanlar, yüksek ısı iletim özellikleri sayesinde önemli bir alternatif sunmaktadır. Ancak elektronik soğutmada kullanılmak üzere nanoakışkan seçimi yapılırken bazı noktalara dikkat edilmelidir. Seçilecek akışkan kararlı olmalı, soğutma sistemi üzerinde korozif bir etkisi olmamalı, daha iyi ısı iletkenliğe sahip olmalı ve ekonomik olarak kullanılabilir olmalıdır (Ganvir vd. 2017).

iii. *Uzay ve savunma sanayi*; yüksek teknoloji uygulamaların olduğu bu alanda nanoteknolojiye sıklıkla rastlanmaktadır. Büyük oranda soğutma ihtiyacına sahip bazı güç elektronikleri, enerji silahları ve askeri cihazlar bu gruba girer. Nanoakışkanlar bu ihtiyacın giderilmesi konusunda önemli bir potansiyele sahiptir. Bazı durumlarda savunma sanayi uygulamalarında nanoakışkan kullanımı, birden fazla fonksiyonu yerine getirmek üzere tasarlanmıştır. Örneğin bilinen özelliklerinin yanında enerji depolama veya kimyasal reaksiyonlar sırasında enerji toplama gibi (Yu vd. 2007) uygulamalar söylenebilir.

iv. *Kameralar, mikro cihazlar ve ekranlar*; yeni yapılan çalışmalarda nanoakışkanların elektrik alanlara maruz kaldıklarında daha yüksek performans ve kararlılık gösterdikleri görülmüştür (Saidur vd. 2011). Bu özelliğin, yeni tip minyatür kamera lenslerinin, cep telefonu ekranlarının ve diğer bazı küçük ölçekli sıvı yapıdaki cihazların geliştirilmesine imkân sağlayacağı düşünülmektedir. Bu çalışmalar, nanoakışkanların mikro veya nano boyuttaki cihazların tahrik düzeneklerinde kullanılabilme imkanını ortaya koymuştur.

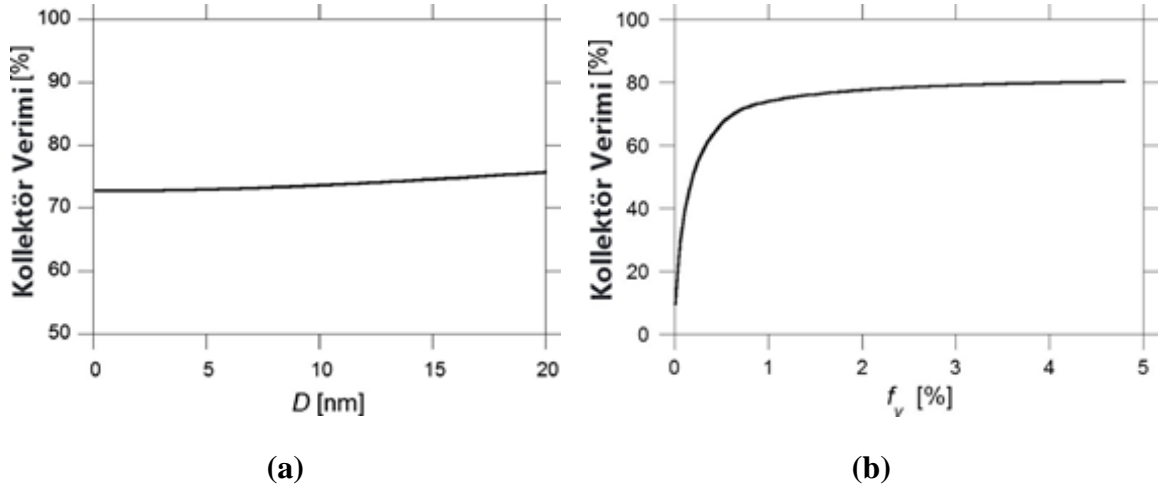
v. *Talaşlı imalatta soğutma sıvısı olarak*; talaşlı imalat esnasında açığa çıkan ısı ve sürtünme, kullanılan takımların ömrü açısından her zaman önemli bir problem olmuştur. Kesme sıvıları bu sorunu çözmek için kullanılan geleneksel yöntemlerdir. Ancak bu sıvıların çevreye verdikleri zararlar kullanımlarının sınırlandırılmasına neden olmuştur. Bu noktada nanoakışkanlar, ısı transfer karakteristikleri ve yağlama özellikleri ile bu problemin çözümünde alternatif bir yöntem olarak ortaya çıkmaktadır (Srikant vd. 2009).

Burada bahsedilen uygulama alanlarının dışında, farklı ısı değiştiricilerinin kullanıldığı ısıtma ve soğutma uygulamalarında da geleneksel ısı transfer akışkanlarının yerine nanoakışkanların kullanılması mümkündür.

3. GÜNEŞ ENERJİSİNDE NANOAKIŞKAN UYGULAMALARI

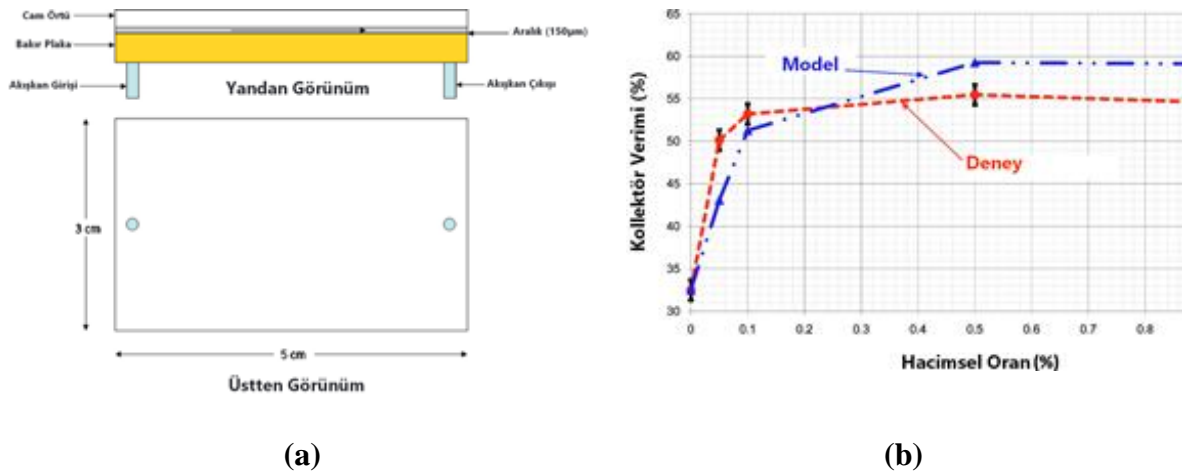
Güneş enerji sistemlerinde genellikle güneş ışınımını ısıya dönüştürmek için yutucu yüzeyler kullanılmaktadır. Bu yüzeyler ile ısı transfer sıvısı arasındaki ısı direnci mevcuttur. Bu da sistemin veriminin düşmesine sebep olan etkenlerden bir tanesidir. Güneş enerjili sistemlerde çeşitli nanoakışkanlar kullanılarak yapılan çalışmalar mevcuttur.

Tyagi vd. (2009) tarafından doğrudan absorpsiyonlu güneş kollektörü üzerinde alüminyum oksit nanopartikülleri ve su karışımından oluşan nanoakışkan kullanarak teorik bir çalışma yapılmıştır. Şekil 2-a'da 1 ile 20 nm aralığında partikül büyüklüğünün değişimine bağlı olarak kollektör veriminin değişimi görülmektedir. Kollektör veriminin, partikül boyutu ile doğru orantılı arttığı saptanmıştır. Kollektör verimindeki büyümenin hacim oranı ile ilişkisi Şekil 2-b'deki gibi tespit edilmiştir. Düşük hacimsel oranlarda, hacimsel orana bağlı verim artışı hızlı bir şekilde olurken yaklaşık %1'den sonra verim artışı düşüşe geçerek verim yaklaşık olarak sabit kalmıştır. Aynı zamanda %0.8 sabit hacimsel oranda nanopartikül boyutlarını değiştirerek yapılan çalışmada partikül boyutunun artması ile ısı transfer kapasitesinin az da olsa arttığı tespit edilmiştir (Tyagi vd. 2009).



Şekil 2. a) Kollektör veriminin partikül boyutuna (D) göre değişimi ($f_v = \%0.8$); b) Kollektör veriminin hacimsel orana (f_v) göre değişimi ($D = 5$ nm) (Tyagi vd. 2009)

Bir başka çalışmada karbon nanotüp, grafit ve gümüş gibi partiküller içeren farklı nanoakışkanların performansı deneysel ve analitik olarak incelenmiştir. Deneysel inceleme için doğrudan absorpsiyonlu bir güneş enerji sistemi kullanılmıştır. Böylece nanoakışkanın doğrudan güneş ışığını absorbe etmesi amaçlanmıştır. Şekil 3-a'da şematik olarak gösterilen sistemde 5 cm x 3 cm boyutundaki dikdörtgen yüzey ile 150 μ m derinliğinde bir kanal kullanılmıştır. Ayrıca güneş spektrumunu simüle etme için özel parabolik enkandesan bir lamba kullanılmıştır. kollektör verimi değerlendirildiğinde yaklaşık %0.5 hacimsel orandan sonra verim artışının yavaşladığı (Şekil 3-b) tespit edilmiştir (Otanicar vd. 2010).



Şekil 3. a) Mikro güneş kollektörünün şematik gösterimi; b) 30 nm grafit küreleri kullanılarak yapılan deneysel ve teorik çalışmaların karşılaştırılması (Otanicar vd. 2010)

Tiwari vd. (2013) tarafından yapılan teorik bir çalışmada nanoakışkanların düz plakalı güneş kollektörü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmada düz plakalı güneş kollektöründe

Al_2O_3 esaslı nanoakışkanın kullanıldığı ve ısı transfer akışkanı olarak su kullanıldığı durumlardaki verimler karşılaştırılmıştır. Dakikada 0.5, 1, 1.5 ve 2 litre olacak şekilde üzere dört farklı hacimsel debide iki akışkanın karşılaştırılması sağlanmış ve verimin akışkan tipi ve debiye göre nasıl değiştiği gösterilmiştir. Yüksek debide performans artışları kaydedilmiştir. Bu çalışmada incelenen diğer bir parametre ise baz akışkandaki Al_2O_3 partiküllerinin hacimsel oranının verime etkisidir. %0.5, %1, %1.5 ve %2 hacimsel oranda yapılan karşılaştırmalarda en yüksek performans artışının %1.5 hacimsel orandaki Al_2O_3 nanoakışkanı ile elde edildiği sonucuna varılmıştır. Bu çalışmada kWh başına salınan kilogram karbondioksit miktarında azalma tespit edilmiş ve nanoakışkan kullanılan sistemde geleneksel sisteme göre yaklaşık %31 verim artışı elde edilmiştir.

Bir diğer çalışmada su- TiO_2 ve su-CNT (karbon nanotüp) içeren nanoakışkan performansları vakum tüplü güneş enerji sistemi ile güneşli ve bulutlu hava şartlarında karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda CNT-su sisteminin ışıyım-ısı dönüşümü karakteristikleri bakımından daha uygun olduğu saptanmıştır (He vd. 2011). ZnO-su, Al_2O_3 -su, MgO-su gibi nanoakışkanlar ile çeşitli hacimsel oranlarda performans artışı çalışmaları da yapılmıştır. Sonuç olarak %0.2'lik ZnO-su nanoakışkanının en iyi sonuç verdiği sonucuna ulaşılmıştır (Li vd. 2011).

Nanoakışkan tabanlı odaklı parabolik güneş enerji sistemi ile geleneksel odaklı parabolik güneş enerji sisteminin aynı şartlar altında karşılaştırılmasını amaçlayan çalışmada %0.05 alüminyum esaslı, Therminol VP-1 baz akışkanı ile aynı hava şartlarında çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda geleneksel sistemlere göre %5 ile %10 arasında verim artışı elde edilmiştir (Khullar vd. 2012).

Yousefi vd. (2012) tarafından yapılan çalışmada Al_2O_3 -su nanoakışkanının düz plakalı güneş enerji sisteminin ısıl performansı üzerine etkileri incelenmiştir. %0.2 ile %0.4 oranında, 15 nm boyutunda partiküller ile yapılan bu çalışmada Triton X-100 sürfaktanının da verim üzerine etkileri gözlemlenmiştir. Yousefi vd. (2012) tarafından yapılan bir diğer çalışmada ise pH değişiminin ısı transfer performansı üzerine etkileri tespit edilmiştir. Bu çalışmada çok duvarlı karbon nanotüp-su nanoakışkanı kullanılarak 3.5, 6.5 ve 9.5 pH değerinde Triton X-100 eklenerek verim artışı araştırılmıştır.

TiO_2 parçacıkları içeren nanoakışkan kullanılarak çift fazlı kapalı bir ısıtıcının ısıl performans artışı üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada 40 cm buharlaşma, 40 cm yoğunlaşma ve 20 cm adyabatik bölgeleri içeren 1 metre boyunda bir bakır boru ısı borusu olarak kullanılmıştır. Üç farklı güçte ve üç farklı debide yapılan çalışmalar ile nanoakışkan kullanımının ısıl performans etkileri araştırılmıştır. Çeşitli debi ve ısıtıcı güçlerinde yapılan çalışmalarda elde edilen en iyi sonuçta 200 W güç ve 5 g/s kütleli debideki soğutma suyunun kullanıldığı durumda %16.5 verim artışı elde edilmiştir (Çiftçi vd. 2016). Said vd. (2015) düz plakalı bir güneş enerji sisteminde %0.1 ile %0.3 arasında değişen hacimsel oranda ve 0.5 kg/dk ile 1.5 kg/dk arasında değişen debide TiO_2 -su nanoakışkanı kullanarak ısı transfer performansı üzerine çalışma yapmışlardır. Bu çalışma sonucunda %0.1 hacimsel oran ve 0.5 kg/dk debide %76.6 verim artışı elde edilmiştir. Mahendran vd. (2011), vakum tüplü güneş enerji

sisteminde TiO₂-su nanoakışkanı kullanarak ısı transfer kapasitesi performansı üzerine çalışmışlardır. Zorlanmış taşınım ile yapılan çalışmada 30-50 nm boyutlarındaki TiO₂ nanopartikülü kullanılan sistemde %16.7 oranında performans artışı gözlemlenmiştir.

TiO₂-su nanoakışkanının ısı performans etkilerinin araştırıldığı bir çalışmada %2 TiO₂/saf su karışımı kullanılmıştır. Ardından karışıma %0.2 Triton X-100 süfaktanı eklenerek çalışma tamamlanmıştır. Düz plakalı güneş kolektörü ile zorlanmış taşınım şartları altında yapılan çalışmada TiO₂-su nanoakışkanı için en yüksek verim yaklaşık %48 olurken, saf su kullanıldığı durumda en yüksek anlık verim yaklaşık %36 olarak elde edilmiştir (Kılıç vd. 2018).

Teoride oldukça faydalı olan nanoakışkanların uzun vadede metaller üzerindeki aşındırıcı etkileri hakkında da bir çalışma yapılmıştır. Söz konusu çalışmada alüminyum oksit esaslı nanoakışkanın bakır, paslanmaz çelik, alüminyum gibi metaller üzerindeki etkileri araştırılmıştır. 50 nm boyutundaki alüminyum oksit nanopartiküllerinin kullanıldığı bu çalışmada baz akışkan olarak su tercih edilmiştir. Çalışma ile Al₂O₃ esaslı nanoakışkanın paslanmaz çelik üzerindeki etkilerinin ihmal edilebilir olsa da bakır ve alüminyum üzerindeki ciddi etkileri olabileceği sonucuna ulaşılmıştır (Fotowat vd. 2017).

Ag esaslı bir nanoakışkan kullanılarak düz plakalı güneş kolektörünün ısı performansının teorik olarak analiz edildiği bir çalışma da mevcuttur. Baz akışkan olarak su kullanılan bu çalışmada giriş ve çıkış sıcaklıklarının, kütsel debinin, güneş ışınımı miktarının ve ısı transfer katsayısının ısı verime etkileri üzerinde çalışılmıştır. Re sayısının 5000 ile 25000 aralığında ve yapay sinir ağı metodu ile yapılan teorik çalışmalarda yaklaşık 10000 Reynolds'a kadar sistemin verimli çalıştığı sonucuna varılmıştır. Yapılan teorik çalışma deneysel verilerle karşılaştırıldığında gerçek verilere yaklaşık yüzde 2 fark ile yaklaşıldığı görülmüştür (Tomy vd. 2016).

Verma vd. (2017) tarafından yapılan bir çalışmada düz plakalı güneş enerji sisteminde nanoakışkan kullanımının etkileri araştırılmıştır. SiO₂, CuO, TiO₂, grafen, Al₂O₃ ve MWCNT (çok duvarlı karbon nanotüp) esaslı nanoakışkanlar kullanılarak yapılan deneysel çalışmada çalışma akışkanı olarak saf su kullanılmıştır. Bu çalışmada, kullanılan nanoakışkanların hacimsel oranlarının da verim üzerine etkisi olduğu sonucuna varılmıştır. Yaklaşık %0.75 hacimsel orana kadar nanoakışkan kullanılan tüm sistemlerde saf su kullanılan sisteme göre ciddi verim artışı sağlanırken, bu orandan sonra verimlerin yaklaşık sabit kaldığı görülmüştür. Başta SiO₂, grafit ve Al₂O₃ olmak üzere pek çok nanoakışkanın %1.25 hacimsel orandan sonra verim düşüşüne sebep olduğu görülmüştür. Bu çalışma ile kullanılacak nanoakışkanın hacimsel oranının verim ile doğrudan bir ilişkisi olmadığına dikkat çekilmiştir.

4. SONUÇ

Yapılan literatür değerlendirmesinden görüleceği üzere nanometrik boyuttaki (1-100 nm) katı partiküllerin bir temel akışkan içerisinde dağıtılması ile oluşturulan nanoakışkanların

kullanım alanlarına yönelik birçok alternatif mevcut olduğu gibi bu akışkanların gerek güneş enerjili sistemler gerekse diğer ısı sistemlerinde ticari olarak kullanılabilmesi için araştırılması gereken birçok konu ve aşılması gereken problemler bulunmaktadır. Öncelikle bu alanda yapılan çalışmalarda karşılaşılan çelişkilerin kaynağı araştırılmalı ve benzer parametrelerin farklı durumlar için neden farklı sonuçlar verdiği üzerinde durulmalıdır. Literatürdeki çalışmalarda çelişkiler bulunan durumların, partiküllerin ve akışkanların iyi bir şekilde karakterizasyonunun yapılmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Eksik veya yanlış yöntemler kullanılarak yapılan karakterizasyon işlemleri, nanoakışkan davranışının açıklanmasında da hatalı yorumlamalara yol açmaktadır.

Termofiziksel özelliklerin tespiti konusunda tüm akışkanları kapsayan genel bir teorik model henüz oluşturulamamış ve klasik yöntemler nanoakışkanların termofiziksel özelliklerini belirlemede kullanılamamaktadır. Bu nedenle akışkanların artan ısı transfer performanslarını da genel ifadeler ile açıklamak mümkün olmamaktadır. Çeşitli mekanizmalar bu durumu açıklamak üzere önerilmiş olsa da termofiziksel özelliklerin değişimi üzerine sistematik bir açıklama getirilememiştir. Bu nedenle nanoakışkanlar ile yapılan çalışmalarda ilgili özelliklerin deneysel tespiti gereklidir. Ancak yapılan çalışmalarda prosesler detaylı olarak sunulması halinde, sistematik çözümlerin de zamanla gelişme imkânı olabilir. Bu süreçte ilgili özellikler için bir özellik veri tabanının oluşması, araştırmaların hızlanması ve belirli bir standartta yapılması açısından faydalı olacaktır.

Nanoakışkanların artan viskozitelerine bağlı olarak kullanıldıkları sistemlerde neden oldukları basınç düşüşleri ve artan pompalama güçleri önemli bir sorundur. Bu artışlar incelenen sisteme bağlı olarak ısı performansındaki artıştan daha az olduğunda nanoakışkanın kullanılabilir olduğu varsayılmaktadır. Ancak bu durum her sistem için geçerli olmamakta ve büyük potansiyele sahip olan nanoakışkanların kullanılmasına engel olmaktadır. Bu nedenle nanoakışkanların viskozite artışlarını belirli limitlerde tutacak şekilde sentez ve/veya nanoakışkan hazırlama yöntemlerinin geliştirilmesine ve bu alanlarda yapılacak çalışmalara ihtiyaç vardır.

Düşük maliyetli, uzun dönem kararlılıkları iyi olan ve tekrarlanabilir nanoakışkanların büyük miktarlarda üretilmesi için gerekli teknolojilerin geliştirilmesi, bu alandaki en önemli eksikliklerden bir tanesidir. Çünkü mevcut yöntemler, ticari boyutta nanopartikül sentezi ve nanoakışkan üretimi için uygun değildir.

Nanoakışkanların tribolojik özelliklerinin araştırılması, bu akışkanların kullanıldıkları sistemlerdeki uzun dönem etkilerinin bilinmesi açısından önemlidir. Özellikle metal ve/veya metal oksit nanopartikülleri kullanılarak hazırlanan nanoakışkanların kullanıldıkları sistemlerde metal yüzeyler üzerindeki sürtünmeden doğan olası aşınma ve korozyon etkilerinin değerlendirilmesi ve olası hasarlara karşı önlemler alınması, daha fazla araştırılması gereken bir konudur.

Gerek güneş enerjili sistemler gerekse diğer ısı sistemlerinde nanoakışkan kullanımının ticari hale gelebilmesi için bahsi geçen tüm çelişki ve problemlerin giderilmiş olmasında fayda görülmektedir.

KAYNAKLAR

- Abdelrahman, M., P. Fumeaux and P. Suter. 1979. Study of Solid-Gas-Suspensions Used for Direct Absorption of Concentrated Solar Radiation. *Solar Energy* 22 (1): 45–48. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(79\)90058-6](https://doi.org/10.1016/0038-092X(79)90058-6).
- Ali, F.M. and W. Mahmood Mat Yunus. 2011. Study of the Effect of Volume Fraction Concentration and Particle Materials on Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Nanofluids. *Japanese Journal of Applied Physics*. <https://doi.org/10.1143/JJAP.50.085201>.
- Azmi, W. H., Sharma, K. V., Mamat, R., Najafi, G. and Mohamad, M. S. 2016. The enhancement of effective thermal conductivity and effective dynamic viscosity of nanofluids - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1046–1058. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.081>
- Bigdeli, M. B., Fasano, M., Cardellini, A., Chiavazzo, E. and Asinari, P. 2016. A review on the heat and mass transfer phenomena in nanofluid coolants with special focus on automotive applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1615–1633. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.027>
- Choi S. U. S. and Eastman J. A. 1995. Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles. in Proceedings ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition San Francisco, CA, USA.
- Çiftçi, E., Sözen, A., Karaman E. 2016 TiO₂ İçeren Nanoakışkan Kullanımının Isı Borusu Performansına Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi, *Politeknik* 13 367-376.
- Das, S.K., Stephen U.S. Choi and Hrishikesh E. Patel. 2006. Heat Transfer in Nanofluids - A Review. *Heat Transfer Engineering*. <https://doi.org/10.1080/01457630600904593>.
- Fotowat, S., Askar, S., Ismail, M. and Amir Fartaj. 2017. A Study on Corrosion Effects of a Water Based Nanofluid for Enhanced Thermal Energy Applications. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2017.02.001>.
- Ganvir, R. B., Walke, P. V. and Kriplani, V. M. 2017. Heat transfer characteristics in nanofluid-A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75(November 2016), 451–460. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.010>
- Gupta, M., Singh, V., Kumar, R. and Said, Z. 2017. A review on thermophysical properties of nanofluids and heat transfer applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74(March), 638–670. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.073>
- Gupte, S.K., Suresh G. Advani and Pablo Huq. 1995. Role of Micro-Convection Due to Non-Affine Motion of Particles in a Mono-Disperse Suspension. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(95\)00060-M](https://doi.org/10.1016/0017-9310(95)00060-M).
- He, Y., Cong Qi, Yanwei Hu, Bin Qin, Fengchen Li and Yulong Ding. 2011. Lattice Boltzmann Simulation of Alumina-Water Nanofluid in a Square Cavity. *Nanoscale Research Letters*. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-6-184>.

Ho, C. D., H. M. Yeh and R. C. Wang. 2005. Heat-Transfer Enhancement in Double-Pass Flat-Plate Solar Air Heaters with Recycle. *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.01.006>.

International Energy Agency, 2014. <https://www.iea.org/tcp/fossilfuels/> [Son erişim tarihi: 09.09.2018]

Jang, S. P. and Choi, S. U. S. 2004. Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids, 84(21), 4316–4318. <https://doi.org/10.1063/1.1756684>

Jang, S.P. and Stephen U S Choi. 2006. Cooling Performance of a Microchannel Heat Sink with Nanofluids. *Applied Thermal Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.02.036>.

Khullar, V., Himanshu Tyagi, Patrick E. Phelan, Todd P. Otanicar, Harjit Singh and Robert A. Taylor. 2012. Solar Energy Harvesting Using Nanofluids-Based Concentrating Solar Collector. In ASME 2012 Third International Conference on Micro/Nanoscale Heat and Mass Transfer. <https://doi.org/10.1115/MNHMT2012-75329>.

Kılıç, F., Menlik T. and Sözen A. 2018. Effect of Titanium Dioxide/Water Nanofluid Use on Thermal Performance of the Flat Plate Solar Collector. *Solar Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.02.002>.

Li, Y., Hua Qing Xie, Wei Yu and Jing Li. 2011. Investigation on Heat Transfer Performances of Nanofluids in Solar Collector. *Materials Science Forum*. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.694.33>.

Mahendran, M., Lee. G.C, K.V Sharma and A. Shahrani. 2011. Performance Evaluation of Evacuated Tube Solar Collector Using Water-Based Titanium Oxide (TiO₂) Nanofluid. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences (JMES)*.

Mahian, O., Kianifar, A., Kalogirou, S. A., Pop, I. and Wongwises, S. 2013. A review of the applications of nanofluids in solar energy. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 57(2), 582–594.

Maxwell, J. C. 1881. A treatise on electricity and magnetism: Oxford Univ.

Nithyadevi, N., P. Gayathri and N. Sandeep. 2017. Boundary Stratum Exploration of Unsteady 3D MHD Stagnation Point Flow of Al–Cu Water Nanofluid. *International Journal of Mechanical Sciences*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.08.003>.

Otanicar, T.P., Patrick E. Phelan, Ravi S. Prasher, Gary Rosengarten and Robert A. Taylor. 2010. Nanofluid-Based Direct Absorption Solar Collector. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 2 (3). <https://doi.org/10.1063/1.3429737>.

Pak, B. C. and Cho, Y. I. 1998. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer*, 11(2), 151–170. <https://doi.org/10.1080/08916159808946559>

Paul, G., Pal, T. and Manna, I. 2010. Thermo-physical property measurement of nano-gold dispersed water based nanofluids prepared by chemical precipitation technique. *Journal of*

Colloid and Interface Science, 349(1), 434–437. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2010.05.086>

Said, Z., Sabiha, M. A., R. Saidur, A. Hepbasli, N. A. Rahim, S. Mekhilef and T. A. Ward. 2015. Performance Enhancement of a Flat Plate Solar Collector Using Titanium Dioxide Nanofluid and Polyethylene Glycol Dispersant. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.01.007>.

Saidur, R., Leong, K. Y. and Mohammad, H. A. 2011. A review on applications and challenges of nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1646–1668. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.035>

Shahrul, I. M., Mahbulul, I. M., Khaleduzzaman, S. S., Saidur, R. and Sabri, M. F. M. 2014. A comparative review on the specific heat of nanofluids for energy perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 88–98. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.081>

Srikant, R. R., Rao, D. N., Subrahmanyam, M. S. and Krishna, V. P. 2009. Applicability of cutting fluids with nanoparticle inclusion as coolants in machining. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 223(2), 221–225. <https://doi.org/10.1243/13506501JET463>

Teng, T. P., Hung, Y. H., Teng, T. C., Mo, H. E. and Hsu, H. G. 2010. The effect of alumina/water nanofluid particle size on thermal conductivity. *Applied Thermal Engineering*, 30(14–15), 2213–2218.

Timofeeva, E., Smith, D., Yu, W., Routbort, J. and Singh, D. 2009. Nanofluid development for engine cooling systems.

Tiwari, A.K., Pradyumna Ghosh and Jahar Sarkar. 2013. Solar Water Heating Using Nanofluids - a Comprehensive Overview and Environmental Impact Analysis. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering An ISO Certified Int. Journal*. www.ijetae.com.

Tomy, A.M., Nizar Ahammed, M. S.P. Subathra and Lazarus Godson Asirvatham. 2016. Analysing the Performance of a Flat Plate Solar Collector with Silver/Water Nanofluid Using Artificial Neural Network. *Procedia Computer Science* 93 (September): 33–40. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.07.178> .

Tyagi, H., Phelan P. and Ravi Prasher. 2009. Predicted Efficiency of a Low-Temperature Nanofluid-Based Direct Absorption Solar Collector. *Journal of Solar Energy Engineering* 131 (4): 041004. <https://doi.org/10.1115/1.3197562>.

Vajjha, R. S., Das, D. K. and Mahagaonkar, B. M. 2009. Density measurement of different nanofluids and their comparison with theory. *Petroleum Science and Technology*, 27(6), 612–624. <https://doi.org/10.1080/10916460701857714>

Verma, S.K., Arun Kumar Tiwari and Durg Singh Chauhan. 2017. Experimental Evaluation of Flat Plate Solar Collector Using Nanofluids. *Energy Conversion and Management*. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.12.037>.

Wang, X. Q. and Mujumdar, A. S. 2007. Heat transfer characteristics of nanofluids: a review. *International Journal of Thermal Sciences*, 46(1), 1–19.

<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2006.06.010>

Xuan, Y. and Qiang Li. 2000 Heat transfer enhancement of nanofluids. *International Journal of heat and fluid flow* 21.1, 58-64. [https://doi.org/10.1016/S0142-727X\(99\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0142-727X(99)00067-3).

Yousefi, T., Veysi, F., Shojaeizadeh E. and Sirus Zinadini. 2012. An Experimental Investigation on the Effect of MWCNT-H₂O Nanofluid on the Efficiency of Flat-Plate Solar Collectors. *Experimental Thermal and Fluid Science*. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2012.01.025>.

Yousefi, T., Veysi, F., Shojaeizadeh E. and Sirus Zinadini. 2012. An Experimental Investigation on the Effect of Al₂O₃-H₂O Nanofluid on the Efficiency of Flat-Plate Solar Collectors. *Renewable Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.08.056>.

Yu, W., France, D., Choi, S. and Routbort, J. 2007. Review and assessment of nanofluid technology for transportation and other applications. *Renewable Energy*, Medium: ED. <https://doi.org/10.2172/919327>