

# Kayma Altında Katılaşılan Sıvıların Reolojik Özellikleri

Selim GÜRGEN\*, Melih Cemal KUŞHAN\*\*

\*Ulaştırma Meslek Yüksekokulu, Anadolu Üniversitesi, 26470, Eskişehir, Türkiye

\*\*Makine Mühendisliği Bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, 26480, Eskişehir, Türkiye

(Geliş / Received : 14.01.2016 ; Kabul / Accepted : 16.03.2016 )

## ÖZ

Bu çalışmada sıcaklık ve katı partikül miktarının Kayma Altında Katılaşılan Sıvıların (KAKS) reolojik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. KAKS'ların katılma mekanizmasını ifade edebilmek için viskozite profili, kritik kayma oranı, katılma periyodu ve katılma oranı olmak üzere dört temel parametre belirlenmiştir. KAKS'ın özelliklerini etkileyen diğer parametrelerin etkileri belirlenen bu dört parametre kullanılarak incelenmiştir. Deneylede silika esaslı KAKS'lar farklı silika miktarlarında ve sıcaklıklarda reolojik ölçümlere alınmıştır. Sonuçlara göre, katı partikül oranının artması katılma özelliğini iyileştiren bir etkiye sebep olmuştur. Sıcaklığın artması ise katılma mekanizmasını bozmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Kayma altında katılaşılan sıvılar (KAKS), reoloji, silika

## Rheological Properties of Shear Thickening Fluids

### ABSTRACT

In this study, influences of temperature and amount of solid particles in Shear Thickening Fluids (STFs) were investigated. To observe the thickening mechanism of STFs, four main characteristic terms which are viscosity profile, critical shear rate, thickening period and thickening ratio, were defined and the effects of the variable parameters on these terms were discussed. In the experimental stage, rheological measurements were performed with silica based STFs with various silica amounts under various temperatures. According to the results, thickening behavior was improved as the solid particles were increased in the STFs. However, thickening mechanism decayed by the effect of increased temperature.

**Keywords:** Shear thickening fluid (STF), rheology, silica

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kayma altında katılaşılan sıvılar (KAKS) Newtonyan olmayan bir sıvı çeşididir. Bu sıvıların üzerine gerilim uygulandığı sürece sıvı viskozitesini artırır. Ortamdan gerilim çekildiğinde ise viskozite ilk değerine geri döner. KAKS'lar genellikle bir sıvı ortamda dağıtılmış nano boyutlu katı partiküllerden oluşan süspansiyonlardır. KAKS'ların katılma mekanizması ile ilgili ilk çalışma Hoffman tarafından gerçekleştirilmiştir. Hoffmann bu çalışmada kritik kayma gerilmesi olarak adlandırılan nokta öncesinde süspansiyon içindeki katı partiküllerin altıgen biçimli paketler halinde olduğunu belirtmiştir. Bu nokta ötesinde ise partikül düzeninin bozulup düzensiz partikül kümelenmelerinin oluştuğunu bildirmiştir [1]. Bu fikir Düzen-Düzensizlik Geçişi (Order-Disorder Transition) teorisinin temelini oluşturmaktadır. Hidrokümelenme (Hydroclustering) teorisi ise katılma mekanizmasının hidrokümeler (hydroclusters) arasında oluşan güçlü hidrodinamik kuvvetler sonucu oluştuğunu önermektedir. Buna göre, yüksek gerilmeler altında süspansiyon içinde güçlü hidrodinamik kuvvetler oluşur ve dolayısıyla partiküller birbiriyle temas haline geçer. Sonuç olarak süspansiyonda hidroküme olarak adlandırılan ve çok sayıda partikülün kümeleşmesi sonucu oluşan yapılar meydana gelir. Hidrokümeler

yoğun haldedir ve akış içinde bir dizi engel olarak sıvı akışını zorlaştırır. Sıvı üzerinden gerilme kalktığında ise partiküller dağınık düzene geçerek süspansiyon viskozitesini düşürür. Hidrokümelenme teorisi birçok çalışmayla doğrulanmış ve KAKS yapısını açıklamada genel kabul görmektedir [2,3]. KAKS'ların bu özelliğini mühendislik alanında kullanabilmek için bazı çalışmalar yapılmıştır. Bu sıvılar personel zırh sistemleri, enerji sönmüleyiciler ve akıllı yapılar olmak üzere genel olarak üç alanda kullanılmışlardır. Birçok önceki çalışma [4-9] bu süspansiyonları zırh sistemleri ile bir araya getirerek kompozit zırh malzemeleri geliştirmiştir. Çalışmalarda KAKS ilavesinin zırhların koruyuculuk performansını arttırdığı bildirilmiştir. Bu süspansiyonlar ayrıca enerji sönmüleyici sistemlerde titreşim kontrolü için de kullanılmıştır. Gerilim uygulandıkça viskozitenin artışı sönmülemeye yardımcı bir özellik olarak görülmüştür. Zhang ve ekibi [10] KAKS ile doldurulmuş bir sönmüleyici elemanın dinamik performansını inceleyerek enerji sönmülemeye KAKS'ın etkili olduğunu bildirmiştir. Fischer ve ekibi [11] KAKS ilave edilmiş bir makine elemanının titreşim karakteristiğini inceleyerek titreşimin KAKS sayesinde kontrol edilebileceğini göstermiştir. Bunların yanı sıra, endüstriyel makinaların çalışma sırasında titreşimini sönmülemek için KAKS içeren sabitleyiciler düşünülmüştür. Akıllı yapılarda ise KAKS, değişik şekillerde kullanılmıştır. William ve ekibi [12] KAKS içerikli medikal araçlar ile diz, dirsek, omuz gibi

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: selingurgen@anadolu.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.4 409-414

eklemlerin ani hızlanmasını engelleyerek ani yükler altında eklemlerin zarar görmesini önlemiştir. Ayrıca bazı araştırmacılar manyeto-reolojik (MR) sıvılar ile KAKS'ları bir araya getirerek kompozit malzemeler oluşturmuşlardır. Elde edilen yeni sıvının hem MR hem de KAKS özelliklerine sahip olduğu fakat MR sıvılara daha yakın davranış sergilediği bildirilmiştir [13–16].

Bu çalışmada sıcaklık ve süspansiyon içindeki katı partikül miktarının KAKS'ların reolojik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. KAKS'ların katılaşma mekanizmasını ifade edebilmek için dört temel terim tanımlanmış ve değişken parametrelerin etkileri bu terimler kullanılarak incelenmiştir. KAKS yapısını gösteren bu terimler; viskozite profili, kritik kayma oranı, katılaşma periyodu ve katılaşma oranı olarak belirlenmiştir. Deneylerde silika esaslı KAKS'lar farklı silika miktarlarında ve sıcaklıklarda reolojik ölçümlere alınmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHOD)

Çalışmada katı partikül olarak silika tozu (Aerosil 90, Evonik), sıvı ortam olarak ise polietilen glikol (81172, Sigma-Aldrich) seçilmiştir. Üretici firma bilgilerine göre silika ve polietilen glikol'ün teknik detayları sırasıyla Çizelge 1 ve Çizelge 2'de verilmektedir. Reolojik ölçümler için dört farklı silika miktarı ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 olarak belirlenmiştir. Numunelerin hazırlanması aşamasında silika tozları polietilen glikol (PEG) ortamında dağıtılıp 40 dakika boyunca mekanik olarak karıştırılmıştır. Numunelerde sedimentasyonu önlemek için silika tozu karıştırma sırasında aralıklarla eklenerek homojen bir şekilde dağıtılması sağlanmıştır. Her numune toplamda 10 g olarak hazırlanmıştır. Şekil 1

KAKS hazırlama prosedürünü ve örnek bir numuneyi göstermektedir.

**Çizelge 1.** Silika özellikleri (Properties of silica)

Yüzey alanı	75-110 m <sup>2</sup> /g
Ortalama tane boyutu	20 nm
Sıkıştırılmış yoğunluk	80 g/l
Saflık	> %99.8

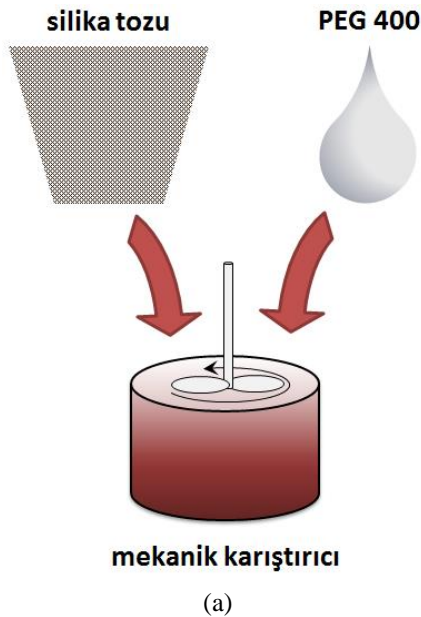
**Çizelge 2.** Polietilen glikol özellikleri (Properties of polyethylene glycol)

Moleküler ağırlık	400 g/mol
Yoğunluk	1.13 g/cm <sup>3</sup>
Tutuşma sıcaklığı	305°C

Reolojik ölçümler gerilim kontrollü reometre (MCR 301, Anton Paar) ile yapılmıştır. Testler sırasında 20 mm çaplı paralel plaka kullanılmıştır. Ölçüm boşluğu 0.20 mm olarak sabit tutulmuştur. Ölçümlerde kayma oranı 0–1000 s<sup>-1</sup> aralığında kullanılmıştır. Test sıcaklığı için üç farklı seviye sıcaklık 20°C, 40°C ve 60°C olarak belirlenmiştir. Sıcaklığın etkisi %20 silika miktarlı KAKS'lar üzerinde incelenmiştir. Süspansiyon sıcaklığı reometrenin alt plakasına bağlı olan bir ısıtıcı sistemle kontrol edilmiştir.

## 3. SONUÇLAR (RESULTS)

KAKS'lardaki katılaşma davranışı birçok parametreye bağlı olarak gerçekleşir. Katı partikül boyutu, katı partikül en/boy oranı, katı partikül cinsi, katı partikül miktarı, sıvı ortam moleküler ağırlığı, sıcaklık gibi her etken katılaşma mekanizması üzerinde bir etkiye sahiptir. Ancak katılaşmanın gerçekleşebilmesi için gereken mekanizma hidrodinamik kuvvetlerin partiküller arası itici kuvvetleri yenmesi ve süspansiyon içinde



**Şekil 1.** (a) KAKS numune hazırlama prosedürü ve (b) KAKS numunesi ((a) Procedure of STF preparation and (b) STF sample)

hidrokümeleri oluşturmaya bağlıdır. Durağan veya düşük akış hallerinde süspansiyon içindeki katı partiküller elektrostatik kuvvetler gibi etkiler ile birbirlerine itici kuvvetler uygular ve partiküller sıvı ortamda rastgele dağınık durumda bulunurlar. Ancak süspansiyondaki kayma oranı arttıkça hidrodinamik kuvvetler yükselerek katı partikülleri birbirine yaklaştırır ve hidrokümeleri oluşturup akış içinde viskoziteyi arttıran engeller yaratırlar [3,9].

Hidrokümelenme teorisine göre katılma mekanizması hidrodinamik kuvvetlerin Brownian kuvvetlere oranı olan Peclet sayısı (Pe) ile ilişkilendirilmektedir (Denklem 1).

$$Pe = \frac{\dot{\gamma}a^2}{D} \quad (1)$$

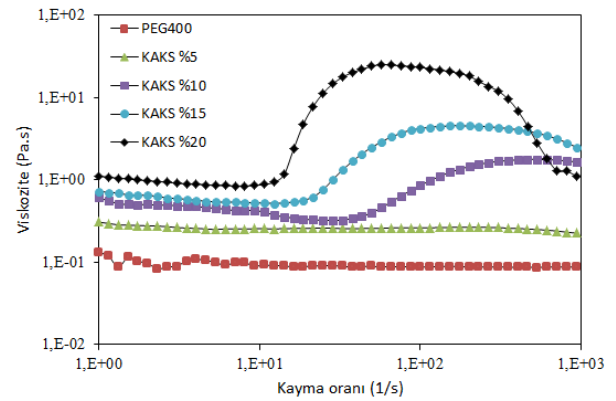
$\dot{\gamma}$  kayma oranını,  $a$  partikül yarıçapını ve  $D$  difüzyon katsayısını ifade etmektedir. Difüzyon katsayısı  $D$  ise Stokes-Einstein eşitliğinde verilmektedir (Denklem 2).

$$D = \frac{kT}{6\pi\eta a} \quad (2)$$

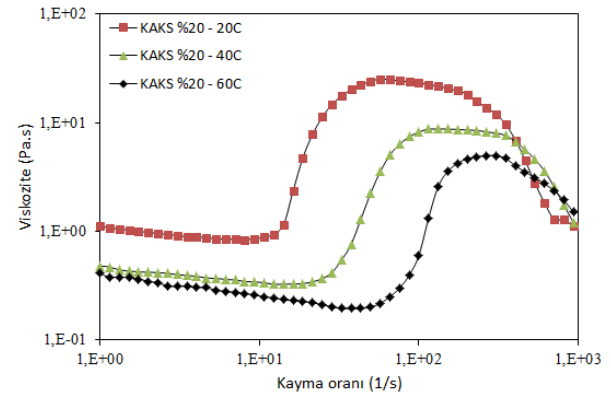
$\eta$  sıvı ortam dinamik viskozitesini,  $k$  Boltzmann sabitini ve  $T$  sıcaklığı ifade etmektedir. Kayma oranının artması partiküller arası mesafenin azalmasına sebep olmaktadır. Dolayısıyla hidrodinamik kuvvetler baskın hale gelip partiküller üzerine uygulanan net kuvvet partikülleri birbirine yaklaştırmaktadır [20]. Peclet sayısı süspansiyon reolojisi hakkında bilgi vermektedir.  $Pe \approx 1$  olduğu durumlarda kayma altında incelleme görüldüğü bilinmektedir. Peclet sayısının daha yüksek değerler aldığı durumlarda ise katılma mekanizması gerçekleşmektedir [20–22].

Şekil 2 farklı silika miktarlarına sahip süspansiyonların 20°C'deki reolojik özelliklerini göstermektedir. Grafikte görüldüğü üzere bu çalışmadaki malzemelerle hazırlanan süspansiyonlar için katılma özelliği %5–%10 silika miktarları arasında gerçekleşmektedir. Silika miktarındaki artış katılma olmasa dahi süspansiyonun viskozite profilini arttırmaktadır. Viskozite profilindeki bu artış birim süspansiyon hacmindeki silika partikül sayısındaki artıştan kaynaklanmaktadır. Silika miktarı arttıkça partiküller arası mesafe azalmakta ve süspansiyon daha yoğun bir hal almaktadır [17,18]. Katı partikül oranındaki artıştan dolayı viskozite profilinin artışı önceki çalışmalarda [15–18] da belirtilmiştir. Şekil 3 farklı sıcaklıklardaki %20 silika miktarlı KAKS'ların reolojik özelliklerini göstermektedir. Buna göre, sıcaklığın artması süspansiyon viskozite profilini düşürmektedir. Bu etki sıcaklık yükseldikçe silika ve PEG arasındaki hidrojen bağlarının zayıflamasından kaynaklanmaktadır. Süspansiyon içinde silika ve PEG molekülleri birbirleri arasında güçlü hidrojen bağları kurmaktadır. Sıcaklık yükseldikçe hidrojen bağları zayıflayarak PEG moleküllerinin hareketliliği artar. Bunun sonucu olarak silika partiküllerini saran hidrojen bağı tabakası gittikçe inceler ve kaybolur. Dolayısıyla silika partikülleri daha serbest kalarak Brownian hareketleri artar ve partiküller arası çekim bozulur viskozitenin düşmesine sebep olur. Ayrıca düşük kayma oranlarında süspansiyon mikroyapısı bozulmaya başlar

ve silika partiküllerinin Brownian hareketlerinde artış gözlenir. Bu durum süspansiyon viskozitesinin azalmasına yani kayma altında incelleme olayına sebep olur. Ancak kayma oranı arttıkça hidrodinamik kuvvetler süspansiyon içinde daha baskın görülür. Kritik kayma oranı denilen noktaya erişildiğinde ise hidrodinamik kuvvetler silika partiküllerinin kümeleşmesini sağlayacak seviyeye yükselir. Böylece silika partiküllerinin Brownian hareketleri azalır ve sonuç olarak süspansiyon içinde oluşan hidrokümeler sıvı akışını engelleyen bariyerler olarak viskozitenin artmasına sebep olur [18]. Katılma mekanizması ayrıca süspansiyonun sıvı ortamına da bağlıdır. Sıvı ortamın molekül ağırlığı arttıkça daha uzun moleküler bağlar görülmektedir. Bu da süspansiyon içinde moleküller arası hareketi kısıtlamakta ve süspansiyon viskozite profilini yükseltmektedir. Bunun yanı sıra, uzun moleküler bağlar silika partiküllerinin sıvı ortama bağlanma oranını arttırmakta ve silika partiküllerini daha yakın alanda tutarak katılma için gereken hidrokümelerin oluşmasını daha düşük kayma oranlarında gerçekleştirmektedir [9,18].



Şekil 2. Farklı silika miktarlarına sahip süspansiyonların reolojik özellikleri (Rheological properties of STFs with various silica contents)



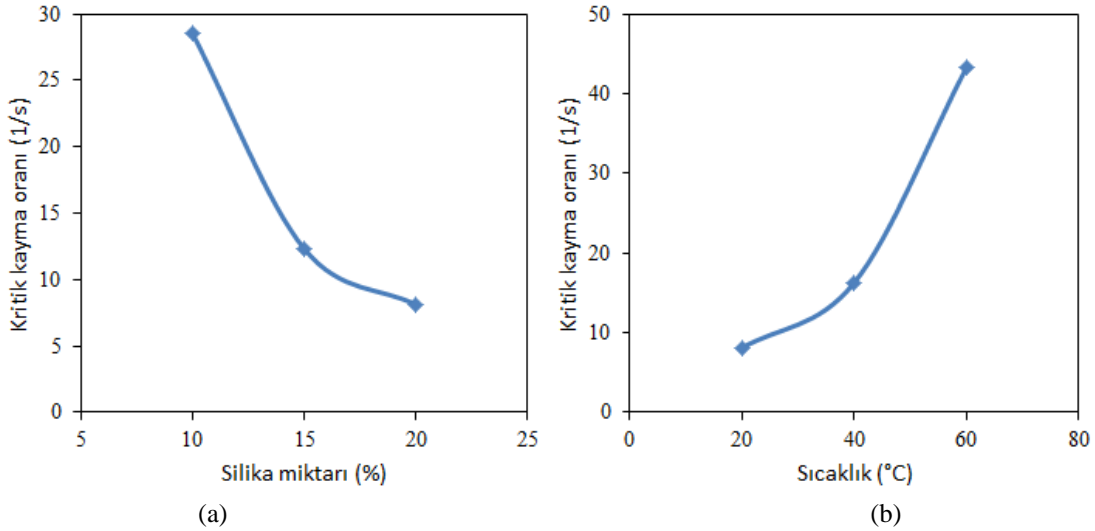
Şekil 3. Farklı sıcaklıklar altında süspansiyonların reolojik özellikleri (Rheological properties of STFs under various temperatures)

KAKS'lar için önemli bir özellik katılmanın başladığı nokta olarak tanımlanan kritik kayma oranıdır. Bu değer

katılaşmanın başladığı andaki kayma oranıdır. Şekil 4 kritik kayma oranının silika miktarı ve sıcaklıkla değişimini göstermektedir. Şekil 4a'daki değerler 20°C'deki KAKS'ların test sonucudur. Şekil 4b'deki sonuçlar ise %20 silika miktarlı KAKS'lar ile elde edilmiştir. Buna göre, kritik kayma oranının silika miktarıyla düştüğü görülmektedir. Yani silika miktarı arttıkça katılaşma daha düşük kayma oranlarında gerçekleşebilmektedir. Süspansiyonda katı partikül

yenerek hidrokümler oluşturması gerekmektedir. Partiküller arası itici kuvvetler sıcaklığın yükselmesi ile artmaktadır ve bu itici kuvvetleri aşması gereken hidrodinamik kuvvetlerin artması gerekmektedir. Hidrodinamik kuvvetler yüksek kayma oranlarında arttığı için sıcaklık yükseldikçe katılaşmanın tetiklendiği kritik kayma oranı yükselmektedir [7,18,19]

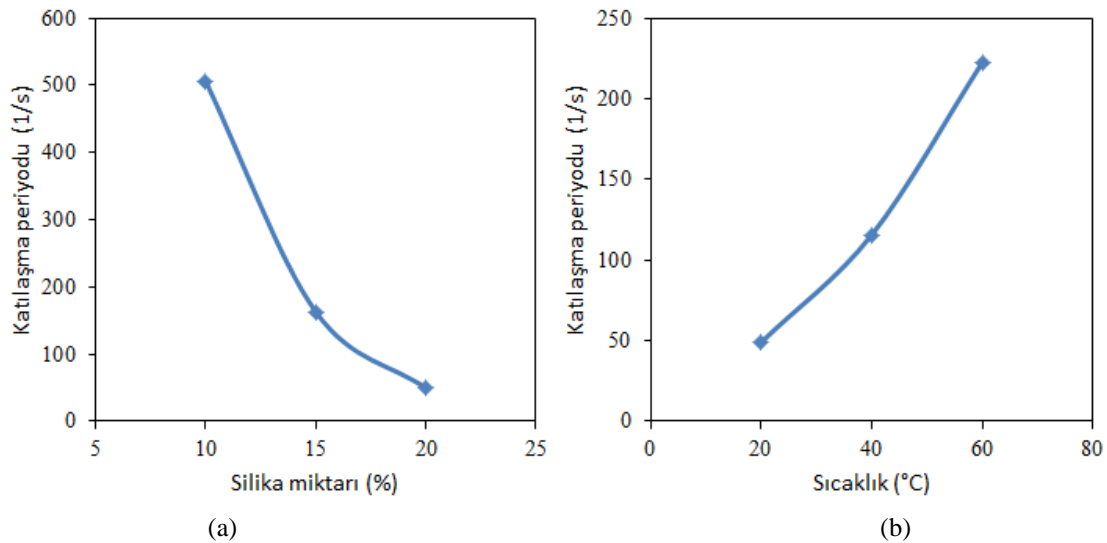
KAKS'ların katılaşma davranışlarını gösteren bir başka özellik ise katılaşma periyodudur. Katılaşma periyodu



Şekil 4. Kritik kayma oranının (a) silika miktarı ve (b) sıcaklıkla değişimi (Variation of critical shear rate with respect to (a) silica content and (b) temperature)

miktarı arttıkça partiküller arası itici kuvvetler azalmakta ve hidrokümleri oluşturmak için gereken kayma oranı daha düşük değerlerde yeterli olmaktadır [7]. Dolayısıyla süspansiyondaki silika miktarı arttıkça süspansiyonun katılaşma özelliği iyileşmektedir. Sıcaklık ise kritik kayma oranını yükselten bir etkiye sahiptir. Süspansiyonda katılaşmanın gerçekleşebilmesi için hidrodinamik kuvvetlerin partiküller arası itici kuvvetleri

süspansiyonda maksimum viskozite değerinin elde edildiği kayma oranı ile kritik kayma oranı arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır. Bu değer katılaşmanın ne kadar hızlı gerçekleştiğini göstermektedir. Dolayısıyla katılaşma periyodunun kısa olması süspansiyonun katılaşma tepkisinin hızlı olduğu yani katılaşma özelliğinin yüksek olduğu anlamına gelmektedir. Şekil 5 katılaşma periyodunun silika miktarı ve sıcaklıkla

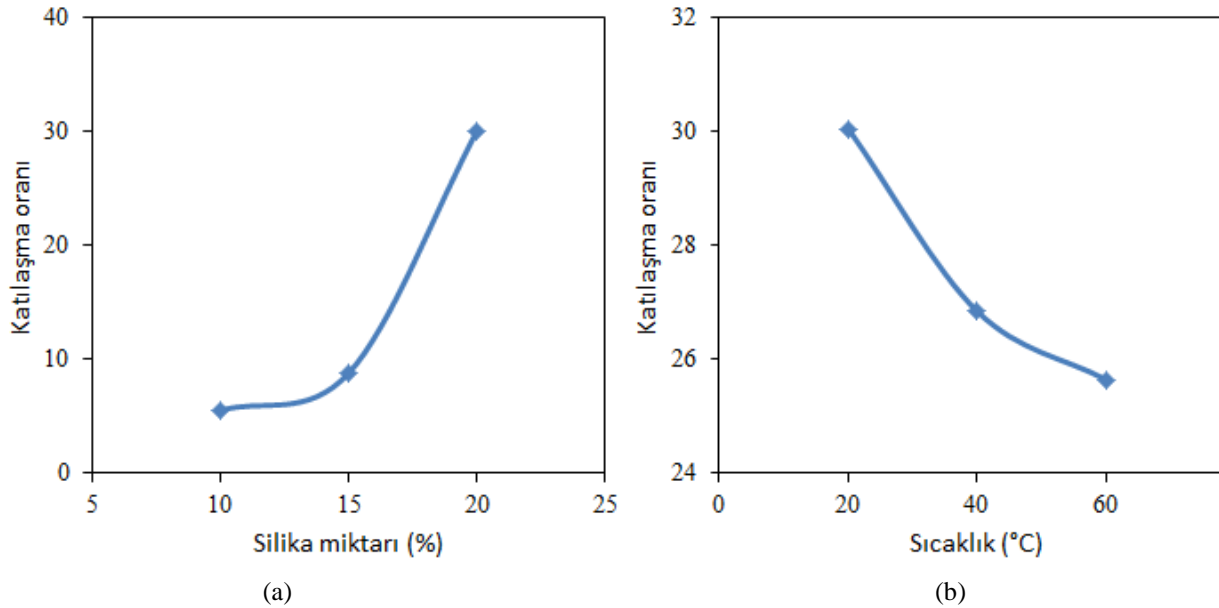


Şekil 5. Katılaşma periyodunun (a) silika miktarı ve (b) sıcaklıkla değişimi (Variation of thickening period with respect to (a) silica content and (b) temperature)

değişimini göstermektedir. Buna göre, katılaşma periyodu silika miktarı ile azalmaktadır. Bu durum silika miktarındaki artışın katılaşma mekanizmasını hızlandırdığını göstermektedir. Sıcaklığın artması ise katılaşma periyodunu uzatmakta yani katılaşma özelliğini bozmaya yönelik bir etki yapmaktadır. Bu durum katılaşmanın tamamlanması için gereken hidrodinamik kuvvetlerin yüksek kayma oranına ihtiyaç duymasına ve sonuç olarak katılaşma periyodunun gecikmesinden kaynaklanmaktadır.

Katılaşma oranı KAKS'ların katılaşma mekanizması hakkında fikir veren önemli bir parametredir. Katılaşma oranı, süspansiyonun reolojik eğrisindeki katılaşma sonrası ulaşılan maksimum viskozitenin kritik kayma oranındaki viskoziteye oranı olarak ifade edilmektedir. Buna göre, katılaşma oranı ne kadar yüksekse süspansiyonun katılaşma davranışı o kadar gelişmiş olarak yorumlanmaktadır. Şekil 6 katılaşma oranının silika miktarı ve sıcaklıkla değişimini göstermektedir. Grafiklerde görüldüğü üzere silika miktarı arttıkça süspansiyonun katılaşma oranı da artmaktadır. Bu durum

Sonuçlara göre katı partikül miktarının artması genel olarak süspansiyonun katılaşma davranışını olumlu yönde etkilemektedir. Bu durum silika miktarındaki artışın kritik kayma oranını düşürüp daha erken aşamada katılaşmayı tetiklemesiyle görülmektedir. Ayrıca silika miktarı arttıkça katılaşma periyodu kısalmakta yani süspansiyon katılaşmanın tamamlanması için çok daha kısa sürede tepki vermektedir. Katılaşma davranışını en iyi ifade eden parametrelerden biri olan katılaşma oranı da silika miktarındaki artış ile artmaktadır. Silika miktarındaki artış ile süspansiyon viskozite profilinin artması ise sıvılarda genel olarak görülen yoğun katı faz sebebiyledir. Diğer yandan sıcaklık ise KAKS'lar üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. Sıcaklığın katılaşma mekanizmasını bozması temel olarak partiküller arası itici kuvvetlerin sıcaklıkla birlikte artmasına dolayısıyla katılaşma mekanizmasını oluşturan hidroküme oluşumunun yavaşlamasına dayanmaktadır. Sıcaklığın yükselmesiyle görülen bu etki kritik kayma oranını geciktirmekte, katılaşmanın tamamlanması için geçen periyodu uzatmakta ve katılaşma oranını da



Şekil 6. Katılaşma oranının (a) silika miktarı ve (b) sıcaklıkla değişimi (Variation of thickening rate with respect to (a) silica content and (b) temperature)

süspansiyon içindeki katı partikül yoğunluğunun katılaşma özelliğini olumlu olarak etkilediğini göstermektedir. Sıcaklık ise katılaşma oranı üzerinde ters bir etkiye sahiptir. Yani sıcaklık yükseldikçe katılaşma oranı azalmaktadır. Bu durum yüksek sıcaklıklarda partiküller arası itici kuvvetlerin baskın olmasından dolayı hidrodinamik kuvvetlere düşük sıcaklıklarda olduğundan daha fazla karşı koymasından kaynaklanmaktadır.

#### 4. TARTIŞMA (DISCUSSION)

Deneysel verilerin incelenmesinde KAKS'larla ilgili dört temel çıktı incelenmiştir. Değişken parametrelerin çıktıları arttıran etkileri Çizelge 3'de verilmektedir.

düşürmektedir. Bunların yanı sıra sıcaklığın artması ile süspansiyon incelmeyle dolayısıyla viskozite profili düşmektedir.

Çizelge 3. KAKS katılaşma mekanizması üzerinde değişken parametre etkileri (Effects of variable parameters on STF thickening mechanism)

Çıktılar	Değişken parametreler	
	Katı partikül miktarı	Sıcaklık
Viskozite profili	(+)	(-)
Kritik kayma oranı	(-)	(+)
Katılaşma periyodu	(-)	(+)
Katılaşma oranı	(+)	(-)

## 5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada Newtonyan olmayan ve reolojik olarak özel bir karaktere sahip olan silika esaslı KAKS'ların katılaşma mekanizması incelenmiştir. KAKS'ların katı partikül miktarına ve sıcaklığa bağlı reolojik özelliklere sahip olduğu görülmüştür. Son yıllarda bu özel malzemelerin mühendislik uygulamalarında yer aldığı görülmektedir. Reolojik özelliklerinden yararlanıldığından dolayı bu sıvıların hangi şartlarda ne tür tepki verdiği tespit edilerek kullanılması mümkün olan alanlar belirlenebilir. Kritik kayma oranı ve katılaşma oranı gibi parametrelerin belirlenmesi ile kontrol edilebilir sıvı aktüatörler gibi uygulamalar gerçekleştirilebilir. Ayrıca sıcaklık girdisi ile reolojik davranışları kontrol edilerek titreşim sönmüleyici sistemlere adapte edilmesi de mümkün olabilir.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Bu çalışma Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından desteklenen ESOGU-2014-431 no'lu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca yazar S.Gürgen 2211 Programı kapsamında desteklerinden dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'a teşekkür eder.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Hoffman R. L., "Discontinuous and Dilatant Viscosity Behavior in Concentrated Suspensions. I. Observation of a Flow Instability," *J. Rheol.*, 16(1): 155, (1972).
- Boersma W. H., Laven J., and Stein H. N., "Viscoelastic properties of concentrated shear-thickening dispersions," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 149(1): 10–22, (1992).
- Bossis G. and Brady J. F., "The rheology of Brownian suspensions," *J. Chem. Phys.*, 91(3): 1866, (1989).
- Park J. L., Yoon B. I., Paik J. G., and Kang T. J., "Ballistic performance of p-aramid fabrics impregnated with shear thickening fluid; Part I - Effect of laminating sequence," *Text. Res. J.*, 82(6): 527–541, (2012).
- Park J. L., Yoon B. I., Paik J. G., and Kang T. J., "Ballistic performance of p-aramid fabrics impregnated with shear thickening fluid; Part II - Effect of fabric count and shot location," *Text. Res. J.*, 82(6): 542–557, (2012).
- Srivastava A., Majumdar A., and Butola B. S., "Improving the impact resistance performance of Kevlar fabrics using silica based shear thickening fluid," *Mater. Sci. Eng. A*, 529: 224–229, (2011).
- Kang T. J., Kim C. Y., and Hong K. H., "Rheological behavior of concentrated silica suspension and its application to soft armor," *J. Appl. Polym. Sci.*, 124(2): 1534–1541, (2012).
- Lee Y. S., Wetzel E. D., and Wagner N. J., "The ballistic impact characteristics of Kevlar® woven fabrics impregnated with a colloidal shear thickening fluid," *Journal of Materials Science*, 38(13): 2825–2833, (2003).
- Baharvandi H. R., Alebooyeh M., Alizadeh M., Heydari M. S., N Kordani., and Khaksari P., "The influences of particle-particle interaction and viscosity of carrier fluid on characteristics of silica and calcium carbonate suspensions-coated Twaron® composite," *J. Exp. Nanosci.*, 1–14, (2015).
- Zhang X. Z., Li W. H., and Gong X. L., "The rheology of shear thickening fluid (STF) and the dynamic performance of an STF-filled damper," *Smart Mater. Struct.*, 17(3): 035027, (2008).
- Fischer C., Braun S. A., Bourban P.-E., Michaud V., Plummer C. J. G., and Manson J.-A. E., "Dynamic properties of sandwich structures with integrated shear-thickening fluids," *Smart Mater. Struct.*, 15(5): 1467–1475, (2006).
- Williams T. H., Day J., and Simon P., "Surgical and Medical Garments and Materials Incorporating Shear Thickening Fluids," US2007000440086, (2008).
- Peng G. R., Li W., Tian T. F., Ding J., and Nakano M., "Experimental and modeling study of viscoelastic behaviors of magneto-rheological shear thickening fluids," *Korea-Aust. Rheol. J.*, 26(2): 149–158, (2014).
- Li W., Nakano M., Tian T., Totsuka A., and Sato C., "Viscoelastic properties of MR shear thickening fluids," *J. Fluid Sci. Technol.*, 9(2): 10019, (2014).
- Zhang X., Li W., and Gong X. L., "Thixotropy of MR shear-thickening fluids," *Smart Mater. Struct.*, vol. 19(12): 125012, (2010).
- Zhang X., Li W., and Gong X. L., "Study on magnetorheological shear thickening fluid," *Smart Mater. Struct.*, 17(1): 015051, (2008).
- Liu D. M., "Particle packing and rheological property of highly-concentrated ceramic suspensions:  $\phi_m$  determination and viscosity prediction," *Journal of Materials Science*, 35(21): 5503–5507, (2000).
- Liu X.-Q., Bao R.-Y., Wu X.-J., Yang W., Xie B.-H., and Yang M.-B., "Temperature induced gelation transition of a fumed silica/PEG shear thickening fluid," *RSC Adv*, 5(24): 18367–18374, (2015).
- Suh Y. J., Ullmann M., Friedlander S. K., and Park K. Y., "Elastic Behavior of Nanoparticle Chain Aggregates (NCA): Effects of Substrate on NCA Stretching and First Observations by a High-Speed Camera †," *J. Phys. Chem. B*, 105(47): 11796–11799, (2001).
- Hasanzadeh M. and Mottaghitlab V., "The Role of Shear-Thickening Fluids (STFs) in Ballistic and Stab-Resistance Improvement of Flexible Armor," *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(4): 1182–1196, (2014).
- Wagner N. J. and Brady J. F., "Shear thickening in colloidal dispersions," *Physics Today*, 62(10): 27–32, (2009).
- Warren J., Offenberger S., Toghiani H., Pittman C. U., Lacy T. E., and Kundu S., "Effect of Temperature on the Shear-Thickening Behavior of Fumed Silica Suspensions," *ACS Applied Materials & Interfaces*, 7(33), 18650–18661, (2015).