



# Sodyum Karbonat ile Aktive Edilmiş Cüruf Esaslı Karışımların Reolojik Özellikleri: Uçucu Kül ve Sıcaklık Etkisi

## *Rheological Properties of Sodium Carbonate Activated Slag-Based Mixes: Effects of Fly Ash and Temperature*

Büşra Aktürk<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> İstanbul Bilgi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, [busra.akturk@bilgi.edu.tr](mailto:busra.akturk@bilgi.edu.tr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1484-7758>

### MAKALE BİLGİLERİ

#### Makale Geçmişi:

Geliş 17 Aralık 2021  
Revizyon 9 Şubat 2022  
Kabul 4 Mart 2022  
Online 30 Mart 2022

#### Anahtar Kelimeler:

Reoloji,  
Tiksotropi,  
Sodyum karbonat,  
Cüruf,  
Uçucu kül

### ÖZ

Bu çalışmada, yüksek fırın cürufu esaslı sodyum karbonatla aktive edilen karışımların reolojik özellikleri ve tiksotropik davranışları belirlenmiştir. Bu sistemlerde cürufun uçucu kül ile farklı oranlarda ikame edilmesinin ve 10 °C, 25 °C ve 40 °C gibi farklı uygulama sıcaklıklarının karışımın eşik kayma gerilmesi, plastik viskozitesi, tiksotropisi gibi reolojik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Çalışma sonucunda, sodyum karbonatla aktive edilen karışımların reolojik özelliklerinin çimento esaslı sistemler ile benzer özellik gösterdiği, uçucu kül ikamesi ile reolojik özelliklerin iyileştiği belirlenmiştir. Ayrıca, farklı uygulama sıcaklıklarının karışımların reolojik özelliklerini değiştirdiği, daha yüksek sıcaklıkta daha düşük eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozite değerleri elde edildiği belirlenmiştir.

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 17 December 2021  
Received in revised form 9  
February 2022  
Accepted 4 March 2022  
Available online 30 March 2022

#### Keywords:

Rheology,  
Thixotropy,  
Sodium carbonate,  
Slag,  
Fly ash

### ABSTRACT

This study presents the rheological properties and thixotropic behaviour of sodium carbonate-activated slag/fly ash blend systems. The effect of different application temperatures such as 10 °C, 25 °C and 40 °C and the contribution of different fly ash replacement ratios on the rheological response were explored. Yield stress, plastic viscosity and thixotropy of the mixes are determined. It was found that sodium carbonate-activated mixes could have a similar rheological property with the cement-based systems, enhanced results are obtained with the fly ash substitution. Moreover, different application temperatures affected the rheological properties, higher temperatures caused lower yield stress and plastic viscosity.

Doi: 10.24012/dumf.1037766

\* Sorumlu Yazar

## Giriş

Beton üretiminde kullanılan çimento, üretimi sırasında yüksek miktarda CO<sub>2</sub> emisyonuna neden olmaktadır. Dünya genelinde açığa çıkan CO<sub>2</sub> emisyonunun yaklaşık %8'inin çimento üretimi kaynaklı olduğu bilinmektedir [1]. Son yıllarda artan CO<sub>2</sub> emisyonları nedeniyle pek çok sektörde olduğu gibi inşaat sektöründe de minimum karbon salınımı hedeflenmektedir. Bu hedef doğrultusunda, çimento yerine atık malzemelerin bağlayıcı olarak kullanılması çevresel açıdan daha uygun ve sürdürülebilir bir çözüm olacaktır. Alkaliler ile aktive edilmiş malzemeler gösterdikleri erken yüksek dayanım, kimyasal etkilere ve donma-çözölmeye karşı dayanıklılık gibi olumlu özellikleri ile çimento esaslı sistemlere alternatif olmaktadır [2], [3].

Alkaliler ile aktive edilmiş malzemeler (AAM) son yıllarda gittikçe artan sayıda çalışılan konulardan biridir. AAM'lerin üretiminde bağlayıcı malzeme olarak çimento yerine yan ürünlerden granüle yüksek fırın cürufu, uçucu kül gibi malzemeler ile ponza, tuf gibi doğal puzolanlar kullanılabilir. AAM'lerin özellikleri kullanılan bağlayıcının kimyasal kompozisyonu, inceliği, kullanılan aktivatör tipi ve miktarı ile uygulanan ısı küre göre değişiklik göstermektedir [4], [5]. Cüruf esaslı sistemler en çok üretilen, dayanımı ve dayanıklılığı yüksek karışımlardan biridir. AAM'lerin üretiminde genellikle sodyum silikat ve sodyum hidroksit in alkali aktivatör olarak kullanılması tercih edilmektedir [6]–[11]. Bu aktivatörler pH değerini artırır, bağlayıcı malzemenin çözünmesini kolaylaştırır. Ancak bu aktivatörler, genellikle sodyum silikat ve sodyum hidroksit, hızlı priz, yüksek kuruma rötesi ve mikro çatlak oluşumu gibi problemlere yol açabilmektedir [12], [13]. Ayrıca, bu malzemelerin üretim maliyeti yüksekliği ve yakıcı özellikte olmaları bu malzemeleri daha az tercih edilebilir kılmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak aktivatör olarak sodyum karbonat (NC) kullanımı tercih edilmiştir. NC, çevre dostu, doğal yollarla da üretilebilir, ekonomik ve hidroksit ve silikatlara göre daha az zararlı olması özellikleri ile dikkat çekmektedir. Bununla birlikte, Türkiye dünyada ikinci en büyük NC rezervlerine sahiptir [14]. Böylelikle, NC'nin ülkemizde kullanılabilir potansiyelini artmaktadır.

Yapı malzemelerinin sahip olması istenen temel özellikler; işlenebilirlik, dayanım ve dayanıklılıktır. İşlenebilirlik, malzemenin taze halde iken karıştırılması, yerleştirilmesi sırasında minimum enerji harcayacak, maksimum doluluk sağlayacak şekilde olmalıdır. Özellikle kendiliğinden yerleşen betonlarda, betonun kendi ağırlığı ile boşluksuz, minimum enerji ile yerleşebilir olması istenmektedir. Malzemenin işlenebilirliği, yapılan birtakım deneyler ile ölçülebilmekte, reolojik özelliklerinin belirlenmesi ile malzemenin işlenebilirliği, zamana bağlı davranışı hakkında bilgi sahibi olunabilmektedir.

Malzemelerde belirlenen en temel reolojik özellikler eşik kayma gerilmesi ile viskozitedir. Eşik kayma gerilmesi malzemenin akışa geçmesi için gereken minimum gerilme, viskozite ise malzemenin akmaya karşı gösterdiği dirençtir [15]. Malzemenin eşik kayma gerilmesi ne kadar yüksek olursa malzemeyi yerleştirmek için harcanması gereken

enerji de o kadar yüksek olacaktır. Minimum enerji ile malzemeyi kalıba yerleştirmek için malzemenin eşik kayma gerilmesinin düşük olması istenmektedir.

Yapı malzemelerinin fiziksel, mekanik ve durabilite özellikleri ile ilgili yapılan çok sayıda çalışma bulunurken, reolojik özellikleri ile ilgili çalışma sayısı sınırlıdır. Özellikle farklı tip malzemelerin kullanıldığı özel karışımların reolojik özelliklerinin belirlenmesi son yıllarda daha önemli hale gelmiştir. Benzer şekilde, AAM'lerin mekanik, içyapı ve durabilite özelliklerine yönelik çok sayıda çalışma bulunurken, reolojik özelliklere yönelik az sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu malzemelerin reolojik özelliklerinin belirlenmesi ile uygulamada başarılı, taze hal özellikleri belirlenmiş malzeme üretimi mümkün olabilecektir.

Bu çalışmada, sodyum karbonatla aktive edilmiş cüruf esaslı sistemlerde uçucu kül ikamesinin ve farklı uygulama sıcaklıklarının malzeme reolojik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Bu malzemelerin reolojik özelliklerine etki eden faktörler, bu malzemelerin uygulamada kullanılabilirliğine yönelik katkı sunacak; özellikle 3 boyutlu yazılım yöntemi ile üretilecek malzemeler ile ilgili gelecek çalışmalara ışık tutacaktır.

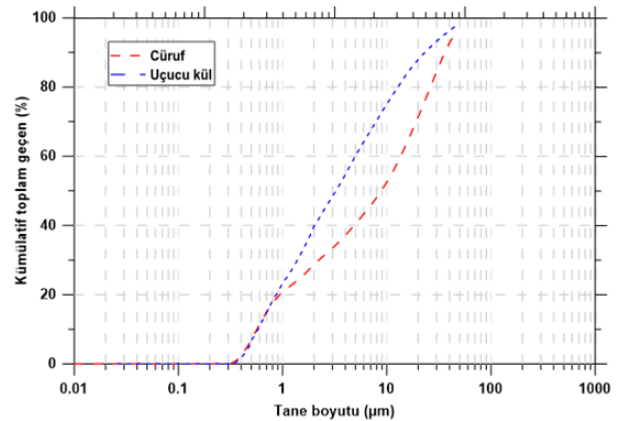
## Materyal ve Metot

### Malzemeler ve karışım oranları

Karışımlarda ana bağlayıcı malzeme olarak Kardemir Demir Çelik A.Ş.'den elde edilen, ASTM C989 standardına uygun granüle yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Uçucu kül F tipidir ve ASTM C618'e uygundur. Malzemelerin kimyasal kompozisyonları X-ışını floresan spektrometresi ile belirlenmiş ve sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir. Bağlayıcı malzemelerin özgül ağırlıkları ve özgül yüzey alanları ve sırasıyla helyum piknometresi ve Blaine yöntemi yardımıyla belirlenmiştir. Cüruf ve uçucu kül için bu değerler sırası ile 2.92, 2.21 ile 4860 cm<sup>2</sup>/g ve 5236 cm<sup>2</sup>/g'dır.

Tablo 1. Bağlayıcıların kimyasal kompozisyonları ve fiziksel özellikleri.

Malzemeler	Kimyasal kompozisyon (%)						
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	LOI
Cüruf	40.6	12.6	35.7	1.2	5.8	0.1	0.13
Uçucu kül	52.6	25.0	3.3	5.8	2.1	1.0	-



Şekil 1. Cüruf ve uçucu külün tane boyutu dağılımı

Toplam 4 hamur karışımı üretilmiş olup karışımlara dair bilgiler Tablo 2'de paylaşılmıştır. Öncelikle %100 cüruf içeren kontrol karışımı üretilmiş, daha sonra uçucu kül, cüruf ile %25, %50 ve %75 oranlarında ağırlıkça yer değiştirilerek kullanılmıştır. Su/bağlayıcı oranı 0,38 olarak sabit tutulmuştur. Alkali aktivatör olarak sodyum karbonat (NC) bağlayıcı ağırlığının %6'sı kadar Na<sub>2</sub>O içerecek şekilde kullanılmıştır. Karışımlar kullanılan cüruf yüzdesine göre isimlendirilmiştir. 100, 75, 50 ve 25 cüruf yüzdesini, "S" cürufu temsil etmektedir. Sonuçlar kısmındaki grafiklerde yer alan seri isimlendirmelerinde en sondaki 10, 25 ve 40 ise uygulama sıcaklıklarını (°C) temsil etmektedir (Şekil 7 ve 8).

Tablo 2. Karışım oranları.

Karışımlar	Cüruf (%)	Uçucu kül (%)	NC (%) Na <sub>2</sub> O	Su/Bağlayıcı
100S	100	-		
75S	75	25	6	0.38
50S	50	50		
25S	25	75		

### Karışım prosedürü

Reolojik özelliklerin belirlenmesi için yapılan hamur üretimleri aşağıda belirtildiği şekilde gerçekleştirilmiştir. Öncelikle alkali aktivatör ile karışım suyu karıştırılmış ve alkali solüsyonu hazırlanmıştır. Aktivatör ve suyun karışımı ile ekzotermik reaksiyon meydana geldiği için solüsyon sıcaklığının 25 °C'ye düşmesi için solüsyon yaklaşık 1 saat kadar ortam sıcaklığında bekletilmiştir.

Karışım prosedürü aşamaları aşağıda belirtildiği şekildedir:

- Toz bağlayıcı malzemeler, cüruf ve uçucu kül, 30 sn süresince düşük hızda (140 ± 5 rpm) karıştırılmıştır.
- Daha sonra, aktivatör solüsyonu toz malzemeye ilave edilmiş ve 30 sn daha düşük hızda (140 ± 5 rpm) karıştırılmıştır.
- Son olarak, karışım yüksek hızda (285 ± 5 rpm) 2 dakika daha karıştırılmış ve karışım sonlandırılmıştır.

Uygulama sıcaklıklarının etkisinin belirlenmesi için reolojik deneyler 10 °C, 25 °C, 40 °C sıcaklıklarda tekrarlanmıştır.

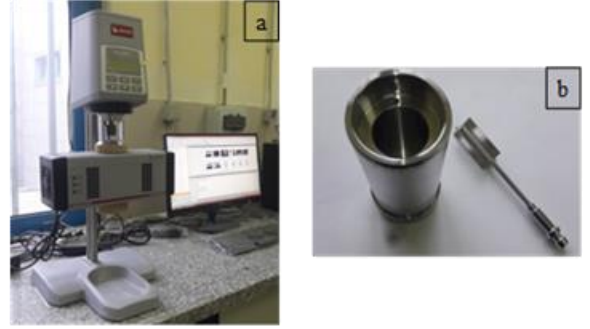
### Deneysel Çalışma

#### Mini-slump test

Mini-slump testi üretilen hamur karışımlarının işlenebilirliğinin belirlenmesi için ASTM C1437'ye uygun olarak üretimden hemen sonra yapılmıştır. Yukarıda bahsedilen karışım prosedürüne uygun olarak üretilen hamur numune, üst çap uzunluğu 70 mm, alt çap uzunluğu 100 mm ve yüksekliği 50 mm olan standart Hagermann kesik konisine iki tabakada yerleştirilir. Her tabakada hamur numune 20 kez tokmaklanır. Kesik koni kaldırılır ve tabla manuel olarak 25 kez sarsılır. Sarsma sonucu elde edilen yayılma çapı iki birbirine dik doğrultuda ölçülür ve ortalama değer malzemenin işlenebilirliği olarak kaydedilir.

### Reolojik ölçümler

Reolojik özellikler Anton Paar Rheolab QC rotasyonel reometresi kullanılarak belirlenmiştir (Şekil 2 (a)). Ölçüm için çapı 11 mm, uzunluğu 40 mm olan dört kanatlı uç kullanılmıştır (Şekil 2 (b)).



Şekil 2. (a) Rotasyonel reometre and (b) Dört kanatlı uç (four blade vane)

Yaklaşık 35 ml hamur reometre ölçüm kabına yerleştirilmiştir. Hamur üretiminden deneyin başlamasına dek geçen süre yaklaşık 5 dakikadır. Ölçümler üretimden hemen sonra alınmıştır.

Reolojik özelliklerin belirlenmesi için kademeli artan ve kademeli azalan kayma gerilmesi oranlarını uygulanmıştır. Şekil değiştirme kontrollü ölçüm ile ana reolojik parametreler olan eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozite belirlenmiştir.

Kayma gerilmesi ( $\tau$ ) ve kayma hızı ( $\dot{\gamma}$ ) temel reolojik özelliklerdir. Kayma gerilmesi malzemenin birim alanına uygulanan kuvveti, kayma hızı ise hız gradyanını ifade etmektedir. Bu çalışmada maksimum kayma hızı olarak 100 s<sup>-1</sup> seçilmiştir. Bu değer uygulamadaki değerleri yansıttığı ve önceki pek çok çalışmada da kullanıldığı görülmektedir [16]–[20].

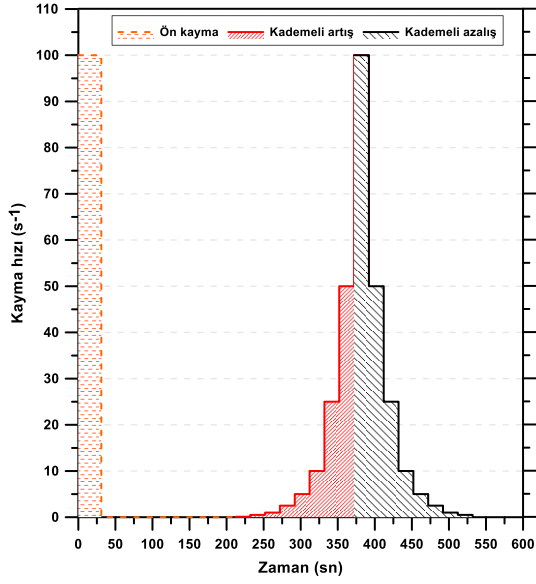
Eşik kayma gerilmesinin belirlenmesinde kayma gerilmesi ( $\tau$ ) - kayma hızı ( $\dot{\gamma}$ ) eğrisinde stres platosunun net bir şekilde elde edilmesi için geniş bir aralıkta kayma hızı uygulanması gerekmektedir [20]. Bu nedenle, 0,05-100 s<sup>-1</sup> kayma hızı aralığının uygulanmasına karar verilmiştir. Çimento esaslı sistemlerde de bu aralığın kullanıldığı görülmektedir [16]–[21].

Akış eğrileri 3 aşamada elde edilmiştir:

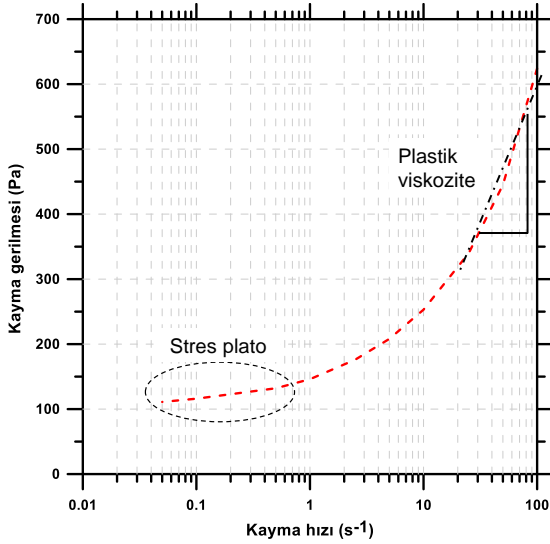
- 100 s<sup>-1</sup> kayma hızında 30 sn süresince ön kayma gerilmesi uygulanması
- 180 sn dinlenme
- 0 s<sup>-1</sup>'den 100 s<sup>-1</sup>'e kademeli artış
- 100 s<sup>-1</sup>'den 0 s<sup>-1</sup>'e kademeli azalış (Şekil 3)

Kararlı kayma gerilmeleri elde edilmesi için her bir kayma hızı 20 sn süresince uygulanmıştır. Ölçüm yaklaşık 9 dakika sürmüştür. Her ölçüm elde edilen verilerin doğrulanması için tekrarlanmıştır. Ölçüm sonucunda serilerin kayma gerilmesi-kayma hızı eğrileri kayma hızı x-ekseninde logaritmik olarak gösterilecek şekilde çizdirilmiş ve azalan hız değerleri dikkate alındığında stres plato elde edilmektedir. Stres platonun ortalama değeri eşik kayma gerilmesini, 100 s<sup>-1</sup> ile

25 s<sup>-1</sup> kayma hızı değerleri arasındaki eğrinin eğimi ise plastik viskoziteyi göstermektedir (Şekil 4).

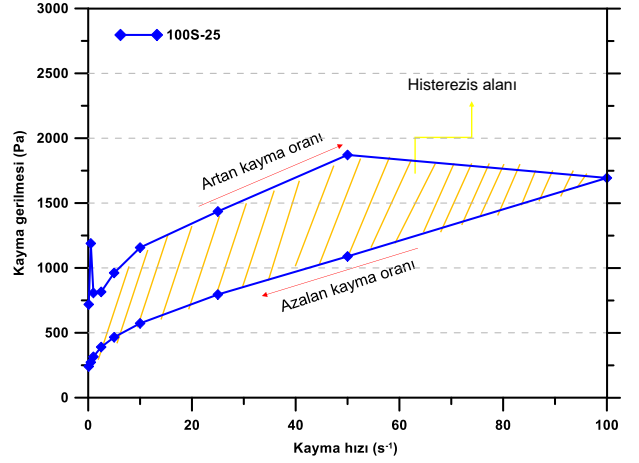


Şekil 3. Eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozitenin belirlenmesi için uygulanan kayma hızı değeri-zaman ilişkisi



Şekil 4. Eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozitenin belirlenmesi

Çalışmada NC ile aktive edilmiş cüruf/uçucu kül karışımlarının tiksotropik özelliklerinin belirlenmesi için tipik histerezis döngüsü reoloji metodu uygulanmıştır (Şekil 5). Çimento esaslı malzemeler için tiksotropi genellikle çıkış ve iniş eğrilerinin arasında kalan alanın hesaplanması ile belirlenir ve buna histerezis döngüsü denilmektedir. Bu metotla elde edilen sonuçlar uygulanan test prosedürlerine ve ekipmana göre değişiklik gösterdiği için hala bazı eksikleri bulunmaktadır [22]. Bu çalışmada elde edilen tipik bir histerezis döngüsü Şekil 5'te görülmektedir.



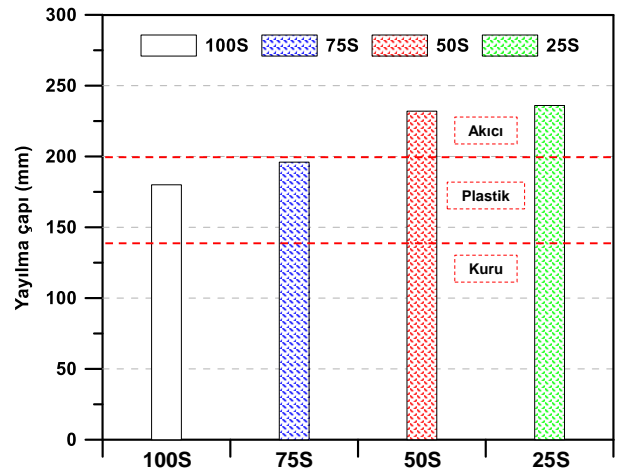
Şekil 5. Tipik histerezis döngüsü belirlenmesi

## Sonuçlar ve Tartışmalar

### Yayılma

Mini-slump deneyi çimento esaslı sistemlerde işlenebilirliğin belirlenmesi için uygulanan yöntemlerden biridir. Bu deneyden elde edilen sonuçlar ile malzemelerin diğer reolojik özellikleri arasında ilişki kurulabilmekte; hamurda görülebilen yapısal iyileşme (*structural recovery*) ve topaklanma (*flocculation*) daha iyi analiz edilebilmektedir.

NC ile aktive edilmiş cüruf esaslı, uçucu kül katkı sistemlerde 25 °C'de elde edilen yayılma çapları Şekil 6'da verilmiştir. Buna göre, kontrol serisi olan 100S'de yayılma çapı 180 mm iken, uçucu kül ikamesi ile yayılma çapı artmış; daha yüksek miktarda uçucu kül yer değiştirmesi ile elde edilen yayılma çapı daha yüksek değerlere erişmiştir. 50S ve 25S karışımlarının benzer işlenebilirliğe sahip oldukları görülmektedir. Kontrol serisi 100S ile en yüksek yayılma çapına sahip olan 25S serisi arasındaki fark %31'dir. Uçucu külün yayılma çapını artırma sebebi uçucu külün küresel tanecik sahip olması nedeni ile akıcılığı kolaylaştırmış olmasına bağlanmıştır [23].



Şekil 6. Karışımların 25 °C'deki yayılma çapları

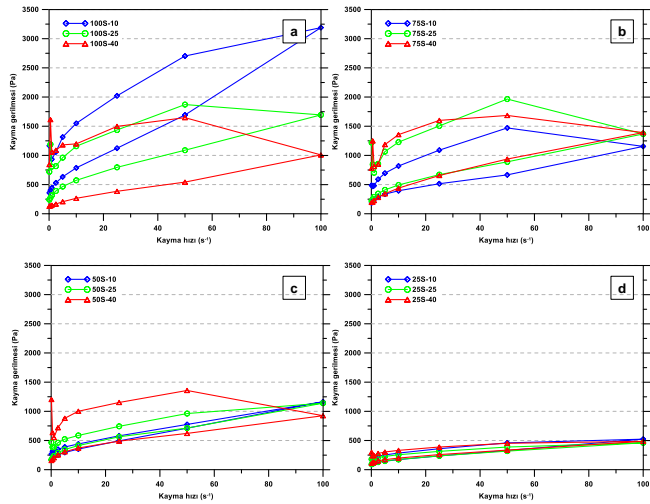
Önceki bir çalışmada, AAM'lerin malzemelerin sahip oldukları yayılma çaplarına göre malzemenin kuru, plastik ya da akıcı kıvamı olmasının belirlenebildiği ifade edilmiştir [24]. Buna göre, bu çalışmadaki tüm karışımların en azından plastik kıvama sahip oldukları, yüksek miktarda uçucu kül

kullanılan 50S ve 25S serilerinin ise akıcı kıvama sahip oldukları görülmektedir (Şekil 6).

### Akış eğrileri

Farklı uygulama sıcaklıkları altında, artan ve azalan kayma gerilme oranlarına karşılık NC ile aktive edilmiş çüruf esaslı, uçucu kül katkılı karışımların gösterdiği kayma gerilmesi-kayma hızı değişim eğrileri Şekil 7 (a)-(d)'de verilmiştir.

Karışımların karıştırıldıkları sürece kayma incelmesi (*shear-thinning*) davranışı gösterdiği ve Newtonyan olmayan davranışın Herschel-Bulkley modeline uygun olduğu görülmektedir. Statik koşullar altında çimento esaslı vb. malzemeler kayma kalınlaşması davranışı (*shear-thickening*) özelliği göstermektedir. Belli kayma hızı altında, görünen viskozite değerleri azalmakta, kayma gerilmesi uygulanmadığı zaman ise malzeme kendini toparlamaktadır. Şekil 7'den de görüleceği üzere tüm karışımların artan kayma hızında azalan kayma gerilmesi oranlarına göre daha yüksek kayma gerilmesi değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Buna göre, 10 °C'de en yüksek kayma gerilmesine ulaşan seri 100S iken 25 °C ve 40 °C'de 75S serisi olmuştur.



Şekil 7. Karışımların akış eğrileri (a) 100S, (b) 75S, (c) 50S, (d) 25S

Uçucu kül ikamesi ile 10 °C'de maksimum kayma hızında (100 s<sup>-1</sup>) erişilen kayma gerilmesi değerleri düşmüş; 75S ve 50S serileri benzer değerlere (~1200 Pa) ulaşmışlardır. 25 °C'de uçucu kül ikamesi maksimum kayma hızında erişilen değerleri düşürmüştür, 40 °C'de ise %25 uçucu kül ikamesi ile (75S serisi) artış görülmüş, daha fazla ikame ile yeniden düşüş görülmüştür. %75 uçucu kül içeren 25S serisi her sıcaklıkta benzer değerlere ulaşmıştır (Şekil 7).

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, 100S serisi sıcaklık arttıkça daha düşük maksimum gerilmelere erişilmekte, 10 °C'den 40 °C'ye artış ile maksimum gerilme üçte bir değerine düşmüştür. Benzer şekilde, 75S serisinde de kayma gerilmesinde azalma görülmektedir ve bu azalma 100S'deki azalmaya göre çok daha düşük seviyelerdedir. 50S ve 25S serilerinde ise sıcaklığa göre kayda değer bir değişim görülmemiştir.

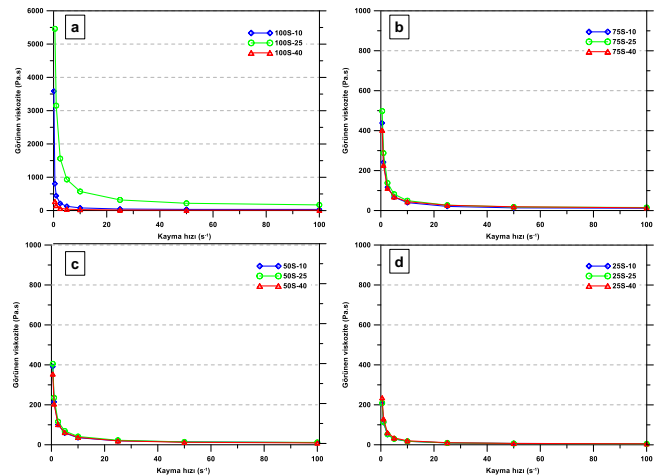
Uçucu kül ve sıcaklık değişimlerine bağlı olarak histerezis alanında farklılıklar görülmektedir. Bu konu "Tiksotropik davranış" başlığı altında detaylı olarak incelenmiştir.

### Görünen viskozite- kayma hızı ilişkisi

Karışımların görünen viskozite-kayma gerilmesi ilişkileri Şekil 8'de paylaşılmıştır. Uygulanan kayma gerilmesine bağlı olarak zamanla görünen viskozite düşmeye başlamaktadır. Bu, kayma incelmesi (*shear-thinning*) nedeniyle meydana gelen, artan yapısal bozulmadan kaynaklanmaktadır. Kayma sonrası bozulan bağların sayısına bağlı olarak yapı yeniden eski haline dönmeye başlamaktadır [25].

Görünen viskozite eğrileri uçucu kül ikamesi ile azalmakta; daha düşük değerlere sahip olmaktadır. Bunun sebebi, hamur kayma gerilmesi etkisi altında iken topaklanmaların yok olmasıdır. Kayma gerilmesi altında hamur sürekli olarak incelik; kayma incelmeye görülür.

Kontrol serisinde (100S), uçucu kül ikamesi olmadığında, hamur tipik kayma incelmeye davranışı gösterir. Uçucu kül ikamesindeki artış ile kayma hızının görünen viskozite üzerindeki etkisi azalır. Bunun nedeni uçucu kül ikamesi ile hamurun incelmeye davranışı göstermesi ve zamanla Newtonyan akışa yakın bir kıvama sahip olmasıdır. Bu durumda eğri X eksenine daha paralel hale gelmektedir. Şekil 8 (b)-(d) den de görüleceği gibi uçucu kül ikamesi arttıkça karışımlar daha ince olmakta, görünen viskozite düşmekte ve Newtonyan akışa yaklaşmaktadır. En yüksek görünen viskozite değerleri 100S'de elde edilirken en düşük değerler 25S serilerinde elde edilmiştir.



Şekil 8. Karışımların 10 °C, 25 °C ve 40 °C'deki görünen viskozite-kayma hızı eğrileri (a) 100S, (b) 75S, (c) 50S, (d) 25S

### Eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozite

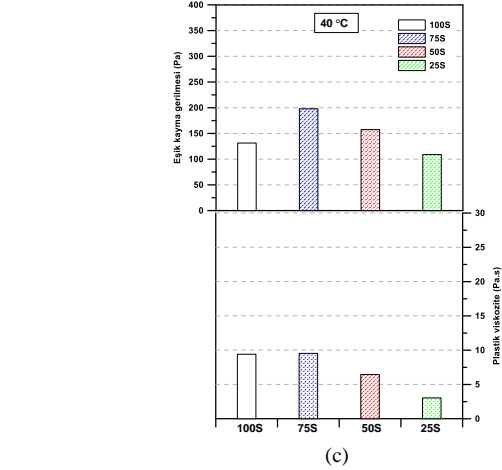
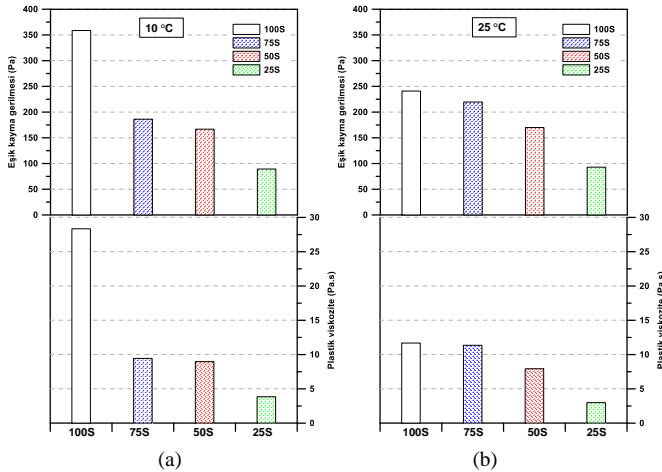
Eşik kayma gerilmesi ( $\tau_0$ ), betonun doldurma yeteneğini kullanabilmek için uygulanması için gerekli minimum gerilmenin büyüklüğüdür. Plastik viskozite ( $\mu$ ) betonun akışa geçtikten sonraki kayma hızı ile ilişkilidir. Düşük plastik viskoziteye sahip betonlar akışa geçtikten sonra daha hızlı hareket ederken, yüksek olanlar daha yavaş hareket edecektir. Plastik viskozite pompalanabilme veya döküm hızı gibi özellikleri etkilerken, taze betonun kalıbı doldurabilme yeteneğini etkileyen en önemli parametre eşik kayma gerilmesidir ( $\tau_0$ ). Viskozite, malzemenin kalıba yerleşme süresini etkilemektedir. Taze betonun reolojik davranışı genelde belli bir plastik viskoziteye sahip olan Bingham ya da Herschel-Bulkley sıvısı olarak modellenir [15], [26].

Bu çalışmada üretilen NC ile aktive edilmiş cüruf/uçucu kül karışımlarının farklı uygulama sıcaklıkları etkisi altında gösterdikleri eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozite değerleri Şekil 9'da verilmiştir. Her sıcaklıkta en yüksek ve en düşük kayma gerilmesine sırasıyla 100S ve 25S karışımlarının sahip olduğu görülmektedir. Sadece 40 °C'de 100S serisi daha düşük değer göstermiştir. Uçucu kül oranı arttıkça eşik kayma gerilmesi değeri azalmış, en büyük azalma 10 °C'de gerçekleşmiştir. Serilerin sıcaklığa bağlı olarak eşik kayma gerilmesi değerleri 100S serisi hariç az miktarda artmış ya da azalmıştır. 100S serisi en yüksek kayma gerilmesini 10 °C de gösterirken (357 Pa) 40 °C'de 131 Pa değerine ulaşmıştır. 25S serisinde kayma gerilmeleri sıcaklığa göre 89 Pa ile 109 Pa arasında değişmiştir.

Eşik kayma gerilmesinin malzemenin viskozitesine, parçacıklar arası kuvvetlere ve olası parçacık topaklanmasına bağlı olduğu bilinmektedir [27]–[29]. Karışımlarda kullanılan katı oranı aynı iken farklı uçucu kül katkısı ile karışımların viskoziteleri değişmiş; uçucu kül oranı arttıkça viskozite ve buna bağlı olarak eşik kayma gerilmesi düşmüştür. Sıcaklık etkisi altında parçacıklar arası kuvvetler zayıflar ve daha düşük eşik kayma gerilmesi elde edilmektedir. Çalışma sonuçlarında 100S karışımının en yüksek oranda sıcaklık değişiminden etkilendiği görülmüş, uçucu kül oranı arttıkça sıcaklık etkisi daha az etkin olmuştur.

Plastik viskozite değerleri uçucu kül ikame oranı arttıkça azalmıştır. %25 ikame 25 °C ve 40 °C'lerde kayda değer düşüş sağlamamışken %50 ve %75 ikame oranlarında yüksek miktarda düşüş sağlamıştır. Ayrıca, 10 °C'de %25'lik uçucu kül ikamesi plastik viskozite kontrol karışımına göre üçte bir değerine düşmüştür.

Sıcaklık değişiminden en çok etkilenen serinin 100S olduğu görülmektedir. Bu seride 10 °C'de çok yüksek kayma gerilmesi ve plastik viskozite değerleri elde edilmişken, sıcaklığın artması ile her iki sıcaklıkta da kayda değer düşüşler görülmüştür (Şekil 9).



Şekil 9. Karışımların farklı uygulama sıcaklıkları altında kayma gerilmesi ve plastik viskozite değerleri (a) 10 °C, (b) 25 °C ve (c) 40 °C

### Tiksotropik davranış

Histerezis döngüsü çimento esaslı malzemelerin tiksotropisini ölçmek için kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir. Bu metotta, iki akış eğrisinin altında kalan alan, yukarı yönlü artan eğri ile aşağı yönlü azalan eğri arasında kalan alan, malzemenin tiksotropisini ifade etmektedir. Artan eğri ile kayma hızı 0'dan maksimum değere dek kademeli olarak artmakta ve oluşmuş yapıyı bozmaktadır. Daha sonra, azalan eğri ile kayma hızı kademeli olarak maksimum değerden 0'a doğru azalmaktadır ve malzemenin toparlanmasına, bozulan yapısının yeniden yapılanmasına izin vermektedir. Bu iki eğri arasındaki alanın, başlangıçta oluşmuş olan bağları koparmak için birim zamanda birim hacimde yapılan işi ifade ettiği belirtilmektedir [30].

Şekil 7'de verilmiş olan akış eğrilerinin artan ve azalan eğrilerin arasında kalan alan histerezis döngüsü olarak adlandırılmıştır. Entegre histerezis alanı tiksotropi derecesini ifade etmektedir. Daha büyük alan daha tiksotropik malzemeyi ifade etmektedir. İntegrasyon metodu aşağıda gösterilmiştir.

Histerezis alanı aşağıda verilen integrasyon eşitliği (1) ile hesaplanabilmektedir.

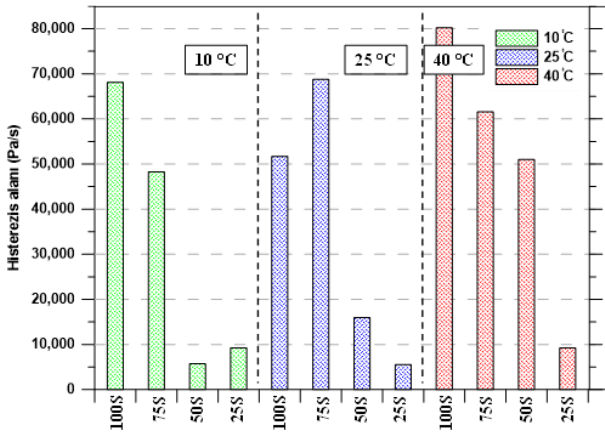
$$S = \int_{x_1}^{x_2} (Y_1 - Y_2) dx \quad (1)$$

S histerezis alanını (Pa.s);  $x_1$  ve  $x_2$  ilk ve son kayma gerilmesi oranlarını ( $s^{-1}$ );  $Y_1$  ve  $Y_2$  ise eğrilerin artan kısım ve azalan kısım arasındaki fonksiyonel ilişkiyi göstermektedir.

Şekil 10'da tüm serilerin farklı sıcaklık etkisi altındaki histerezis alanları verilmiştir. 25 °C'deki 75S serisi hariç tüm serilerde uçucu kül ikamesi ile histerezis alanı azalmıştır. 10 °C ve 25 °C'lerde %50 ve daha fazla uçucu kül ikamesi çok yüksek düşüşe neden olurken 40 °C'de %75 uçucu kül ikamesi ile histerezis alanı önemli derecede azalmıştır. 10 °C'de %50 uçucu kül ikamesi, 40 °C'de ise %75 uçucu kül ikamesi malzeme tiksotropisini azaltmıştır. 25 °C'de %25 uçucu kül ikamesi ile histerezis alanında artış görülmüştür, malzeme daha tiksotropik davranış göstermiştir.

25 °C'den 40 °C'ye sıcaklık artışı, daha büyük bir yapısal bozulmaya neden olarak histerezis döngüsü alanında artışa neden olmuştur. Bu, sıcaklık etkisi ile bağlayıcıların

reaktivitesinin artması ve erken yaşta oluşan hidrasyon ürünlerindeki tanecikler arası bağlar ile ilgilidir [31].



Şekil 10. Serilerin histerezis alan değerleri

## Sonuçlar

Bu çalışmada sodyum karbonatla aktive edilmiş cüruf esaslı hamur karışımlarının reolojik özellikleri araştırılmıştır. Karışımlara farklı oranlarda uçucu kül ikamesinin ve farklı uygulama sıcaklıklarının reolojik özellikler üzerindeki etkisi ortaya çıkarılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Sodyum karbonatla aktive edilmiş cüruf esaslı karışımlar çimento esaslı sistemler yerine kullanılabilir, benzer reolojik özelliklere sahiptirler.
- Uçucu kül ikamesi işlenebilirliği iyileştirmekte, eşik kayma gerilmesi ve plastik viskoziteyi düşürmektedir. Daha yüksek ikame oranları daha yüksek iyileşme sağlamaktadır.
- Farklı uygulama sıcaklıkları etkisi altında malzemelerin reolojik özellikleri değişkenlik göstermektedir. Sıcaklık artışı sonucu malzeme kayma incelmeleri davranışı göstermekte, sıcaklık arttıkça daha düşük kayma gerilmesi ve viskozite değerleri elde edilmektedir. Uygulamada yüksek kayma gerilmesi ve viskozitesi nedeniyle en çok zorlanılan karışım, kontrol karışımı olan 100S serisidir.
- Eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozite genel olarak birbiri ile uyumlu trend göstermiştir ancak aralarındaki ilişki lineer değildir.
- Histerezis alanı karışımların tiksotropi derecesini göstermektedir ve sıcaklık değişimleri ile uçucu kül ikamesine göre farklı değerler almaktadır.

Elde edilen tüm sonuçlar değerlendirildiğinde, sodyum karbonat ile aktive edilmiş cüruf esaslı sistemler yapı malzemesi olarak kullanılabilir ve reolojik özellikler açısından uygulamada iyi sonuçlar verecek karışımlar üretilebilecektir. Uçucu kül ikamesi reolojik özellikleri iyileştirmekte, farklı uygulama sıcaklıkları altında ise karışımların reolojik özelliklerinin değiştiği görülmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, benzer konularda yapılacak daha detaylı çalışmalara ışık tutacaktır.

## Kaynakça

- [1] K. L. Scrivener and R. J. Kirkpatrick, "Innovation in use and research on cementitious material," *Cem. Concr. Res.*, 2008, doi: 10.1016/j.cemconres.2007.09.025.
- [2] J. N. Yankwa Djobo, A. Elimbi, H. Kouamo Tchakouté, and S. Kumar, "Mechanical properties and durability of volcanic ash based geopolymer mortars," *Constr. Build. Mater.*, vol. 124, pp. 606–614, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.141.
- [3] S. Pilehvar *et al.*, "Effect of freeze-thaw cycles on the mechanical behavior of geopolymer concrete and Portland cement concrete containing micro-encapsulated phase change materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 200, pp. 94–103, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.057>.
- [4] P. Duxson, A. Fernández-Jiménez, J. L. Provis, G. C. Lukey, A. Palomo, and J. S. J. Van Deventer, "Geopolymer technology: The current state of the art," *J. Mater. Sci.*, vol. 42, no. 9, pp. 2917–2933, May 2007, doi: 10.1007/s10853-006-0637-z.
- [5] A. F. Abdalqader, F. Jin, and A. Al-Tabbaa, "Development of greener alkali-activated cement: Utilisation of sodium carbonate for activating slag and fly ash mixtures," *J. Clean. Prod.*, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.12.010.
- [6] P. Duxson, A. Fernández-Jiménez, J. L. Provis, G. C. Lukey, A. Palomo, and J. S. J. Van Deventer, "Geopolymer technology: The current state of the art," *J. Mater. Sci.*, vol. 42, no. 9, pp. 2917–2933, 2007, doi: 10.1007/s10853-006-0637-z.
- [7] J. Davidovits, "Geopolymers: inorganic polymeric new materials," *J. Therm. Anal.*, vol. 37, no. 8, pp. 1633–1656, 1991, doi: 10.1007/BF01912193.
- [8] A. Palomo, M. W. Grutzeck, and M. T. Blanco, "Alkali-activated fly ashes: A cement for the future," *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, no. 8, pp. 1323–1329, 1999, doi: 10.1016/S0008-8846(98)00243-9.
- [9] V. F. F. Barbosa and K. J. D. MacKenzie, "Thermal behaviour of inorganic geopolymers and composites derived from sodium polysialate," *Mater. Res. Bull.*, vol. 38, no. 2, pp. 319–331, 2003, doi: 10.1016/S0025-5408(02)01022-X.
- [10] H. Xu and J. S. J. van Deventer, "The geopolymerisation of aluminosilicate minerals," *Int. J. Miner. Process.*, vol. 59, no. 3, pp. 247–266, 2000, doi: 10.1016/S0301-7516(99)00074-5.
- [11] D. Hardjito, S. E. Wallah, D. M. J. Sumajouw, and B. V. Rangan, "On the development of fly ash-based geopolymer concrete," *ACI Mater. J.*, vol. 101, no. 6, pp. 467–472, 2004, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/303836414>.
- [12] N. K. Lee and H. K. Lee, "Setting and mechanical properties of alkali-activated fly ash/slag concrete manufactured at room temperature," *Constr. Build.*

- Mater.*, vol. 47, pp. 1201–1209, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.107.
- [13] X. H. Yuan, W. Chen, Z. A. Lu, and H. Chen, “Shrinkage compensation of alkali-activated slag concrete and microstructural analysis,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 66, pp. 422–428, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.085.
- [14] D. Production and N. T. Relations, “Soda ash,” no. May 2008, pp. 2008–2009, 2012.
- [15] P. F. G. Banfill, “The rheology of fresh cement and concrete—a review,” *Proc. 11th Int. Cem. Chem. Congr.*, vol. 1, no. July, pp. 50–62, 2003, doi: 10.1016/0008-8846(90)90053-Z.
- [16] M. Torres-Carrasco, C. Rodríguez-Puertas, M. Del Mar Alonso, and F. Puertas, “Alkali activated slag cements using waste glass as alternative activators. Rheological behaviour,” *Bol. la Soc. Esp. Ceram. y Vidr.*, vol. 54, no. 2, pp. 45–57, 2015, doi: 10.1016/j.bsecv.2015.03.004.
- [17] S. J. Choi, J. Il Choi, J. K. Song, and B. Y. Lee, “Rheological and mechanical properties of fiber-reinforced alkali-activated composite,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 96, pp. 112–118, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.182.
- [18] H. Mehdizadeh and E. Najafi Kani, “Rheology and apparent activation energy of alkali activated phosphorous slag,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 171, pp. 197–204, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.130.
- [19] D. P. Bentz, C. F. Ferraris, S. Z. Jones, D. Lootens, and F. Zunino, “Limestone and silica powder replacements for cement: Early-age performance,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 78, pp. 43–56, 2017, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2017.01.001.
- [20] K. Vance, G. Sant, and N. Neithalath, “The rheology of cementitious suspensions: A closer look at experimental parameters and property determination using common rheological models,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 59, pp. 38–48, 2015, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2015.03.001.
- [21] S. G. Erzençin, K. Kaya, S. Perçin Özkorucuklu, V. Özdemir, and G. Yıldırım, “The properties of cement systems superplasticized with methacrylic ester-based polycarboxylates,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 166, pp. 96–109, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.088.
- [22] P. F. G. Banfill and D. C. Saunders, “On the viscometric examination of cement pastes,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 11, no. 3, pp. 363–370, 1981, doi: https://doi.org/10.1016/0008-8846(81)90108-3.
- [23] P. Nath and P. Sarker, “Effect of fly ash on the durability properties of high strength concrete,” *Procedia Eng.*, vol. 14, pp. 1149–1156, 2011, doi: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.144.
- [24] M. M. Alonso, S. Gismera, M. T. Blanco, M. Lanzón, and F. Puertas, “Alkali-activated mortars: Workability and rheological behaviour,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 145, pp. 576–587, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.020.
- [25] J. Golaszewski, G. Cygan, M. Drewniok, and A. Kilijanek, “Rheological Properties of Scc in terms of its Thixotropic Behaviour and its Influence on Formwork Pressure,” *Int. J. Res. Eng. Technol.*, vol. 3, no. 13, 2014.
- [26] O. H. Wallevik and J. E. Wallevik, “Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, no. 12, pp. 1279–1288, 2011, doi: 10.1016/j.cemconres.2011.01.009.
- [27] R. J. Flatt and P. Bowen, “Yodel: A yield stress model for suspensions,” *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 89, no. 4, pp. 1244–1256, 2006, doi: 10.1111/j.1551-2916.2005.00888.x.
- [28] K. Vance, A. Dakhane, G. Sant, and N. Neithalath, “Observations on the rheological response of alkali activated fly ash suspensions: the role of activator type and concentration,” *Rheol. Acta*, vol. 53, no. 10–11, pp. 843–855, 2014, doi: 10.1007/s00397-014-0793-z.
- [29] D. Lowke, “Interparticle Forces and Rheology of Cement Based Suspensions,” *Nanotechnol. Constr.* 3, pp. 295–301, 2009, doi: 10.1007/978-3-642-00980-8\_39.
- [30] B. Hasanzadeh, “Testing and modeling of the thixotropic behavior of cementitious materials,” University of Louisville, 2017.
- [31] N. Roussel, “Steady and transient flow behaviour of fresh cement pastes,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, no. 9, pp. 1656–1664, 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.08.001.