

## FARKLI KÜR KOŞULLARININ TABAN KÜLÜ KATKILI GEOPOLİMERLERİN TERMAL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Hasbi YAPRAK<sup>1</sup>, Gökhan KAPLAN<sup>2\*</sup>  
hyaprak@kastamonu.edu.tr, gkaplan@kastamonu.edu.tr

<sup>1</sup>Kastamonu Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat  
Mühendisliği Bölümü, Kastamonu

<sup>2</sup>Kastamonu Üniversitesi, Kastamonu MYO, İnşaat Bölümü, Kastamonu

### Özet

Bu çalışmada, mineral katkı olarak taban külü (TK) ve yüksek fırın cürufu (YFC), alkali aktivatör olarak NaOH (SH) ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> (SS) kullanılmıştır. TK %0, 25, 50, 75, 100 oranında, SS %25, 50 75 oranında kullanılmıştır. Termik santrallerde açığa çıkan taban külü çevresel problemlere yol açmaktadır. Bu yüzden taban külü ve yüksek fırın cürufu katkıli geopolimer harçlar hazırlanarak ekolojik yapı malzemesi üretimi araştırılmıştır. Geopolimer harç numunelerine 20, 30 ve 50°C'de farklı sürelerde deney gününe kadar kür uygulanmış, kür işlemi sonrası numunelere eğilme ve basınç testleri uygulanmış, ayrıca harç numuneleri üzerinde DTA-TG/DTG analizleri yapılmıştır. SS ve TK oranındaki artışın, kısa süreli ve düşük kür sıcaklığı şartlarında basınç dayanımını düşürdüğü belirlenmiştir. Geopolimer ve çimento esaslı harçlarda gerçekleştirilen termal analizlerde C-S-H, Ca(OH)<sub>2</sub>, NaCO<sub>3</sub>, CaCO<sub>3</sub>, alümina-silikat esaslı yapılar ve fiziki su varlığı tespit edilmiştir. Laboratuvar ve yüksek sıcaklık ortamında bekletilen geopolimer harçların DTA analizlerinde fiziki su varlığına rastlanmamıştır, bunun hidrasyon ürünlerinin oluşumu sonucu boşluk yapısının azalmasından kaynaklandığı sanılmaktadır. TG analizi sonucu elde edilen ağırlık kaybı değerleri ile mekanik özelliklerin paralellik gösterdiği belirlenmiştir. Kür sıcaklığının artması ile mekanik özelliklerde iyileşmeler elde edilmiştir. Taban külünün artması sonucunda sodyum hidroksit miktarının da artması gerekmektedir. %50 TK + %50 YFC'nun, %25 SS'la aktive edilmesiyle üretilen geopolimer harçlar, endüstriyel atıkların ekolojik ve çevresel etkilerinin azaltılmasına, ayrıca sürdürülebilirliğe önemli bir katkı sağlayacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Geopolimer, Taban külü, Yüksek fırın cürufu, DTA-TG, Sodyum silikat, Sodyum hidroksit

## EFFECT OF DIFFERENT CURE CONDITIONS ON THE THERMAL AND MECHANICALS PROPERTIES OF GEOPOLYMERS WITH ADDITIVE BOTTOM ASH

### Abstract

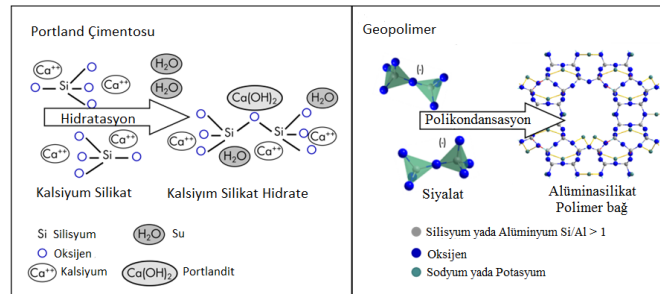
This study uses bottom ash (BA) and fly ash (FA) as mineral additive, and NaOH (SH) and Na<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> (SS) as alkali activator. TK was used in five different ratios (0%, 25%, 50%, 75%, and 100%), while SS was used in three different ratios (25%, 50%, 75%). The bottom ash produced in thermal power plants leads to environmental issues. Therefore, this study explores the option of ecological building material manufacturing with the preparation of geopolymer mortars with bottom ash and fly ash as additives. The geopolymer mortar samples were cured at 20°C, 30°C, and 50°C for varying periods of time until the experiments, the samples were then tested for their bending strength and compressive strength, and they were also subjected to DTA-TG/DTG analyses. It was found that increased SS and TK ratios increase compressive strength if cured for a shorter period of time with lower curing temperatures. The thermal analyses conducted on the geopolymer and cement based mortars revealed the existence of C-S-H, Ca(OH)<sub>2</sub>, NaCO<sub>3</sub>, CaCO<sub>3</sub>, alumina silicate based structures and physical water. DTA analyses conducted on the geopolymer mortars cured at lab temperature and higher temperatures did not indicate the existence of water and it was assumed that this was a result

of the decreased pore structure due to hydration products available. The weight loss value obtained with the TG analysis was in parallel with its mechanical properties. Increasing the curing temperature led to improvements in the mechanical properties. Increasing amounts of bottom ash would increase the amount of sodium hydroxide. Geopolymer mortars obtained with 50% BA + 50% FA which is activated using 25% SS will reduce the environmental impacts of industrial waste while significantly contributing to sustainability.

**Keywords:** Geopolymer, Bottom ash, Ground-granulated blast-furnace slag, DTA-TG, Sodium silicate, Sodium hydroxide

## 1. GİRİŞ

Beton dünyadaki en önemli yapı malzemesidir. Yüksek mekanik dayanım ve kabul edilebilir durabilite performansından dolayı yılda 10 milyar tondan fazla beton üretilmektedir [1-3]. Ancak beton üretiminde kullanılan portland çimentosu %5-8 oranında CO<sub>2</sub> salınımı yaptığından dolayı küresel ısınmada önemli bir paya sahiptir. Yapı malzemelerinin neden olduğu çevresel problemlerin azaltılması ve sürdürülebilirlik açısından alternatif yapı malzemelerinin üretilmesi için çok sayıda araştırma yapılmaktadır. Bu çerçevede geopolimerler en uygun alternatif malzemeler olarak ön plana çıkmaktadır [4]. Geopolimer üretimi ilk defa 1957 yılında Glukhovsky tarafından NaOH ve YFC kullanılarak gerçekleştirilmiştir [5]. Geopolimerler günümüzde kullanılan en yaygın yapı malzemelerinden bir tanesidir [6]. Davidovits [7], geopolimerleri üç boyutlu alümina-silikat esaslı bir bağlayıcı olarak tanımlamıştır. Geopolimerler katı haldeki alümina-silikat ile yüksek konsantrasyondaki sıvı alkali hidroksit veya silikat çözeltisinin reaksiyonu ile oluşmaktadır. Alümina-silikatlar güçlü alkali çözeltilerde hızlıca çözülerek serbest SiO<sub>4</sub> ve AlO<sub>4</sub> tetrahedral yapılarını oluşturur, reaksiyonun ilerlemesi ile SiO<sub>4</sub> ve AlO<sub>4</sub> tetrahedral yapıları oksijen (O) atomları ile bağ kurarak polimerik Si-O-Al bağını oluşturur [8]. Geopolimerlerdeki bu reaksiyon polikondansasyon sonucu gerçekleşmekte ve geopolimerizasyon olarak tanımlanmaktadır. Geopolimerlerdeki reaksiyon süreci ve portland çimentosu ile karşılaştırılması Şekil 1'de tanımlanmıştır [9].



Şekil 1. Portland çimentosu ve geopolimerlerin hidratasyon/polikondansasyon aşamaları [9]

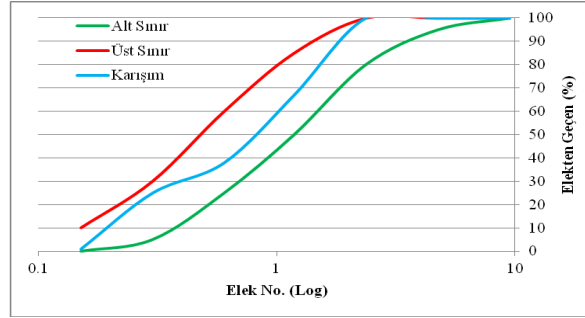
Geopolimerlerde bağlayıcı olarak doğal alümina-silikat yada uçucu kül, pirinç kabuğu külü, yüksek fırın cürufu gibi alümina-silikat esaslı atık malzemeler kullanılmaktadır [10]. Alümina-silikat esaslı bileşenlerin kullanılması sonucunda elde edilen geopolimerlerde (hibrit portland çimentosu) N-A-S-H ve C-A-S-H gibi iki önemli jel yapısının oluştuğu tahmin edilmektedir [11]. Günümüzde geopolimerle ilgili yapılan çalışmalar; mekanik özellikler [12-16], durabilite [17-19], termal stabilite/yüksek sıcaklık etkisi [20, 21] ve çevresel etkiler [22] üzerine yoğunlaşmıştır.

Bu çalışmada, ana bağlayıcı olarak YFC, ikame malzemesi olarak TK, alkali aktivatör olarak SH ve SS kullanılarak geopolimer harç numuneleri üretilmiştir. Taban külü termik santrallerde açığa çıkan ve çevresel problemlere yol açan atık bir malzemedir. Bu yüzden taban külünün geopolimer harçlarda kullanılarak uygulama alanlarını genişletmeye yönelik bir çalışma yapılmıştır. Harçlar üç farklı kür ortamında bekletilmiş, kür sonunda harçların eğilme ve basınç dayanımları belirlenmiş, harçların DTA/TG/DTG analizleri gerçekleştirilmiştir. Kür sıcaklıkları değiştirilerek geopolimer harçların hidratasyon süreci incelenmiş ve en uygun kür sıcaklığı belirlenmiştir.

## 2. MALZEME VE YÖNTEM

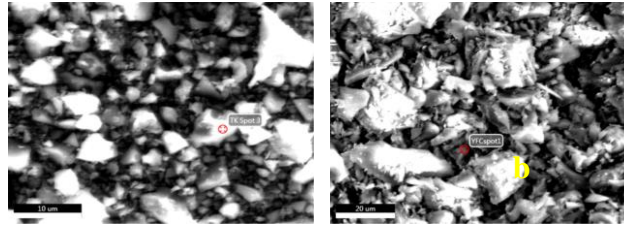
### 2.1 Malzeme

Karışımların hazırlanmasında tane boyutu 0-2 mm olan kalker agregası kullanılmıştır. Agreganın tane dağılımı ASTM C33 ve AASHTO M 6 standartlarına uygun olup Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 2. Kalker esaslı agregaya ait tane dağılımı

Harç karışımlarında kullanılan TK ve YFC'na ait SEM görüntüleri de Şekil 3'de, YFC, TK ve çimentoya ait özellikler Çizelge 1'de verilmiştir.



Şekil 3. TK (a) ve YFC (b) için alınan SEM görüntüleri

Referans karışımlarda TS EN 197-1 standardına uygun CEM I 42.5 R tipi çimento kullanılmıştır. YFC öğütülmüş olarak temin edilmiş, TK ise Çayırhan Termik Santralinden sağlanmıştır. TK 200 saniye süre ile diskli öğütücüde öğütülmüş, daha sonra TK'ne 500 °C'de 1 saat süre ile kalsinasyon işlemi uygulanmıştır.

YFC ve TK'nün aktivasyonu için SS ve SH kullanılmıştır. SH granüle formda olup, %97 saflık değerindedir. SH laboratuvar ortamında 16M olacak şekilde hazırlanmıştır. Firma verilerine göre SS'in özgül ağırlığı 1.35 değerinde olup %8.5 Na<sub>2</sub>O, %28.5 SiO<sub>2</sub> ve %65 H<sub>2</sub>O'dan oluşmaktadır.

### Çizelge 1

#### Çimento, YFC ve TK'nün Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

|                                | Çimento | YFC   | TK    |
|--------------------------------|---------|-------|-------|
| CaO                            | 63,66   | 31,61 | 1,62  |
| SiO <sub>2</sub>               | 20,64   | 43,45 | 59,28 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4,75    | 16,17 | 25,15 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3,33    | 0,45  | 5,86  |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,25    | 3,81  | -     |
| K <sub>2</sub> O               | 0,94    | 0,65  | 3,74  |
| MgO                            | 1,28    | 4,00  | 3,06  |
| SO <sub>3</sub>                | 3,01    | 1,54  | 0,07  |
| Özgül Ağırlık                  | 3,10    | 2,85  | 2,30  |
| Blaine (cm <sup>2</sup> /gr)   | 3300    | 6000  | 6400  |

## 2.2 Yöntem

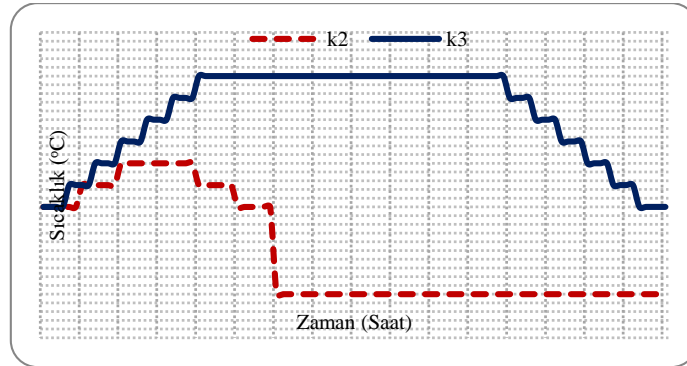
Hazırlanan karışımlarda sadece referans harçlarda çimento kullanılmış, diğer numunelerde ise farklı oranlarda TK ve YFC kullanılmıştır. Bağlayıcı ve aktivasyon çözeltisine ait değişkenler Çizelge 2'de verilmiştir. Harçların üretiminde kullanılan malzeme oranları Çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 2

*Harç Karışımlarında Kullanılan Malzemelerin % Dağılımı*

| Bağlayıcılar (%) |     | Aktivasyon Çözeltileri (%)       |      |
|------------------|-----|----------------------------------|------|
| TK               | YFC | Na <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> | NaOH |
| 0                | 100 | 25                               | 75   |
| 25               | 75  | 50                               | 25   |
| 50               | 50  | 75                               | 50   |
| 75               | 25  |                                  |      |
| 100              | 0   |                                  |      |

Tüm harç karışımlarında su/bağlayıcı (S/B) oranı 0.35 ve agrega/bağlayıcı oranı 1.25 olarak alınmıştır. Mineral katkıların aktive edilmesi için karışım içerisinde kullanılan TK + YFC ağırlığının %40'ı oranında aktivasyon çözeltisi, bağlayıcı miktarının %1,7'si oranında akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Karışımlarda kullanılacak su miktarı aktivasyon çözeltisindeki içeriği dikkate alınarak belirlenmiştir. Harçlar kendiliğinden yerleşme özelliğine sahip olduğu için herhangi bir sıkıştırma işlemi uygulanmamıştır. Kalıptan çıkartılan sertleşmiş harç numuneleri 20°C'de 28 gün (k1), 30°C'de 36 saat (k2), 50°C'de 96 saat (k3) süreyle üç farklı ortamda deney gününe kadar kür işlemine tabi tutulmuştur. 30 ve 50°C'lik kür işlemlerinde ki sıcaklık-zaman değişimi Şekil 4'de verilmiştir.



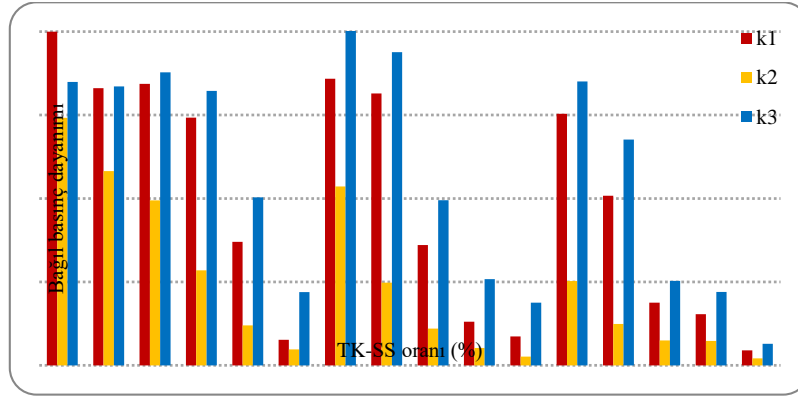
Şekil 4. Kür uygulamaları için sıcaklık-zaman değişimi

## 3. BULGULAR ve TARTIŞMA

### 3.1 Sodyum Silikat Kür Koşulları ve Taban Külünün Basınç Dayanımı Üzerindeki Etkisi

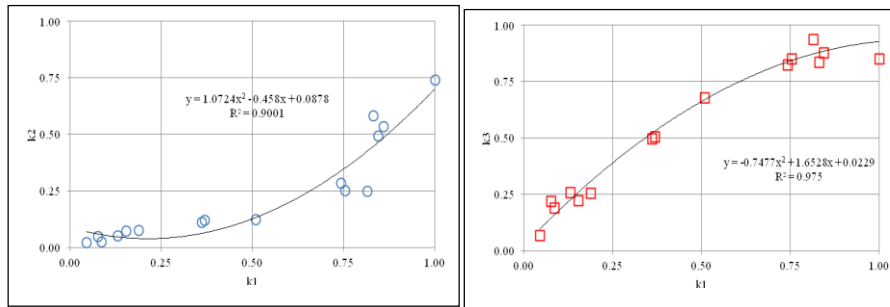
Kür koşulları, SS, ve TK'nün basınç dayanımı üzerindeki etkileri Şekil 5'te verilmiştir. Şekil 5 incelendiğinde SS ve TK oranındaki artışın, kısa süreli ve düşük kür sıcaklığı şartlarında basınç dayanımını düşürdüğü belirlenmiştir. k2 kür koşulu tüm karışımlarda en düşük dayanımı vermiştir. Bu değerler YFC'ü ve TK'nün hidratasyon gelişiminin uzun süreçte geliştiğini, kısa süreli kürün hidratasyon için yeterli olmadığını göstermektedir. %25 SS, %0, 25 ve 50 TK katkılı harçlar, k1 ve k3 kür koşullarında eşdeğer basınç dayanımı sergilemiş, en düşük bağıl dayanım % 74 olarak bulunmuştur. %25 TK katkısının, uzun süreli ve yüksek sıcaklıktaki kür koşullarında iyi bir performans sergilediği gözlenmiştir. %0 ve 25 TK ve %50 SS katkılı harçların k3 kür ortamında bağıl basınç dayanımı sırasıyla 1.0 ve 0.94 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar YFC'nun tek başına veya TK ile birlikte geopolimer harç üretiminde kullanılabilceğini

göstermektedir. %50, 75 SS ve %75, 100 TK katkılı harçlarda basınç kaybı, kür koşuluna da bağlı olarak %98'lere ulaşmıştır.



Şekil 5. Geopolimer harçların bağlı basınç dayanımları

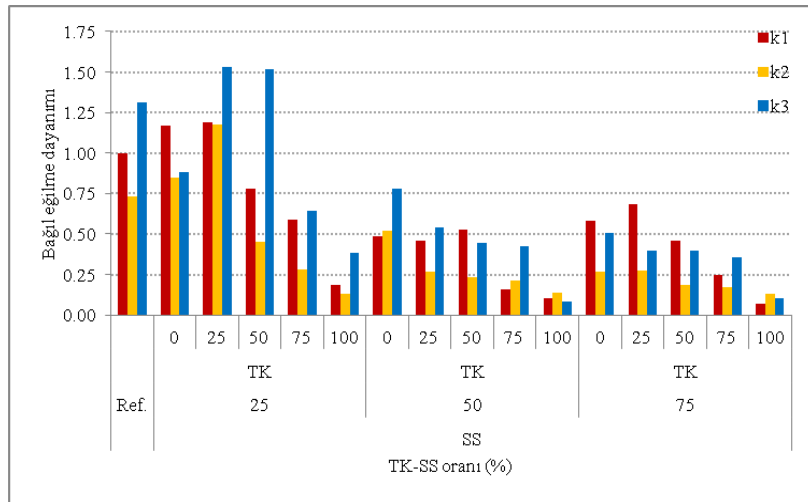
Harçların basınç dayanımları üzerinde etkili olan farklı kür koşulları arasındaki korelasyon analizi Şekil 6'da verilmiştir. Bulunan korelasyon katsayıları kür koşulları arasında pozitif, çok güçlü ve anlamlı bir ilişkinin varlığını göstermektedir. Bu ilişkinin k1 ve k3 arasında daha anlamlı olduğu görülmektedir.



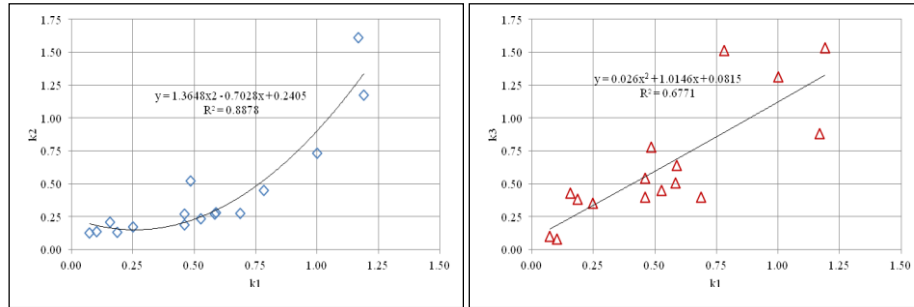
Şekil 6. Kür yöntemleri-basınç dayanımı korelasyonu

### 3.2 Sodyum Silikat Kür Koşulları ve Taban Külünün Eğilme Dayanımı Üzerindeki Etkisi

Kür koşulları, SS, ve TK'nün eğilme dayanımı üzerindeki etkileri Şekil 7'te verilmiştir. %25, 50 TK ve %25 SS katkılı harçların k3 kür koşulunda bağlı eğilme dayanımı sırasıyla 1.53, 1.51 olarak bulunmuştur. Ancak belirtilen katkı oranlarının dışında kalan harçlarda artan TK ve SS oranına da bağlı olarak bağlı eğilme dayanımı değerleri 0.07'ye kadar düşüş kaydetmiştir. Harçların eğilme dayanımlarının özellikle düşük ve kısa süreli kür koşullarından olumsuz olarak etkilendiği görülmüştür. %50, 75 SS ve TK katkılı harçlarda k1 ve k3 kür koşullarının daha etkili olduğu belirlenmiştir. TK katkılı harçların artan taban külü katkı oranına da bağlı olarak kısa süreli ve düşük kür sıcaklığından olumsuz etkilendiği görülmektedir.



Şekil 7. Geopolimer harçların bağıl eğilme dayanımları



Şekil 8. Kür yöntemleri-basınç dayanımı korelasyonu

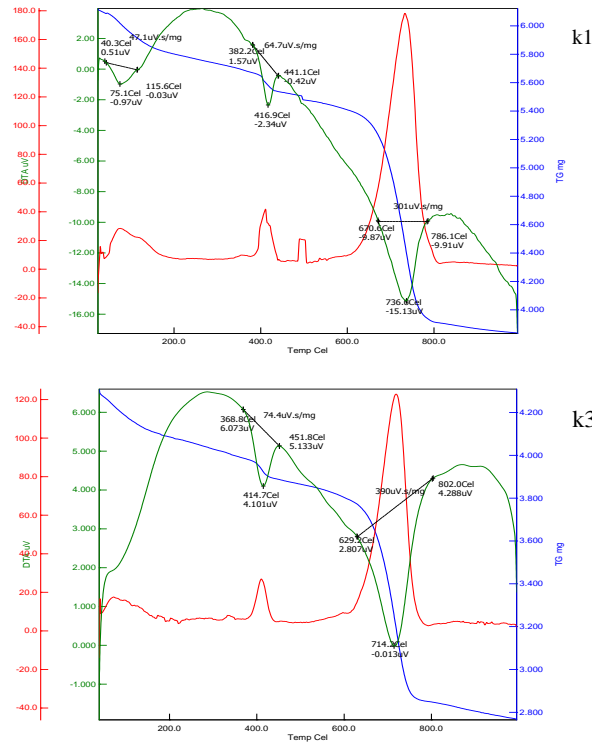
Harçların eğilme dayanımları üzerinde etkili olan farklı kür koşulları arasındaki korelasyon analizi Şekil 8'de verilmiştir. k1 ve k3 kür koşulları arasında pozitif, güçlü ve anlamlı bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Ancak k1 ve k3 kür koşulları arasında 0.68 olarak bulunan korelasyon katsayısı, pozitif yönlü, zayıf bir ilişkinin varlığını ortaya koymaktadır. k1 ve k3 kür koşulları arasında basınç dayanım değerleri açısından çok güçlü bir ilişki sergilemesine karşın, aynı etki eğilme dayanımı değerlerinde oluşmamıştır.

### 3.3 Termal Analiz ile Hidratasyon Ürünlerinin İncelenmesi

Hidratasyon ürünlerinin incelenmesi için bazı geopolimer harçlar üzerinde DTA/TG/DTG analizleri gerçekleştirilmiştir. Termal analizlerde mekanik özellikler dikkate alınmış, 16 farklı geopolimer harç numuneden yalnızca k1 ve k3 kür koşullarında bekletilen, en yüksek ve en düşük basınç dayanımına sahip geopolimer ve referans harç numuneler üzerinde termal analizler gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımı en yüksek numune olarak % 0 TK, %50 SS katkılı geopolimer, %100 TK, %75 SS katkılı geopolimer numune de en düşük basınç dayanımına sahip numune olarak seçilmiştir. Termal analiz eğrilerinden; mavi eğri TG, kırmızı eğri DTG ve yeşil eğri DTA'yı temsil etmektedir.

Yaklaşık 118 °C'de oluşan pik ve ağırlık kaybı buharlaşabilir fiziksel suyu tanımlanmaktadır. Fiziksel su 5 nm ve üstü boyutundaki gözeneklerde bulunmaktadır [23]. TGA'da 300 °C'da meydana gelen ağırlık kaybı hidratasyon ürünlerinde (C-S-H, N-A-S-H vb.) yer alan kimyasal bağlı suyun dehidrasyonunu belirtmektedir [24]. 400 °C'deki ağırlık kaybı ise reaksiyona girmemiş NaOH ve atmosferdeki CO<sub>2</sub>'in reaksiyonu sonucu oluşan sodyum karbonatın ayrışması olarak tanımlanmıştır [25]. DTA analizinde 330-460 °C aralığında oluşan endotermik pikler Ca(OH)<sub>2</sub> ayrışmasını ifade eder. 600-800 °C aralığındaki endotermik pikler ise karbonatların ayrışmasını göstermektedir [26].

Alkaliler ile aktive edilen harçlarda  $\text{Na}^+$  iyonlarının artması ile ağırlık kaybı artmaktadır. Bu bağlayıcı faz içerisindeki alkali çözeltinin  $\text{OH}^-$  grupları ve kuvvetli bağlara sahip kimyasal bağlı suyun etkisi ile açıklanmaktadır [27]. Ayrıca kür süresinin uzaması sonucu hidrasyonun ilerlemesine bağlı olarak ağırlık kaybı yine artmaktadır [28]. DTG analizinde  $400^\circ\text{C}$  civarında oluşan ekzotermik pik, su esaslı bir bileşiğin varlığını ifade etmektedir.  $800^\circ\text{C}$  civarında oluşan ekzotermik pik ise  $\text{CO}_2$  çıkışı gerçekleştiğini belirtirken bu durum çimento esaslı kompozitler de genellikle karbonatların ayrışması ile açıklanmaktadır [29].

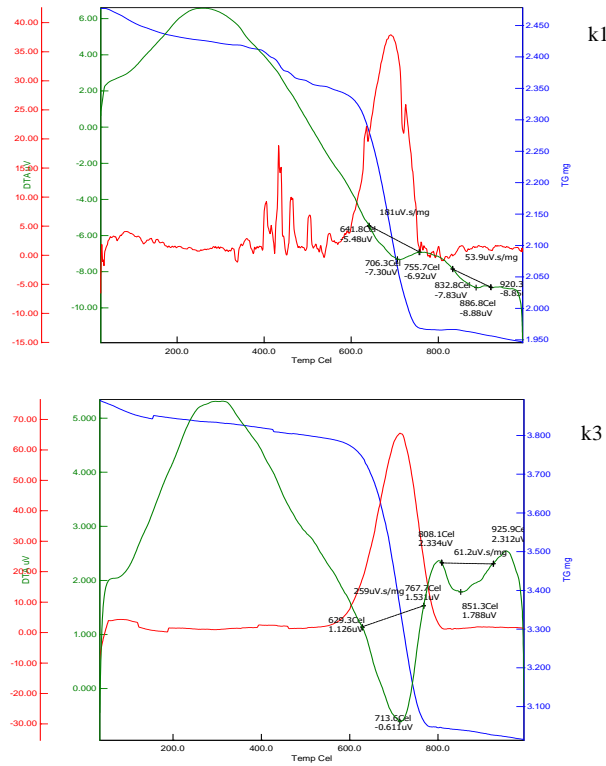


Şekil 9. Farklı kür koşullarında (k1-k3) bekletilen referans karışımın termal analiz eğrileri

Şekil 9'da referans numunenin DTA-TG/DTG eğrileri yer almaktadır.  $40-75^\circ\text{C}$  arasındaki pikler fiziki, buharlaşabilir suyu ifade etmektedir.  $106.5-115.6^\circ\text{C}$  arasındaki pikler ise C-S-H jellerinin dehidratasyonu göstermektedir.  $375.4-432.5^\circ\text{C}$  arasında oluşan pikler  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'in,  $632.2-786.1^\circ\text{C}$  arasındaki piklerde karbonatların ayrışması olarak tespit edilmiştir.

k1 kür koşullarında harç numunelerinde %47.7 ağırlık kaybı gerçekleşmiştir. DTG analizlerinde yaklaşık  $700^\circ\text{C}$  'de meydana gelen pik  $\text{CO}_2$  çıkışını ve karbonatların ayrışmasını ifade etmektedir.

k3 kür koşullarında  $368.8^\circ\text{C}$ 'de meydana gelen pik C-S-H jelinin dehidratasyonunu belirtmektedir, ancak DTA sonuçlarına göre fiziki su oluşumu belirlenmemiştir. Ayrıca k1 kür koşullarında olduğu gibi  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ve  $\text{CaCO}_3$  ayrışması belirlenmiştir. TG analizinde ise %36 oranında ağırlık kaybının olduğu gözlemlenmiştir.

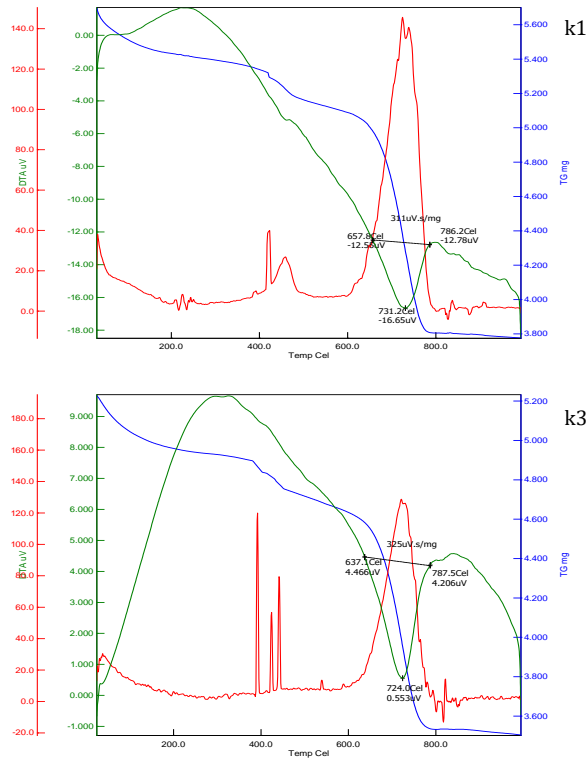


Şekil 10. Farklı kür koşullarında (k1-k3) bekletilen %75 SS ve %100 TK katkıli harçların termal analiz eğrileri

%100 TK ve %75 SS kullanımı ile elde edilen geopolimer harçların k1 ve k3 yöntemlerine göre DTA-TG/DTG eğrileri Şekil 10'da verilmiştir. Geopolimer harçların DTA eğrisinde yer alan pikler incelendiğinde harçlarda  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'in oluşmadığı görülmektedir. k1 kür koşullarında ki harçlarda fiziki su belirlenmemiştir. 600-700 °C'de oluşan pikler karbonatların ayrışmasını göstermektedir. TG eğrisinde 400 °C'de yer alan ağırlık kaybı hidrate olmamış NaOH'in ortamdaki  $\text{CO}_2$  ile reaksiyona girmesi sonucu oluşan  $\text{NaCO}_3$ 'ün ayrışmasını göstermektedir, %100 TK katkıli harçlarda gözlenen çiçeklenme hasarı bunun kanıtıdır. k1 kür ortamında ki harçlarda oluşan ağırlık kaybındaki azalma, mekanik özelliklerle benzerlik göstermektedir. k3 kürü etkisindeki harçların DTA eğrisinde 713.6 °C'den itibaren karbonatların ayrışması görülmekte, bunu DTG eğrisinde 800 °C'de oluşan ekzotermik pikte doğrulamaktadır. TG eğrisinde %25.6 oranında ağırlık kaybı gerçekleşmiştir.

%50 oranında SS ve %0 TK kullanılarak üretilen geopolimer harçların DTA-TG/DTG eğrileri Şekil 11'de verilmiştir. k1'in DTA eğrisinde yer alan pikler de harçlarda  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'in oluşmadığı gözlenmiş, geopolimer harçlarda fiziki ve kimyasal bağlı suyun dehidratasyonu belirlenememiş, %33.3 ağırlık kaybı gerçekleşmiştir. DTG ve DTA eğrileri dikkate alındığında 800 °C'de yer alan pikler karbonatların varlığını göstermektedir. DTA eğrisinde k3 ortamındaki harçlarda fiziki ve kimyasal bağlı suyun dehidratasyonunun gerçekleşmediği, TG eğrisinde %32.7 ağırlık kaybının oluştuğu belirlenmiştir. DTG eğrisinde %100 TK katkıli harçlarda ki gibi 400 °C'de kuvvetli ekzotermik pikler gözlenmiştir. %0 TK kullanımında da  $\text{CaC}_2\text{O}_4$  (kalsiyum oksalat monohidrate) tespit edilmiştir.





Şekil 11. Farklı kür koşullarında (k1-k3) bekletilen %50 SS ve %0 TK katkıli harçların termal analiz eğrileri

k1 kürü uygulanan harçlarda yaklaşık 100 °C'de kimyasal bağ suyunun dehidratasyonu belirlenmemiştir. Ayrıca harçların DTA eğrilerinde yaklaşık 600 °C'de ayrışmaya uğrayan silanol:alüminol yapıya rastlanılmıştır. Geopolimer harçlarda Si-O-Al yapısının bağlayıcılık özelliğine sahip olduğu literatürde belirtilmiştir [24]. Ancak bu yapının erken yaşlarda oluşmadığı kür işleminin devam etmesi sonucu meydana geldiği belirlenmiştir.

#### 4. SONUÇLAR

- SS ve TK oranındaki artışın, kısa süreli ve düşük kür sıcaklığı şartlarında basınç dayanımını düşürdüğü belirlenmiştir,
- YFC'ü ve TK'nün hidratasyon gelişiminin uzun süreçte geliştiği, kısa süreli kürün hidratasyon için yeterli olmadığı görülmüştür,
- %25 TK katkısının, uzun süreli ve yüksek sıcaklıktaki kür koşullarında iyi bir performans sergilediği gözlenmiştir.
- Test sonuçları YFC'nun tek başına veya TK ile birlikte geopolimer harç üretiminde kullanılabilirliğini göstermektedir.
- %50 TK + %50 YFC'nun, %25 SS'la aktive edilmesiyle üretilecek geopolimer harçlar, endüstriyel atıkların ekolojik, çevresel etkilerinin azaltılmasına ve sürdürülebilirliğe önemli bir katkı sağlayacaktır.
- TK katkıli harçların eğilme dayanımlarının artan taban külü katkı oranına da bağlı olarak kısa süreli ve düşük kür sıcaklığından olumsuz etkilendiği görülmektedir.
- Termal analizler de çimento esaslı harç örneklerinde fiziki su, C-S-H, Ca(OH)<sub>2</sub> ve CO<sub>3</sub>'ün varlığı belirlenmiş, geopolimer harçlarda ise Ca(OH)<sub>2</sub> içeriği tespit edilememiştir.
- %100 TK katkıli harçlarda yetersiz kür etkisi ile, SH'in reaksiyonunu tamamlayamaması sonucu TG analizinde NaCO<sub>3</sub> ayrışması belirlenmiştir.

- Taban külü gibi karbon içeriği yüksek mineral katkıların kullanımı kalsiyum oksalat gibi karbon içerikli bileşiklerin oluşmasına neden olmuştur.
- Hızlandırılmış kür uygulamasının geopolimer harçların mekanik dayanımının kısa sürede belirlemede etkili bir yol olduğu görülmektedir. Hızlandırılmış kür yöntemlerinin yanında yapay zeka tekniklerinin de kullanılması geopolimerlerin dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin tahmin edilmesinde daha etkili olacaktır.

## 5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma Kastamonu Üniversitesi KÜBAP-01/2013-13 numaralı BAP projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Yazarlar, destekleri dolayısıyla Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetimi Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederler.

## KAYNAKLAR

- [1] Aİtcin, P.C. Cements of yesterday and today: Concrete of tomorrow. *Cem. Concr. Res.* 2000, 30, 1349–1359.
- [2] Flatt, R.; Roussel, R.; Cheeseman, C.R. Concrete: An eco-material that needs to be improved. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2012, 32, 2787–2798.
- [3] Juenger, M.C.G.; Winnerfeld, F.; Provis, J.L.; Ideker, J.H. Advances in alternative cementitious binders. *Cem. Concr. Res.* 2011, 41, 1232–1243.
- [4] Castaldelli N.V., Akasaki J.L., Melges J.L.P., Tashima M.M., Soriano L., Borrachero M.V., Monzó J., Payá J., Use of Slag/Sugar Cane Bagasse Ash (SCBA) Blends in the Production of Alkali-Activated Materials, *Materials* 2013, 6, 3108-3127
- [5] Pacheco-Torgal, F.; Castro-Gomes, J.; Jalali, S. Alkali-activated binders: A review: Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. *Constr. Build. Mater.* 2008, 22, 1305–1314.
- [6] Hao H., Lin K.L., Wang D.Y, Chao S.J., Shiu H.S., Cheng T.W., Hwang C.L. Elucidating Characteristics of Geopolymer With Solar Panel Waste Glass, *Environmental Engineering and Management Journal* 14 (2015), 1, 79-87
- [7] Davidovits J., (1991), Geopolymers: Inorganic polymeric new materials, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 37, 1633-1656.
- [8] Khale D., Chaudhary R., (2007), Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review, *Journal of Materials Science*, 42, 729– 746.
- [9] Geopolymer Institute » Portland Cement Chemistry vs. Geopolymer Chemistry. <http://www.geopolymer.org/science/portland-cement-chemistry-vs-geopolymer-chemistry>, 09.01.2014.
- [10] Heikal M., Nassar M.Y., El-Sayed G., İbrahim S.M., Physico-chemical, mechanical, microstructure and durability characteristics of alkali activated Egyptian slag, *Construction and Building Materials* 69 (2014) 60–72
- [11] García-Lodeiro, A. Palomo, A. Fernández-Jiménez, D.E. Macphee, Compatibility studies between N-A-S-H and C-A-S-H gels. Study in the ternary diagram Na<sub>2</sub>O–CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O, *Cement and Concrete Research* 41 (2011) 923–931
- [12] Yardımcı M.Y., Aydın S., Tuyan., Alkalilerle Aktive Edilmiş Harçların Düşük Hızlı Darbe Yükleme Altında Eğilme Performanslarının İncelenmesi, *Beton* 2015, (283-292).
- [13] Aydın S., Yardımcı M.Y. Alkalilerle Aktive Edilmiş Harçların Aşınma Dayanıklılığının İncelenmesi *Beton* 2015, (293-302).

- [14] Fernández-Jiménez A, Palomo JG, Puertas F. Alkali-activated slag mortars: mechanical strength behavior. *Cem Concr Res* 1999;29:1313–21.
- [15] Wang SD, Scrivener KL, Pratt PL. Factors affecting the strength of alkaliactivated slag. *Cem Concr Res* 1994;24(6):1033–43.
- [16] Criado M, Fernández-Jiménez A, De la Torre AG, Aranda MAG, Palomo A. An XRD study of the effect of the SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O ratio on the alkali activation of fly ash. *Cem Concr Res* 2007;37:671–9.
- [17] Bakharev T. Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions. *Cem Concr Res* 2005;35:1233–46.
- [18] Bakharev T, Sanjayan JG, Cheng YB. Resistance of alkali-activated slag concrete to acid attack. *Cem Concr Res* 2003;33:1607–11.
- [19] Fernández-Jiménez A, García-Lodeiro I, Palomo A. Durable characteristics of alkali activated fly ashes. *J Mater Sci* 2007;42:3055–65.
- [20] Kong DLY, Sanjayan JG. Damage behavior of geopolymer composites exposed to elevated temperatures. *Cem Concr Compos* 2008;30:986–91.
- [21] Hai YZ, Venkatesh Kodur, Shu LQ, Liang C, Bo W. Development of metakaolinfly ash based geopolymers for fire resistance applications. *Constr Build Mater* 2014;55:38–45.
- [22] Weil M, Dombrowski K, Buchawald A. Life-cycle analysis of geopolymers. *Geopolymers, structure, processing, properties and applications*. Abington Hall: Woodhead Publishing Limited; 2009. p. 194–210.
- [23] Škvára F, Kopecký L, Šmilauer V, Bittnar Z. Material and structural characterization of alkali activated low-calcium brown coal fly ash. *J Hazard Mater* 2009;168(2):711–20.
- [24] Lemouagna PN, MacKenzie KJD, Melo UFC. Synthesis and thermal properties of inorganic polymers (geopolymers) for structural and refractory applications from volcanic ash. *Ceram Int* 2011;37(8):3011–8.
- [25] Recommendation RD. DE LA RILEM PDR. 129-MHT: test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures. *Mater Struct* 1995;28:410–4.
- [26] D. Joziã, J. Zeliã, *The effect of fly ash on cement hydration in aqueous suspensions*, *Ceramics – Silikáty* 50 (2) 98-105 (2006) 99
- [27] Ramachandran VS, Paroli RM, Beaudoin JJ, Degado AH. *Handbook of thermoanalysis of construction materials*. Noyes: William Andrew Publishing; 2002.
- [28] Tashima MM, Akasaki JL, Castaldelli VN, Soriano L, Monzo J, Paya J. New geopolymeric binder based on fluid catalytic cracking catalyst residue (FCC). *Mater Lett* 2012;80:50–2.
- [29] A. Morandea, M. Thiery, P. Dangla, Investigation of the carbonation mechanism of CH and C-S-H in terms of kinetics, microstructure changes and moisture properties, *HAL aRCHIVES ouvertes*, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00922073> (2014).