

## **Akışkanlaştırıcı Katkı Kullanımının Yüksek Fırın Cürufu Esaslı Geopolimer Harçların Özelliklerine Etkisi**

Ahmet Ferdi Şenol<sup>1\*</sup> ve Nazım Çağatay Demiral<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*İnşaat Mühendisliği Bölümü /Mühendislik Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Türkiye*

*\*(ahmetferdi.senol@bilecik.edu.tr)*

**Özet** – Geopolimer, son yıllardaki yapı malzemesi literatüründe yaygın olarak kullanılan bir malzeme olmuştur. Bu malzeme genellikle; çevre dostu özellikleri, yüksek yangın direnci ve daha sürdürülebilir olması nedeniyle tercih edilmektedir. Ancak, geopolimer harçların üretim sürecinde bazı problem sahaları da ortaya çıkabilmektedir. Bunlardan biri de malzemenin işlenebilirlik özelliklerinin akışkanlaştırıcı katkı ile kısıtlı düzeyde iyileştirilebilmesidir. Bu çalışmada, yüksek fırın cürufu (YFC) esaslı geopolimer harçlarda süperakışkanlaştırıcı katkı kullanımının, işlenebilirlik ve mekanik özelliklere olan etkileri araştırılmıştır. Bu bağlamda, bağlayıcı toz ağırlığının %0, %1, %1,5 ve %2 oranlarında polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcının kullanıldığı toplam dört serilik geopolimer harç karışımları üretilmiştir. Agregabağlayıcı oranı ağırlıkça; 1,5 su/bağlayıcı oranı; 0,30 olarak belirlenmiştir. Üretilen taze geopolimer harç serilerine yayılma tablası deneyleri uygulandıktan sonra 40x40x160 mm boyutlarındaki numunelere 7 ve 28 gün süre ile ortam kürü (laboratuvarda 22 ± 2 °C) uygulanmıştır. Kür sonundaki sertleşmiş harç numuneleri üzerinde, eğilme ve basınç deneyleri yapılmıştır. Çalışma sonucunda, %2 oranına kadar kullanılan akışkanlaştırıcının işlenebilirlikleri artırdığı, %1,5 ile %2 oranlarında akışkanlaştırıcı katkı kullanımının benzer (%1’lik yayılma değeri farkı) işlenebilirlik özellikleri gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca kullanılan akışkanlaştırıcı katkı miktarının artması ile harç numunelerinin eğilme ve basınç dayanımlarının da azaldığı sonucuna varılmıştır.

*Anahtar Kelimeler – Alkali Aktivasyon, Yüksek Fırın Cürufu, Süperakışkanlaştırıcı, Geopolimer Harç, İşlenebilirlik*

### **I. GİRİŞ**

Geopolimerler, inşaat ve endüstriyel atıklar gibi çeşitli kaynaklardan elde edilebilen, alüminosilikat esaslı öncül malzemeler ve alkali aktivatörler kullanılarak üretilen, çevre dostu alternatif inorganik ve polimerik malzemelerdir. Genellikle, sodyum hidroksit, potasyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılarak aktivasyon sağlanmaktadır. Geopolimerlerin çevre dostu olması, bazı etkenlere karşı yüksek dayanıklılığı ve iyi termal yalıtım özellikleri nedeniyle çeşitli inşaat uygulamaları için ilgi çekici bir seçenek oluşturmaktadır.

Geopolimerlerin özellikleri; öncül malzemelerin ve aktivasyon çözeltilerinin oranları, kür koşulları, sıcaklık, nem, malzeme özellikleri gibi faktörlere bağlı olarak değişebilir. Geopolimerizasyon sürecinde, aktivasyon çözeltisi reaksiyona

girdiğinde, karışıma işlenebilirlik özelliği kazandırır. Bu alkali aktivatör, karışımın işlenebilirlik özelliklerini etkiler ve geopolimerin mekanik, termal ve yapısal özelliklerine etki edebilir.

Birçok çalışma, farklı akışkanlaştırıcı konsantrasyonlarının, farklı alkali aktivatör çözeltisi bileşimlerinin ve farklı kür sıcaklıklarının geopolimer malzemelerin özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu çalışmalar, akışkanlaştırıcı kullanımının malzemenin taze ve sertleşmiş hal özelliklerine çeşitli etkileri olduğunu raporlamıştır. Fakat literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde; geopolimerde akışkanlaştırıcı katkı kullanımının malzeme özelliklerine etkileri ve ne tür akışkanlaştırıcının daha efektif olduğu ile ilgili fikir ayrılıkları olduğu görülmektedir.

Gupta vd.'nin [1] yaptığı bir çalışmada, granüle yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve süperakışkanlaştırıcı (SP) kullanılarak bir geopolimer beton kompoziti geliştirilmiştir. İki farklı karışım için SP'yi %1, %2 ve %3 oranlarında kullanarak geopolimer kompozitler hazırlanmıştır. İlk örnekte sadece granüle yüksek fırın cürufu kullanılmış, ikinci örnekte ise %50 granüle yüksek fırın cürufu ile %50 uçucu kül kullanılmıştır. Geliştirilen geopolimer kompozitlerin mekanik ve dayanıklılık özelliklerini belirlemek için deneyler yapılmıştır. Mekanik özellikleri değerlendirmek için basınç dayanımı ve çekme dayanımı deneyleri yapılmış, dayanıklılığı belirlemek için ise su emme deneyi yapılmıştır. Sonuçlar, mekanik ve dayanıklılık özelliklerinde maksimum gelişmenin %3 SP dozajı ile elde edildiğini göstermiştir. %100 granüle yüksek fırın cürufu örneği için maksimum 40,2 MPa basınç dayanımı ve 2,9 MPa maksimum çekme dayanımı elde edilmiştir. Bu karışımın su emilimi ise %2,4 olarak bulunmuştur. Bu nedenle, geopolimer beton kompoziti geliştirmek için %3 SP dozajının optimize bir şekilde kullanılabilirdiği raporlanmıştır.

Nematollahi ve Sanjayan [2] tarafından, farklı ticari SP'lerin işlenebilirlik ve dayanım üzerindeki etkileri, F tipi uçucu kül bazlı geopolimer hamurunun iki farklı ve çok bileşenli bir aktivatör kombinasyonu ile aktive edilmesiyle değerlendirilmiştir. Bu SP'ler, uçucu külün ağırlıkça %1'lik bir oranda taze hamura ilave edilmesi ve uçucu kül hamurunun akıcılığının mini slump testi ile ölçüldükten sonra SP kullanılmayan hamurun akıcılığıyla karşılaştırılması sonucunda değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlara göre, farklı SP'nin uçucu kül bazlı geopolimerin çalışabilirliği ve dayanım üzerindeki etkisinin aktivatör ve SP tipine bağlı olduğunu belirtmiştir. Aktivatör olarak 8 Mol NaOH çözeltisi kullanıldığında, naftalin bazlı süperakışkanlaştırıcının etkili bir tür olduğu, çok bileşenli aktivatör kullanıldığında ise modifiye polikarboksilat esaslı SP'nin en verimli tür olduğu belirlenmiştir.

Verma vd. [3] SP'nin geopolimer betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisini analiz etmek için üretilen geopolimer betonların basınç, eğilme, çekme dayanımları ve elastisite modülünü belirlemişlerdir. Çalışmada naftalin sülfona formaldehit bazlı SP kullanılmıştır. Çalışma sonucunda geopolimer beton karışım tasarımındaki SP'nin %1 dozajında optimum dayanım noktasına

geldiği belirtilmiştir. Ayrıca, geopolimer beton karışımlarında %1 SP oranına kadar dayanım ve işlenebilirliğin arttığı raporlanmıştır.

Pasupathy vd. [4], kimyasal köpürtme yöntemiyle üretilen geopolimer köpük betonunda SP kullanarak köpürme davranışını artırma yöntemini araştırmışlardır. Geopolimer köpük betonu alüminyum tozu kullanılarak üretilmiş ve polikarboksilat bazlı bir SP, farklı dozlarda uygulanmıştır. Geopolimer köpük betonun genleşme davranışı, SP dozajı ile ilişkilendirilmiş ve erken yaşta karşılık gelen verimlilik artışı incelenmiştir. Sonuçlar, aynı alüminyum dozuna sahip olmalarına rağmen, geopolimer köpük betonun genişlemesinin karışımdaki SP dozajına bağlı olarak büyük ölçüde farklılık oluşturduğunu göstermiştir.

Puertas vd. [5] uçucu kül esaslı geopolimer betonun işlenebilirliği ve basınç dayanımı üzerine iki farklı SP'nin (naftalen ve polikarboksil esaslı) etkisini incelemişlerdir. SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O oranı 2,0 olan 7 M potasyum hidroksit çözeltisi (%28.6) + Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (%71.4) ile aktive edilmiş uçucu kül esaslı geopolimer betonun işlenebilirliğinin, naftalen ve polikarboksil esaslı SP'lerin büyük ölçüde iyileştirmediği sonucuna varmışlardır. Sonuçlara göre, polikarboksil esaslı SP'nin uçucu kül kütlelerinin %3,3'ü oranında ve naftalen esaslı SP'nin uçucu kül kütlelerinin %1,19'u oranında (%21,8) kullanımı dayanımı sırasıyla %54 ve %21,8 oranında azalttığı belirlenmiştir.

Geopolimerlere akışkanlaştırıcı katkı ilave edilmesinin etkileri hakkında daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Bu çalışmalar, gelecekteki inşaat uygulamaları için daha uygun ve optimize edilmiş geopolimer malzemelerin geliştirilmesine yardımcı olabilir. Düşük işlenebilirliği ve yüksek viskozitesi nedeniyle karıştırma, yerleştirme ve bitirme sırasında kullanımı zor olan geopolimerlerde SP kullanılarak bu dezavantajların çözüme ulaştırılmasını amaçlayan çalışmaların yapılması gerektiği düşünülmektedir.

## II. MATERYAL VE YÖNTEM

### A. Materyal

Geopolimer harçların üretiminde bağlayıcı malzeme olarak öğütülmüş yüksek fırın cürufu (YFC) kullanılmıştır. YFC, Hatay-İskenderun demir-çelik fabrikasından temin edilmiştir. YFC

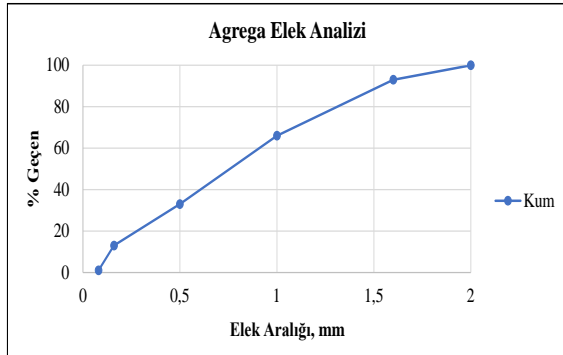
tozunun tamamı 90 µm'den daha küçük tanecik boyutlarına sahiptir. Geopolimer harç serilerinin üretiminde agrega olarak TS EN 196-1 [6]'e uygun CEN referans kumu kullanılmıştır. CEN standart kumu 0-2 mm aralığında olup Limak Batı Çimento San. ve Tic.Şti.'den temin edilmiştir. YFC'nin ve kumun kimyasal analizleri Tablo 1'de, kumun tane boyutu analizi ise Şekil 1'de sunulmuştur. Karışımlarda akışkanlaştırıcı katkı olarak; CHRYSO firmasından temin edilen, yüksek oranda su azaltıcı özellikteki polikarboksilat esaslı Delta Pr196 (1,06 g/cm<sup>3</sup>) süperakışkanlaştırıcı (SP) kullanılmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. Çalışmada kullanılan süperakışkanlaştırıcı.

Tablo 1. Karışımlardaki malzemelerin kimyasal analizi.

Oksitler, %	YFC	CEN Kumu
SiO <sub>2</sub>	32,1	93,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,2	3,1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,62	0,4
CaO	36,1	0,2
MgO	5,64	0,1
SO <sub>3</sub>	1,21	0,1
K <sub>2</sub> O	0,83	2,4
TiO <sub>2</sub>	1,07	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,01	-
MnO	1,48	-
Kızdırma Kaybı	2,35	0,6
Özgül Ağırlık, g/cm <sup>3</sup>	2,9	2,6



Şekil 1. Agrega (CEN kumu) elek analizi.

Geopolimer harçların üretiminde alkali aktivatör olarak 10 Mol (M) NaOH çözeltisi ve NaOH miktarının ağırlıkça 2,0 katı kadar Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> kullanılmıştır. Kullanılan NaOH, %99 saflıkta olup Lapointe Tic. A.Ş. 'den temin edilmiştir.

## B. Yöntem

Çalışmada YFC esaslı geopolimer harçların özelliklerine akışkanlaştırıcı katkı etkisini araştırmak amacıyla, bağlayıcı toz ağırlığının %0, %1, %1,5 ve %2 oranlarında süper akışkanlaştırıcının kullanıldığı toplam 4 serilik geopolimer harç karışımları üretilmiştir. Agrega/bağlayıcı oranı ağırlıkça; 1,5 su/bağlayıcı oranı 0,30 olarak belirlenmiştir. Üretilen geopolimer harçlara, ortam kürü (laboratuvarda 22 ± 2 °C) uygulanmıştır. Geopolimer harçların karışım oranları Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Geopolimer harçların karışım miktarları (g/dm<sup>3</sup>).

Seriler	YFC (g)	Kum (g)	SP (g)	NaOH (g)	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (g)
S0	700	1050	0	98	196
S1	700	1043	7	98	196
S1,5	700	1040	10,5	98	196
S2	700	1035	14	98	196

Geopolimer harç serilerinin üretimine, öncelikle alkali aktivatör olarak kullanılan NaOH çözeltilerinin hazırlanması ile başlanmıştır. 10 M NaOH çözeltisi elde etmek için gerekli miktardaki katı NaOH, karışımda kullanılacak su ile karıştırılmıştır. Hazırlanan çözeltiler oda sıcaklığına gelinceye kadar yaklaşık 24 saat laboratuvarda bekletilmiştir. YFC ve standart kum hazırlandıktan sonra harç mikserinde 1 dakika düşük hızda karıştırılarak karıştırma işlemine başlanmıştır. Daha sonra karışıma NaOH çözeltisi ilave edilerek, 1,5 dakika daha düşük hızda karıştırılmıştır. Homojen hale gelen karışıma süper akışkanlaştırıcı katkı azar azar ilave edilmiş ve 1,5 dk süre ile karıştırılmıştır. Daha sonra Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> karışıma azar azar ilave edilerek 1,5 dakika daha düşük hızda karıştırma işlemine devam edilmiştir. Son olarak karışımlar, 1

dakika boyunca yüksek hızda karıştırılmış ve TS EN 12350-5 [7] standartlarına uygun olarak yayılma tablası deneyleri uygulanmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Harç serilerinin üretimi ve yayılma tablası deneyi.

Hazırlanan karışımlar 40x40x160 mm boyutlarındaki standart prizmatik harç kalıplarına dökülmüştür. Kalıplarda 24 saat bekleyen numuneler, kalıptan çıkartılıp ortam koşullarında (laboratuvarında  $22 \pm 2$  °C, %50 bağıl nem) deney günlerine kadar (7 ve 28 gün) bekletilmiştir. Geopolimer harç numunelerinin mekanik özellikleri TS EN 196-1 [6]'e göre belirlenmiştir. Basınç ve eğilme dayanımı deneylerinin uygulanması için laboratuvar tipi otomatik çimento presli kullanılmıştır. Eğilme dayanımı üç noktalı eğilme dayanımı deneyi ile belirlenmiştir. Üç noktalı eğilme dayanımı deneyi her bir kür süresi (7 ve 28 gün) için üretilen üçer numune üzerine uygulanıp ortalaması alınarak elde edilmiştir. Basınç dayanımı deneyleri ise eğilme dayanımı deneyi sonucunda kırılan her bir prizmatik numunenin ikişer parçasına da uygulanıp, her kür süresi için toplam altı değer ortalaması alınarak belirlenmiştir. Yapılan deneyler Şekil 4'te gösterilmiştir.



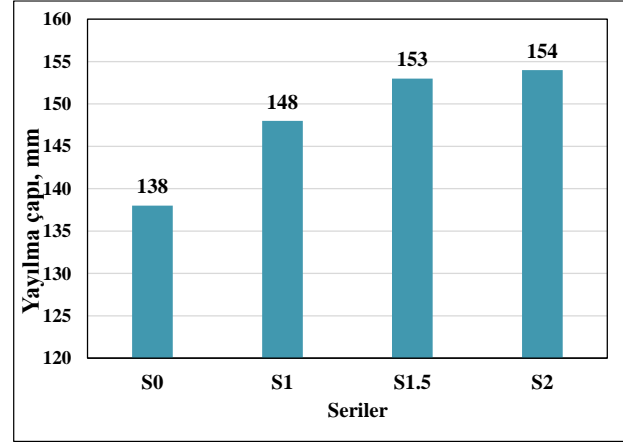
Şekil 4. Mekanik deneyler.

### III. BULGULAR

#### A. İşlenebilirlik Deney Sonuçları

Hazırlanan karışımların taze hal özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan işlenebilirlik deney sonuçları Şekil 5'te verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, bağlayıcının %1, %1,5 ve %2'si oranında SP kullanımı, S0 karışımına göre sırasıyla %7, %11 ve %12 oranında yayılma tablası

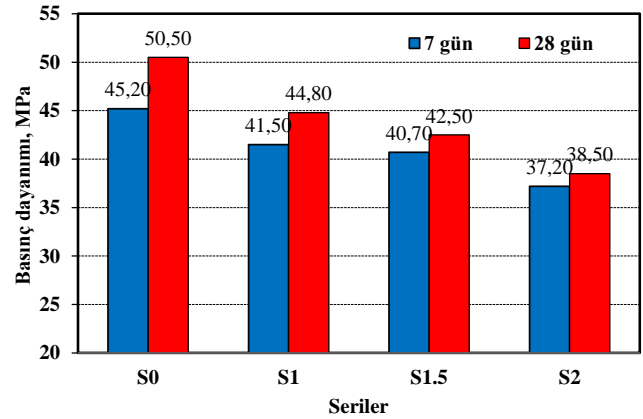
deney sonuçlarını arttırdığı görülmüştür. S2 karışım serisi 154 mm yayılma çapına ulaşarak en yüksek işlenebilirlik değeri gösteren karışım serisi olmuştur.



Şekil 5. Geopolimer harç serilerinin yayılma çapları.

#### B. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

Farklı SP içeriğine sahip geopolimer harçların 7 ve 28 günlük basınç dayanımı deney sonuçları Şekil 6'da gösterilmiştir.



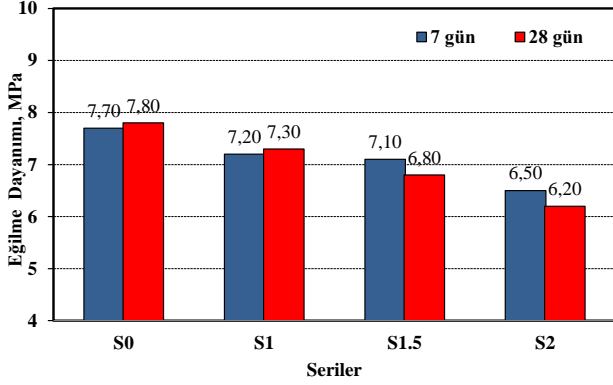
Şekil 6. Geopolimer harçların 7 ve 28 günlük basınç dayanımları.

Şekil 6'daki 7 ve 28 günlük basınç dayanımı deney sonuçlarına göre, %1, %1,5 ve %2 SP ilavesi basınç dayanımını S0 karışımına göre 7 gün için sırasıyla; %8, %10, %18 ve 28 gün için sırasıyla %11, 16 ve %24 oranında azaltmıştır.

7 günlük basınç dayanımı sonuçlarına göre en yüksek basınç dayanımı değeri 45,2 MPa (S0), 28 günlük basınç dayanımı sonuçlarına göre ise 50,50 MPa (S0) olarak belirlenmiştir.

### C. Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları

Farklı SP içeriğine sahip geopolimer harçların 7 ve 28 gün kür süresi sonunda eğilme dayanımı sonuçları şekil 7’de gösterilmiştir.



Şekil 7. Geopolimer harçların 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları.

Şekil 7’deki göre 7 ve 28 günlük eğilme dayanımı deney sonuçlarına göre, %1, %1,5 ve %2 SP ilavesi S0 karışımına göre eğilme dayanımını 7 gün için sırasıyla %6, %8, %16 ve 28 gün için sırasıyla %6, %13 ve %21 oranında azaltmıştır.

7 günlük eğilme dayanımı sonuçlarına göre en yüksek eğilme dayanımı değeri 7,7 MPa (S0), 28 günlük eğilme dayanımı sonuçlarına göre ise 7,8 MPa (S0) olarak belirlenmiştir.

### IV. TARTIŞMA

Çalışma kapsamında kullanılan SP, geopolimer harcın su/bağlayıcı oranı ihtiyacını azaltıcı etki göstermiştir. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlara göre SP kullanımı geopolimer harcın işlenebilirlik özelliklerini iyileştirici etkide bulunduğu görülmüştür. Bu nedenle, YFC bazlı geopolimer harcın SP’lerle birlikte kullanımı, daha işlenebilir bir yapı malzemesi üretimi sağlamıştır.

Basınç dayanımı sonuçlarına göre SP ilavesi karışımların işlenebilirlik özelliklerini iyileştirmesine rağmen basınç dayanımı değerlerini azalttığı belirlenmiştir. SP ilavesinin basınç dayanımını azaltmasının sebebi yüksek alkali ortamda polikarboksil esaslı SP’lerin kimyasal açıdan işlevsel ve kararlı kalmamasına bağlanabilir. Nematollahi ve Sanjayan [2], Palacios ve Puertas [8, 9] yaptıkları çalışmada polikarboksil esaslı akışkanlaştırıcıların yeterince kararlı kalamadıklarını belirten çalışmalar yapmışlardır.

Çalışma kapsamında elde edilen eğilme dayanımı bulgularına göre SP ilavesinin her iki kür süresinde

de eğilme dayanımlarında azaltıcı etki gösterdiği belirlenmiştir. Bu durumun sebebi SP’nin geopolimerizasyon reaksiyonunda kararlı yapıda kalamayıp matriste boşluklara sebep olması ve eğilme etkisi altında bu zayıflıklar sebebiyle dayanımları düşürmesine atfedilebilir.

### V. SONUÇLAR

DeneySEL çalışmalar kapsamında elde edilen sonuçlar, sırasıyla aşağıda sunulmuştur. Buna göre;

- YFC esaslı geopolimer harçlarda, bağlayıcının %2 oranına kadar polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcı kullanımı işlenebilirlikleri artırırken, %1,5 ile %2 oranlarında akışkanlaştırıcı katkı kullanımı, benzer (%1’lik yayılma değeri farkı) işlenebilirlik özellikleri göstermiştir.

- Geopolimer harç serilerinde kullanılan akışkanlaştırıcı katkı miktarı arttıkça, harç numunelerinin eğilme ve basınç dayanımları da her kür süresinde azalmaktadır. Özellikle, %1,5 oranından daha yüksek miktarda akışkanlaştırıcı kullanımı, işlenebilirlikleri değiştirmezken, harçların mekanik özelliklerini kabul edilir seviyelerin üstünde (%20’den fazla) azaltmaktadır.

- Geopolimer harç karışımlarında işlenebilirliğin iyileştirilmesi ve kabul edilebilir dayanım kaybının elde edilmesi bakımından, akışkanlaştırıcı katkı kullanımının %1,5 ile sınırlandırılmasının uygun olacağı değerlendirilmiştir.

Araştırmacılar tarafından yapılacak olan diğer çalışmalarda, geopolimer harçlarda lif kullanılması sonrası oluşacak işlenebilirlik kayıplarının, belli oranlarda polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcı kullanımı ile iyileştirilebileceği değerlendirilmektedir.

### KAYNAKLAR

- [1] Gupta, N., Gupta, A., Saxena, K. K., Shukla, A., ve Goyal, S. K. (2021). Mechanical and durability properties of geopolymer concrete composite at varying superplasticizer dosage. *Materials Today: Proceedings*, 44, 12-16.
- [2] Nematollahi, B., ve Sanjayan, J. (2014). Effect of different superplasticizers and activator combinations on workability and strength of fly ash based geopolymer. *Materials & Design*, 57, 667-672.
- [3] Verma, M., ve Dev, N. (2022). Effect of SNF-based superplasticizer on physical, mechanical and thermal

- properties of the geopolymer concrete. *Silicon*, 14(3), 965-975.
- [4] Pasupathy, K., Ramakrishnan, S., ve Sanjayan, J. (2022). Enhancing the chemical foaming process using superplasticizer in aerated geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 324, 126535.
- [5] Puertas, F., Palomo, A., Fernández-Jiménez, A., Izquierdo, J. D., & Granizo, M. L. (2003). Effect of superplasticisers on the behaviour and properties of alkaline cements. *Advances in cement research*, 15(1), 23-28
- [6] TS EN 196-1. (2016). Çimento test yöntemleri - Bölüm 1: Dayanımın belirlenmesi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [7] TS EN 12350-5. (2019). Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 5: Yayılma tablası deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [8] Palacios, M., & Puertas, F. (2004). Stability of superplasticizer and shrinkage-reducing admixtures Stability of superplasticizer and shrinkage-reducing admixtures in high basic media. *Materiales de Construcción*, 54(276), 65-86.
- [9] Palacios, M., & Puertas, F. (2005). Effect of superplasticizer and shrinkage-reducing admixtures on alkali-activated slag pastes and mortars. *Cement and concrete research*, 35(7), 1358-1367.