



## PARÇACIK BOYUTUNA BAĞLI FÜME SİLİKA BAZLI KESME İLE KALINLAŞAN AKIŞKANLARIN REOLOJİK DAVRANIŞI

Mehmet Fahri SARAÇ<sup>1\*</sup>, Seçil PEKER<sup>2</sup>, Kerim YAPICI<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

<sup>2</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

Füme silika,  
Polietilen glikol,  
Nanoakışkan,  
Reoloji.

### Öz

Üç farklı ortalama parçacık boyutuna sahip (8, 12 ve 18nm) füme silikaların PEG200 taban akışkanına dört farklı kütleli fraksiyon aralığında (%5, 10, 15 ve 20) dağıtılması ile elde edilen süspansiyon akışkanlarının reolojik (viskozite, kritik kayma hızı, depolama modülü ve kayıp modülleri) davranışları incelenmiştir. Doğrusal ve doğrusal olmayan viskoelastik ölçümlerden elde edilen bulgular da, kütlece %5 fraksiyonda hazırlanan süspansiyonların Newton kuralına uyduğunu ayrıca artan fraksiyona bağlı olarak viskoziteninde arttığı gözlemlenmiştir. Düşük kütleli fraksiyonlarda nanoparçacık boyutu ile kaymadan dolayı viskozite kalınlaşmasına etki ettiği gözlemlenirken, kütleli fraksiyon artışı ile bu etkinin azaldığı da görülmüştür. Ayrıca tüm parçacık boyutu ve fraksiyonlarda depolama ve kayıp modülüslerinin salınım gerilimleri incelendiğinde süspansiyonların viskoz davranış özelliği göstermiştir. Bu bulgular daha güçlü ve hafif kesme ile kalınlaşan süspansiyonların hazırlanmasını ve balistik esaslı çalışmalarda kullanılması açısından önem arz etmektedir.

## RHEOLOGICAL BEHAVIOR OF PARTICLE SIZE DEPENDENT FUMED SILICA BASED SHEAR THICKENING FLUIDS

### Keywords

Fumed silica,  
Polyethylene glycol,  
Nanofluid,  
Rheology.

### Abstract

The rheological properties (viscosity, critical shear rate, storage modulus and loss modulus) of suspension fluids produced by dispersing fume silicates with three different mean particle sizes (8, 12 and 18 nm) in PEG200 base fluid at four different fractional ranges (5, 10, 15 and 20%) were investigated. In the findings obtained from linear and nonlinear viscoelastic measurements, it was observed that the suspensions prepared in 5% fraction increased in viscosity due to increasing fraction. It is observed that in low mass fractions the nanoparticle size affects the viscosity thickening due to the slip, this effect leads to be reduced by the increase of the mass fraction. Furthermore, when the storage modulus / loss modulus vs strain in all particle sizes and fractions were examined, it was observed that for all suspensions have viscous behavior characteristics. This findings are important for the preparation of suspensions with stronger and light-weight shear thickening fluids and for use in ballistic related works.

### Alıntı / Cite

Saraç, M. F., Peker, S., Yapıcı, K., (2018) Parçacık Boyutuna Bağlı Füme Silika Bazlı Kesme ile Kalınlaşan Akışkanların Reolojik Davranışı, *Journal of Engineering Sciences and Design*, 6(4), 665-671.

### Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

M.F. Saraç, 0000-0002-0760-5569  
S. Peker, 0000-0003-4438-0896  
K. Yapıcı, 0000-0002-3902-9375

### Makale Süreci / Article Process

|                                  |            |
|----------------------------------|------------|
| Başvuru Tarihi / Submission Date | 14.05.2018 |
| Revizyon Tarihi / Revision Date  | 14.08.2018 |
| Kabul Tarihi / Accepted Date     | 12.10.2018 |
| Yayın Tarihi / Published Date    | 10.12.2018 |

\* İlgili yazar / Corresponding author: fahrisarac@sdu.edu.tr

## 1. Giriş

Nanoakışkan, nanoparçacıkların genel de Newton kuralına uyan su, etilen glikol, motor yağı gibi taban akışkanlarına belli bir fraksiyonda dağıtılmasına denilmektedir (Choi, 2009). Nanoakışkanlar mühendislik ve endüstriyel uygulamalar da sıklıkla kullanılması ile beraber daha çok termal davranışlarının incelenmesi üzerine son yıllarda yoğunlaşmıştır (Wong ve Leon, 2010).

Nanoakışkanların reolojik davranışlarının incelenmesi daha verimli süreç tasarımlarının gerçekleştirilmesine ve nanoparçacıkların akışkan ortamda maruz kalacağı farklı koşullardaki davranışlarının bilinmesine yardımcı olacaktır (Morrison, 2001). Özellikle parçacıkların süspansiyon içerisindeki fraksiyonu, parçacık boyut dağılımı ve şekli parçacıkların süspansiyon içerisindeki davranışını etkilemektedir (Morrison, 2001; Kawaguchi, 2017; Jiang ve Zukoski, 2012; Maranzano ve Wagner, 2001).

Nanoakışkanlar kaymadan dolayı viskoziteleri kalınlaşan ve incelen olmak üzere iki farklı reolojik davranış özelliği sergilemektedir. Nanoparçacıkların boyutu, şekli, konsantrasyonu ve kullanılan taban akışkanları ile doğrudan ilişkilidir (Moriani vd., 2016; Khandavalli ve Rothstein, 2014; Genovese, 2012).

Farklı kimyasal bileşenlerde ve boyutlardaki parçacıkların farklı hacimsel fraksiyonlarında kritik kayma hızı davranışları üzerine yapılan çalışmalar da, özellikle titanyum oksit, kalsiyum karbonat, mısır nişastası, polivinil alkol-sodyum borat karışımları, polimetakrilatların sulu çözeltileri ve poli (alkil metakrilatlar), arap zamkı ve borat iyonları ve guar zamkı ve borat gibi malzemeler kullanılmaktadır (Crawford vd., 2013; Ding vd., 2011).

Bununla beraber, su, etilen glikol (EG) ve polietilen glikol (PEG) dahil olmak üzere birçok taşıyıcı akışkanlar da reolojik davranışlar üzerine yapılan çalışmalarda kullanılmıştır. Kararlı olması, yüksek kaynama noktası ve yanıcı olmayan özellikleri nedeniyle, EG veya PEG, kesme ile kalınlaşan akışkanlarda en yaygın olarak kullanılan taşıyıcı sıvı olarak bilinmektedir (Ding vd., 2011). Özellikle silika nanopartiküllerin EG veya PEG solüsyonlar içerisindeki yüksek dağılımı ve gösterdiği benzersiz viskozite davranışları ile de diğer kesme ile kalınlaşan nanoakışkanlardan reolojik davranışları itibari ile ayrılmaktadır.

Füme silika ile polietilen glikol arasındaki dispersiyon stabilitesi ve füme silika tozlarının yüzey karakteristikleri ve hacim fraksiyonunun bir fonksiyonu olarak reolojik özellikleri birkaç araştırmacı tarafından irdelenmiştir (Khandavalli ve Rothstein, 2014; Warren vd., 2015). Ayrıca farklı silika bazlı (koloidal, partikül v.b.) kesme ile kalınlaşan

nanoakışkanlarda ilave katkı malzemeler eklenerek (grafen oksit, silisyum karbür v.b.) nanoakışkanın viskozite, kritik kayma hızı, depolama modülü ve kayıp modülünde iyileştirmeler göstermiştir (Huang vd., 2015; Gurgun vd., 2016a; Duvarcı, 2009; Gurgun vd., 2016b).

Kesme ile kalınlaşan akışkanların temel olarak reolojik davranışlarının incelenmesi ve çıkan sonuçlar bu nanoakışkanların ticari uygulamalarda kullanımını arttırmıştır (Peter vd., 2015). Özellikle sıvı vücut zırhı olarak kullanılan kesme ile kalınlaşan akışkan esaslı kumaşlar ile gelen darbeye karşı enerjiyi saptırma, dağıtma veya söndürme yeteneği ile savunma sanayi alanında yaygın olarak kullanımını sağlamıştır.

Son 10 yılda, balistik kumaşlara emdirilmiş nanoakışkanlar üzerine yapılan çalışmalar bu anlamda yoğunluk kazanmıştır (Fischer vd., 2016; Gurgun vd., 2017a; Cao vd., 2017; Lee vd., 2003). Nanoakışkan emdirilmiş balistik kumaşlarda balistik direncin artırılması temel olarak hedeflenmiş (Zhang vd., 2008; Decker vd., 2007; Yıldız, 2013) olup yüksek kayma oranlarına sahip nanoakışkanların fraksiyonlarının belirlenmesi önem kazanmıştır.

Bu çalışmada polietilen glikol esaslı farklı yüzey alanlara sahip koloidal füme silika partiküllerin akışkan viskozitesi, parçacık yüklemeleri (fraksiyonları) ve partikül morfolojisinin reolojik davranışları üzerine etkisi incelenmiştir. Parçacık kütle fraksiyonları üzerinde ağırlıkça %20'ye kadar düşük molekül ağırlıklı polietilen glikol (PEG 200) içinde dağıtılmış koloidal füme silika (SiO<sub>2</sub>) parçacıkları içeren nanoakışkanların reolojik özelliklerinin kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Bu çalışma sonucunda, hangi parçacık boyut ve fraksiyonda süspansiyonun Newton olmayan davranış göstereceği belirlenerek ballistik kompozitlere alternatif sıvı vücut zırhı süspansiyonun hazırlanmasına olanak verecektir.

## 2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışma kapsamında üç farklı yüzey alana sahip füme silika nanoparçacıklar ticari olarak Cabot Corporation'dan temin edilmiştir. Nanoakışkan solüsyonu olarak kaynama noktası yüksek ve kararlı bir taban akışkanı olan düşük moleküler ağırlığa (200gr/mol) sahip Polietilen glikol (Merck-PEG200) kullanılmıştır (Gurgun vd., 2017b). Tablo 1 füme silika parçacıklarına ait teknik özellikleri verilmiştir.

**Tablo 1.** Füme Silikaların özellikleri (Boyle vd., 2004; Sacca vd., 2007)

| Tekli Partikül Boyutu (nm) | Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> / g) | Yoğunluk (g/ cm <sup>3</sup> ) |
|----------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| 18                         | 150                              | 1,10                           |
| 12                         | 200                              | 1,47                           |

|   |     |     |
|---|-----|-----|
| 8 | 300 | 2,2 |
|---|-----|-----|

Üç farklı ortalama partikül boyutuna sahip füme silikalar, dört farklı % 5, % 10, % 15 ve % 20 konsantrasyonda numuneler olarak hazırlanmıştır.

Nanoakışkanların hazırlanması iki aşama da gerçekleştirilmiştir. İlk olarak füme silikaların polietilen glikol içerisinde etkili dağılımını sağlamak için etil alkol solventi içerisinde 750 W ultrasonik güce ve 20 kHz frekansa sahip (Sonic VCX-750, US) prob tipi sonifikasyon ile 2 saat boyunca karıştırılıp homojen bir karışım elde edilmiştir. Her numune için gerekli silika nanopartikülleri miktarı aşağıda verilen Eşitlik 1'e göre hesaplanmıştır.

$$\frac{x}{100} = \frac{m_{\text{silika}}}{m_{\text{silika}} + m_{\text{peg}}} \quad (1)$$

Söz konusu formülde,  $x$  : Füme silika kütlece yüzdesi (%),  $m_{\text{silika}}$  : Silika miktarı (g) ve  $m_{\text{peg}}$ : PEG 200 miktarıdır (g). Numunelerin topaklanmasını önlemek için her bir solüsyona polietilen glikol (PEG 200) aralıklarla eklenerek homojen bir dağılım oluşturulması sağlanmıştır. Her ekleme sonrası 10 dakika aralıklar ile 50 W ultrasonik güce ve 20 kHz frekansa sahip ultrasonik banyo (Jeiotech, US-05, Korea ) ile karışım sağlanmıştır. Son ekleme aşamasından sonra karışım 2 saat süre ile ultrasonik banyoda ayrıca karıştırılmıştır. Her numune 22,48 gram PEG 200 içermektedir. Hazırlanan nanoakışkanların içerisindeki etil alkol 90°C'ye ayarlanmış bir etüv fırında uzaklaştırılmıştır.

Tüm reolojik ölçümler stress kontrollü reometre ( Malvern Kinexus Pro, UK) cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Reolojik testler sırasında 20 mm çapa sahip paralel plaka kullanılmıştır. Ölçüm boşluğu 0.05 mm olarak sabit tutulmuştur. Ölçümler sırasında sıcaklık kontrolü  $\pm 0.1$  hassasiyete sahip peltier plaka aracılığıyla sağlanmıştır. Ölçümlerde kayma hızı 0.1-10000  $s^{-1}$  aralığında gerçekleştirilmiştir. Test sıcaklıkları oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Doğrusal viskoelastik bölgenin belirlendiği osilasyon testleri için, depolama ( $G'$ ) ve kayıp ( $G''$ ) modülüs ölçümleri 0.01-10 Pa salınım aralığında 1 Hz frekans için ölçülmüştür. Bu testlerde, depolama modülü  $G'$  malzemenin elastik özelliklerini ve kayıp modülü  $G''$  viskoz özelliklerini göstermektedir. Ayrıca nanoakışkanların sünme ve geri kazanım ölçümleri gerçekleştirilmiştir. 120 s için kayma gerilim yükü 0.1 Pa olarak uygulanmıştır.

### 3. Araştırma Bulguları

Reoloji, kompleks malzemelere uygulanan gerilim altında deformasyon ve akış hidrodinamiğini inceleyen bilim dalı olarak tanımlanmaktadır (Morrison, 2001). Kompleks akışkan olarak da bilinen

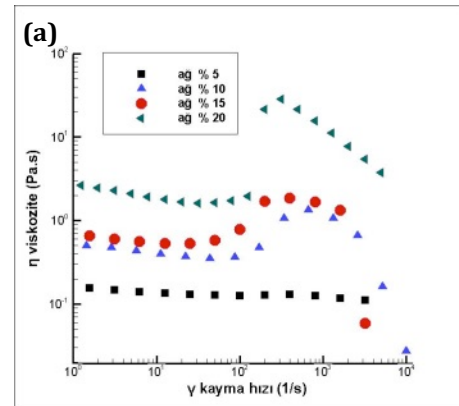
bu tip akışkanların davranışları Newton kuralına uyan akışkanların göstermiş olduğu akış davranışlarından oldukça farklıdır. Newton kuralına uyan davranış özelliği gösteren akışkanların görünür viskoziteleri kayma hızı ile değişmeden sabit kalmasına karşın Newton kuralına uymayan akış özelliği gösteren akışkanların viskoziteleri kayma hızı ile artan (shear-thickening) ya da azalan (shear-thinning) eğilimde değişim göstermektedir. Bunun ile birlikte bu tip akış özelliği gösteren akışkanların uygulanan sabit kayma hızı altında viskozitesi zamanla azalabilir (thixotropic) veya artabilir (rheopexy). Yukarı da sayılan Newton kuralına uymayan akışkanların göstermiş olduğu davranış özelliklerine ilaveten polimer katkılı ve yüksek derişimlere sahip nanoakışkanlar viskoelastik akış davranışı göstermektedirler. Bu tip akışkanların en belirgin özelliği geçmiş bir hafızaya sahip olmaları ve dikey gerilimlerinin ( $\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{zz}$ ) sıfır olmamasıdır.

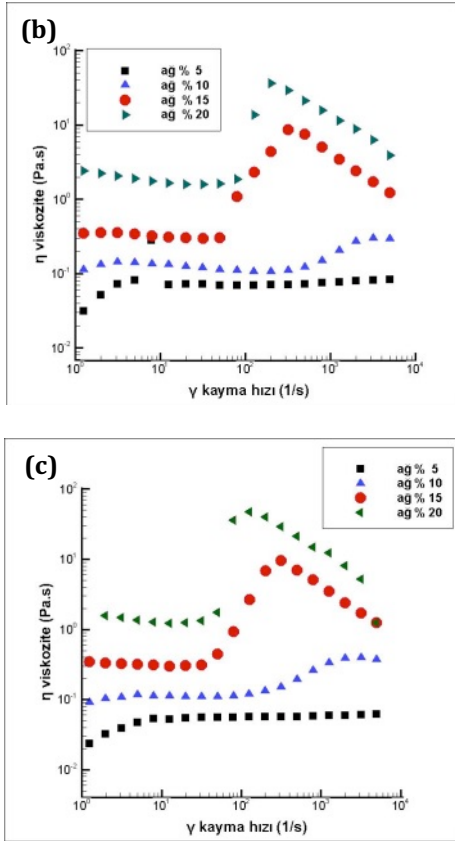
Bu çalışmada, doğrusal olmayan ve doğrusal olan viskoelastik ölçüm sonuçları parçacık boyutu ve kütleli fraksiyona bağlı olarak incelenmiştir.

#### 3.1. Doğrusal Olmayan Viskoelastik Ölçümler

Doğrusal olmayan viskoelastik ölçümler kayma hızı 0.1-10.000  $sn^{-1}$  aralığında ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

Şekil 1'de üç farklı parçacık boyutuna (8, 12 ve 18nm) sahip füme silikaların kütlece %5-%20 fraksiyon aralığında PEG200 içerisinde dağıtılması ile elde edilen süspansiyon akışkanların kayma hızına karşı viskozitelerinin değişimini göstermektedir.





**Şekil 1.** Parçacık boyutu (a) 8nm, (b) 12nm ve (c) 18 nm için konsantrasyona bağlı kayma viskozite eğrileri

Üç grafik incelendiğinde aşağıda maddeler halinde verilen sonuçlar söylenebilir. Şöyle ki;

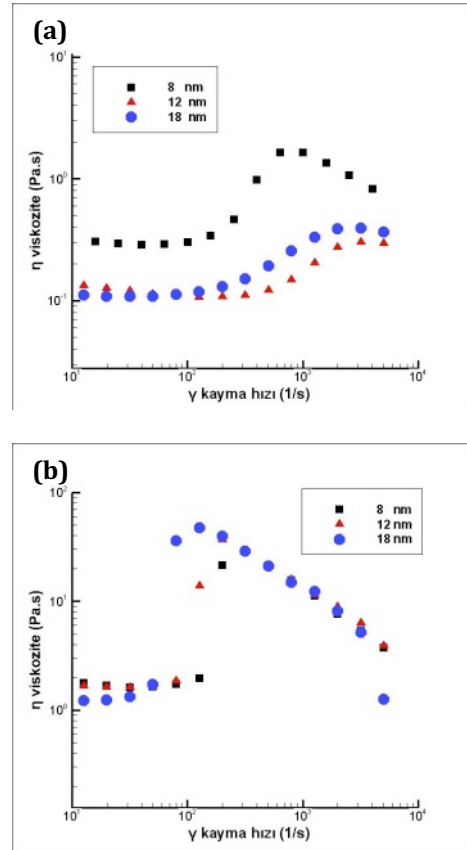
- Düşük kütleli fraksiyonda (%5) çalışma kapsamında incelenen tüm parçacık boyutları Newton kuralına uyan akış özelliği göstermişlerdir. Kütlece düşük nanoparçacık fraksiyonlarında hazırlanan nanoakışkan düşük viskoziteye sahip olduğundan, reometre  $10^{-1} - 10$  (1/sn) kayma hızı aralığında hassas sonuç üretmemektedir. Diğer bir ifade ile kayma hızı ile süspansiyon akışkanlarının viskoziteleri sabit olup değişmemiştir. Bu sebep ile düşük kütleli fraksiyonlarda kaymadan dolayı kalınlaşma görülmektedir.
- Tüm parçacıklar için kayma hızı arttıkça viskozitedeki artış, kütlece %10 fraksiyon aralığında başlamış ve süspansiyon içerisindeki parçacık miktarı arttıkça artmıştır.
- Kütlece fraksiyon %20 olduğunda süspansiyon kayma hızı 100'e kadar kaymadan dolayı inceleme özelliği gösterirken yaklaşık olarak bu kayma hızından sonra her üç parçacık boyutlarında viskozite artarak kaymadan dolayı kalınlaşma özelliği göstermiştir.

Kaymadan dolayı inceleme özelliği göstermenin sebep olduğu fiziksel mekanizma kaymadan dolayı kalınlaşmaya göre açıklaması daha basit olup literatürde bu alanda yapılan tüm çalışmalar ile

benzer yorumlar getirilmiştir. Homojen dağılıma sahip süspansiyon içerisinde kırılğan yapıya sahip olan nanoparçacıklar, kayma hızı arttıkça kırılğan yapının kopmasına ve sonucunda akışkan viskozitesinin azalmasına neden olmaktadır.

Buna karşın, kaymadan dolayı kalınlaşma mekanizması üzerine birçok model ortaya konmuş olup bu modeller içerisinde Bossis vd. (1989) önermiş olduğu mekanizma araştırmacılar tarafından genel kabul görmektedir. Önerilen mekanizma da kayma/kalınlaştırma davranışının düzenli bir şekilde oryantasyona bağlı olduğunu, bunun sebebinin ise hidrodinamik kuvvetlerin parçacıkları domine ederken farklı yönlerde uzanan parçacık kümeleri (cluster) ile kalınlaşma meydana geldiği öne sürülmektedir. Bu kümeler akışkanlığı bloke ederek viskozitenin artışına neden olmaktadır.

Şekil 2'de sırası ile kütlece %10 ve %20 fraksiyonlara sahip hazırlanan füme silika/PEG200 nanoakışkanlarının parçacık boyutu ile karşılaştırmalı değişimi gösterilmektedir.



**Şekil 2.** Kütlece (a) %10 ve (b) %20 fraksiyonlara sahip füme silika /PEG 200 nanoakışkanların viskozite & kayma hızı eğrileri

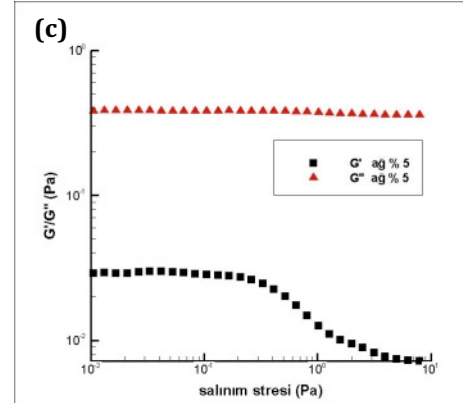
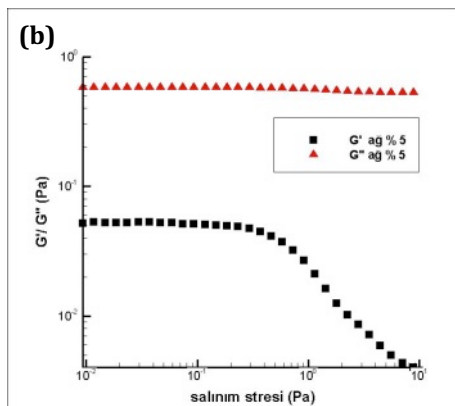
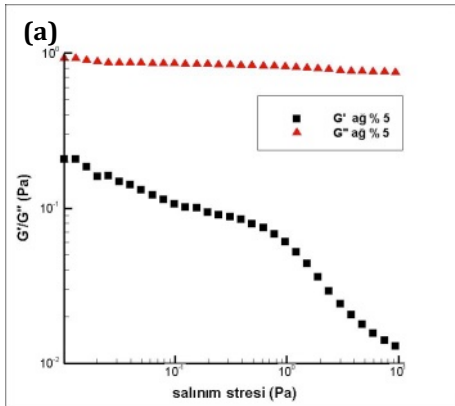
Şekil 2'de açıkça görüleceği üzere düşük kütleli fraksiyonda en küçük parçacık boyutuna sahip füme silika (8nm) kaymadan dolayı kalınlaşma özelliği diğer nanoparçacıklara göre daha yüksek çıkmıştır. Buna karşın, kütleli fraksiyon arttığında hemen hemen

tüm parçacık boyutları yaklaşık aynı viskozite artışı göstermektedir. Örneğin, 8 nm, 12 nm ve 18 nm nanoparçacık boyutları için viskozite artış yüzdeleri sırası ile %92, %89 ve %92 olarak bulunmuştur. Buna karşın kalınlaşmanın başladığı kritik kayma hızları sırası ile  $252 \text{ s}^{-1}$ ,  $200 \text{ s}^{-1}$  ve  $126 \text{ s}^{-1}$  olarak ölçülmüştür. Diğer bir ifade ile parçacık boyutu arttıkça kalınlaşmanın başladığı kayma hızı azalmıştır. Kısaca, kütlece büyük fraksiyonlarda parçacık boyutunun kaymadan dolayı kalınlaşmanın etkisinin az olduğu söylenebilir.

### 3.2. Doğrusal Olan Viskoelastik Ölçümler

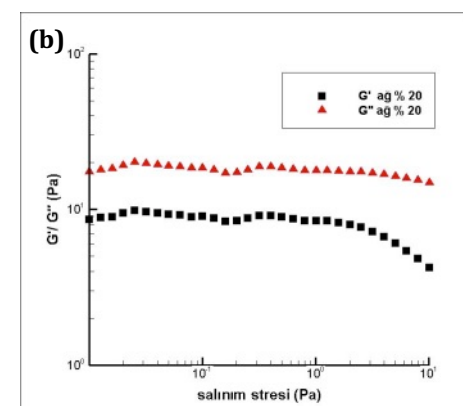
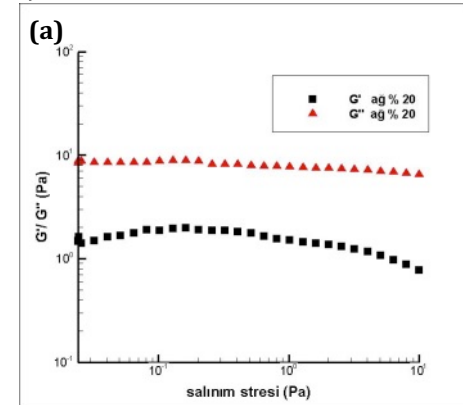
Süspansiyonların doğrusal viskoelastik bölgesinin belirlenmesi amacı ile depolama  $G'$  ve kayıp  $G''$  modülüs ölçümleri 0.001-10 Pa salınım gerilim aralığında ve 1 Hz frekans için gerçekleştirilmiştir. Elastik modülüs olarak bilinen  $G'$  yapısal bütünlüğün bir ölçüsü olup değerindeki ani bir değişim yapının bozulduğu ve doğrusal olmayan bölgenin geçildiği anlamına gelir. Buna karşın,  $G''$  viskoz modülü süspansiyon içerisindeki viskoz bileşenin bir ölçüsüdür. Eğer depolama modülü kayıp modülünden büyük değere sahip olduğunda süspansiyonun elastik davranış gösterdiği, tam tersi durumunda ise viskoz özelliği sahip olduğu söylenebilir.

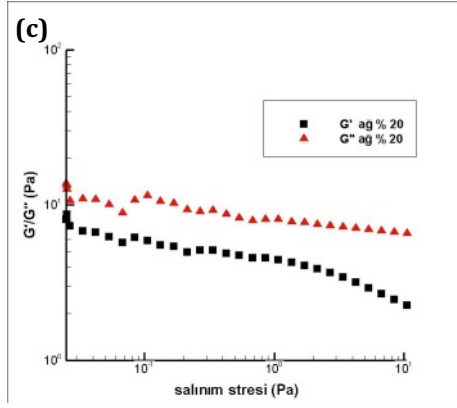
Şekil 3'de sırası ile kütlece %5 ve %20 fraksiyonlarda hazırlanmış füme silika/PEG200 süspansiyonlarına ait 8, 12 ve 18 nm parçacık boyutlarına ait depolama / kayıp modülüslerinin salınım gerilim ile değişimini göstermektedir.



Şekil 3. Kütlece %5 fraksiyonda (a) 8nm, (b) 12nm ve (c) 18nm parçacık boyutuna sahip füme silika /PEG 200 süspansiyonlar için  $G'$  &  $G''$  eğrileri

Şekillerden açıkça görüleceği üzere tüm parçacık konsantrasyonlarında ve parçacık boyutlarında süspansiyonlar viskoz davranış özelliği göstermişlerdir. Benzer sonuç Raghavan vd. (2000) tarafından gerçekleştirilen çalışmada da gözlemlenmiştir. Raghavan vd., (2000) yapmış oldukları çalışmada 12 nm parçacık boyutuna sahip füme silika nanoparçacıkları hacimce %10 fraksiyon oranında 19 farklı polar organik taban akışkanına dağıtarak üretilen nanoakışkanların detaylı reolojik davranışlarını incelemişlerdir. Taban akışkanı olarak PEG 300 ve PEG monometil eter 350 kullandıklarında süspansiyon akışkanlarının viskoz davranış özelliği gösterdiği buna karşın PEG dimetil eter kullanıldığında ise yüksek molekül ağırlığından dolayı oldukça elastik davranış özelliği gösterdiğini belirtmişlerdir.





Şekil 4. Kütlece %20 fraksiyonda (a) 8nm, (b) 12nm ve (c) 18nm parçacık boyutuna sahip füme silika /PEG 200 süspansiyonlar için G' & G'' eğrileri

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışma da ortalama 8, 12 ve 18nm parçacık boyutuna sahip füme silikaların PEG200 taban akışkanına kütlece %5 - %20 fraksiyon aralığında dağıtılması ile üretilen süspansiyonların reolojik özellikleri incelenmiştir. Gerçekleştirilen doğrusal ve doğrusal olmayan ölçümler sonucunda;

- Kütlece düşük fraksiyonda (%5) tüm nanoparçacık boyutlarında süspansiyonlara Newton kuralına uyan özellik gösterdiği, derişim artırıldığında kayma hızı ile viskozitenin arttığı ve en yüksek artış miktarının kütlece %20 fraksiyona sahip süspansiyonlarda olduğu gözlemlenmiştir.
- Parçacık boyutu düşük kütleli fraksiyonlarda kaymadan dolayı kalınlaşmaya bir eğilim var iken yüksek kütleli fraksiyonlarda kalınlaşmaya eğilimin daha az olduğu görülmüştür.
- Doğrusal viskoelastik ölçümler sonucunda çalışılan tüm kütleli fraksiyon ve parçacık boyutlarında süspansiyonların elastik davranış göstermediği viskoz davranış gösterdiği anlaşılmıştır.

#### Teşekkür

Bu çalışmada Reolojik test ve analizlerinin tamamlanmasında emeği geçen Dr. Öğr. Üyesi Ümit Nazlı TEMEL'e teşekkürü bir borç biliriz.

#### Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

#### Kaynaklar

- Bossis, G., Brady, J.F. 1989. The rheology of Brownian suspensions, *The Journal of Chemical Physics*, 91, 1866-1874.
- Boyle, J., Manas-Zloczower, I., Feke, D.L. 2004. Influence of Particle Morphology and Flow

Conditions on the Dispersion Behavior of Fumed Silica in Silicone Polymers, *Part. Part. Syst. Charact.*, 21, 205-212.

Cao, S., Chen, Q., Wang, Y., Xuan, S., Jiang, W., Gong, X. 2017. High strain-rate dynamic mechanical properties of Kevlar fabrics impregnated with shear thickening fluid, *Composites: Part A*, 100, 161-169.

Choi, U.S. 2009. Nanofluids: from vision to reality through research, *Journal of Heat Transfer*, 131, 1-9.

Crawford, N.C., Popp, L.B., Johns, K.E., Caire, L.M., Peterson, B.N., Liberatore, M.W. 2013. Shear thickening of corn starch suspensions: Does concentration matter?, *Journal of Colloid and Interface Science*, 396, 83-89.

Decker, M.J., Halbach, C.J., Nam, C.H., Wagner, N.J., Wetze, E.D. 2007. Stab resistance of shear thickening fluid (STF)-treated fabrics. *Compos. Sci. Techn.*, 67, 565-578.

Ding, J., Li, W., Shen, S.Z. 2011. Research and applications of shear thickening fluids, *Recent Patents Mater Sci*, 4, 43-49.

Duvarcı Ö. Ç. 2009. Rheological Behavior Of Nanocrystalline / Submicron Ceramic Powder Dispersions. Doktora Tezi, İzmir Yüksek Teknolojisi, Türkiye.

Fischer, C., Braun, S.A., Bourban, P.E., Michaud, V., Plummer, C.J.G., Manson, J.A.E. 2016. Dynamic properties of sandwich structures with integrated shear-thickening fluids, *Smart Materials and Structures*, 15, 1467-1475.

Genovese, D.B. 2012. Shear rheology of hard-sphere, dispersed, and aggregated suspensions, and filler-matrix composites. *Advances in Colloid and Interface Science*, 171-172, 1-16.

Gurgen, S., Kushan, M.C. 2017a. The stab resistance of fabrics impregnated with shear thickening fluids including various particle size of additives, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 94, 50-60.

Gurgen, S., Kushan, M.C., Li, W. 2016a. The effect of carbide particle additives on rheology of shear thickening fluids, *Korea-Australia Rheology Journal*, 28(2), 121-128.

Gurgen, S., Kushan, M.C., Li, W. 2017b. Shear thickening fluids in protective applications: A review, *Progress in Polymer Science*, 75, 48-72.

Gurgen, S., Li, W., Kushan, M.C. 2016b. The rheology of shear thickening fluids with various ceramic particle additives, *Materials & Design*, 104, 312-319.

Huang, W., Wu, Y., Qiu, L., Dong, C., Ding, J., Li, D. 2015. Tuning Rheological Performance of Silica Concentrated Shear Thickening Fluid by Using

- Graphene Oxide, *Advances in Condensed Matter Physics*, 734250, 1-5.
- Jiang, T., Zukoski, C.F. 2012. Role of Particle Size and Polymer Length in Rheology of Colloid-Polymer Composites, *Macromolecules*, 45, 9791-9803.
- Kawaguchi, M. 2017. Dispersion stabilities and rheological properties of fumed silica suspensions, *Journal of Dispersion Science and Technology*, 38(5), 642-660.
- Khandavalli, S., Rothstein, J.P. 2014. Extension rheology of shear-thickening fumed silica nanoparticles dispersed in an aqueous polyethylene oxide solution, *J. Rheol.*, 58(2), 411-431.
- Lee, Y.S., Wetzel, E.D., Wagner, N.J. 2003. The ballistic impact characteristics of Kevlar woven fabrics impregnated with a colloidal shear thickening fluid, *Journal of Materials Science*, 38, 2825-2833.
- Maranzano, B.J., Wagner, N.J. 2001. The effects of particle size on reversible shear thickening of concentrated colloidal suspensions. *J Chem Phys*, 114, 10514-10527.
- Moriana, A.D., Tian, T., Sencadas, V., Li, W. 2016, Comparison of rheological behaviors with fumed silica-based shear thickening fluids, *Korea-Australia Rheology Journal*, 28(3), 197-205.
- Morrison, F.A. 2001. *Understanding Rheology*, Oxford University Press, New York.
- Peter, O.E., Ouellet, S., Loiseau, J., Frost, D.L., Higgins, A.J. 2015. A comparison of the ballistic performance of shear thickening fluids based on particle strength and volume fraction, *International Journal of Impact Engineering*, 85, 83-96.
- Raghavan, S.R., Walls, H.J., Khan, S.A. 2010. Rheology of Silica Dispersions in Organic Fluids: New Evidence for Solvation Forces Dictated by Hydrogen Bonding, *Langmuir*, 16, 7920-7930.
- Sacca, A., Pedicini, R., Carbone, A., Gatto, I., Passalacqua, E. 2007. Comparative investigation on nano-sized SiO<sub>2</sub> as a filler for Proton Exchange Membranes (PEM) Fuel Cells, *ECS Transactions*, 11, 357-366.
- Warren, J., Offenberger, S., Toghiani, H., Pittman, C.U., Lacy, T.E., Kundu, S. 2015. Effect of Temperature on the Shear-Thickening Behavior of Fumed Silica Suspensions, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 7, 18650-18661.
- Wong, K.V., Leon, O.D. 2010. Applications of Nanofluids: Current and Future, *Adv. Mech. Eng.*, 2, 1-11.
- Yıldız, S. 2013. *Synthesis and Rheological Behavior of Shear Thickening Fluid for Liquid Armor Applications*. Doktora Tezi, İzmir Yüksek Teknolojisi, Türkiye.
- Zhang, X.Z., Li, W.H., Gong, X.L. 2008. The rheology of shear thickening fluid and the dynamic performance of an STF-filled damper, *Smart Materials and Structures*, 17, 1-7.