



Farklı Molaritelere Sahip KOH Çözeltisi Kullanılarak Üretilen Cüruf Esaslı Geopolimer Harçlarda Kür Sıcaklığı Etkisinin İncelenmesi

Murat ÇAVUŞ¹, Şinasi BİNGÖL^{2*}

^{1,2}Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 60250, Tokat

¹<https://orcid.org/0000-0002-9480-4418>

²<https://orcid.org/0000-0002-3708-3079>

*Sorumlu yazar: sinasi.bingol@gop.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 06.04.2022

Kabul tarihi: 18.10.2022

Online Yayınlanma: 04.12.2023

Anahtar Kelimeler:

Yüksek fırın cürufu

Geopolimer harç

Basınç dayanımı

ÖZ

Bu çalışmada, farklı kür sıcaklıklarına ve farklı potasyum hidroksit (KOH) oranlarına sahip yüksek fırın cürufu (YFC) geopolimer harçların fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Geopolimer harçların karışımında; YFC ve agrega miktarı sabit tutulurken KOH çözeltisinin molaritesi 5, 10, 15, 20 M olarak belirlenmiştir. Hazırlanan harçlar 40x40x160 mm ebatlarında prizma kalıplara yerleştirilmiş ve 50, 75 ve 100 °C sıcaklıklarda 24 saat küre tabi tutulmuşlardır. Elde edilen numuneler; 1, 7 ve 28 gün laboratuvar koşullarında bekletildikten sonra mekanik dayanımları ölçülmüştür. Ayrıca 28 günlük harçların birim ağırlık, su emme, boşluk oranı ve ultrases geçiş hızı gibi fiziksel özellikleri belirlenmiştir. En iyi basınç dayanımı sonuçları 50 °C de küre tabi tutulan ve 20 M KOH çözeltisiyle hazırlanan numunelerde elde edilmiştir. En az su emme ve boşluk oranı değerleri için ideal kür sıcaklığının 50 °C olduğu görülmüştür.

Curing Temperature Effect on Slag Based Geopolymer Mortars Produced Using KOH Solution with Different Molarities

Research Article

Article History:

Received: 06.04.2022

Accepted: 18.10.2022

Published online: 04.12.2023

Keywords:

Blast furnace slag

Geopolymer mortar

Compressive strength

ABSTRACT

In this study, the physical and mechanical properties of blast furnace slag (BFS) geopolymer mortars with different curing temperatures and different potassium hydroxide (KOH) ratios were examined. In the mixture of geopolymer mortars; While the amount of YFC, water and aggregates was kept constant, KOH's molarite was determined as 5, 10, 15, 20 M. The prepared mortars were placed in prism molds in sizes 40x40x160 mm and sphered for 24 hours at temperatures of 50, 75 and 100 °C. The mechanical strength values of the samples were determined after waiting 1, 7, and 28 days in laboratory conditions. The physical properties of 28-day mortars were also determined, including unit weight, water absorption, clearance rate, and ultrases transition rate. The best compressive strength results were obtained in samples cured at 50 °C and prepared with 20 M KOH solution. It has been observed that the ideal curing temperature for the minimum water absorption and void ratio values is 50 °C.

To Cite: Çavuş M., Bingöl Ş. Farklı Molaritelere Sahip KOH Çözeltisi Kullanılarak Üretilen Cüruf Esaslı Geopolimer Harçlarda Kür Sıcaklığı Etkisinin İncelenmesi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2023; 6(3): 1959-1970.

1. Giriş

Portland çimentosu, inşaat ve madencilik endüstrisinde bağlayıcı matris olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Dünya ekonomisindeki hızlı büyüme ve üretim faaliyetlerinin artması nedeniyle, kişi başına yılda yarım tondan fazla çimento üretilmektedir (Andrew, 2018). Çimento üretimi sırasında hem doğal kaynak tüketimi hem de enerji sarfiyatı oldukça yüksektir (ham maddelerin yaklaşık 1500 °C 'ye kadar ısıtılması gerekmektedir (Taylor, 1997). Bir ton Portland çimentosu üretiminde, ön kalsinasyon esnasında 0,55 ton CO₂ ve buna ek olarak kalsinasyonun oluşması için gerekli olan yakıtın yanmasıyla 0,40 ton CO₂ emisyonu gözlemlenmektedir (Nisbet ve ark., 2000; Mahasenan ve ark., 2003). Küresel ısınmaya bağlı iklim değişikliği şu anda en önemli çevresel zorluklardan biri olmakla beraber sera gazı emisyonları, küresel ısınmaya neden olan ana faktördür. CO₂, diğer sera gazlarıyla kıyaslandığında, bu gazların arasında %65 oranla en büyük paya sahiptir (McCaffery, 2002; Phummiphan ve ark., 2018). Çimento üretimi nedeniyle her yıl yaklaşık 4 milyar ton CO₂ salınımı gerçekleşmektedir. Bu miktar da dünyadaki yıllık CO₂ salınımının %8'ini oluşturmaktadır (Hardjito ve ark., 2004). Bu sebeple çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ salınımını en aza indirmek gerekmektedir.

Çimento üretiminden kaynaklanan etkileri ve çimento kullanımını azaltmak amacıyla; endüstriyel atık malzemeleri ve yan ürünleri değerlendiren, betonun mukavemet ve dayanıklılığını arttırmayı hedefleyen malzemeler geliştirilmektedir (Palomo ve ark., 2014; Nath ve ark., 2017). Bu konuda yapılan çalışmaların önemli bir kısmı, alkali bir çözeltide aktive edilen silika ve alümina içeren malzemeler kullanılarak beton ya da beton bloklar üretmeye odaklanmaktadır (Sukmak ve ark., 2013; Luukkonen ve ark., 2016). Alkali ile aktive edilerek elde edilen betonlara 'Geopolimer Beton' adı verilmiştir (Davidovits, 1991). Geopolimerler, alüminosilikat içerikli malzemelerin alkali çözeltileri ile polimerize edilmesiyle oluşur (Liew ve ark., 2016). Bu onların çevre sıcaklıklarına yakın sıcaklıklarda sabitlenmesini ve sertleşmesini sağlar (Nematollahi ve ark., 2015). Alkali ile aktive edilen malzemeye dayanan yeni geopolimer beton, hammaddelerin yaklaşık 1400 °C sıcaklıkta kalsinlenmesini gerektirmez. Geopolimerizasyon işlemi için, alümino-silikat öncüllerinin ve alkali çözeltilerinin nispeten düşük bir sıcaklıkta pişirilmesi veya önışlemden geçirilmesi gerekir. İşlem, oda sıcaklığından 150 °C' ye kadar olan sıcaklıklarda tamamlanabilir ve üretim sürecinde NO_x, SO_x ve CO₂ emisyonu da çok düşüktür (Zhang ve ark., 2010). Geopolimerler çoğunlukla endüstriyel atıklardan veya yan ürünlerden üretilir ve Portland çimentosu gibi betonda bir bağlayıcı görevi üstlenecek bir tür inorganik polimerler olarak tanımlanır (Zakka ve ark., 2021).

Geopolimerlerin yüksek erken dayanım büyümesi, asit ve sülfat saldırılarına karşı güçlü direnç göstermesi, yüksek sıcaklıkta iyi performans sağlaması (Duan ve ark., 2016; Kwasny ve ark., 2018, Yurt ve ark., 2020), çimento kullanımını en aza indirerek sera gazı salınımını %44-%64 oranında azaltması ve çok çeşitli düşük maliyetli alüminosilikat malzemelerden (uçucu kül, yüksek fırın cürufu vb.) üretilebilir olması gibi avantajlarından dolayı günümüzde Portland çimentosuna potansiyel bir alternatif olarak görülmektedir (Davidovits, 1988; Crozier ve ark., 1999).

Bu çalışmada yüksek fırın cürufu, KOH ile aktive edilerek geopolimer harçlar elde edilmiştir. Karışımlarda alkali aktivatör miktarı, 5, 10, 15 ve 20 M olarak 4 farklı oranda kullanılmıştır. 40x40x160 mm'lik kalıplara yerleştirilen harçlar 24 saat 50, 75 ve 100 °C kür sıcaklığına tabi tutulmuş ve elde edilen sertleşmiş harçların 1., 7. ve 28. günlerinde mekanik ve fiziksel özellik testleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar çözeltilerin molaritesi ve kür sıcaklığı üzerinden tartışılmıştır. Literatürde üretilen geopolimer harçlarda çoğunlukla NaOH ve Na₂SiO₃ kullanılmaktadır (Amran ve ark., 2020; Jihui ve ark., 2021). Bu çalışma kapsamında bu iki alkali malzemenin dışında farklı bir malzeme olan KOH kullanılmıştır. Bu yönden çalışmanın literatüre yenilik katacağı düşünülmektedir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Yapılan çalışmada bağlayıcı olarak yüksek fırın cürufu (YFC), alkali aktivatör olarak KOH, agrega olarak dere kumu ve farklı molaritelere sahip alkali çözelti kullanılmıştır. İskenderun demir-çelik fabrikasından temin edilen YFC'na ait kimyasal içerik Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. YFC'nin kimyasal içeriği (%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	MnO	SO ₃
YFC	38,8	13,48	1,36	4,32	34,36	0,31	1,36	1,75

Alkali aktivasyonu için beyaz renkte nem çekici (higroskopik) katı pelet halinde %99 saflıkta KOH, içme suyu ile karıştırılmış, soğuyana kadar bekletilmiş ve çözelti halinde karışımlara ilave edilmiştir. Literatürde Geopolimer harçlarda kullanılan suyun reaksiyona bir etkisinin olmadığı sadece harcın işlenebilmesi için gerektiği belirtilmiştir (Davidovits, 2015). Karışımlarda maksimum dane çapı 3 mm olan ve Tokat bölgesinden elde edilen dere kumu kullanılmıştır. Kumun maksimum yoğunluğu 2,3 g/cm³ olarak ölçülmüştür.

2.2. Metot

Deneysel çalışmada KOH, karışım suyunda eritilerek molaritesi 5, 10, 15 ve 20 M olan çözeltiler elde edilmiştir. KOH suyun sıcaklığını artırdığı için çözelti kullanılmadan önce oda sıcaklığına gelene kadar bekletilmiştir. Tüm karışımlarda bağlayıcı olarak 450 gr YFC, 250 ml su ve 1350 gr dere kumu kullanılmıştır. Dört farklı alkali oranı ve 3 farklı kür sıcaklığı için 12 seri ve toplamda 108 numune hazırlanmıştır (Tablo 2). Numune isimlendirmesinde rakamsal olarak sırasıyla molarite ve kür sıcaklığı verilmiştir.

Tablo 2. Geopolimer harçlara ait karışım oranları

Seri Kodu	Kür Sıcaklığı (°C)	Molarite (M)	YFC (g)	Kum (g)	Alkali Çözelti (ml)
K05_50	50	5	450	1350	250
K10_50		10	450	1350	250
K15_50		15	450	1350	250
K20_50		20	450	1350	250
K05_75	75	5	450	1350	250
K10_75		10	450	1350	250
K15_75		15	450	1350	250
K20_75		20	450	1350	250
K05_100	100	5	450	1350	250
K10_100		10	450	1350	250
K15_100		15	450	1350	250
K20_100		20	450	1350	250

Taze harç üretiminde ilk olarak; kum ile YFC kuru olarak karıştırılmış, başka bir kapta hazırlanan alkali çözelti karıştırıcıya konmuş daha sonra kuru karışım eklenerek TS EN 196-1 (2016)'ya göre taze geopolimer harcı elde edilmiştir. Elde edilen taze harçlar 40x40x160 mm'lik üçlü prizma kalıplara dökülmüştür. Hazırlanan harçlar 24 saat boyunca 50, 75 ve 100 °C ısı küre tabii tutulmuşlardır. Geopolimer harçlar ısı küre işlemlerinin ardından fiziksel ve mekanik özellik testlerinin yapılacağı güne kadar laboratuvar ortamında ve 22±2 °C'lik ısıda muhafaza edilmiştir. Laboratuvar koşullarında bekletilen harçların 1, 7 ve 28. günde dayanım gelişimleri, 28. gün için ise ultrases geçiş hızı ve fiziksel özellikleri incelenmiştir.

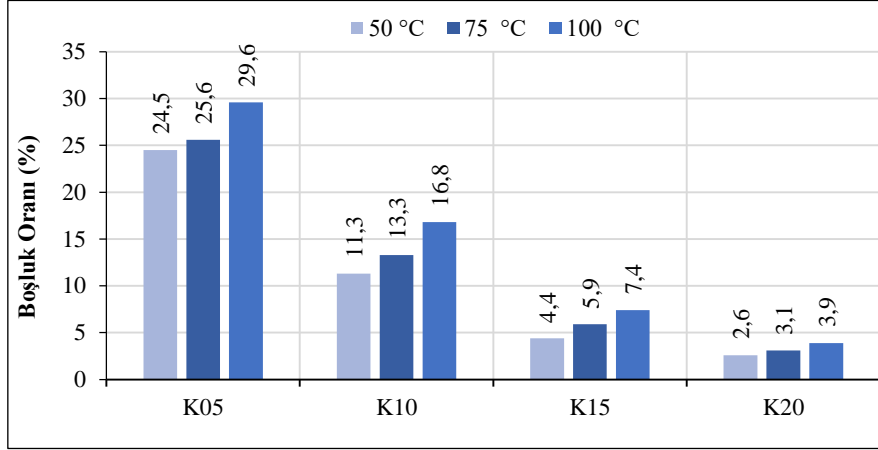
Harçların eğilme ve basınç dayanım özellikleri TS EN 1015-11 (2020)'ye göre belirlenmiştir. Mekanik testler için otomatik kontrollü laboratuvar tipi çimento presi kullanılmıştır. Geopolimer harçların fiziksel özelliklerinin belirlenmesi sırasında ise; örnekler önce suya doygun hale getirilmiş daha sonra su tankından alınarak, su içerisinde asılı ağırlıkları ve suya doygun yüzey kuru ağırlıkları belirlenmiştir. Ardından ilgili örnekler etüvde değişmez ağırlığa gelinceye kadar kurutulup tekrar tartılarak etüv kuru ağırlıkları belirlenmiştir. Elde edilen veriler yardımıyla örneklerin; birim hacim ağırlıkları ve görünen porozite değerleri TS EN 197-1 (2012)'ye göre, su emme değerleri ise TS EN 771-1 (2015)'e göre belirlenmiştir. Ayrıca laboratuvar ortamında bekletilen numuneler üzerinde ultrases geçiş hızı deneyi ASTM C597 (2016)'a göre yapılmıştır. Deney sonuçları yorumlanırken her bir seriden üç sonucun aritmetik ortalaması alınarak kullanılmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Boşluk Oranı Özellikleri

28 günlük geopolimer harçlar üzerinde yapılan porozite deneyine ait sonuçlar Şekil 1'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar karışımlarda kullanılan aktivatörün molaritesi ve kür sıcaklığı açısından değerlendirilmiştir. Geopolimerler üzerinde yapılan porozite deneyi ile boşluk oranları %2,6–29,6

aralığında ölçülmüştür. Deneysel çalışma sonunda en yüksek boşluk oranı değeri %29,6 ile 100 C° de küre tabi tutulmuş olan 5M KOH içeren K05_100 numunesinde ölçülürken en düşük boşluk oranı değeri ise %2,6 ile 50 C° de kür yapılan K20_50 numunesinde ortaya çıkmıştır. Karışımlarda kullanılan çözeltinin molaritesinin artıyor olması boşluk oranlarının azalmasına katkı sağladığı görülmüştür. Su miktarının sabit tutulduğu bu çalışmada, çözelti hazırlamada kullanılan KOH miktarının artması oransal olarak karışımda katı madde miktarını arttırmaktadır. İlerleyen günlerde kristalize olan KOH harçlardaki boşluk oranlarının düşmesine sebep olmaktadır.

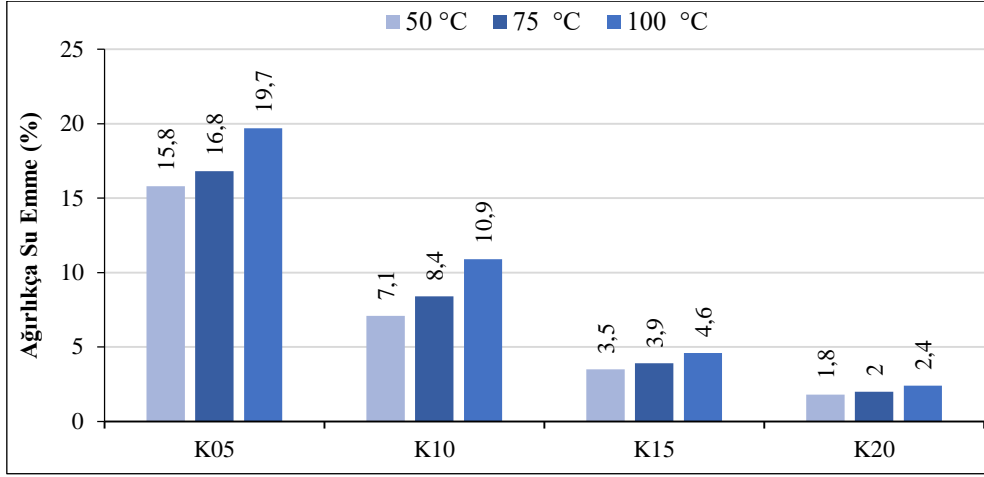


Şekil 1. Harçlara ait porozite oranlarının molariteye ve kür sıcaklığına göre değişimi

Sonuçlar kür sıcaklığı açısından değerlendirildiğinde ise en iyi sonuçlar 50 °C de elde edilmiştir. Molarite açısından da en iyi sonuçların alındığı 20 M KOH'in kullanıldığı harçlarda 50 °C ile 100 °C arasındaki fark %50 çıkarken, 5M KOH kullanılan harçlarda aynı sıcaklıklar için bu fark %21 olarak hesaplanmıştır. Aynı molariteye sahip numunelerde, kür sıcaklığı arttıkça harçlardaki kılcal çatlakların ve boşluk oranının artmasına neden olmaktadır. Elde edilen sonuçlar literatürde bazı benzer çalışmalarla kıyaslandığında Tekin (2016) yaptığı çalışmada 0,5 bağlayıcı su oranına sahip örneklerden daha iyi sonuçlar alınırken, Çelikten ve Atabey'in (2021) yaptıkları çalışmada elde ettikleri maksimum boşluk oranından daha fazla çıkmıştır.

3.2. Su Emme Özellikleri

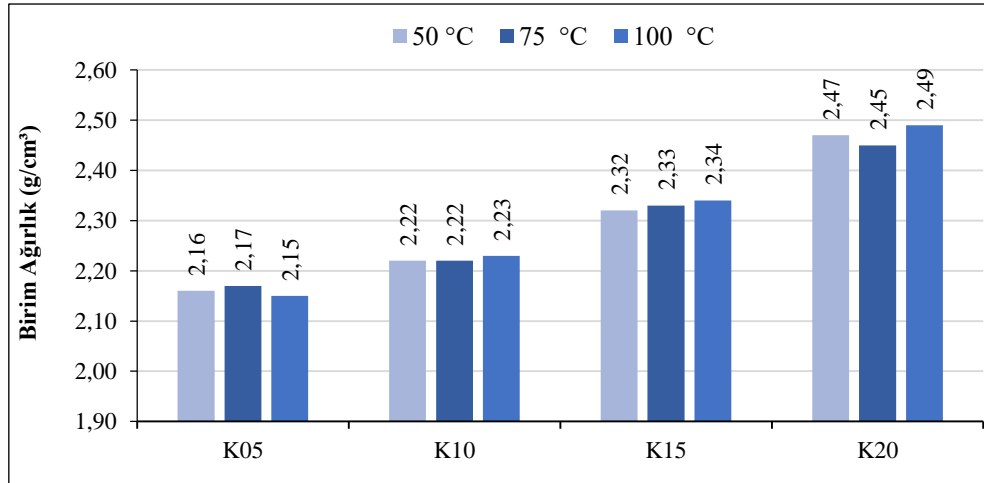
Su emme oranlarına ait sonuçlar Şekil 2'de verilmiştir. Deneyler sonucunda en yüksek su emme oranları 5 M KOH'ın kullanıldığı örneklerde ölçülmüştür. En yüksek su emme oranı K05_100 numunesinde %19,7 olarak saptanmıştır. En düşük su emme oranı ise %1,8 olarak K20_50 numunesinde elde edilmiştir. Genel olarak bakıldığında molaritenin artması su emme oranlarının azalmasında etkili olmuştur. Molaritenin 15 ve 20 olması halinde su emme oranı ciddi düşüşler göstermektedir. Kür sıcaklığı açısından bakıldığında en iyi değerler 50 °C de elde edilmiştir.



Şekil 2. Harçlara ait su emme oranlarının molariteye ve kür sıcaklığına göre değişimi

3.3. Birim Ağırlık Deneyi

Deneysel çalışmada üretilen harçların birim ağırlıkları Şekil 3'te verilmiştir. Tüm sıcaklıklarda geopolimer harçların birim ağırlıklarının çözeltideki KOH'ın artmasıyla daha büyük değerlere ulaştığı görülmüştür. Harçlarda en yüksek birim ağırlık değeri $2,49 \text{ g/cm}^3$ ile K20_100 kodlu harçlarda gözlenirken, en düşük birim ağırlık değeri $2,15 \text{ g/cm}^3$ ile K05_100 kodlu numunede elde edilmiştir. Genel olarak molarite arttıkça birim ağırlık değerleri de artış göstermiştir. Aynı molariteye sahip harçların kür sıcaklığı arttıkça birim ağırlıkları neredeyse değişim göstermemiştir. Boşluk oranı ve su emme değişimlerine paralel olarak KOH miktarının artması harçlardaki doluluk oranını da artırmış ve birim ağırlıklar değerlerinin artmasını sağlamıştır. Literatüre benzer şekilde su emme oranlarının birim ağırlık değerleriyle benzerlik gösterdiği görülmüştür (Djobo ve ark., 2016; Shoaei ve ark., 2019).

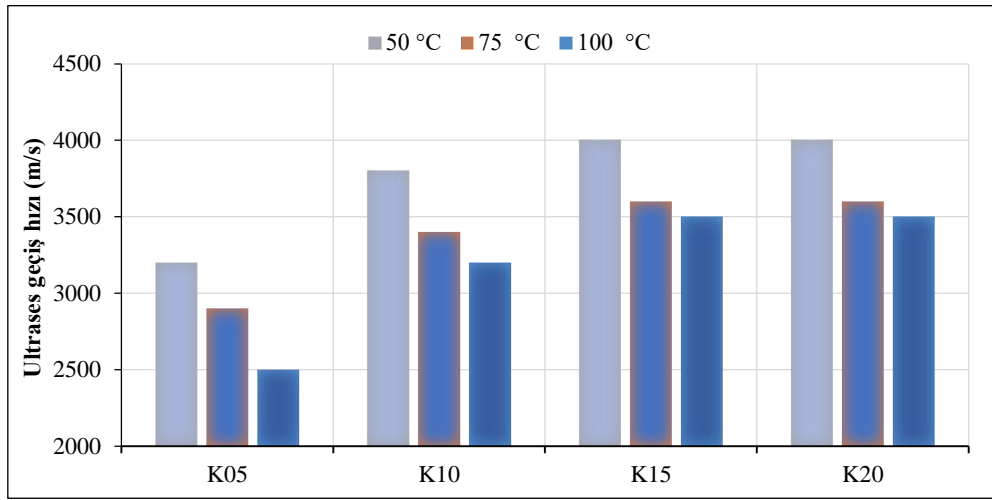


Şekil 3. Harçlara ait birim ağırlıkların molariteye ve kür sıcaklığına göre değişimi

3.4. Ultrases Geçiş Hızı Deneyi

Harçlara ait ultrases geçiş hızı değerleri Şekil 4'te verilmiştir. Ultrases geçiş hızı değerleri malzemelerin boşluk yapısı ve dayanımları hakkında fikir veren sonuçlar üretir. Portland çimentosuyla

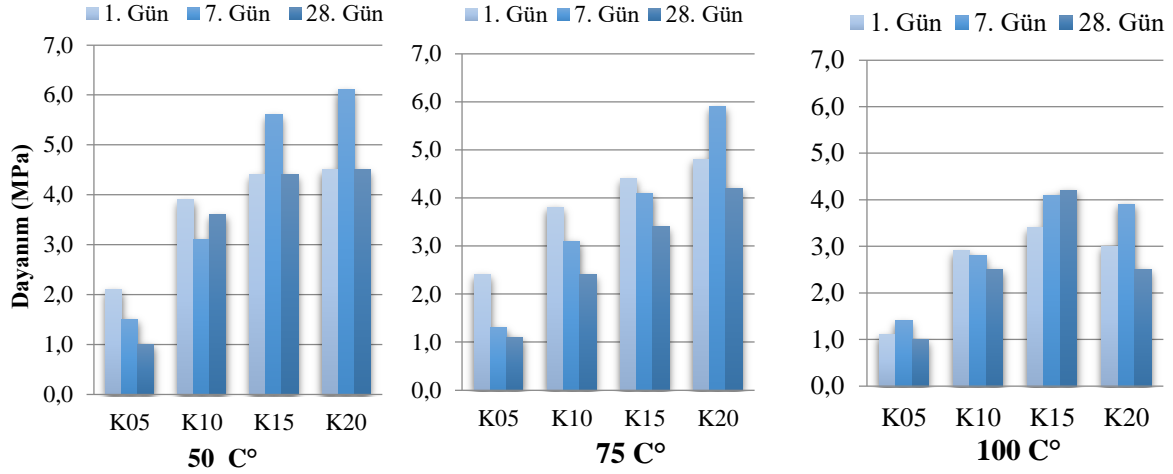
üretileen harçlarda olduğu gibi geopolimer harçlarda Genellikle dayanım artışına paralel olarak ultrases değeriinde artış beklenir. Yapılan bu çalışmada en yüksek ultrases hızı K15_50 ve K20_50 numunelerinde 4000 m/s olarak belirlenmiştir. Bu durum literatürde yapılan bazı çalışmalarla paralellik göstermektedir (Duan ve ark., 2016; Phummiphan ve ark., 2018; Amran ve ark., 2020). Bununla birlikte molarite arttıkça harçların ultrases geçiş hızlarında artışlar gözlenmiştir. Aynı sıcaklık değeriinde molarite arttıkça geçiş hızı artarken, aynı molariteye sahip harçlarda, kür sıcaklığı arttıkça geçiş hızlarında düşüş yaşanmıştır. Bu düşüş oranı 5 M harçlarda daha yüksek olmaktadır. 15 ve 20 M harçlarda sıcaklık arttıkça yaşanan düşüş paralellik göstermektedir.



Şekil 4. Harçlara ait ultrases geçiş hızı değeri

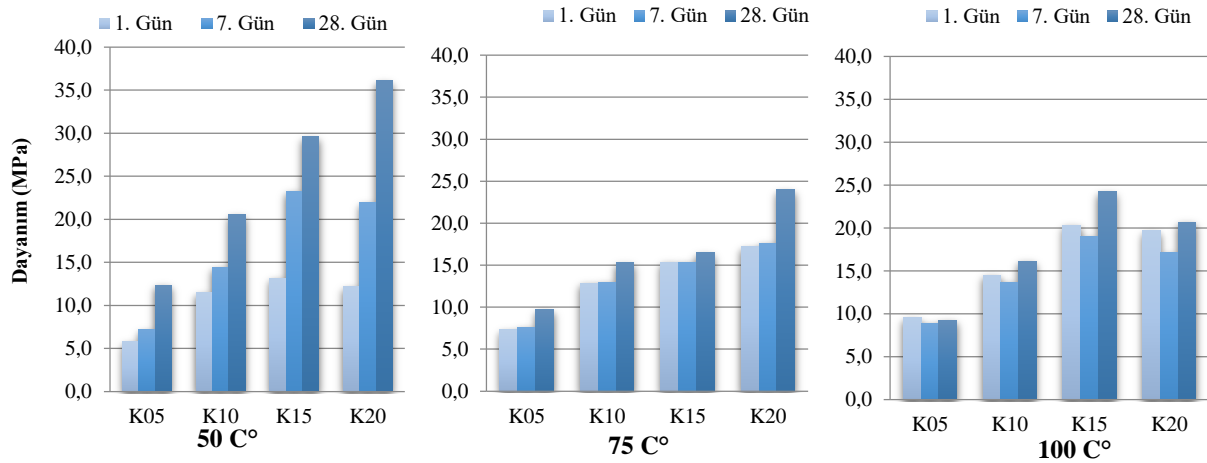
3.5. Eğilme ve basınç dayanımı

Sertleşmiş harçlar üzerinde yapılan eğilme dayanımına ait sonuçlar Şekil 5'te verilmiştir. Eğilme testleri sonucunda en yüksek dayanım değeriine 50 °C kür koşullarında ve 20 M KOH kullanılan numunelerin 7. gününde 6,1 MPa olarak belirlenmiştir. Genel olarak 5 M dışındaki harçlarda 2 MPa üzerinde eğilme dayanımı elde edilmiştir. 50 °C ve 75 °C kür koşullarında 15 ve 20 M KOH sahip harçların eğilme dayanımları 4- 6,1 MPa aralığında çıkmıştır.



Şekil 5. Sırasıyla 50, 75 ve 100 °C’de küre tabi tutulan numunelerin eğilme dayanımı değerleri

Geopolimer harç örnekleri üzerinde yapılan basınç dayanımı testlerine ait sonuçlar Şekil 6’da verilmiştir. Çözeltideki KOH oranının artmasının genel olarak daha yüksek basınç dayanımı elde edilmesinde olumlu katkı sağladığı görülmüştür. Burada KOH’ın YFC’nin aktivasyonunda önemli bir rol oynamıştır. En yüksek basınç dayanımı değeri 50 °C’de 20 M’de 28. gün 36,05 MPa olarak belirlenmiştir. Aktivatör olarak 10 M NaOH çözeltisi ve seramik atıklarının kullanıldığı çalışmada 80 °C kür sıcaklığı için 18,7 MPa basınç değeri elde edilmiştir (Atabey ve Öztürk, 2021). Genel olarak 50 °C ve 75 °C’deki numunelerin artan molariteyle birlikte basınç dayanımlarının da arttığı gözlenmektedir. 100 °C’de kür edilen numunelerin ise 7. günde çok az düşüş gösterdiği 28. gün tekrar arttığı belirlenmiştir.

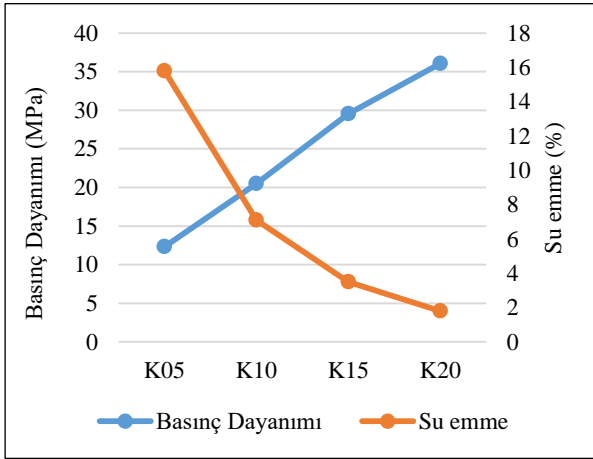


Şekil 6. Sırasıyla 50, 75 ve 100 °C’de küre tabi tutulan numunelerin basınç dayanımı değerleri

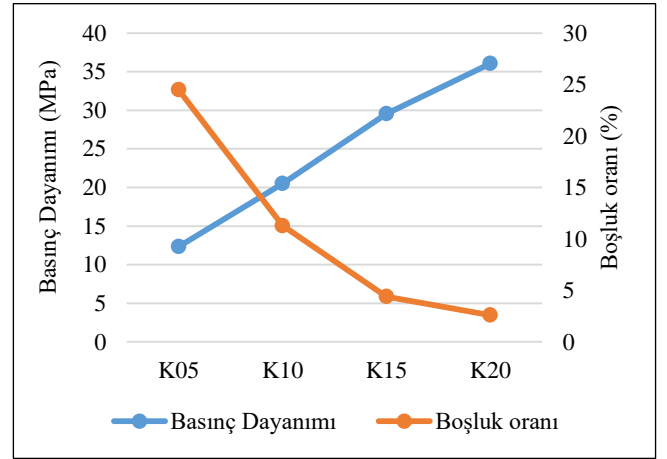
Eğilme ve basınç dayanımları için en iyi sonuçlar 50 °C’de 20 M’de elde edilmekte, basınç dayanımları için kür süresi arttıkça dayanımların geliştiği gözlenmektedir. Eğilme dayanımları için, aynı molaritede kür süresi arttıkça dayanım gelişimi olmazken, aynı günler için molarite arttıkça dayanım artmaktadır. Kür süresi arttıkça eğilme dayanımlarında daha gevrek bir yapı oluştuğu ve

dayanımın düştüğü düşünülmektedir. Basınç dayanımı açısından bakıldığında hem molarite hem de kür süresi arttıkça dayanım gelişimi görülmektedir. Yalnızca 100 °C’de kür edilen numunelerin 7. günde çok az düşüş gösterdiği 28. gün tekrar arttığı belirlenmiştir.

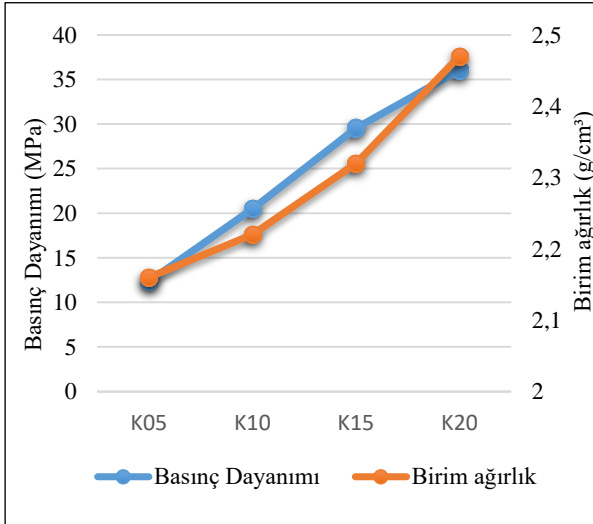
Harçlara ait basınç dayanımları ile fiziksel özellikler arasındaki ilişkinin daha iyi gözlenmesi için ayrıca grafikler eklenmiştir. Optimum sonuçların alındığı, 50 °C’de kür edilerek 28 gün laboratuvarında bekletilen numuneler için Basınç dayanımı-Su emme, Basınç dayanımı-Boşluk oranı, Basınç dayanımı-Birim ağırlık ve Ultrases geçiş hızı-Birim ağırlık-Basınç dayanımı grafikleri çizilerek Şekil 7-8-9-10’da verilmiştir.



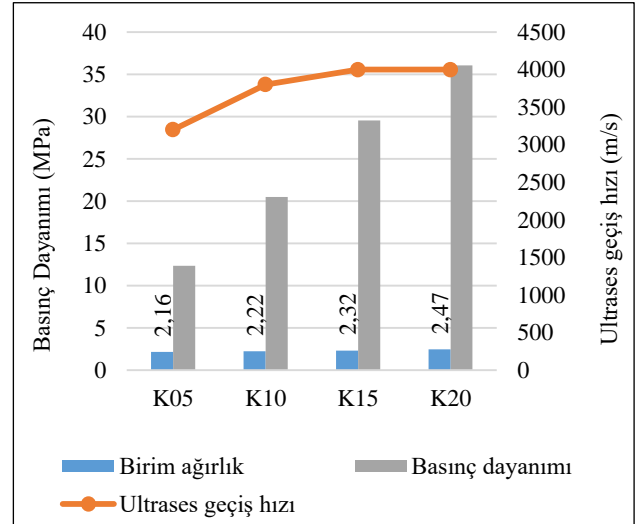
Şekil 7. Basınç dayanımı- Su emme oranı ilişkisi



Şekil 8. Basınç dayanımı- Boşluk oranı ilişkisi



Şekil 9. Basınç dayanımı- Birim ağırlık ilişkisi



Şekil 10. Birim ağırlık- Basınç dayanımı- Ultrases geçiş hızı ilişkisi

Grafiklerden de anlaşılacağı üzere, KOH miktarı arttıkça numunelerin su emme ve boşluk oranının azaldığı, birim ağırlıklarının ise arttığı görülmektedir. Yine KOH molaritesi arttıkça dayanımlarda iyileşme olduğu gözlenmektedir.

4. Sonuç

Bu çalışmada KOH ile aktive edilerek üretilen YFC bazlı geopolimer harçların fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Elde edilen bulgulara göre aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

-Kür sıcaklığı ve KOH molaritesi, YFC esaslı geopolimerin mekanik ve fiziksel özelliklerini önemli ölçüde etkilemiştir. Optimum sıcaklık ve molarite, geopolimerizasyon reaksiyonunu ve dolayısıyla yapısal bütünlük ile mukavemet gelişimini arttırmıştır. Ancak geopolimer harçların kür sıcaklığı arttıkça, kılcal çatlakların artışına ve dolayısıyla mukavemet gelişiminin azalmasına neden olmuştur.

-Su emme, birim ağırlık, boşluk oranı ve ultrases geçiş hızlarına bakıldığında artan molaritenin sonuçları iyileştirdiği gözlenmiştir. En iyi sonuçların ise 50 °C'de elde edildiği anlaşılmaktadır. Düşük molariteye sahip çözelti ile yapılan YFC bazlı geopolimer harçlarda daha gözenekli bir yapı oluşmuş ve buna bağlı su emme oranlarında belirgin artışlar gözlemlenmiştir. Birim ağırlıklarda ise molaritenin artmasıyla artışlar olduğu gözlemlenmiştir.

-YFC bazlı geopolimer harçların eğilme mukavemeti ve basınç mukavemeti, KOH'ın molaritesinin artmasıyla artmıştır. Yapılan deneysel çalışmanın bulguları, yüksek ısıyla kürlemenin erken dayanımların artmasına ancak ilerleyen yaşlarda dayanımların düşmesine neden olduğunu göstermiştir. Yüksek molaritenin 50 °C ve 75 °C kür şartlarında geopolimerlerin mukavemetinin zamanla artmasına, ancak 100 °C sıcaklıkta üretilen harçlarda düzensiz bir dayanım artışı dağılımına sebep olmuştur. Özellikle 50 °C'de kür edilerek 7 ve 28 gün laboratuvar ortamında bekletilen 10, 15 ve 20 M KOH'e sahip harçların dayanım gelişimlerinin çok iyi olduğu gözlenmiştir.

Bu çalışma, yüksek fırın cürufunun geri dönüştürülerek çimento yerine bağlayıcı matris olarak kullanılmasını amaçlamaktadır. Bu amaçla yapılan çalışmaların olumlu sonuçlar verdiği söylenebilir. Özellikle 50 °C ve 75 °C'de, 15 ve 20 M KOH içeren geopolimer harçların hem fiziksel hem de mekanik özellikler bakımından tatmin edici seviyelerde sonuçlar verdiği düşünülmektedir. Ayrıca çalışmanın daha sonraki araştırmalar için olumlu bir kaynak olacağı belirlenmiştir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan etmektedir.

Kaynakça

Atabey İİ., Öztürk ZB. Seramik sağlık gereci atıklarının geopolimer harç üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması. Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi 2021; 13(1): 212-219.

Amran M., Alyousef YH., Alabduljabbar RH., El-Zeadani M. Clean production and properties of geopolimer concrete; A review. Journal of Cleaner Production 2020; 251(119679).

- Andrew RM. Global CO₂ emissions from cement production. *Earth System Science Data* 2018; 10(1): 195-217.
- ASTM C597-09. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete 2016; USA.
- Crozier DA., Jay GS. Chemical and physical degradation of concrete at elevated temperatures. *Concrete in Australia* 1999; 18-20.
- Çelikten S., Atabey İİ. Su içeriği ve ısı kÜR süresinin atık bazalt tozu esaslı geopolimer harçların fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 2021; 10(1): 328-332.
- Davidovits J. Geopolymers of the first generation: SILIFACE-Process. *Geopolymer* 1988; 1: 49-67.
- Davidovits J. Geopolymers inorganic polymeric new materials. *AKJournals* 1991; 37: 1633–1656.
- Davidovits J. Geopolymer chemistry and applications. 2015; 4th ed. Saint-Quentin: Institut Géopolymère.
- Djobo JNY., Elimbi A., Tchakouté HK., Kumar S. Mechanical properties and durability of volcanic ash based geopolymer mortars. *Construction and Building Materials* 2016; 124: 606-614.
- Duan P., Chunjie Y., Wenjun L. A novel waterproof, fast setting and high early strength repair material derived from metakaolin geopolymer. *Construction and Building Materials* 2016; 124: 69-73.
- Hardjito D., Wallah SE. On the development of fly ash-based geopolymer concrete. *ACI Materials Journal* 2004; 101(6): 467-472.
- Jihui Z., Liangyu T., Boen L., Tianhao C., Chunpeng W., Gangqiang Y., Ye Z. Eco-friendly geopolymer materials: A review of performance improvement, potential application and sustainability assessment. *Journal of Cleaner Production* 2021; 307(1-18).
- Kwasny J., Aiken T., Soutsos M., Mcintoch A. Sulfate and acid resistance of lithomarge-based geopolymer mortars. *Construction and Building Materials* 2018; 166: 537-553.
- Liew YM., Heah CY., Mohd Mustafa AB., Kamarudin H. Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review. *Progress in Materials Science* 2016; 83: 595–629.
- Luukkonen T., Sarkkinen M., Kemppainen K. Metakaolin geopolymer characterization and application for ammonium removal from model solutions and landfill leachate. *Applied Clay Science* 2016;119:266–276.
- Mahasanen N., Steve S., Kenneth H. The cement industry and global climate change: current and potential future cement industry CO₂ emissions. *Greenhouse gas control technologies-6th International Conference* 2003; Pergamon.
- Mccaffrey R. Climate change and the cement industry. *Global cement and lime magazine. Environmental Special Issue* 2002; 15: 19.
- Nath P., Prabir KS. Flexural strength and elastic modulus of ambient-cured blended low-calcium fly ash geopolymer concrete. *Construction and Building Materials* 2017; 130: 22-31.

- Nematollahi B., Jay S., Faiz UAS. Synthesis of heat and ambient cured one-part geopolymer mixes with different grades of sodium silicate. *Ceramics International* 2015; 41(4): 5696-5704.
- Nisbet MA., Van Gee MG., Gajda J., Marceau M. Environmental life cycle inventory of portland cement concrete. Portland Cement Association R&D 2000; Serial No 2137. USA.
- Palomo Á., Kavalerova E., Fernandez-Jimenez A., Krivenko P., Garcia-Lodeiro I., Maltseva O. A review on alkaline activation: new analytical perspectives. *Materiales de Construcción* 2014; 64: 315.
- Phummiphan I., Horpibulsuk S., Rachan R., Arulrajah A., Shen SL., Chindapasirt P. High calcium fly ash geopolymer stabilized lateritic soil and granulated blast furnace slag blends as a pavement base material. *Journal of Hazardous Materials* 2018; 341: 257-267.
- Shoaei P., Musaei HR., Mirlohi F., Ameri F., Bahrami N. Waste ceramic powder-based geopolymer mortars: effect of curing temperature and alkaline solution-to-binder ratio. *Construction and Building Materials* 2019; 227(11): 66-86.
- Sukmak P., Horpibulsuk S., Shen SL. Strength development in clay-fly ash geopolymer. *Construction and Building Materials* 2013; 40:566-574.
- Taylor HFW. *Cement chemistry*. Vol. 2. 1997; London: Thomas Telford.
- Tekin İ. Properties of NaOH activated geopolymer with marble, travertine and volcanic tuff wastes. *Construction and Building Materials* 2016; 127: 607-617.
- TS EN 196-1. Çimento Deney Metotları-Bölüm 1: Dayanım Tayini. Türk Standartları Enstitüsü. 2016; Ankara.
- TS EN 197-1. Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü 2012; Ankara.
- TS EN 771-1. Kâgir birimler- Özellikler- Bölüm 1: Kil kâgir birimler. Türk Standartları Enstitüsü. 2015; Ankara.
- TS EN 1015-11. Kâgir harcı- Deney yöntemleri- Bölüm 11: Sertleşmiş harcın eğilmede çekme ve basınç dayanımının tayini. Türk Standartları Enstitüsü. 2020; Ankara.
- Yurt Ü., Dündar B., Çınar E. Jeopolimer betonlarda sülfürik asit etkisinin araştırılması. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi* 2020; 8(2): 1548-1561.
- Zakka WP., Abdul Shukor Lim NH., Chau Khun MA. Scientometric review of geopolymer concrete. *Journal of Cleaner Production* 2021; 280: 124353.
- Zhang YJ., Ya CW., Sheng L. Mechanical performance and hydration mechanism of geopolymer composite reinforced by resin. *Materials Science and Engineering: A* 2010; 527(24-25): 6574-6580.