



**HARRAN ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK DERGİSİ**

*HARRAN UNIVERSITY JOURNAL of ENGINEERING*

e-ISSN: 2528-8733 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/humder>

## **Alkali Aktivatör Parametrelerinin ve Test Koşullarının Geopolimer Betonların Büzülme ve Sünme Davranışı Üzerine Etkisi**

*The Effect of Alkaline Activator Parameters and Test  
Conditions on Shrinkage and Creep Behavior of  
Geopolymer Concrete*

*Yazar(lar) (Author(s)):* Şevin Ekmen, Kasım Mermerdaş

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Ekmen Ş., Mermerdaş K., “Alkali Aktivatör Parametrelerinin ve Test Koşullarının Geopolimer Betonların Büzülme ve Sünme Davranışı Üzerine Etkisi”, *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 3(3): 93-101, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/humder/archive>

## Alkali Aktivatör Parametrelerinin ve Test Koşullarının Geopolimer Betonların Büzülme ve Sünme Davranışı Üzerine Etkisi

Şevin Ekmen, Kasım Mermerdaş

Harran Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa

e-posta: ekmensevin@harran.edu.tr, kasim.mermerdas@harran.edu.tr

Geliş Tarihi: 17.11.2018

Kabul Tarihi: 31.12.2018

### Özet

Geopolimer yapı malzemelerinin zamana bağlı deformasyon davranışını araştırmak için bugüne kadar çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda çeşitli parametrelerle üretilen geopolimer harçların veya betonların büzülme ve sünme değerleri bildirilmiştir. Bu çalışmada, önceki araştırmalarda sunulan deney sonuçlarını etkileyen parametreleri değerlendirmek üzere literatür özeti sunulmuştur. Karışıma giren malzemelerin özellikleri, karışım oranları ve kürlenme koşulları gibi kritik parametrelerin geopolimer harçların deformasyon özellikleri üzerindeki etkileri irdelenmiştir.

**Keywords:** Geopolimer, Rötme, Sünme

## The Effect of Alkaline Activator Parameters and Test Conditions on Shrinkage and Creep Behavior of Geopolymer Concrete

### Abstract

Various studies have been conducted to investigate the time-dependent deformation behavior of geopolymer building materials, so far. In these studies, shrinkage and creep values of geopolymer mortars or concretes produced with various parameters have been reported. In this study, literature review is presented to evaluate the parameters affecting the results of the experiments presented in previous studies. The properties of ingredients, mix proportions and curing conditions on the deformation properties of geopolymer mortars were examined.

**Anahtar kelimeler:** Geopolymer, Shrinkage, Creep

### 1. Giriş

Uygulama alanlarının oldukça geniş olması sebebiyle, inorganik geopolimerlerin geliştirilmesine yönelik önemli araştırmalar son yıllarda artarak devam etmektedir. Yüksek CO<sub>2</sub> emisyonu, artan çevresel kaygılar ve kısıtlı kaynak rezervi sebebiyle Portland çimentosuna alternatif bağlayıcı malzeme arayışı sonucunda geopolimer bağlayıcı yapı malzemeleri geliştirilmiştir. Geopolimer yapı malzemelerinin yüksek erken dayanımı, düşük geçirimsizlik, yüksek kimyasal ve yangın direnci gibi üstün özelliklere sahip olduğu yapılan çalışmalar ile kanıtlanmıştır [1]. Geopolimerlerin bu üstün özellikleri, yapı sektöründe çeşitli sürdürülebilir ürünlerin geliştirilmesi, yangına dayanıklı kaplama ve fiber katkılı kompozit üretimine olanak sağlamakla birlikte kimyasal ve nükleer endüstrisinde atık depolama

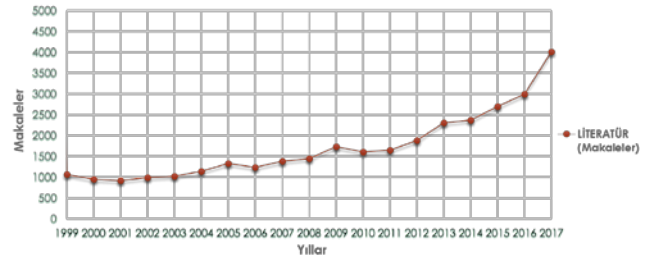
amacıyla kullanımı hedeflenmiştir. Geopolimerler, katı alüminasilikat tozlarının alkali hidroksit ve alkali silikat ile reaksiyonu sonucunda sentezlenmektedir. Kaolinit ve feldispat gibi çeşitli alüminosilikatlar, uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel katı atıklar ve maden atıkları gibi malzemeler geopolimer endüstrisinin ham maddesini oluştururlar. Yürütülen çalışmaların sonucunda yapı malzemesi performansına kimyasal aktivatör kullanımında en olumlu katkıyı Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ve NaOH çözeltilerinin sağladığı belirlenmiştir. Katı hammadde kompozisyonu, kimyasalların karışım oranları, uygulanan kalsinasyon işlemi ısısı ve süresi veya ısı küre bağlı olarak elde edilecek ürünün fiziksel özellikleri değişmektedir. Literatürde geopolimerlerin sentezi, özellikleri ve uygulamaları ile ilgili birçok çalışma mevcuttur[2].

Malzemenin boy ve hacminde küçülmeye sebep olan rötre ve sürekli yükler altında deformasyon olarak tanımlanan sünme yapı ömrünü olumsuz etkilemesi sebebiyle istenmeyen zamana bağı şekil değiştirmelerdir. Geopolimer teknolojisi kullanılarak üretilen yapı malzemelerinde belirtilen şekil değiştirme değerlerinin minimum seviyede tutulması hedeflenmiştir. Karşılaşılan problemi çözmek amacıyla gerçekleştirilen laboratuvar çalışmaları farklı karışım parametreleri ve oranları, kür koşulları ve boyutlar dikkate alınarak yürütülmektedir [3]. Bu çalışmada, tüm dünyada depolama problemi ile karşılaşılan atık toz mineral maddelerin kullanımına ve beton performansına sağladığı katkıları sebebiyle dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin iyileşmesine olanak sağlayan, geopolimer yapı malzemelerinin zamana bağlı şekil değiştirme sonuçlarına ve grafiklerine yer veren literatür çalışmaları incelenmiştir.

## 2. Geopolimer Uygulamaları

Oldukça yeni ve ilgi gören bir teknolojinin ürünü olan geopolimer bağlayıcı hamur/harç/beton gibi yapı malzemeleri üzerine yürütülen laboratuvar çalışmaları; kullanılan parametreler, uygulanan işlemler ve ortam koşulları gibi değişkenlerin dikkate alınması ile geniş bir yelpazede sunulmaktadır.

Bu çalışmada, tüm dünyada depolama problemi ile karşılaşılan atık toz mineral maddelerin kullanımına ve beton performansına sağladığı katkıları sebebiyle dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin iyileşmesine olanak sağlayan, geopolimer bağlayıcı malzemelerinin zamana bağlı şekil değiştirme sonuçlarını sunan ve bunların hangi parametrelerden ne düzeyde etkilendiğini irdeleyen çalışmalar incelenmiştir. Şekil 1’de bu konuya olan ilginin bir göstergesi olarak geopolimer bağlayıcı yapı malzemeleri ile ilgili yapılmış bilimsel çalışmaların yıllara göre dağılımı verilmiştir.



Şekil 1. Yıllara göre yapılan çalışma sayıları (Science Direct)

Tablo 1’de yapılan literatür araştırması neticesinde ulaşılan bazı çalışmaların çeşitli parametrelerine yer verilmiştir. Farklı oranlar ve malzemeler kullanılarak çeşitli kür koşulları altında geopolimer üretimleri gerçekleştirilmiştir.

Tablo1. Çeşitli literatür çalışmaları

ÇALIŞIMLAR	SU/BAĞLAYICI	BAĞLAYICI/KUM/SU	BAĞLAYICI	ALKALI AKTİVATÖR	SİLİKAT ORANI (M <sub>s</sub> )	SODYUM KONSANTRASYONU (%)	KÜR KOŞULLARI (NEM(%)//SICAKLIK)	RÖTRE AZALTICI KATKI (%)
Krizan ve Zivanovic, (2002)	0,5	-	PÇ					
Harç	0,43	1/3/0,43	YFC	WG (Camsuyu) NAMS (Sodyum Meta Silikat)	0,6/0,9/1,2/1,5	3/4	55 // 20 °C	-
Palacios ve Puertas, (2007)	0,42	-	PÇ					
Harç	0,58	-	YFC	WG (Camsuyu)	1/1,2	4	99-50 // 23 °C +2	- 1 2
Neto vd., (2008)	0,5	-						
Harç	0,48	1/2/0,48	YFC	LSS (Sodyum Silikat Çözeltilisi)	1,7	2,5/3,5/4,5	50 // 24 °C	-
Atiş vd., (2009)								
Harç	0,5	1/2,75/0,5	YFC	LSS (Sodyum Silikat Çözeltilisi) SH (Sodyum Hidroksit) SK (Sodyum Karbonat)	0,75/1/1,25/1,5	4/6/8 4/6/8	65 +5 // 23 °C +2	-
Neto vd., (2010)								
Hamur	0,48	1/0,48		Hidrate Kireç	-	-	50 // 24 °C	-
Harç	0,48	1/2/0,48	YFC	Kireç +Alçıtaşı	-	-		
Chi vd., (2012)	0,54	1/2/0,54	PÇ					
Harç	0,44	1/0,44	YFC	LSS (Sodyum Silikat Çözeltilisi) SH (Sodyum Hidroksit)	1,01	-	23 - 25 - 85 °C	
Aydın ve Baradan, (2012)								
Harç	0,44	1/2,75/0,44	YFC	LSS (Sodyum Silikat Çözeltilisi) SH (Sodyum Hidroksit)	0/0,4/0,8/1,2/1,6	2/4/6/8	55 // 20-100-210 °C	
Lee vd., (2014)	0,34	1/0,34	PÇ					
Hamur	0,34	1/0,34	UK+YFC	LSS (Sodyum Silikat Çözeltilisi)	2,18	-	50 // 20 °C	-
Harç	0,34/0,42	1/2/0,34 - 1/2/0,42						
Ye vd., (2017)	0,41	1/2/0,41	PÇ					
Harç	0,49	1/2/0,49	YFC1	LSS (Sodyum Silikat Çözeltilisi) SH (Sodyum Hidroksit)	0,41/1,22	-	85-70-50-30 // 23 °C +0,5	-
	0,51	1/2/0,51	YFC2					
	0,47	1/2/0,47	YFC3					
	0,49	1/2/0,49	YFC4					

### 3. Geopolimer Yapı Malzemelerinin Rötreye Davranışı

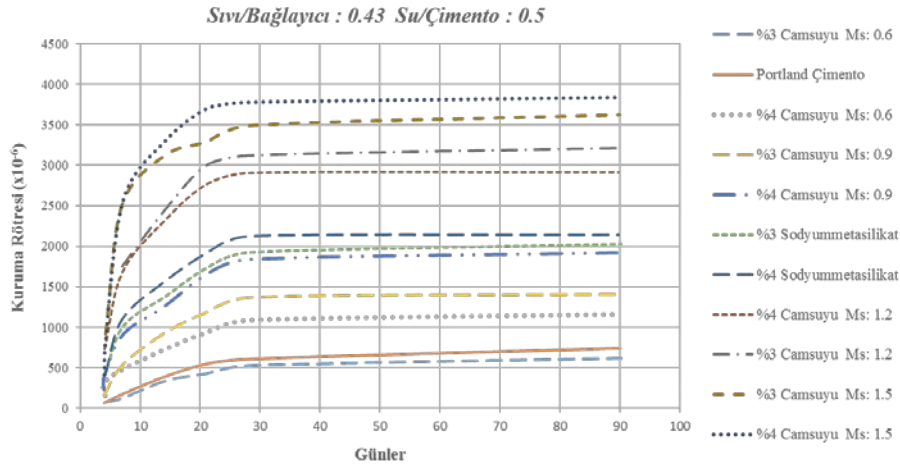
Önceki çalışmalar, alkalilerle aktive edilmiş cüruf içeren (AAC) beton performansının, Portland çimentolu beton performansından daha üstün olduğunu, yüksek erken mukavemet yanısıra kimyasal saldırılara, donma-çözülme döngülerine ve yüksek sıcaklığa [4-5] yeterli direnci gösterdiğini işaret etmektedir. Bununla birlikte, AAC'ın yüksek kuruma büzülmesi [6-7], AAC uygulamasını kısıtlayan önemli bir faktördür. NaOH ile aktive edilmiş AAC hamurunun kuruma büzülmesi, 60 günde Portland çimentosunununkinden yaklaşık 4 kat daha fazladır [8]. AAC harcı genellikle, PC harcı ile karşılaştırıldığında 2-4 kat daha yüksek [7,9,10] ve büzülme değerinin yaklaşık 2200 lere ulaşabileceği bir kuruma büzülmesi gösterir. AAC betonu ile ilgili araştırma [6], AAC betonunun kuruma büzülmesinin Portland çimentolu betonununkinden 3 kat daha yüksek olduğunu göstermiştir. Portland çimentosuna kıyasla, AAC'de yüksek kılcal gerilmeye neden olan daha fazla gözenek bulunduğu ve bu durumun da kuruma koşullarında büzülmeyle önemli ölçüde arttırdığı belirtilmiştir [8,11,12-13].

Gözenek yapısına ek olarak, AAC'ın hidratasyon ürünü de AAC'ın yüksek kuruma büzülmesine sebep olan temel faktörlerden biridir [7,8,14]. AAC'deki ana hidratasyon ürünü, Portland çimento sistemindeki C-S-H'den daha amorf olan C-A-S-H'dir [14]. Yapılan araştırmalar ile [7,8], kuruma işleminde hidratasyon ürünlerinin davranışı incelenmiş ve AAC'ın yüksek kuruma büzülmesi açıklanmıştır. Araştırmalarına göre, C-A-S-H'deki alkali katyonların yapısal olarak birleştirilmesi, C-A-S-H tabakalarının istiflenme düzenini azaltır ve C-A-S-H'nin çökmesi ve kuruması üzerine yeniden dağılımını kolaylaştırır. Bazı çalışmalar ile ise AAC'ın küçülmesini azaltmanın olası yolları araştırılmıştır [10,15-16]. Nano-TiO<sub>2</sub> ilavesinin, AAC'nin yüksek büzülmesinden sorumlu olan 1.25 ile 25 nm arasındaki gözeneklerin hacim

fraksiyonunu azaltmaya yardımcı olduğunu bulunmuştur [16]. Yapılan bir çalışma [15] ile farklı katkı maddelerinin etkisi de incelenmiştir. Alçıtaşı ilavesinin, alçı ile ilgili reaksiyonda oluşan fazlarının dengeleyici etkisinden dolayı AAC'nin büzülmesini azalttığı bulunmuştur. AAC harçları ve hamurlarının büzülmesine karşı büzülme azaltıcı maddelerin (BAM) etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar, BAM'ın ilave edilmesinin, AAC harçlarında sırasıyla % 99 bağıl nem ve % 50 bağıl nemde kürlendiğinde % 85 ve % 50'ye kadar büzülmede azalmaya neden olduğunu göstermiştir [10].

Genellikle büzülme performansı, kısıtlanmamış büzülme testi ile değerlendirilmektedir. Dairesel veya elipsle kısıtlanmış halka testi kullanılarak büzülme değerlendirmesi, özellikle tamir harçları gibi kısıtlanmış koşullarda kullanılacak malzemeler için önemlidir [17,18-19]. Yüksek oranda mezo-gözenek içermesi sebebiyle alkalilerle aktive edilmiş harçların (AAH) Portland çimento bazlı harçlardan çok daha yüksek ötojen büzülme değerlerine sahip olabileceğini bildirmişlerdir [20,21]. Son araştırmalar da, gözenekle ilgili bu açıklamayı doğrulamıştır [22]. Cüruf ve uçucu kül içeren harçların cüruf miktarının artması ile daha yüksek kuruma büzülmesine sahip olduğu belirtilmiştir [23].

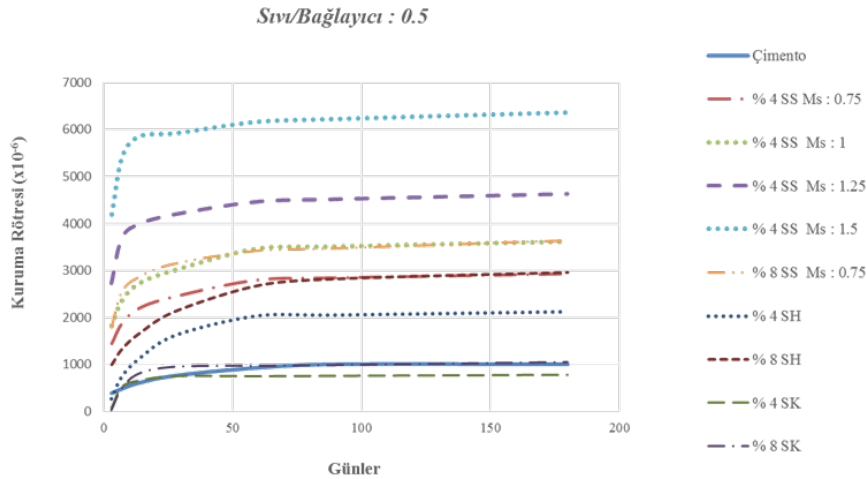
Uçucu kül esaslı alkalilerle aktive edilmiş hamur numunelerinin kısıtlanmış ve kısıtlanmamış büzülme performanslarını karşılaştıran ve hiçbir çatlak tespit edilmediğini belirten sonuçlar yayınlamıştır [24]. Farklı silikat modüllerine sahip camsuyu ile sodyum metasilikat aktivatör olarak kullanılmış ve cürufllu geopolimer çimento üretilmiştir. Camsuyu (Na<sub>2</sub>O(n)SiO<sub>2</sub>) ve sodyummetasilikat (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>.5H<sub>2</sub>O) ile aktifleştirilmiş küllü harçların rötreye davranışlarının PC'li harçlarınkinden daha fazla olduğu belirtilmiştir [25]. Şekil 2'de Aktivatör çeşidinin rötreye etkisine yer verilmiştir.



Şekil 2. Aktivatör çeşidinin rötreye etkisi

Duran ve ark. [9] çalışmalarında farklı aktivatör çeşitlerini kullanarak aktivatörlerin, cüruf lu geopolimer harçların üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Sodyum silikat (SS), Sodyum Hidroksit (SH) ve Sodyum Karbonat (SK) aktivatörleri kullanılmıştır. Sabit sodyum konsantrasyonunda silikat modülünün ( $M_s$ ) artışıyla SS ile aktive edilmiş harçların kuruma rötrelere Portland Çimentolu (PÇ) harçların rötrelere 3-6 kat daha fazla elde

edilirken, sabit  $M_s$  için ise Sodyum konsantrasyonundaki artış ile (%4-%8) kuruma rötresi PÇ'li harcından 3-3.6 kat daha fazla elde edilmiştir. Sodyum konsantrasyonundaki artış SH ve SK'lı harçlardaki rötreyi arttırmıştır. SH'lı harçlar için bu artış 2.1-3 kat SK'lı harçlar için 0.7-1 kat olmuştur. Aktivatör olarak SK kullanımı tavsiye edilmiştir. Şekil 3 'te Silikat modülünün rötreye etkisine yer verilmiştir.



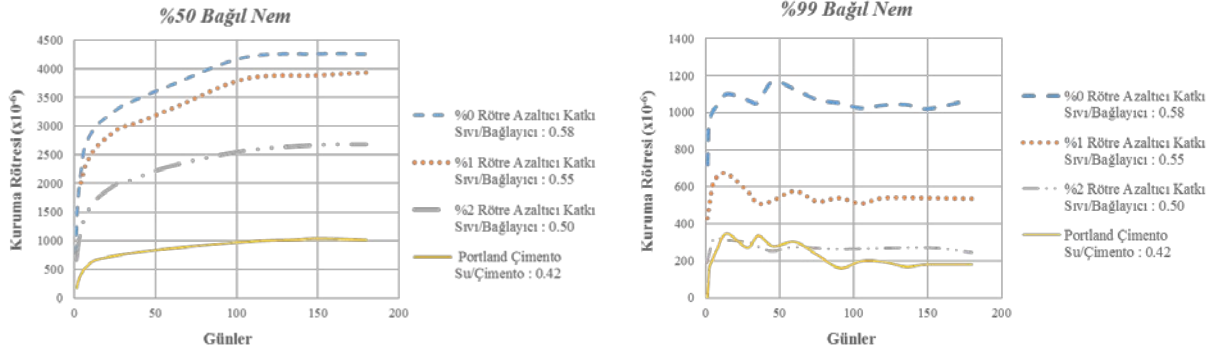
Şekil 3. Silikat modülünün rötreye etkisi

Palacios ve ark. [10] rötreye azaltıcı katkının (RAK) geopolimer harçlarının üzerindeki etkisini araştırmışlardır. RAK(Rötreye azaltıcı katkı) kullanılarak camsuyu ile aktive edilmiş külün %99 ve %50 bağıl nem değerlerinde rötreye değerlerinin sırasıyla %85 %50 azaldığı belirtilmiştir. RAK kullanımı büzülme kaynaklı mikro çatlaklarının sayısını ve genişliğini azaltmıştır. RAK kullanımı ile çapları 1-0.1 mm arasında değişen çaplardaki boşluk yüzdesi artmıştır

ve boşluk yapısı yeniden oluşmuştur. RAK 'nın olumlu etkilerinin sebepleri, sıvı/bağlayıcı oranını azaltması, boşluk sistemindeki suyun yüzey gerilmesini azaltması ve su buharlaştığında daha az iç gerilme oluşması ile açıklanmıştır. Bu boşluklar katkısız hamurdaki daha küçük boşluklara göre daha az kapiler gerilme oluşmuştur. Boşlukların dağılım sebebi RAK'ın karışım işlemi sırasında oluşan, suyun kapiler gerilmesinin azalması olmuştur. Bağıl nem

azalması ile kapiler jel boşluklarındaki suyun buharlaşması sebebiyle ötojen yanında kuruma rötresi de meydana gelmiştir. Bağlı nem %50 iken büyük boşluklardaki tüm su ile kapiler boşluk suyunun bir kısmı da buharlaşarak boşluk çeperlerine uygulanan basınç ile çatlamalar meydana gelmiştir. %50 bağlı nemde %99'a göre

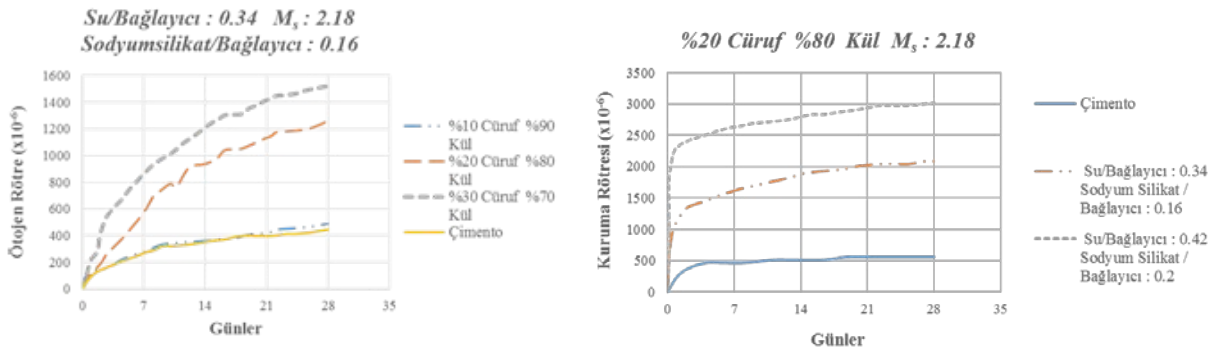
daha fazla kapiler gerilme (su kaybı daha az olduğundan) oluşmuştur. %2 RAK (%99 Bağlı nemde) eklenmesi sıvı ihtiyacını azaltarak boşluk suyu yüzey gerilmesini azaltacağından kuruma rötresini de azaltmıştır. Şekil 4 'te RAK ve bağlı nemin rötreye etkisine yer verilmiştir.



Şekil 4. Rötreye azaltıcı katkı ve bağlı nemin rötreye etkisi

Lee ve ark. [13] çalışmalarında uçucu kül ve cürüflü geopolimer harç ve hamurların rötresini ve rötreyi etkileyen durumları ele almışlardır. Yüksek kül ve sodyum silikat miktarının kuruma ve ötojen rötresini arttırdığı, rötrenin taze haldeki kimyasal rötreden

daha çok sertleşmiş durumdaki kendiliğinden kurumadan (yüksek kapiler gerilme) oluştuğu belirtilmiştir. Şekil 5 'te Bağlayıcı miktarının kuruma ve ötojen rötreye etkisine yer verilmiştir.



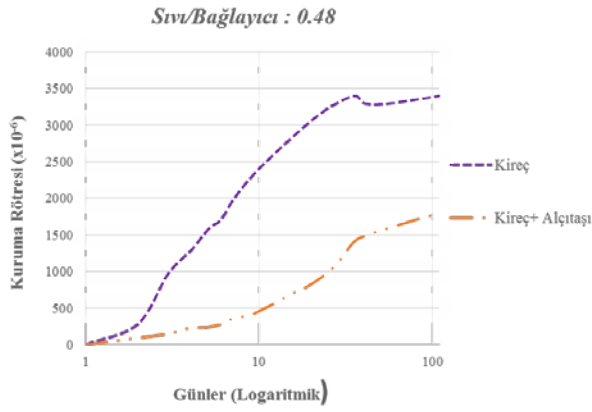
a) Bağlayıcı miktarının ötojen rötreye etkisi

b) Bağlayıcı miktarının kuruma rötresine etkisi

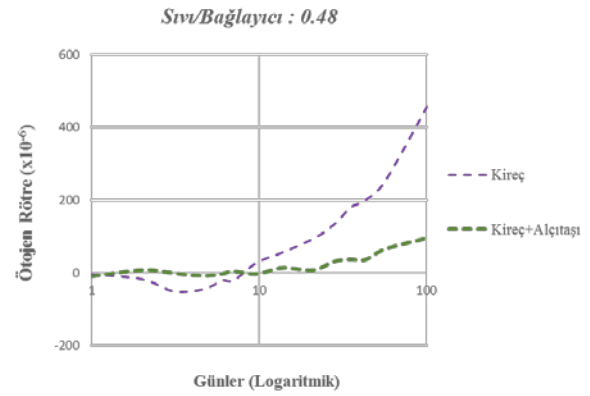
Şekil 5. a) Bağlayıcı miktarının ötojen rötreye ve b) kuruma rötresine etkisi

Krizan ve Zivanovic [26] çalışmalarında silika miktarının artışıyla erken hidrasyonun gerçekleştiğini ve dolayısıyla aktivatör miktarının kuruma ve ötojen rötreyi etkilediğini belirtmişlerdir. Neto ve ark. [27] çalışmalarında aktivatör miktarı artışıyla erken hidrasyonun gerçekleşmesi sonucu silika miktarının kuruma ve ötojen rötreyi etkilediğini belirtmişlerdir. Neto ve ark. [28] çalışmalarında

aktivatör olarak kireç (K) ve kireç+alçıtaşı (KA) kullanmışlardır. Boşluk boyutu dağılımı ve reaksiyon ürünlerinin yapısının ötojen rötreyi açıkladığı belirtilmiş ve bu duruma kimyasal rötredeki kendiliğinden kurumanın önemli etkisi olduğu belirtilmiştir. Şekil 6 'da farklı aktivatörlerin kuruma rötresine ve ötojen rötreye etkisine yer verilmiştir.



a) Farklı aktivatörlerin kuruma rötresine etkisi



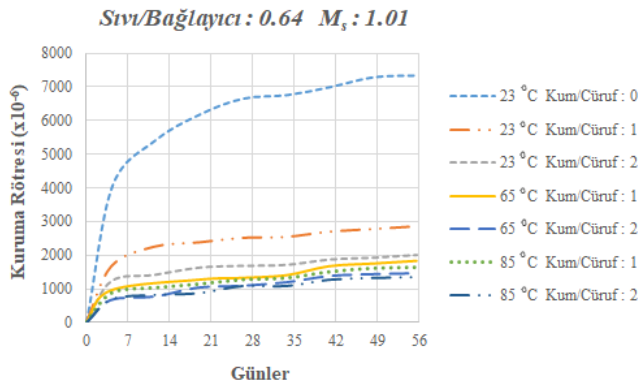
b) Farklı aktivatörlerin ötojen rötreye etkisi

Şekil 6. a) Farklı aktivatörlerin kuruma rötresine ve b) ötojen rötreye etkisi

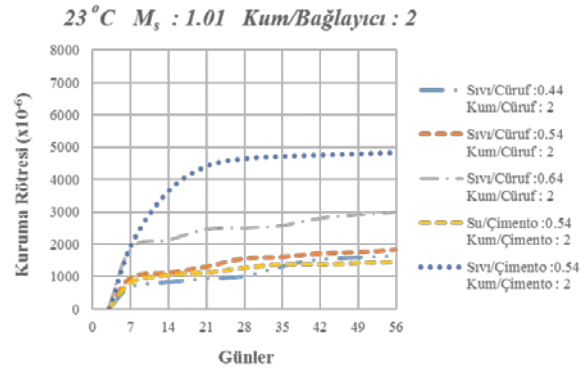
Aydın ve Baradan [29] çalışmalarında buhar ve otoklav kürün geopolimer harçların mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Alkali ile Aktive edilmiş Küllü karışımların (AAK) kuruma rötresi Portland Çimentolu (PÇ) karışımların rötresinden daha fazla olmuştur (Standart kür için 8 kat, buhar kürü için 4.5 kat). PÇ'li karışımların rötresi buhar kürü ile %34 otoklav kür ile %80 azalmıştır. Isıl kürün, AAK'lı karışımların rötresini azaltmada PÇ'li karışımlarinkine göre daha etkili

olduğu belirtilmiştir. Şekil 5'te bağlayıcı miktarının ve kür koşullarının rötreye etkisine yer verilmiştir.

Chi ve ark. [30] çalışmalarında Geopolimer hamurların harçlara göre daha yüksek rötreye değerlerine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Geopolimer harçların da PÇ'li harçlardan daha yüksek rötreye değerlerine sahip olduğu bulunmuştur. Şekil 7' de Agreganın ve çözelti miktarının rötreye etkisine yer verilmiştir.



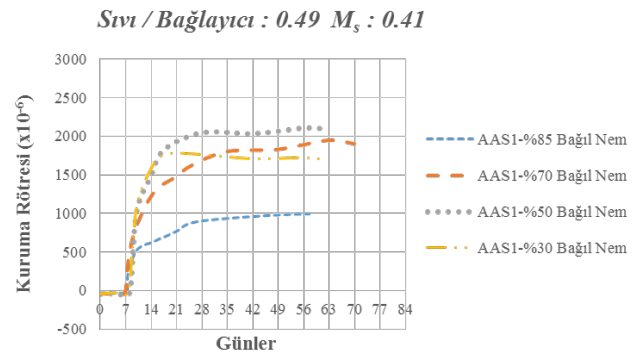
a) Agreganın etkisi



b) Çözelti miktarının etkisi

Şekil 7. a) Agreganın ve b) Çözelti miktarının rötreye etkisi

Ye ve ark. [31] çalışmalarında çeşitli tip ve dozlarda aktivatör kullanarak 4 farklı nem durumu ve 2 farklı kuruma şekli ile cürüflü geopolimer harçların kuruma rötrelere üzerinde çalışma yapmışlardır. Bağıl nem azaldıkça PÇ'li karışımların kuruma rötresi artmış ve AAK'lı karışımlar PÇ'li karışımlara göre farklı kuruma davranışları göstermiştir. Şekil 8' de Bağıl nemin rötreye etkisine yer verilmiştir.



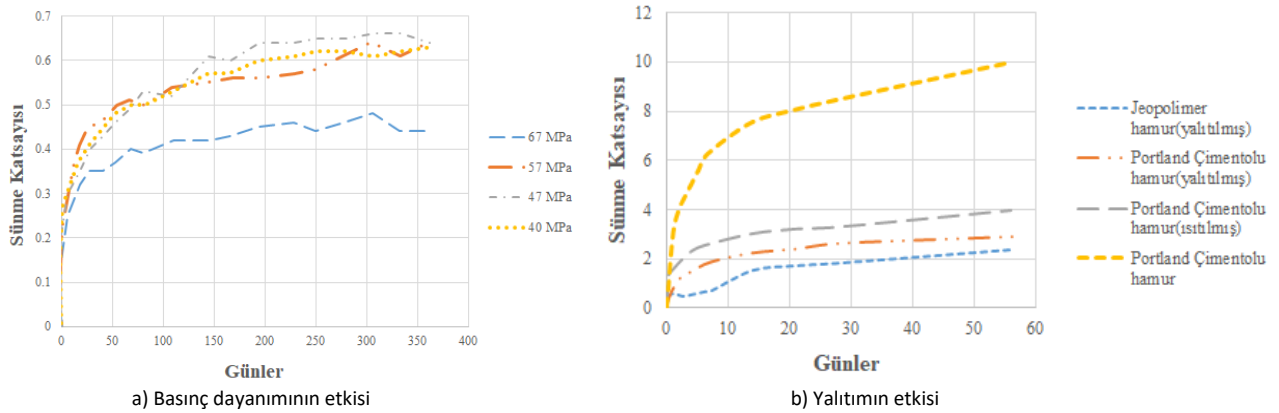
Şekil 8. Bağıl nemin rötreye etkisi



#### 4. Geopolimer Yapı Malzemelerinin Sünme Davranışı

Portland Çimentolu(PÇ) harçlara göre, geopolimer malzemelerin sünmesiyle ilgili sınırlı araştırmalar vardır. Wallah ve Hardjito [23] uçucu kül (UK) kullanarak geopolimer beton numuneler üretmiş ve sünme davranışlarını incelemişlerdir. 1 yıllık test süresinden sonra basınç dayanımları 67-40 MPa olan betonların sünme değerlerinin 15-29 mikrodeformasyon olduğu tespit edilmiştir. Şekil 6'da basınç dayanımının ve yalıtımın (etrafını kapatma) sünmeye etkisine yer verilmiştir. Crentsil ve

ark. [32] uçucu küllü geopolimer beton ile geleneksel betonun (40 MPa) sünme rötresini araştırmışlardır. Numunelerin 28 günlük dayanım değerlerinin %40'ı sabit yük olarak etkilmiş sünme deformasyonunun elastik deformasyona bölünmesiyle sünme katsayısı bulunmuştur. Buhar kürü uygulanmış geopolimer harçların sünme katsayısı PÇ'li numunelerden %45 daha az bulunmuştur. Geopolimer betonun yüke bağlı sünme deformasyonu ihmal edilebilecek seviyede bulunmuştur. Şekil 9' da basınç dayanımının ve yalıtımın sünmeye etkisine yer verilmiştir.



Şekil 9. a) Basınç dayanımının ve b) Yalıtımın sünmeye etkisi

Un ve ark. [33] hamur ve harç örneklerinin sünme davranışlarının değerlendirilmesi için mini bir kiriş testi tasarlamışlardır. Dış sıcaklık artışı ile hidrasyon derecesinin arttığı ve mikroyapının değiştiği belirtilmiştir. Büzülmenin çoğunun hidrasyon hızlanması sırasında oluşan ötojen rötre sebebiyle gerçekleştiğinden ve boşluklarda daha az serbest su kaldığından daha az sünme ve büzülme görülmüştür. Etrafı kapatılmış örnekler için PÇ'li olanların sünme değerleri 2.8 iken geopolimer örnekleri için 2.24 olarak bulunmuştur. Yüksek sıcaklıklarda farklı kürlenme durumları gözönüne alınarak tüm deneysel sonuçlar Eurocode 2 tahminleriyle karşılaştırılmıştır. Kürlenme şeklinin UK 'lı geopolimer betonların sünme değerlerini etkilediği belirlenmiştir. 80 C<sup>o</sup>da 7 günlük kürlenmede sünme değerleri ihmal edilecek seviyede olmuştur [34].

Hardjito ve ark. [35] çalışmalarında ısı ile sertleşen uçucu kül bazlı geopolimer harçların (GH) özellikleri üzerinde bir dizi test gerçekleştirmişlerdir. Sünme

değerlerinin PÇ'li harçlarınkinden daha düşük olduğunu bildirmişlerdir. Uçucu kül bazlı GH'nin 6 haftalık kalıcı yüklerde sünme katsayısı 0.3 olarak belirlenmiştir. Wallah ve Rangan [36] tarafından iki karışım detayı ve iki ısı kürü metoduyla (fırın kuru kürlenme veya buharla kürlenme) dört farklı örnek üzerinde daha fazla çalışma gerçekleştirilmiştir. Tüm örnekler, 1 yıllık yüklenme periyodu içinde 1'in altında sünme katsayısı göstermiştir. PÇ'li harçlara göre buhar ile kürlendikten sonra uçucu kül bazlı GH'larda daha düşük sünme değerleri bulunmuştur [37]. Uçucu kül ve metakaolin karışımından elde edilen bir GH, sürekli yükler altında 60 günde 0.609 olacak şekilde düşük sünme katsayısı göstermiştir [38]. Yüksek fırın cürufu (YFC) ve uçucu küllü harçlar ile kısa süreli bir sünme testi yapılmıştır. Bir aylık



test periyodunun test sonuçları, spesifik sünmenin, mukavemet arttıkça arttığını göstermiştir. [39].

## 5. Sonuç

Geniş bir kullanım alanına sahip olan yapı malzemelerinin çeşitli olumlu özellikleri yanında bazı olumsuz etkileri de mevcuttur. Bu anlamda beton üretiminde kullanılan çimento bağlayıcı malzemelere alternatif olabilecek geopolimer bağlayıcı yapı malzemeleri ile ilgili yapılan çalışmaların popülerliği giderek artmaktadır. Kullanım aşamasına tam bir geçiş için oldukça kompleks olan yapısının daha net anlaşılması gerekmektedir. En önemli istenmeyen özelliği olan şekilsel sabitliğinin olmaması sebebiyle zamana bağlı olarak kullanımı önemli problemlere yol açabilmektedir. Zamana bağlı olarak gelişen büzülme ve sünme mekanizmaları için istenilen değerlerin elde edilmesi amacıyla çeşitli deneyler yapılmıştır. Yapılan bu çalışmaların artması ile birlikte bilinmeyen kısımlar daha açık bir hale gelmektedir.

Sıvı/Bağlayıcı, Sodyum Konsantrasyonu, Silikat Modülü (Ms) ve Camsuyu Yüzdesi artışının rötire değerlerinde artışa sebep olurken, Kum/Bağlayıcı, Buhar/Otoklav Kür, Rötire Azaltıcı Katkı, Bağlı Nem ve Sıcaklık gibi parametrelerin artışının rötreyi azaltıcı etkisi olduğu belirlenmiştir. Karışımdaki su-çimento oranı, Ortamın ısı, özellikle nemi arttıkça sünme deformasyonunun arttığı bilgisine ulaşılmıştır. Kalıcı yük uygulandığı anda betonda oluşan gerilmelerin beton basınç dayanımına oranının bir ölçü kabul edilebildiği ve bu oranın 0,4 ten az olması durumunda sünmenin gerilmeyle orantılı olduğu belirtilmiştir. Bu oranın daha fazla olması durumunda sünme deformasyonu gerilmeyle orantılı olmaksızın daha hızlı artmaktadır.

Yapılan çalışmada, geopolimer/alkalilerle aktive edilmiş yapı malzemelerinin şekil değiştirme özellikleri üzerine yapılan çalışmalar incelenmiş ve elde edilen grafiklere yer verilmiştir. Geopolimer malzemelerin şekil değiştirme oranları oldukça kısıtlı iken alkaliler ile aktive edilmiş malzemelerin şekil değiştirme sabitliği pek sağlanamamaktadır. Elde edilen rötire ve sünme değerlerini azaltmak amacıyla yapılan çalışmalarda belli oranlarda başarıya ulaşılmıştır. Farklı karışım parametreleri ve ortam koşulları dikkate alınarak

yürütülen çalışmalar ile optimum sonuçlar elde edilmiştir. Yapılması hedeflenen bir sonraki çalışma, Literatür çalışma sonuçlarının incelenmesi ile geopolimer/alkalilerle aktive edilmiş yapı malzemeleri üretimi için şekil değiştirme sabitliği sağlanacak şekilde uygun karışım oranlarının ve kürlenme şeklinin seçilmesi ile literatür verilerinin artırılması olacaktır.

## Teşekkür

Bu çalışma Harran Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (HÜBAK) tarafından desteklenen **17138** nolu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir.

## Kaynaklar

- [1] Abdul Aleem, M. I. and Arumairaj, P. D. 2012. Geopolymer concrete- a review. International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies. 1: 118-122.
- [2] Singh Ishwarya, B., Gupta, G.M., and Bhattacharyya, S.K. 2015. Geopolymer concrete: A review of some recent developments. Construction and Building Materials. 85: 78-90.
- [3] Jia, Z., Yang, Y., Yang, L., Zhang, Y., and Sun, Z. 2018. Hydration products, internal relative humidity and drying shrinkage of alkali activated slag mortar with expansion agents. Construction and Building Materials. 158: 198-207.
- [4] Shi, C. 2003. Corrosion resistance of alkali-activated slag cement. Adv. Cem. Res. 15: 77-81.
- [5] Zhang, J., Shi, C., Zhang, Z. and Ou Z. 2017. Durability of alkali-activated materials in aggressive environments: a review on recent studies. Constr. Build. Mater. 152: 598-613.
- [6] Collins, F. and Sanjayan J. 2000. Effect of pore size distribution on drying shrinking of alkali-activated slag concrete. Cem. Concr. Res. 30: 1401-1406.
- [7] Ye, H., Cartwright, C., Rajabipour, F. and Radlin' ska A. 2017. Understanding the drying shrinkage performance of alkali-activated slag mortars. Cem. Concr. Compos. 76: 13-24.
- [8] Ye, H. and Radlin' ska A. 2016. Shrinkage mechanisms of alkali-activated slag. Cem. Concr. Res. 88: 126-135.
- [9] Duran Atis, C., Bilim, C., Çelik Ö. ve Karahan O. 2009. Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar. Constr. Build. Mater. 23: 548-555.
- [10] Palacios, M. and Puertas F. 2007. Effect of shrinkage-reducing admixtures on the properties of alkali-activated slag mortars and pastes. Cem. Concr. Res. 37: 691-702.
- [11] Cartwright, C., Rajabipour, F. and Radlin' ska A. 2014. Shrinkage characteristics of alkaliactivated slag cements, J. Mater. Civ. Eng. 27: B4014007.

- [12] Hansen, T. 1969. Drying shrinkage of concrete due to capillary action. *Matériaux et Construction* 2: 7–9.
- [13] Lee, N., Jang, J. and Lee, H. 2014. Shrinkage characteristics of alkali-activated fly ash/slag paste and mortar at early ages. *Cem. Concr. Compos.* 53: 239–248.
- [14] Lecomte, I. Henrist, C. Liegeois, M. Maseri, F. Rulmont, A. and Cloots R. 2006. (Micro)- structural comparison between geopolymers, alkali-activated slag cement and Portland cement. *J. Eur. Ceram. Soc.* 26: 3789–3797.
- [15] Bakharev, T., Sanjayan, J. and Cheng, Y.-B. 2000. Effect of admixtures on properties of alkali-activated slag concrete. *Cem. Concr. Res.* 30: 1367–1374.
- [16] Yang, L.Y., Jia, Z.J., Zhang, Y.M. and Dai, J.G. 2015. Effects of nano-TiO<sub>2</sub> on strength, shrinkage and microstructure of alkali activated slag pastes. *Cem. Concr. Compos.* 57: 1–7.
- [17] Kristiawan, S. 2012. Evaluation of models for estimating shrinkage stress in patch repair system. *International Journal of Concrete Structures and Materials.* 6: 221-230.
- [18] Khan, M. 2013. Ring test for the measurement of restrained shrinkage of concrete. *Applied Mechanics and Materials.* Vol. 377: 86-91.
- [19] Beushausen, H. and Chilwesa, M. 2013. Assessment and prediction of drying shrinkage in bonded mortar overlays. *Cement and Concrete Research.* 53: 256-266.
- [20] Collins, F. and Sanjayan, J. G. 1999. Workability and mechanical properties of alkali-activated slag concrete. *Cem. Concr. Res.* 29: 455-458.
- [21] Collins, F. and Sanjayan, J. G. 2000. Effect of pore size distribution on drying shrinkage of alkali-activated slag concrete. *Cem. Concr. Res.* 30: 1401-1406.
- [22] Mobili, A., Belli, A., Giosué, C., Bellezze, T., and Tittarelli, F. 2016. Metakaolin and fly ash alkali-activated mortars compared with cementitious mortars at the same strength class. *Cement and Concrete Research.* 88: 198-210.
- [23] Wallah, S. and Hardjito, D. 2014. Assessing the shrinkage and creep of alkali-activated concrete binders. In *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes.*
- [24] Gao, X., Yu, Q., and Brouwers, H. 2016. Assessing the porosity and shrinkage of alkali activated slag-fly ash composites designed applying a packing model. *Construction and Building Materials.* 119: 175-184.
- [25] Ma, Y. and Ye, G. 2015. The shrinkage of alkali activated fly ash. *Cement and Concrete Research.* 68: 75-82.
- [26] Krizan, D. and Zivanovic, B., 2002. Effects of dosage and modulus of water glass on early hydration of alkali-slag cements. *Cement and concrete research.* 32: 1181-1188.
- [27] Neto, A.A.M., Cincotto, M.A. and Repette, W. 2008. Drying and autogenous shrinkage of pastes and mortars with activated slag cement. *Cement and Concrete Research.* 38: 565-574.
- [28] Neto, A.A.M., Cincotto, M.A. and Repette, W., 2010. Mechanical properties, drying and autogenous shrinkage of blast furnace slag activateFatid with hydrated lime and gypsum. *Cement and Concrete Composites.* 32: 312-318.
- [29] Aydın, S. and Baradan, B. 2012. Mechanical and microstructural properties of heat cured alkali-activated slag mortars. *Materials and Design.* 35: 374-383.
- [30] Chi, M.-C., Chang, J.-J. and Huang, R. 2012. Strength and drying shrinkage of alkali-activated slag paste and mortar. *Advances in Civil Engineering.*
- [31] Ye, H., Cartwright, C., Rajabipour, F. and Radlińska, A., 2017. Understanding the drying shrinkage performance of alkali-activated slag mortars. *Cement and Concrete Composites,* 76: 13-24.
- [32] Crentsil, K.S., Brown T. and Taylor, A. 2013. Drying shrinkage and creep performance of geopolymer concrete. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials.* 2: 35-42.
- [33] Un, C.H., Sanjayan, J.G., San Nicolas R. and Van Deventer J.S.J. 2014. Predictions of long-term deflection of geopolymer concrete beams. *Construction and Building Materials.* 94: 10-19.
- [34] Castel, A., Foster, S.J., Ng, T. et al. 2016. Creep and drying shrinkage of a blended slag and low calcium fly ash geopolymer Concrete. *Mater. Struct.* 49: 1619.
- [35] Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J., and Rangan, B.V. 2004. On the development of fly ash-based geopolymer concrete. *ACI Materials Journal.* 101: 467-472.
- [36] Wallah, S. and Rangan, B.V. 2006. Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: Long-term properties. *Res. Report-GC2, Curtin University, Australia,* 76-80.
- [37] Liu, H., Lu, Z., and Peng, Z. 2014. Test research on prestressed beam of inorganic polymer concrete. *Materials and Structures.*
- [38] Lee, N.P. 2007. Creep and shrinkage of inorganic polymer concrete. In *BRANZ Study Report SR 175, BRANZ Ltd., Judgeford, New Zealand.*
- [39] Ridditirud, C., Chindaprasirt, P., and Pimraksa, K. 2011. Factors affecting the shrinkage of fly ash geopolymers. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials.* 18: 100-104.