

NANO-SİLİKA İÇEREN GEOPOLİMER GROUT REOLOJİSİ HAKKINDA BİR ÖN ÇALIŞMA

A PRELIMINARY STUDY ABOUT RHEOLOGY OF NANO-SILICA INCLUDED GEOPOLYMER GROUT

Hamza GÜLLÜ¹, Mehmet Emin YETİM², Özcan SARIKAYA³

ÖZET

Bu bildiride, bir ön araştırma olarak nano-silika içeren (%0.5 ağırlıkça) geopolimer groutun reolojisi araştırılmıştır. Grout pompalanmasında önemli faktörler olan reolojik davranış, reolojik akım grafikleri (kayma gerilmesi-kayma hızı, viskozite-kayma hızı) ve akım karakteristikleri (akma gerilmesi, plastik viskozite) deneysel olarak belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, nano-silika içeren geopolimer groutun reolojik özelliklerinin Portland çimentolu grouta oldukça benzerlik gösterdiğine işaret etmiştir. Araştırma, nano-silika içeren geopolimer groutun zemin iyileştirmelerinde potansiyel olarak kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: *nano-silika, geopolimer, grout, reoloji*

ABSTRACT

In this paper, rheology of geopolimer grout included nano-silica (%5 by weight) is researched as a preliminary study. The important factors during grout pumping such as rheological behavior, rheological flow curves (shear stress-shear rate, viscosity-shear rate) and rheological characteristics (yield stress, plastic viscosity) are experimentally investigated. The results obtained here indicate that rheological properties of nano-silica included geopolimer grout are similar to the ones of Portland cement grout. Consequently, this work reveals that nano-silica included geopolimer grout could be potentially used for ground improvement.

Keywords: *nano-silica, geopolimer, grout, rheology*

¹ Prof. Dr., Gaziantep Üniversitesi, İnşaat Müh. Bölümü, hgullu@gantep.edu.tr

² Doktora Öğrencisi, Gaziantep Üniversitesi, İnşaat Müh. Bölümü, mehmeteminyetim1@gmail.com

³ Y.Lisans Öğrencisi, Gaziantep Üniversitesi, İnşaat Müh. Bölümü, info@tuna-muhendislik.com

1. GİRİŞ

Nanoteknoloji, hem atomik hem de moleküler seviyelerde olmak üzere malzemelerin mühendislik özelliklerini değiştirerek performanslarının iyileştirilmesinde önemli katkılar sunmaktadır. Beton veya grout uygulamalarında ultra ince danecikli nano partiküller Portland çimentosu ile birleştiğinde konvensiyonel malzemelerden daha farklı karakteristiklere sahip olmaktadırlar. Bu çimento esaslı nano malzemelerin performanslarındaki iyileşmelerin (mukavemet, durabilite, büzülme, v.s.), nano boyuttaki katı daneciklerin oluşturduğu kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) esaslı yüksek yoğunluk oluşturan kuvvetli bağlara ve çimento ile agrega danecikleri arasında oluşan sürtünme yüzeyindeki nano boyutlara indirilebilen boşluklara bağlı olduğu söylenebilir (Collepardi vd., 2005). Silis dumanı ile karşılaştırıldığında, nano-silikanın priz süresini azalttığı, terleme (bleeding) ve segregasyonu indirgediği, taze beton veya groutda kohezyonu iyileştirdiği bildirilmektedir (Senff vd., 2009). Ayrıca, koloidal silika kullanılarak kirlilik izolasyonu için bariyer sistemleri (Persoff vd., 1995; McCartney vd., 2011) ve tünel uygulamalarında stabilite (Funehag ve Gustafson, 2008) çalışmaları da mevcuttur. Çimentoya ince daneli mineraller eklendiğinde, su ile temas durumunda çimento esaslı malzemelerde oldukça kuvvetli bir sıkışma eğilimi oluşmaktadır. Bu olay groutların reolojik (akım veya pompalanabilme) davranışlarını doğrudan etkiler (Park vd., 2005). Bu yüzden, uygun stabilizerlerin kullanımı grout performansı için önemlidir. Nano-silika, koloidal partiküller arasındaki çekim kuvvetlerini arttırarak daha etkili grout karışımlarının elde edilmesine katkı sağlayabilir (Senff vd., 2009). Bazı araştırmacılar (Qing vd., 2007) karışım esnasında daneciklerin dağıtılmasındaki güçlüklerden dolayı uygun nano-silika oranlarının düşük dozajlarda (1%-5% ağırlıkça) olması gerektiğini savunurlarken, diğerleri (Jo vd., 2007) ise aşırı desikasyon ve mikro-çatlaklardan korunmak için yüksek dozajlar (10% ağırlıkça) kullanılması gerektiğine işaret etmektedirler.

Geopolimer, alüminosilikat esaslı malzemeler (uçucu kül, cüruf, metakaolin, v.s.) ile alkali aktivatörlerin (NaOH, KOH, K_2SiO_3 , Na_2SiO_3 , v.s.) tepkimesi sonucu oluşan yenilikçi inorganik polimer bağlayıcıdır. Portland çimentosu ile karşılaştırıldığında, beton teknolojisinde, mukavemet ve durabiliteye katkı sunmakta olup, sürdürülebilir bir çevresel malzeme olarak da oldukça umut vericidir. 1 ton Portland çimentosu üretimi için atmosfere 1 ton karbondioksit salındığı ve global düzeyde atmosfere verilen karbondioksit salınımının %8'inin çimento üretiminden kaynaklandığı bildirilmektedir. Bu durum, bağlayıcı malzeme olarak çimento içermeyen geopolimerin beton veya grout uygulamalarında kullanımının oldukça faydalı bir çevre dostu malzemesi olacağına işaret etmektedir (Adak vd., 2017). Yüksek miktarda uçucu küle ilave edilen nano-silika basınç mukavemetini anlamlı derecede iyileştirmiştir (Deb vd., 2013). Geopolimer (uçucu kül+prinç kabuğu külü) harçlara ilave edilen nano-silika erken mukavemet sağlamıştır (Riahi ve Nazari, 2012). Koloidal nano-silikanın (6% ağırlıkça) düşük kalsiyumlu uçucu külden üretilen geopolimere ilave edilmesi mukavemet ve durabilitede maksimum iyileşme göstermiştir (Adak vd., 2017).

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, nano-silikanın yoğunlukla geopolimer (uçucu külden üretilen) beton veya harçlarda mukavemet ve durabilite üzerindeki etkilerinin araştırıldığı gözlenmektedir. Nano-silikanın geopolimer üzerindeki reolojik (akım veya pompalanabilme) etkilerinin incelendiği bir çalışmaya rastlanmamıştır. Ayrıca, araştırmalar daha çok beton uygulamalarını kapsamakta olup, nano-silikanın geopolimer

groutlardaki etkileri oldukça araştırmaya değer bulunmaktadır. Bu bildiride, özellikle zemin iyileştirmelerindeki grout uygulamalarında faydalı olmak üzere, uçucu kül ilave edilen nano-silika ile üretilen geopolimer groutun reolojik özellikleri bir ön çalışma ile deneysel olarak araştırılmış ve nano-silikanın etkisi anlaşılmaya çalışılmıştır. Bu kapsamda, geopolimer groutun, kayma gerilmesi (pompalama basıncı), viskozitesi, kayma hızı (pompalama hızı), akma (yield) gerilmesi ve plastik viskoziteleri belirlenerek, groutun akım özellikleri değerlendirilmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Geopolimer grout elde etmek için kullanılacak olan alüminosilikatlar uçucu kül ve nano-silikadır. Bu araştırmada geopolimer groutun uçucu kül+nano-silika'dan oluşan alüminosilikat toplamında, düşük miktarda ağırlıkça %0.5 dozajlı nano-silikanın etkisi araştırılırken, kullanılan uçucu kül dozajı ise %99.5'tir. Geopolimer üretimindeki alkali aktivatörler Na_2SO_3 ve NaOH 'dir. Su ilave edilerek oluşturulan alkali çözeltide $\text{Na}_2\text{SO}_3/\text{NaOH}=2.5$ olarak kullanılmıştır. Ayrıca, alkali aktivatör/alüminosilikat, yani $(\text{Na}_2\text{SO}_3+\text{NaOH})/(\text{uçucu kül}+\text{nano-silika})=0.4$ oranında ilave edilerek geopolimer grout elde edilmiştir (Güllü vd., 2019).

Deneysel çalışmada geopolimer groutun reolojisi; çimento esaslı grout bağlayıcısında (çimento+stabilizer) "Su/Bağlayıcı" oranı $w/b=1$ olacak şekilde dikkate alınarak su ilave edilip hazırlanan alkali çözeltiden elde edilen geopolimer grout için araştırılmıştır. Groutun $w/b=1$ oranındaki karışımlarının grout ile yapılan bütün zemin iyileştirme yöntemleri (enjeksiyon, geçirimsizlik, sıkıştırma, jet-grouting) için ortak bir karışım kıvamı olduğu söylenebilir (Çelik ve Canakci, 2018). Laboratuvar ortamında ($23\pm 3^\circ\text{C}$ ve %55–%65 nem) yukarıda verilen miktar ve oranlarda malzemeler karıştırılarak geopolimer grout numunesi elde edilmiş ve reolojik deneyler yapılmıştır.

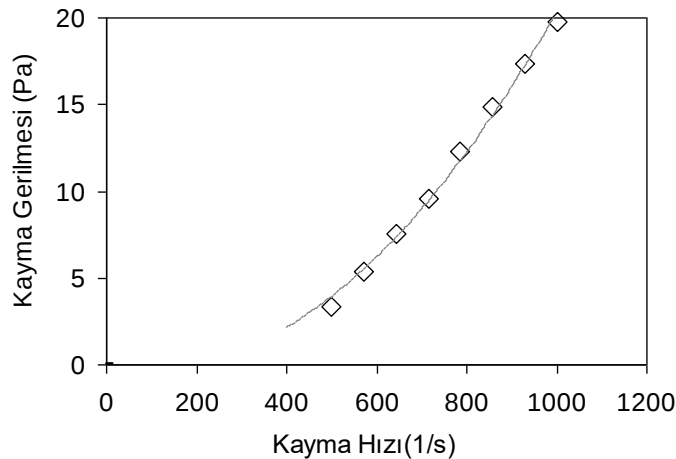
Geopolimer groutun reolojik deneyleri, viskozimetre (rheometre) cihazında DIN 53019-1 standardına göre yapılmıştır. Kayma gerilmesi ve viskozite, kayma hızlarının 500s^{-1} , 571.43s^{-1} , 642.86s^{-1} , 714.29s^{-1} , 785.71s^{-1} , 857.14s^{-1} , 928.57s^{-1} ve 1000s^{-1} değerlerinde ölçülmüştür. Deneylerden elde edilen yükselen eğilimli (ascending) ölçüm grafiği kullanılarak, reolojik grafikler olan kayma gerilmesi-kayma hızı ve viskozite-kayma hızı grafikleri çizilmiş ve bu grafiklerden geopolimer groutun akma (yield) gerilmesi ve plastik viskozitesi hesaplanmıştır. Ayrıca, reolojik grafiklerden reolojik davranış (dilatant, pseudoplastik) belirlenerek, groutun pompalama sırasındaki reolojisi değerlendirilmiştir. Akma gerilmesi ve plastik viskozite ise modifiye Bingham davranışına göre hesaplanmıştır (Sahmaran vd., 2008).

3. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

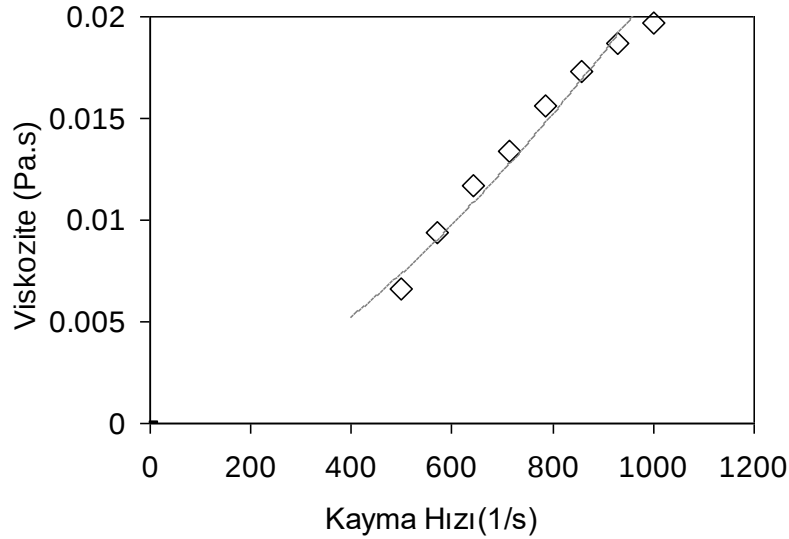
Nano-silika içeren geopolimer grout reolojisinin veya akım grafiklerinin kayma gerilmesi-kayma hızı (rate) grafiği Şekil 1'de, viskozite-kayma hızı (rate) grafiği ise Şekil 2'de verilmektedir. Grafiklerden elde edilen akma gerilmesi ve plastik viskozite değerleri ise Tablo 1'de sunulmaktadır. Pratik uygulamalarda, groutun reolojik grafiklerindeki kayma gerilmesi tepkileri pompa basıncı, kayma hızı ise pompa hızı olarak yorumlanabilir (Güllü vd., 2019).

Reolojik grafiklerden görüldüğü üzere, groutun kayma hızı (pompa hızı) arttığında, kayma gerilmesi (pompa basıncı) de artmaktadır (şekil 1). Aynı şekilde, pompa hızı arttığında grout viskozitesi de artmaktadır (şekil 2). şekil 1 ve şekil 2'ile elde edilen reolojik veya akım grafikleri pompalama esnasındaki groutun dilatant (shear thickening) davranışına işaret etmektedir. Yani, pompa hızı arttığında viskozitesi artarak katılaşan (thick) bir grout davranışını temsil eder. Dilatant davranış, yeterli miktarlarda küçük çaplı danelerden oluşan partiküllere sahip grout karışımlarında gözlemlenebilir. Nano-silika kullanımı bu tür davranışların oluşumunda etkili olmuş olabilir. Dilatant davranışda, grout viskozitesi pompa hızı ile birlikte arttığı için özellikle yüksek hızlarda akım gerektiren groutlarda yüksek pompalama enerjisine ihtiyaç duyulurken, düşük hızlarda akım gerektiren groutlarda ise nispeten daha düşük enerjilerde pompalama yapılabilir (Feys vd., 2009). Bu yüzden yüksek hızlarda grout pompalanırken oldukça dikkatli olmak gerekir. Yüksek pompalama hızları aynı zamanda grout ekipmanlarında sarsıntıya sebep olabileceği için, uygulama esnasında oluşabilecek ters etkilere karşı da tetikte olmak gerekir. Nano-silikanın %0.5 dozajında kullanıldığı geopolimer groutun düşük pompa hızlarında pompalanacak şekilde tasarlanarak zemin iyileştirmede kullanılması daha faydalı olabilir. Böylece, hem enerji tasarrufu açısından hem de ekipman güvenliği açısından grout uygulamalarına katkı sağlanmış olur.

Detayları bu bildiride sunulmayan sadece Portland imentolu groutun reolojik davranışı da, nano-silika içeren geopolimer grout gibi dilatant olarak bulunmuştur. Portland imentosunun davranışını referans olarak kabul edersek, nano-silika içeren geopolimer grout reolojik davranış açısından Portland imnetolu grouta alternatif olabilir. Ayrıca, nano-silika içeren geopolimer groutların reolojik grafiklerinden elde edilen kayma gerilmesi-kayma hızı ve viskozite-kayma hızı tepkilerinin (şekil 1-2) Portland imentolu groutdan elde edilenler ile çok yakın oldukları belirlenmiştir. Tablo 1'de sunulan geopolimer groutun akma gerilmesi ve plastik viskozitesinin de Portland imentolu grout ile benzer olduğu söylenebilir. Pratikte grout ile yapılan zemin iyileştirmelerinde çoğunlukla kullanılan ve geleneksel olan Portland imentolu groutun reolojik davranışını ve tepkilerini referans (lt) olarak alabiliriz. Dolayısıyla, Portland imentolu grouta çok yakın reolojik tepkiler göstermesi nedeniyle nano-silika içeren geopolimer groutun zemin iyileştirmelerinde iyi bir potansiyele sahip olduğu ortaya çıkmakta ve grout uygulamaları için önemli katkılar sağlayacağı anlaşılmaktadır.



şekil 1. Kayma Gerilmesi-Kayma Hızı Grafiği



Şekil 2. Viskozite-Kayma Hızı Grafiği

Tablo 1. Akma Gerilmesi ve Plastik Viskozite

Parametre	Değer
Akma gerilmesi (Pa)	0
Plastik Viskozite (Pa.s)	0.0046

4. SONUÇ

Bu çalışmada, %0.5 dozajında nano-silika içeren geopolimer groutun reolojik özellikleri deneysel olarak araştırılmıştır. Grout pompalanmasını modelleyen ve reolojik akım grafikleri olan kayma gerilmesi-kayma hızı ve viskozite-kayma hızı elde edilmiş, akma gerilmesi ve plastik viskozite değerleri hesaplanmıştır. Çalışmadan elde edilen bulgular, nano-silika içeren geopolimer groutun reolojik tepkilerinin, Portland çimentolu grouta oldukça yakın olduğunu göstermiştir. Araştırma, nano-silika içeren geopolimer groutun zemin iyileştirilmesinde potansiyel olarak katkı sağlayabileceğini ortaya koymuştur.

KAYNAKLAR

- Adak, D., Sarkar, M., Mandal, S. (2014), "Effect of nano-silica on strength and durability of fly ash based geopolimer mortar", *Construction and Building Materials*, 70, 453–459.
- Adak, D., Sarkar, M., Mandal, S. (2017), "Structural performance of nano-silica modified fly-ash based geopolimer concrete", *Construction and Building Materials*, 135, 430–439.
- Celik, F., Canakci, H. (2018), "Examination of the mechanical properties and failure pattern of soilcrete mixtures modified with rice husk ash", *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1-16. Doi:10.1080/19648189.2018.1458656.

- Collepardi, S., Borsoi, A., Ogoumah Olagot, J.J., Troli, R., Collepardi, M., Cursio, A.Q. (2005), "Influence of nano-sized mineral additions on performance of SCC", In: Proceedings of the 6th international congress, global construction, ultimate concrete opportunities, Dundee, UK; 5-7 July.
- Deb, P.S., Nathii P., Sarkar, P.K. (2013), "Strength and permeation properties of slag blended fly ash based geopolimer concrete", *Advanced Materials Research*, 05, 168–173.
- DIN 53019-1. "Viscometry-measurement of viscosities and flow curves by means of rotational viscometers- Part 1: Principles and measuring geometry"
- Feys, D., Verhoeven, R., De Schutter, G. (2009), "Why is fresh self-compacting concrete shear thickening?", *Cement and Concrete Research*, 39(6), 510-523.
- Funehag, J., Gustafson, G. (2008), "Design of grouting with silica sol in hard rock-New methods for calculation of penetration length, Part I", *Tunneling and Underground Space Technology*, 23, 1–8.
- Güllü, H., Cevik, A., Al-Ezzi, K.M., Gülsan, M.E. (2019). "On the rheology of using geopolimer for grouting: A comparative study with cement-based grout included fly ash and cold bonded fly ash", *Construction and Building Materials*, 196, 594-610.
- Jo, B.W., Kim, C.H., Tae, G., Park, J.B. (2007), "Characteristics of cement mortar with nano-SiO₂ particles", *Construction and Building Materials*, 21(6), 1351-5.
- McCartney, J., Nogueira, C., Homes, D., Zornberg, J. (2011), "Formation of secondary containment systems using permeation of colloidal silica", *Journal of Environmental Engineering*, 137, 444-453.
- Park, C.K., Nohb, M.H., Park, T.H. (2005), "Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures", *Cement and Concrete Research*, 35(5), 842-9.
- Persoff, P., Finsterle, S., Moridis, G., Apps, J., Pruess, K., Muller, S. (1995), "Injectable barriers for waste isolation", Technical Report, Lawrence Berkeley Lab, Berkeley, CA, USA, pp.1–11.
- Riahi, S., Nazari, A. (2012), "The effects of nanoparticles on early age compressive strength of ash based geopolimer", *Ceramics International*, 38, 4467-4476.
- Qing, Y., Zenan, Z., Deyu, K., Rongshen, C. (2007), "Influence of nano-SiO₂ addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume", *Construction and Building Materials*, 21(3), 539-45.
- Sahmaran, M., Özkan, N., Keskin, S.B., Uzal, B., Yaman, İ.Ö., Erdem, T.K. (2008), "Evaluation of natural zeolite as a viscosity-modifying agent for cement-based grouts, ", *Cement and Concrete Research*, 38(7), 930-937.
- Senff, L., Labrincha, J.A., Ferreira, V.M., Hotza, D., Repette, W.L. (2009), "Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars", *Construction and Building Materials*, 23, 2487-2491.