

**NaOH İLE AKTİFLEŞTİRİLMİŞ METAKAOLİN KATKILI GEOPOLİMER  
MALZEME ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SAMET GİRĞİN

DANIŞMAN

Yrd. Doç. Dr. GÖKHAN GÖRHAN

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Haziran, 2016

Bu tez çalışması 213M294 numaralı proje ile TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

**AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**NaOH İLE AKTİFLEŞTİRİLMİŞ METAKAOLİN KATKILI**  
**GEOPOLİMER MALZEME ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**SAMET GİRGIN**

**DANIŞMAN**

**Yrd. Doç. Dr. GÖKHAN GÖRHAN**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Haziran, 2016**

## TEZ ONAY SAYFASI

Samet GİRĞİN tarafından hazırlanan “NaOH ile Aktifleştirilmiş Metakaolin Katkılı Geopolimer Malzeme Özelliklerinin Araştırılması” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 24/06/2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Yrd. Doç. Dr. Gökhan GÖRHAN

**Başkan** : Prof. Dr. İsmail DEMİR İmza  
Afyon Kocatepe Ün., Mühendislik Fakültesi,

**Üye** : Yrd. Doç. Dr. Gökhan GÖRHAN İmza  
Afyon Kocatepe Ün., Mühendislik Fakültesi,

**Üye** : Yrd. Doç. Dr. Mehmet Uğur TOPRAK İmza  
Dumlupınar Ün., Mühendislik Fakültesi,

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun

...../...../..... tarih ve

..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....  
Prof. Dr. Hüseyin ENGİNAR

Enstitü Müdürü

## **BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI**

**Afyon Kocatepe Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

**24/06/2016**

**İmza**

**Samet GİRGIN**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### NaOH İLE AKTİFLEŞTİRİLMİŞ METAKAOLİN KATKILI GEOPOLİMER MALZEME ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Samet GİRĞİN

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Yrd. Doç. Dr. Gökhan GÖRHAN

Bu tez çalışmasında, puzolanik malzeme olan endüstriyel atıklardan uçucu kül ve kaolin kilinin kalsine edilmesiyle üretilen metakaolin hammadde olarak kullanılmıştır. Geopolimer üretiminde sodyum silikat ve NaOH gibi alkali aktifleştirciler kullanılmıştır.

Çalışmada kullanılan uçucu kül ve metakolinin kimyasal analizi ve tane boyut analizleri yapılarak malzemelerin özellikleri belirlenmiştir. Çalışmadaki 2,5 x 5 cm'lik örnekler silindir metal kalıplar yardımıyla hidrolik el presinde basınç altında şekillendirilecek olan; uçucu kül, metakaolin ve alkali aktifleştircilerin kullanıldığı geopolimer pastalardır. Örnekler laboratuvar tipi etüvde farklı sıcaklık ve sürelerde kür uygulanmıştır. Geopolimer pasta örneklerinde mekanik özelliklerinden olan basınç dayanım değerleri belirlenmiştir. Tüm örneklerin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla örnekler 24 saat süresince su tankına bırakılmıştır. Ardından ilgili örneklerin; su emme, görünen porozite, birim hacim ağırlık ve görünür yoğunluk değerleri belirlenmiştir. Pasta örneklerinden elde edilen verilere göre, kür süresinin artmasıyla birlikte porozite ve su emme oranlarının azaldığı görülmüştür. Örneklerin yoğunluk değerleri ise kür süresine bağlı olarak artış göstermiştir. En yoğun örneklerin 24 saat kür

edilen geopolimer pastalar olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak geopolimer pastaların basınç dayanım değerleri 8.4 MPa – 28.9 MPa arasında değişkenlik göstermiştir. Bununla birlikte geopolimer pastaların görünen porozite oranları % 26.9 - % 45.5; su emme oranları % 16.7 - % 38.7; birim hacim ağırlıkları  $1150.2 \text{ kg/m}^3$  –  $1612.4 \text{ kg/m}^3$ ; görünür yoğunlukları ise  $2042.0 \text{ kg/m}^3$  –  $2328.6 \text{ kg/m}^3$  arasında değişmiştir.

**2016, xiii + 64 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Uçucu Kül, Metakaolin, Geopolimer, Pasta

## **ABSTRACT**

M.Sc. Thesis

### **THE INVESTIGATION OF PROPERTIES OF METAKAOLIN ADDITIVE GEPOLYMER MATERIAL ACTIVATED WITH NaOH**

Samet GİRĞİN

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Civil Engineering Department

**Advisor:** Asst. Prof. Gökhan GÖRHAN

Metakaolin, produced by the calcination of kaolin clay and fly ash as one the industrial waste, which are pozzolanic materials, was used as raw material in this thesis. Alkaline activators such as sodium silicate and NaOH were used in the geopolymer production.

The properties of the material were determined by carrying out chemical analysis and particle size analysis of the fly ash and metakaolin used in this study. 2.5 x 5 cm samples in the study are geopolymer pastes in which fly ash, metakaolin and alkaline activators were used. These samples will be formed in hydraulic hand press under pressure using cylinder metal molds. The samples were subjected to oven curing in a laboratory-type oven at different temperatures and times. Compressive strength values (one of the mechanical properties) of the geopolymer pastes were determined. The samples were kept in a water tank for 24 hours to determine the physical properties of all samples. Afterwards, water absorption, apparent porosity, bulk density and the apparent density values of the samples in question were determined. The data obtained from the paste samples indicates that porosity and water absorption rates decrease with an increase in curing time. The density values of the samples, on the other hand, increased depending on the curing time. The densest samples were found to be the geopolymer pastes subjected to curing for 24 hours.

In conclusion, the compressive strength values of the geopolymer pastes varied between 8.4 MPa and 28.9 MPa. The apparent porosity values of the geopolymer pastes varied between 26.9% and 45.5%; the water absorption rate between 16.7% and 38.7%; the bulk density values between 1150.2 kg/m<sup>3</sup> and 1612.4 kg/m<sup>3</sup>; the apparent density values between 2042.0 kg/m<sup>3</sup> and 2328.6 kg/m<sup>3</sup>.

**2016, xiii + 64 pages**

**Keywords:** Fly Ash, Metakaolin, Geopolymer, Paste



## TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel alışmaların ynlendirilmesi, sonuların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarında dolayı tez danışmanım Sayın Yrd. Doç Dr. Gökhan GRHAN'a, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen Sayın Yrd. Doç. Dr. Gökhan KÜRKLÜ'ye, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Tezimin gerçekleşmesinde 213M294 numaralı proje ile maddi destek sağlayan TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

Samet GİRGIN

AFYONKARAHİSAR, 2016

# İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR .....	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
RESİMLER DİZİNİ .....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ .....	2
2.1 Uçucu Kül .....	2
2.2 Metakaolin.....	6
2.3 Geopolimer.....	7
3. MATERYAL ve METOT .....	11
3.1 Kullanılan Malzemeler.....	11
3.2 Hammaddelere Uygulanan Analizler .....	11
3.3 Puzolanik Aktivite Deneyleri .....	12
3.4 Geopolimer Pastaların Hazırlanması.....	15
3.5 Fiziksel ve Mekanik Testler .....	20
3.6 SEM Analizleri.....	21
4. BULGULAR .....	22
4.1 Hammadde Analizleri .....	22
4.2 Puzolanik Aktivite Deneyleri .....	27

4.3 Geopolimer Pastaların Fiziksel Özellikleri .....	32
4.4. Geopolimer Pastaların Basınç Dayanım Özellikleri .....	48
4.5. Geopolimer Pastaların SEM Görüntüleri .....	55
5. TARTIŞMA ve SONUÇ .....	57
6. KAYNAKLAR.....	59
ÖZGEÇMİŞ.....	64

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

---

NaOH	Sodyum Hidroksit
$\mu\text{m}$	Mikronmetre
kWh	Kilowattsaat
MW	Megawatt
SiO <sub>2</sub>	Silisyum Dioksit
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Aluminyum Oksit
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Demir Oksit
CaO	Kalsiyum Oksit
Ca(OH) <sub>2</sub>	Kalsiyum Hidroksit
Na <sub>2</sub> O	Sodyum Oksit
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Sodyum Silikat
C <sub>3</sub> A	Trikalsiyum Alüminat

### Kısaltmalar

---

UK	Uçucu Kül
MK	Metakaolin
M	Molarite
SS	Sodyum Silikat

---

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 4.1 UK'nın XRD difraktogramı. ....	22
Şekil 4.2 Kaoline ait XRD difraktogramı.....	23
Şekil 4.3 Kaoline ait DTA-TG analiz grafiği. ....	24
Şekil 4.4 Çimentoya ait XRD difraktogramı.....	25
Şekil 4.5 1000 °C'de kalsine edilen Metakaoline (MK) ait XRD difraktogramı.....	26
Şekil 4.6 Harçların görünen porozite oranları. ....	27
Şekil 4.7 Harçların su emme oranları. ....	28
Şekil 4.8 Harçların birim hacim ağırlık değerleri.....	29
Şekil 4.9 Harçların görünür yoğunluk değerleri.....	30
Şekil 4.10 Harçların eğilme dayanımı değerleri.....	30
Şekil 4.11 Harçların basınç dayanımı değerleri. ....	31
Şekil 4.12 Ağırlıkça % 20 metakaolin içerikli geopolimer pastaların görünen porozite oranları.....	33
Şekil 4.13 Ağırlıkça % 40 metakaolin içerikli geopolimer pastaların görünen porozite oranları.....	34
Şekil 4.14 Ağırlıkça % 60 metakaolin içerikli geopolimer pastaların görünen porozite oranları.....	36
Şekil 4.15 Ağırlıkça % 20 metakaolin içerikli geopolimer pastaların ağırlıkça su emme oranları.....	38
Şekil 4.16 Ağırlıkça % 40 metakaolin içerikli geopolimer pastaların ağırlıkça su emme oranları.....	39

<b>Şekil 4.17</b> Ağırlıkça % 60 metakaolin içerikli geopolimer pastaların ağırlıkça su emme oranları.....	41
<b>Şekil 4.18</b> Ağırlıkça % 20 metakaolin içerikli geopolimer pastaların birim hacim ağırlıkları.....	42
<b>Şekil 4.19</b> Ağırlıkça % 20 metakaolin içerikli geopolimer pastaların görünür yoğunlukları.....	43
<b>Şekil 4.20</b> Ağırlıkça % 40 metakaolin içerikli geopolimer pastaların birim hacim ağırlıkları.....	44
<b>Şekil 4.21</b> Ağırlıkça % 40 metakaolin içerikli geopolimer pastaların görünür yoğunlukları.....	45
<b>Şekil 4.22</b> Ağırlıkça % 60 metakaolin içerikli geopolimer pastaların birim hacim ağırlıkları.....	46
<b>Şekil 4.23</b> Ağırlıkça % 60 metakaolin içerikli geopolimer pastaların görünür yoğunlukları.....	48
<b>Şekil 4.24</b> Ağırlıkça % 20 metakaolin içerikli geopolimer pastaların basınç dayanımları.....	50
<b>Şekil 4.25</b> Ağırlıkça % 40 metakaolin içerikli geopolimer pastaların basınç dayanımları.....	51
<b>Şekil 4.26</b> Ağırlıkça % 60 metakaolin içerikli geopolimer pastaların basınç dayanımları.....	53

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 3.1 Puzolanik aktivite deneylerinde kullanılan malzemeler (gr). .....	14
Çizelge 3.2 Kullanılan alkali aktifleştiriciler ve özellikleri. ....	15
Çizelge 3.3 Pastaların karışım oranları (100 gr katı malzeme için). ....	17
Çizelge 3.4 70 °C'de kür edilecek geopolimer pasta örnekleri. ....	17
Çizelge 3.5 80 °C'de kür edilen geopolimer pasta örnekleri. ....	18
Çizelge 3.6 90 °C'de kür edilecek geopolimer pasta örnekleri. ....	19
Çizelge 4.1 UK'nın XRF kimyasal analiz sonuçları. ....	22
Çizelge 4.2 UK'nın lazer tane boyut analizi sonuçları. ....	23
Çizelge 4.3 Kaolin malzemesine ait XRF kimyasal analiz sonuçları. ....	23
Çizelge 4.4 Kaolin malzemesine ait lazer tane boyut analizi sonuçları. ....	24
Çizelge 4.5 Çimento malzemesine ait XRF kimyasal analiz sonuçları. ....	25
Çizelge 4.6 Çimento malzemesine ait lazer tane boyut analizi sonuçları. ....	25
Çizelge 4.7 MK (Metakaolin) malzemesine ait XRF kimyasal analiz sonuçları. ....	26
Çizelge 4.8 Metakaolin (MK) malzemesine ait lazer tane boyut analizi sonuçları. ....	27

## RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
<b>Resim 3.1</b> Rigaku ZSX Primus. ....	12
<b>Resim 3.2</b> Malvern Mastersizer 2000. ....	12
<b>Resim 3.3</b> Bruker D 8 Advance. ....	12
<b>Resim 3.4</b> Hobart mikser. ....	13
<b>Resim 3.5</b> Kaolin kilinin şekillendirilmesi. ....	13
<b>Resim 3.6</b> Metakaoline dönüştürülmek için hazırlanan kaolin kili örnekleri. ....	13
<b>Resim 3.7</b> Metakaoline dönüştürülecek örneklerin fırına yerleştirilmesi. ....	13
<b>Resim 3.8</b> Puzolanik aktivite deneyleri için dökülen harç örnekleri. ....	14
<b>Resim 3.9</b> Soğumaya bırakılan çözeltiler.....	16
<b>Resim 3.10</b> Şekillendirilen geopolimer pasta.....	16
<b>Resim 3.11</b> Saf su cihazı. ....	20
<b>Resim 3.12</b> Çimento mikseri.....	20
<b>Resim 3.13</b> Laboratuvar tipi etüv.....	20
<b>Resim 3.14</b> Geopolimer pastalar. ....	20
<b>Resim 3.15</b> Eğilme dayanım testi.....	21
<b>Resim 3.16</b> Basınç dayanım testi. ....	21
<b>Resim 4.1</b> Geopolimer pastalardan P055 örneğine ait SEM resimleri.....	55
<b>Resim 4.2</b> Geopolimer pastalardan P058 örneğine ait SEM resimleri.....	55
<b>Resim 4.3</b> Geopolimer pastalardan P064 örneğine ait SEM resimleri.....	56
<b>Resim 4.4</b> Geopolimer pastalardan P067 örneğine ait SEM resimleri.....	56



**Resim 4.5** Geopolimer pastalardan P023 örneğine ait SEM resimleri..... 56

## 1. GİRİŞ

Uçucu kül, öğütülmüş kömürün yanması sonucu oluşan mikron boyutundaki taneciklerin termik santral bacalarındaki filtreler tarafından tutulup silolarda depolanması sonucu elde edilen endüstriyel bir atıktır. Yaygın olarak F ve C sınıfı olarak sınıflandırılırlar. F tipi uçucu küller alkali aktifleştiricilerle tepkimeye girdiğinde geopolimer adı verilen polimer bir yapı malzemesi elde edilir.

Bu çalışmada uçucu kül ve metakaolin gibi puzolanik karakteristiklere sahip olan malzemeler ile alkali aktifleştiriciler kullanılarak geopolimer pasta elde edilmesi amaçlanmıştır. Geopolimer malzeme sentezlemesinde örneklere uygulanan kür işlemleri nihai dayanımlar üzerinde etkili olmaktadır. Bu nedenle örneklere termal kür olarak etüv kürü yöntemi uygulanmıştır.

Bu tez çalışmasında; uçucu kül ve metakaolin içerikli geopolimer pastalardan optimum malzeme özelliklerinin kazanabilmesi adına çalışmalar yürütülmüştür.

Tez çalışmasının ikinci bölümünde, uçucu kül, metakaolin ve geopolimer hakkında detaylı bilgiler verilmiştir.

Tezin üçüncü bölümünde, geopolimer pasta üretimde kullanılan malzemeler hakkında bilgiler sunulmuş ve örneklerin üretim şekilleri ile uygulanan deneyler hakkında bilgiler verilmiştir.

Tezin dördüncü bölümünde, malzemelerden elde edilen bulgular üzerinde yorumlar yapılarak elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Beşinci bölümde ise elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

## 2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

### 2.1 Uçucu Kül

Uçucu kül (UK), kömürle çalışan termik elektrik santrallerinde ortaya çıkan bir atık ürünüdür. Küllerin parçacıkları küresel olup çapları 1-300 µm mertebesindedir. Çevreyi olumsuz olarak etkileyecekleri için, uçucu küllerin santral bacasından çıkarak havaya karışmaları önlenir. Bu amaçla, küller mekanik ve elektrostatik yöntemle toplanarak santral çevresinde veya başka uygun yerlerde depolanır. Zamanla biriken küller geniş alanları kapsamaya başlar ve santral idaresi için bir problem olur (Pelin *et al.*2009).

Termik santralin 1 kWh'lik enerji üretiminde yaklaşık 110 g kül atık madde olarak açığa çıkmaktadır. 1000 MW'lık bir santralden yılda yaklaşık 650.000 ton uçucu kül ve taban külü elde edilmektedir. Dolayısıyla bu küllerin santrallerden uzaklaştırılması ve depolanması çevre kirliliğinin yanı sıra işletme, enerji üretim kaybı vb. konularda parasal ve teknik sorunlar yaratabilmektedir (Yazıcı 2004).

Her endüstriyel atık gibi uçucu külden de yararlanma olasılıkları araştırılmıştır. Bunların başında çimento ve betonda katkı maddesi olarak kullanılması gelir. UK'lar beton teknolojisinde ya çimento ile birlikte doğrudan betona katılarak, ya da betonda kum yerine kullanılabilirler. Çimento üretimi sırasında klinkere katılıp öğütülerek uçucu küllü çimento olarak da değerlendirilebilirler. Kum yerine kullanıldığında özgül yüzey artarsa da kumdan az da olsa tasarruf sağlanır. Genellikle silisi ve alüminli olan bileşimi dolayısıyla puzolanik özellik göstererek çimento ve betonda katkı maddesi olarak yararlı olur. UK'lar daha büyük özgül yüzey ve inceliğe sahip olduklarından bağlayıcı hacminin artmasını ve çimentodan ekonomi yapılmasını sağlarlar. İnce ve küresel taneleri dolayısı ile taze betonda işlenebilmeyi artırır; ayrıca hidrasyon ısısını azaltır. Çimento hidrasyonu sonucu oluşan kireçle reaksiyona girerek ilave bağlayıcı jel oluşturur, çimento hamurundaki boşlukları doldurur ve betona dayanıklılık kazandırır (Pelin *et al.*2009).

Çeşitli ülkelerde uçucu küllerin önemli miktarlarda kullanılmaya başlaması baraj inşaatları sırasında ve betonda hidratasyon ısısını düşürmek amacı ile olmuştur. Örneğin; A.B.D.'de ilk kullanım 1940'lı yıllarda önce Hoover daha sonra Hungry Horse barajlarındadır. Ülkemizde ise 1960'lı yıllarda Gökçekaya ve Porsuk baraj inşaatlarında uçucu kül kullanılmasına karar verilmiştir. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'nün baraj uygulamaları dışında Karayolları Genel Müdürlüğü bazı köprü ve yol inşaatlarında deneme amacı ile uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu küllü çimento hemen hiç üretilmiştir. Katkılı çimentolarda ise kısıtlı miktarlarda kül kullanılmıştır. Geçen süre içinde ülkede uçucu kül kullanımı bu tür uygulamalarla sınırlı kalmış, kullanılan uçucu kül miktarları yılda elde edilenin %1'ine bile ulaşamamıştır. Ancak son yıllarda, özellikle hazır beton endüstrisinin gelişmesi ve Avrupa'dan uyarlanan yeni çimento ve beton standartları çimento ve beton endüstrilerinde uçucu küle olan ilgiyi arttırmış bulunmaktadır (Pelin *et al.*2009).

Uçucu küllerin sınıflandırılmasında, kimyasal bileşen yüzdesine göre esas olarak ASTM C 618 (2000) ve TS EN 197-1 (2002) standartları baz alınmaktadır.

ASTM C 618(2000) standardına göre uçucu küller F ve C sınıfı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. F sınıfına, bitümlü kömürden üretilen ve toplam  $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$  yüzdesi %70'den fazla olan uçucu küller girmektedir. Aynı zamanda bu küllerde CaO yüzdesi %10'un altında olduğu için düşük kireçli olarak da adlandırılırlar. F sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğe sahiptirler.

C sınıfı uçucu küller ise, linyit veya yarı-bitümlü kömürden üretilen ve toplam  $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$  miktarı % 50'den fazla olan küllerdir. Aynı zamanda, C sınıfı uçucu küllerde CaO > %10 olduğu için bu küller yüksek kireçli uçucu kül olarak da adlandırılırlar. C sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğin yanı sıra bağlayıcı özelliğe de sahiptirler. (ASTM C 618 2000).

TS EN 197-1 (2002)'e göre yapılan sınıflandırmada uçucu küller silissi (V) ve kalkersi (W) olmak üzere iki gruba ayrılırlar. V sınıfı uçucu küller, çoğunluğu puzolanik özelliklere sahip küresel taneciklerden meydana gelen ince bir toz olup; esas olarak

reaktif silisyum dioksit ( $\text{SiO}_2$ ) ve alüminyum oksitten ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) oluşan; geri kalanı demir oksit ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç ( $\text{CaO}$ ) oranının % 10'dan az, reaktif silis miktarının % 25'den fazla olması gerekmektedir. W sınıfı küller ise, hidrolik ve/veya puzolanik özellikleri olan ince bir toz olup; esas olarak reaktif kireç ( $\text{CaO}$ ), reaktif  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 'den oluşan; geri kalanı demir oksit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç ( $\text{CaO}$ ) oranının % 10'dan fazla, reaktif silis miktarının da % 25'den fazla olması gerekmektedir (TS EN 197-1 2002)

Uçucu kül, koyu gri renkte, çok ufak taneli bir malzemedir. Renginin koyuluğu açıklığı, elde edildiği kömüre ve yanış özelliğine bağlıdır. Yanmanın tam olmadığı durumda oluşan uçucu küle siyah renk veren içindeki yanmamış karbondur. İyi yanma sonucu oluşan uçucu kül değerine göre daha açık renktedir.

Uçucu külün inceliği öncelikle kazana verilen kömürün öğütülme derecesine bağlıdır. İnceliğe etki eden diğer bir faktör ise küllerin mümkün olabildiğince bacadan kaçmasına mani olunarak tutulmasıdır. Bacadan kaçan kısım azaldıkça incelik artar (Güler *et al.* 2005).

Uçucu kül, kireç ve suyun bir arada bulunduğu durumda reaktiftir. Bu reaktivlik büyük oranda uçucu külün camsı yapısına dayanmaktadır. Uçucu kül içerisindeki camsı (amorf) yapının % 50-90 arasında olduğu belirtilmektedir (Xu 1997).

İnceliğinden ve amorf yapıya sahip mineralojisinden dolayı uçucu kül puzolanik bir malzeme olup aynen ince taneli doğal puzolanlar gibi, puzolanik özellik göstermektedirler; kalsiyum hidroksitle sulu ortamda birleştiklerinde, hidrolik bağlayıcılığa sahip olmaktadırlar. O nedenle, hem portland-puzolan tipi çimento üretiminde, hem de beton katkı maddesi olarak doğrudan kullanılmaktadırlar. Genellikle, beton katkı maddesi olarak çok büyük miktarlarda kullanılabilirler. Beton karışımının içerisinde yer alan uçucu kül miktarı, çimento ağırlığının % 15 - % 50'si civarında değişebilmektedir (Gikunoo 2004).

Özgül ağırlıkları  $1,9-2,4 \text{ gr/cm}^3$  arasında değişen uçucu küllerin gevşek birim hacim

ağırlıkları  $800 \text{ kg/m}^3$  dolaylarındadır. İri tanelerin boşluklu yapılarından dolayı ince tanelerden oluşmuş küllerin yoğunluğu daha fazla olmaktadır. Yoğunluk değerlerinde büyük farklar varsa karışım hesaplarında bu yoğunluk farkının göz önünde bulundurulması gerekir. Yüksek demir içerikli uçucu küllerin yoğunluğu fazla, yüksek alümin, silika ve karbon içerikli küllerin yoğunluğu ise daha düşüktür (Yazıcı 2004).

Termik santral fırınında, uçucu külün kalma süresinin, uçucu külün vitrifikasyon derecesinde ve alkali içeriğinde değişikliklere sebep olduğu belirtilmektedir. Kuzey Amerika da üretilen yüksek ve düşük kireçli küllerin kimyasal kompozisyonları incelendiğinde düşük kireçli kül ile yüksek kireçli küller karşılaştırıldığında benzer alümina içeriğine sahip oldukları bunun yanında düşük kireçli uçucu küllerin çok daha az bir oranda demir oksit içerdiği belirlenmiştir (Xu 1997).

Düşük kireçli uçucu küllerdeki ana aktif bileşen silika ve alüminadan oluşan amorf veya camsı fazdır. Bu tür uçucu küller rutubetli ortamda kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek bağlayıcı özelliklere sahip bileşenler meydana getirirler. Diğer bir deyişle, düşük kireçli uçucu küller puzolanik özelliğe sahiptirler. Yüksek kireçli uçucu küller ise puzolanik özellik gösterirken, içerdikleri serbest kireç, anhidrit,  $C_3A$ , amorf silika ve amorf alümina v.b nedeniyle de kendi başlarına bir miktar bağlayıcı özelliğe sahip olabilirler (Çelik 2004)

Uçucu küllerin çoğu, özellikle F sınıfı uçucu küller, oksijen ile bağ oluşturan tetrahedral silikatlarla yüksek derecede polimerizasyon oluşturmaya rağmen oda sıcaklığında aktiviteleri çok yavaştır. Daha ince uçucu kül ve daha az karbon içeriği puzolanik aktiviteyi arttırmaktadır. Aynı işlenebilirliğe sahip betonda dayanıma daha büyük katkı yaptığı bununla birlikte oda sıcaklığındaki puzolanik reaksiyon oranının çok az olduğu ve kimyasal reaksiyonun  $40-50 \text{ }^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta puzolanik reaksiyonu başarıyla gerçekleştirdiği belirtilmektedir (Karlhans 1990).

Uçucu kül içeren betonların erken yaştaki dayanımlarını arttırmak için  $\text{Ca(OH)}_2$  ve uçucu kül arasında puzolanik reaksiyonu hızlandırmak için farklı metotların kullanıldığı belirtilmekte ve uçucu külün inceliği arttıkça puzolanik aktivitenin de artacağı

belirtilmiştir. Ayrıca uçucu küllü betonların erken dayanımlarını arttırmak için de kür sıcaklığının artırılmasının faydalı olacağı belirtilmiştir. Doğal puzolanların puzolanik reaksiyonlarını arttırmada kimyasal aktivatörlerin etkili bir biçimde reaksiyonu hızlandırdığı belirtilmiştir (Poon *et al.* 1999).

## 2.2 Metakaolin

Günümüzde, oldukça yaygınlaşan yüksek performanslı beton üretiminde puzolanik malzemeler sıklıkla kullanılmaktadır. Beton üretiminde kullanılan puzolanların çoğu endüstriyel atık malzemeler veya yan ürünlerdir. Metakaolin (MK) ise, bu amaç için üretilen puzolanik bir malzemedir. Metakaolin ilk olarak çimento harcında puzolan amaçlı 1962 yılında Brezilya'daki Jupia Barajı için hazırlanan betonda kullanılmıştır.

Kaolin kilinin kalsine edilmesiyle üretilen MK, beyaz renkli, amorf yapılı bir alumina silikattır. Kaolin minerali, ısıtıldığında 200°C'nin altında higroskopik suyunu bırakır. 500-600°C'de kimyasal formüldeki bağlı suyunu bırakarak metakaolinite dönüşür. Bu oluşan madde metakaolinin temel ögesini oluşturur. Kaolin kili aşırı miktarda sıcaklığa maruz kalırsa (900 °C üstünde) mullit fazı oluşur ve reaktif özelliğini kaybeder. Başarılı bir ısıl işlem uygulanması halinde yüksek oranda puzolanik özelliğe sahip amorf fazlı metakaolin elde edilir (MÖİK 1995).

Metakaolin, hidrat oluşturulması amacıyla kalsiyum hidroksit ile birleştirilebilir. Bu da harç ve betonun özelliklerinin iyileşmesine katkıda bulunur. Metakaolinin reaksiyon kapasitesi, temel olarak mineral içeriğine, ham kaolin kaynağına ve üretim şartlarına bağlıdır (Vu 2002).

Metakaolin kalsiyum hidroksiti çok hızlı bir şekilde tüketir ve 1980'li yıllarda yapılan pek çok çalışmada lif katkılı kompozitlerde çimento matrisine eklenmesinin cam lifleri koruduğunu ortaya koymuştur. 1990'lı yıllarda metakaolinin betonda kullanımı yaygınlaşmış ve sülfat direncinin iyileştirilmesi, Alkali Silika Reaksiyonu genleşmesinin azaltılması, çiçeklenmenin yok edilmesi gibi bir dizi beton özelliğinin iyileştirilmesinde etkin olduğu kaydedilmiştir.

Harç ve betonda puzolanik katkı olarak metakaolin kullanımı son yıllarda önemli ölçüde araştırılan bir konu haline gelmiştir. Metakaolin, kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girebilecek aktif formda silika ve alümina içerir. Betonda ve harçta kil bazlı puzolanlar kullanmanın temel sebebi, malzemenin kolay ulaşılabilir olması ve durabiliteyi olumlu yönde etkilemesidir. Ayrıca, kalsine sıcaklığına ve kil tipine bağlı olarak kürün erken yaşlarında yüksek dayanımlar elde etmek de mümkündür. Erken yaşta kazanılan yüksek dayanım metakaolinin filler etkisinden ve çimentonun hidratasyonunu hızlandırmasından kaynaklanmaktadır. Bu etkiler daha sonra, metakaolin ve kalsiyum hidroksit arasındaki puzolanik reaksiyon sonucu güçlenir. Puzolanik malzemelerin kullanımının yararları sadece yakın zamanda yapılmış binalarda değil, bugün hala ayakta durabilen M.Ö. 127 yılında inşa edilmiş olan Roma' daki Pantheon binasında da görülebilmektedir (Melek 2010).

Kimyasal olarak metakaolin mineralinin temel bileşenleri  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 'tir. Bununla birlikte yapısında az miktarlarda  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  ve  $\text{K}_2\text{O}$  bileşenleri de bulunabilir. Metakaolin mineralinin mineral katkı olarak çimento ve beton içerisinde kullanılması ile çimento ve betona sağlayacağı faydalar daha çok  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  içeriğine bağlıdır. Ticari amaçla kullanılan metakaolin  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  (metakaolinit) ve amorf veya az kristalli formdaki  $\text{SiO}_2$  gibi aktif bileşikler içermektedir. Ancak, kaolin ve kaolinit killerinin suyunu tamamen kaybetmiş halleri tartışma konusu olmuştur. Daha önceleri, metakaolin mineralinin amorf alüminyum ve silika oksitlerinin karışımından meydana geldiği belirtilmiştir. Daha sonraları ise metakaolin mineralinin, kaolinitin bazı bünyesel özelliklerini açığa vurduğu kanıtlanmıştır. Araştırmacıların çoğunluğu, metakaolin mineralinin amorf ve az kristalli formdaki metakaolinitten oluştuğu göstermektedir. (Seyhan 1971).

### **2.3 Geopolimer**

Son yıllarda çimento karakteristiğine sahip malzemelerin başka bir formu geopolimer adıyla gelişmektedir (Rattanasak and Chindaprasirt 2009). Polimerizasyon sürecinde malzemede bulunan silika ve alüminanın belli bir miktarının çözülmesi ile hammadde partiküllerinin yüzey hidrolizini yükseltmek için güçlü bir alkali ortam gereklidir. Bu



ortam ise aktivatör olarak adlandırılan tek yada kombine alkali çözeltilerle elde edilebilmektedir (De Vargas *et al.* 2011). Si ve Al oksitlerinin çözülmesinde alkali aktifleştirici çözeltiler önemli rol oynamaktadır. Bu sebeple geopolimerler, en yaygın alkali aktifleştiricilerden; sodyum hidroksit (NaOH), potasyum hidroksit (KOH), potasyum silikat yâda sodyum silikat gibi güçlü alkali çözeltiler ile alüminosilikat reaktif malzemelerin karıştırılmasıyla sentezlenmektedir (Palomo *et al.* 1999). Genellikle geopolimerizasyon olarak adlandırılan alkali aktivasyon, iyi yoğunlaştırılmış ve çimento özellikli kompozitlerde camsı yapıları değiştiren kimyasal bir proses olarak tanımlanmaktadır (De Vargas *et al.* 2011).

Geopolimerlerin basınç dayanımlarına aktivatör konsantrasyonu önemli etki yapmaktadır. İdeal aktivatör konsantrasyonu geopolimerin dayanımında artış gerçekleştirmektedir. Bu ideal konsantrasyonun ötesinde malzemenin geopolimer yapısını değiştirebilecek alkali aktifleştirilmiş matris de bulunan serbest OH<sup>-</sup> iyonlarından dolayı malzemenin mekanik özelliklerinde kayıplar da oluşabilmektedir. Geopolimerlerin yaşı ve kür sıcaklığı da örneklerin basınç dayanımında etkili olan diğer değişkenlerdir. Bununla birlikte bu değişkenlerin etkili olabilmesi için geopolimerizasyon süresinde ortamda yeterli aktivatör konsantrasyonu bulunmalıdır (De Vargas *et al.* 2011).

Geopolimerler genellikle düşük sıcaklıklarda aktifleştirilmiş uçucu kül ile oluşturulmaktadır. Uçucu kül termik santrallerden elde edilen ve beton yapımında çimento yerine kullanılabilen puzolanik özelliklere sahip endüstriyel atıktır. Uçucu kül bünyesinde bulunan SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, portland çimentosunun hidrasyonu sonucu ortaya çıkan kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek puzolanik reaksiyonu başlatmaktadır. Bu sebeple portland çimentosu yerine uçucu kül kullanılabilir (Rattanasak and Chindapasirt 2009).

Uçucu kül bünyesinde yüksek oranda amorf silika ve alümina bulunmakta ve bunları çözmek için de genellikle alkali çözeltilerle karıştırılmaktadır. Uçucu kül, alkali çözeltilerle kontak kurduğunda silikatlar çözülmeye başlamaktadır. Geopolimerizasyon ise esasen alümino-silika zincirine dayandığı için uçucu küllerin geopolimer üretiminde

kaynak malzeme olarak kullanılması uygundur. Bununla birlikte alkali çözeltinin konsantrasyonu ve tipi, uçucu külün çözülmesinde önemli bir rol oynar. Alkali çözeltiler arasında sodyum hidroksit çözeltisinde  $Al^{3+}$  ve  $Si^{4+}$  iyonlarının çözülmesi, potasyum hidroksit çözeltisine göre daha yüksektir (Rattanasak and Chindapasirt 2009). Bundan dolayı NaOH, geopolimerin yapısına ve basınç dayanımına önemli bir etki yapar (Panias *et al.* 2007). Uçucu kül, NaOH ile temas ettiğinde Si, Al ve diğer minör iyonlar çözülmeye başlar. Çözülme miktarının NaOH konsantrasyonuna ve çözülme süresine bağlı olduğu belirtilmiştir (Rattanasak and Chindapasirt 2009).

NaOH çözeltisinin konsantrasyonu malzemenin dayanım değerlerini etkilemektedir. Bu aşamada kür sıcaklığı ve yaşın önemli bir etkisi yoktur (De Vargas *et al.* 2011, Hu *et al.* 2009, Bakharev 2005). Hazırlanan karışım oda sıcaklığında yada belirli bir sıcaklıkta kür işlemine tabi tutulabilir. Güçlü alkali çözeltilerde alüminosilikat reaktif malzemeler çözünür ve serbest  $SiO_4$  ve  $AlO_4$  tetrahedral yapısı oluşur. Bununla birlikte, geopolimer yapımında uçucu külün ortam sıcaklığında reaksiyonu düşüktür (Somna *et al.* 2011), bu nedenle 40 – 95 °C arasındaki belirli sıcaklıklarda malzemenin yüksek basınç dayanımına sahip olabileceği geopolimerizasyon süreci gelişebilmektedir (Swanepoel and Strydom 2002, Panias *et al.* 2007, Bakharev 2005 Chindapasirt *et al.* 2007). Uçucu kül geopolimerlerinin mikro yapısı, alüminosilikat jel, reaksiyona girmemiş uçucu kül ve diğer kristal fazları içerir (Lecomte *et al.* 2006). Yüksek dayanımlı geopolimerlerin yapımında F sınıfı (Schmucker and Mac Kenzie 2004) ve yüksek kalsiyumlu uçucu küllerin kullanılabileceği de belirtilmektedir (Chindapasirt *et al.* 2007).

Geopolimerik sistemin sulu fazında NaOH konsantrasyonu nihai yapıda katı partiküllerin bağlanmasında olduğu gibi çözünme prosesini de etkilemektedir (Panias *et al.* 2007). Uçucu külün 10 molaritelik (M) NaOH ile 10 dakika süreyle karıştırılmasının geopolimer sentezi için uygun olduğu belirtilmiştir (Rattanasak and Chindapasirt 2009).

Daha önce yapılan çalışmalara göre, geopolimer üretiminde F sınıfı uçucu külün iyi bir kaynak olduğu ve uçucu külün aktifleştirilmesinde NaOH'in daha etlen bir aktivatör

olduğu belirtilmiştir. Hatta yapılan bir çalışmada sodyum silikat solüsyonu ile NaOH'in bir arada kullanılması ile daha yüksek basınç dayanımı elde edilebileceği (Fernandez-Jimenez *et al.* 1999), bunun sebebi olarak da cam suyunun geopolimerizasyon sürecinde daha fazla Si'li reaksiyon ürünlerini arttıracakđı ve akabinde daha fazla mekanik dayanım kazandırması gösterilmektedir (Criado *et al.* 2005). Yapılan bazı çalışmalarda da cam suyunun alkali aktivatörle kullanılması durumunda basınç ve eğilme dayanımlarının arttığı (Pacheco-Torgal *et al.* 2008) sadece NaOH yerine, cam suyu ile NaOH'in bir arada kullanılması durumunda ise örneklerin sadece bir gün sonunda bile önemli dayanım kazandıkları belirtilmektedir (Fernandez-Jimenez and Palomo 2005, Fernandez-Jimenez and Palomo 2003). Bununla birlikte, toz halde bulunan cam suyu, likit haldeki cam suyuna göre daha düşük bir performansa sahiptir (Pacheco-Torgal *et al.* 2008).

Literatürdeki bazı çalışmalarda farklı kür süreleri ve sıcaklıkları ile NaOH konsantrasyonu kombinasyonları denenmiştir. Bu alışmalar arasında; uçucu kül ve taban külünün kullanıldığı geopolimerler (Li *et al.* 2012) ile uçucu kül, kaolinit, sodyum silikat solüsyonu ve NaOH ile sentezlenen geopolimerler (Swanepoel and Strydom 2002) bulunmaktadır. Ayrıca F sınıfı uçucu kül, metakaolin ve hafif agregaların NaOH ve sodyum silikat solüsyonu ile sentezlendiği hafif inorganik polimerler (Wu and Sun 2007), uçucu kül ile sodyum silikat solüsyonu kullanılarak üretilen geopolimerler (Provis *et al.* 2009), ve 7 günlük uçucu kül bazlı geopolimerlerin sentezlendiği çalışmalar da literatürde yer almaktadır (Van Jaarsveld *et al.* 2003).

### **3. MATERYAL ve METOT**

#### **3.1 Kullanılan Malzemeler**

Bu çalışmada geopolimer malzeme üretiminde iki hammadde kullanılmıştır. Bu hammaddeler uçucu kül (UK) ve metakaolindir (MK). Çalışmada kullanılan uçucu kül Kütahya Seyit Ömer Termik santraline ait olup, Kütahya'da bulunan bir hazır beton santralinden temin edilmiştir. Geopolimer malzeme üretiminde kullanılan diğer bir malzeme ise metakaolindir. Metakolin, Kale Maden A.Ş.'den temin edilen kaolin kilinin belirli sıcaklıklarla kalsine edilmesi sonucu elde edilen malzemedir.

Metakolinin sinterleme sıcaklığını belirlemek için puzolanik aktivite deneylerinde farklı oranlarda harçlar üretilmiştir. Harçlarda bağlayıcı malzeme olarak Afyon çimento fabrikası tarafından üretilen CEM I 42.5 R tipi çimento kullanılmıştır. Dolgu malzemesi olarak da Limak Çimento fabrikası tarafından üretilen standart kum (silis kumu) kullanılmıştır.

Geopolimer pastaların hazırlanmasında kullanılan UK ve MK malzemeleri, NaOH ve Sodyum silikat solüsyonu ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) - (SS) ile aktifleştirilmiştir.

#### **3.2 Hammaddelere Uygulanan Analizler**

Çalışmada kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimlerinin belirlenmesi amacıyla XRF analizleri Rigaku ZSX Primus cihazı (Resim 3.1) ile yapılmıştır. Tane boyutunun belirlenmesi amacıyla da lazer tane boyutu analizi Malvern Mastersizer 2000 cihazı (Resim 3.2) ile yapılmıştır.

Malzemelerin iç yapısında bulunan fazların belirlenmesi amacıyla XRD analizleri Bruker marka D8 Advance cihazı (Resim 3.3) ile yapılmıştır. Kaolin kilinin termal davranışlarının belirlenmesi için ise DTA-TG analizleri yapılmıştır.

Tezde kullanılan hammaddelerin özgül ağırlığı, A.K.Ü., Müh. Fak., İnş. Müh. Böl., Yapı Laboratuvarında bulunan cihazlar yardımıyla belirlenmiştir.



**Resim 3.1** Rigaku ZSX Primus.



**Resim 3.2** Malvern Mastersizer 2000.



**Resim 3.3** Bruker D 8 Advance.

### 3.3 Puzolanik Aktivite Deneyleri

Geopolimer malzeme üretiminde kullanılacak olan metakaolin malzemesinin en iyi puzolanik aktivite göstereceği kalsinasyon sıcaklığının belirlenmesi amacıyla şekillendirilen örnekler (Resim 3.6) 600 – 700 – 800 – 900 - 1000 °C’de olmak üzere beş farklı sıcaklıkta ve son sıcaklıkta bir saat kalması ile laboratuvar tipi fırında (Resim 3.7) kalsine edilerek metakaoline dönüştürülmüştür. Bu şekillendirme işteminde kaolin kili % 20 oranında su ilave edilerek hobart mikserde karıştırılmış (Resim 3.4) ve 5 x 10 cm’lik ölçülerde metal silindir bir kalıp yardımıyla elle şekillendirilmiştir (Resim 3.5).

Metakaoline dönüşen silindir örnekler laboratuvar tipi bilyeli değirmende maksimum tane çapı 250 µm oluncaya kadar öğütülmüştür.



**Resim 3.4** Hobart mikser.



**Resim 3.5** Kaolin kilinin şekillendirilmesi.



**Resim 3.6** Metakaoline dönüştürülmek için hazırlanan kaolin kili örnekleri.



**Resim 3.7** Metakaoline dönüştürülecek örneklerin fırına yerleştirilmesi.

Puzolanik aktivite deneyleri için üretilen harçlar ASTM C 618 (2000) nolu standarda göre üretilmiştir.

Harçların hazırlanması sırasında beş farklı sıcaklıkta kalsine edilen metakaolin örnekleri ayrı ayrı deneylerde kullanılmış ve en iyi puzolanik aktivite özellikleri gösteren metakaolin örneklerinin belirlenmesine çalışılmıştır. Örneklerin puzolanik aktivitelerinin belirlenmesinde 7, 28 ve 90 günlük örnekler kullanılmıştır. Puzolanik aktivite deneylerinde kullanılan malzemeler ve miktarları Çizelge 3.1’de verilmiştir.

**Çizelge 3.1** Puzolanik aktivite deneylerinde kullanılan malzemeler (gr).

Numune	Çimento	Kum	MK	MK kalsinasyon sıcaklığı (°C)	Su
Referans	500	1375	-	-	242
600	400	1375	100	600	257
700	400	1375	100	700	257
800	400	1375	100	800	257
900	400	1375	100	900	257
1000	400	1375	100	1000	257



**Resim 3.8** Puzolanik aktivite deneyleri için dökülen harç örnekleri.

Harçların hazırlanması sırasında malzemeler, Çizelge 3.1’de verilen reçetede ve tam otomatik programlanabilir çimento mikserinde homojen bir biçimde karıştırıldıktan sonra 4 x 4 x 16 cm boyutlarında metal kalıplara dökülmüştür (Resim 3.8). Titreşimli tabla yardımıyla örneklerde boşluk kalmayacak şekilde titreşim uygulanarak örneklerin metal kalıplara yerleştirilmesi sağlanmıştır. Hazırlanan harçlar laboratuvar şartlarında bir gün açık ortamda bekletilmiş ardından da kalıplardan alınarak basınç ve eğilme testlerinin yapılacağı güne kadar su içerisinde bekletilmiştir.

### 3.4 Geopolimer Pastaların Hazırlanması

MK'nın en reaktif olduğu kalsinasyon sıcaklığının belirlenmesinin ardından, geopolimer pasta örneklerinin hazırlanması amacıyla optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Optimizasyon çalışmalarında öncelikle hidrolik el presinde (Resim 3.10) örneklerin şekillendirilebilmesi amacıyla en ideal likit/katı oranı ve sıkıştırma basıncının belirlenebilmesi için bazı çalışmalar yapılmıştır. Ardından örneklerden en iyi basınç dayanım değerlerinin alınabilmesi adına en ideal NaOH konsantrasyon (Molarite) oranlarının belirlenmesi için optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Geopolimer pastaların hazırlanmasında alkali aktifleştirci olarak NaOH ve Sodyum silikat solüsyonu ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) - (SS) kullanılmış ve bu malzemelerin özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

**Çizelge 3.2** Kullanılan alkali aktifleştirciler ve özellikleri.

Sodyum silikat solüsyonu (SS)	Sodyum hidroksit (NaOH)
$\text{Na}_2\text{O}$ : 26.98 (%)	M: 40 g/mol
$\text{SiO}_2$ : 8.77 (%)	NaOH $\geq$ 99,0 (%)
$\text{H}_2\text{O}$ : 64.25 (%)	

Optimizasyon çalışmalarında hazırlanan çözeltiler 24 saat öncesinden hazırlanmış ve oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır (Resim 3.9). Tüm karışımlarda ağırlıkça % 80 uçucu kül (UK) ve % 20 metakaolin (MK) malzemesi kullanılmıştır. Uçucu kül ve metakaolin malzemesi öncelikle kuru olarak 30 sn. karıştırılmış, ardından alkali aktivatörler (NaOH ve SS) karışıma ilave edilerek 3 dak. daha karıştırma işlemi uygulanmıştır. Karıştırılan malzemeler hidrolik el presinde, 2.5 x 5 cm'lik silindirik boyutlarında şekillendirilmiştir (Resim 3.10).

Optimizasyon çalışmalarının sonucu olarak, üretiminde en iyi şartların alındığı bazı parametreler belirlenmiş ve bu aşamadan sonra geopolimer pasta üretiminde bu parametrelerin kullanılmasına karar verilmiştir.

Bu doğrultuda geopolimer pasta üretiminde optimize edilen ve kullanılan parametreler şunlardır; Sıkıştırma basıncı: 100 bar, Likit/katı oranı: 0.36 ml/gr, NaOH konsantrasyon



oranları: 9M, 12M ve 15M,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  oranı: 2.0, Karıştırma süresi: 5+5 (10) dakika.



**Resim 3.9** Soğumaya bırakılan çözeltiler.



**Resim 3.10** Şekillendirilen geopolimer pasta.

Optimizasyon çalışmalarında belirlenen parametreler doğrultusunda, geopolimer pasta üretiminde hidrolik el presi kullanılmıştır. Hidrolik el presinde örnekler şekillendirilirken; 100 bar sabit sıkıştırma basıncı ve 0.36 ml/gr – likit/katı oranı kullanılmıştır. Geopolimer pastalarda NaOH konsantrasyonunun etkisini belirlemek amacıyla toplam üç farklı molariteye (M) sahip NaOH konsantrasyonu (9M, 12M ve 15M) kullanılmıştır.

Pellet halde olan NaOH, saf suda çözünerek konsantrasyon haline getirilmiştir. Geopolimer pasta örnekleri hazırlanırken kullanılan malzemeler ve karışım oranları Çizelge 3.3’de verilmiştir. Karışımlarda kullanılan likit miktarı Çizelge 3.3’de verildiği gibi aynen alınmıştır. Tez çalışmaları sırasında 70 °C’de kür edilen örnekler Çizelge 3.4’de, 80 °C’de kür edilen örnekler Çizelge 3.5’de ve 90 °C’de kür edilen örnekler ise Çizelge 3.6’da verilmiştir.

**Çizelge 3.3** Pastaların karışım oranları (100 gr katı malzeme için).

Konsantrasyon (M)	UK – MK (% - %)	Uçucu kül (g)	Metakaolin (g)	Sodyum silikat solüsyonu (SS) (ml)	NaOH solüsyonu (ml)	SS/NaOH oranı
9	80 - 20	80	20	24	12	2.0
9	60 - 40	60	40	24	12	2.0
9	40 - 60	40	60	24	12	2.0
12	80 - 20	80	20	24	12	2.0
12	60 - 40	60	40	24	12	2.0
12	40 - 60	40	60	24	12	2.0
15	80 - 20	80	20	24	12	2.0
15	60 - 40	60	40	24	12	2.0
15	40 - 60	40	60	24	12	2.0

**Çizelge 3.4** 70 °C’de kür edilen geopolimer pasta örnekleri.

Geopolimer	NaOH (M)	Kür süresi (saat)	Kür sıcaklığı (°C)	UK – MK (% - %)	SS/NaOH oranı
P001	9	5	70	80 - 20	2.0
P002	9	24	70	80 - 20	2.0
P003	9	48	70	80 - 20	2.0
P004	12	5	70	80 - 20	2.0
P005	12	24	70	80 - 20	2.0
P006	12	48	70	80 - 20	2.0
P007	15	5	70	80 - 20	2.0
P008	15	24	70	80 - 20	2.0
P009	15	48	70	80 - 20	2.0
P010	9	5	70	60 - 40	2.0
P011	9	24	70	60 - 40	2.0
P012	9	48	70	60 - 40	2.0
P013	12	5	70	60 - 40	2.0
P014	12	24	70	60 - 40	2.0
P015	12	48	70	60 - 40	2.0
P016	15	5	70	60 - 40	2.0
P017	15	24	70	60 - 40	2.0
P018	15	48	70	60 - 40	2.0
P019	9	5	70	40 - 60	2.0
P020	9	24	70	40 - 60	2.0
P021	9	48	70	40 - 60	2.0
P022	12	5	70	40 - 60	2.0
P023	12	24	70	40 - 60	2.0
P024	12	48	70	40 - 60	2.0
P025	15	5	70	40 - 60	2.0
P026	15	24	70	40 - 60	2.0
P027	15	48	70	40 - 60	2.0

**Çizelge 3.5** 80 °C’de kür edilen geopolimer pasta örnekleri.

Geopolimer	NaOH (M)	Kür süresi (saat)	Kür sıcaklığı (°C)	UK – MK (% - %)	SS/NaOH oranı
P028	9	5	80	80 - 20	2.0
P029	9	24	80	80 - 20	2.0
P030	9	48	80	80 - 20	2.0
P031	12	5	80	80 - 20	2.0
P032	12	24	80	80 - 20	2.0
P033	12	48	80	80 - 20	2.0
P034	15	5	80	80 - 20	2.0
P035	15	24	80	80 - 20	2.0
P036	15	48	80	80 - 20	2.0
P037	9	5	80	60 - 40	2.0
P038	9	24	80	60 - 40	2.0
P039	9	48	80	60 - 40	2.0
P040	12	5	80	60 - 40	2.0
P041	12	24	80	60 - 40	2.0
P042	12	48	80	60 - 40	2.0
P043	15	5	80	60 - 40	2.0
P044	15	24	80	60 - 40	2.0
P045	15	48	80	60 - 40	2.0
P046	9	5	80	40 - 60	2.0
P047	9	24	80	40 - 60	2.0
P048	9	48	80	40 - 60	2.0
P049	12	5	80	40 - 60	2.0
P050	12	24	80	40 - 60	2.0
P051	12	48	80	40 - 60	2.0
P052	15	5	80	40 - 60	2.0
P053	15	24	80	40 - 60	2.0
P054	15	48	80	40 - 60	2.0

Belirtilen koşullarda optimizasyon çalışmaları yapılmış ve Çizelge 3.3’de belirtildiği gibi reçeteler hazırlanmıştır. Ardından Çizelge 3.4 – Çizelge 3.6’da sunulan toplam 81 seri geopolimer pasta örneği hazırlanmıştır. NaOH çözeltileri hazırlanırken laboratuvarında bulunan saf su (Resim 3.11) cihazı yardımıyla saf su üretilmiş ve konsantrasyonlarda elde edilen bu sular kullanılmıştır. Çalışmada hazırlanan reçetelerin homojen bir biçimde karıştırılması için tam otomatik programlanabilir çimento mikseri (Resim 3.12) kullanılmıştır.

**Çizelge 3.6** 90 °C’de kür edilen geopolimer pasta örnekleri.

Geopolimer	NaOH (M)	Kür süresi (saat)	Kür sıcaklığı (°C)	UK – MK (% - %)	SS/NaOH oranı
P055	9	5	90	80 - 20	2.0
P056	9	24	90	80 - 20	2.0
P057	9	48	90	80 - 20	2.0
P058	12	5	90	80 - 20	2.0
P059	12	24	90	80 - 20	2.0
P060	12	48	90	80 - 20	2.0
P061	15	5	90	80 - 20	2.0
P062	15	24	90	80 - 20	2.0
P063	15	48	90	80 - 20	2.0
P064	9	5	90	60 - 40	2.0
P065	9	24	90	60 - 40	2.0
P066	9	48	90	60 - 40	2.0
P067	12	5	90	60 - 40	2.0
P068	12	24	90	60 - 40	2.0
P069	12	48	90	60 - 40	2.0
P070	15	5	90	60 - 40	2.0
P071	15	24	90	60 - 40	2.0
P072	15	48	90	60 - 40	2.0
P073	9	5	90	40 - 60	2.0
P074	9	24	90	40 - 60	2.0
P075	9	48	90	40 - 60	2.0
P076	12	5	90	40 - 60	2.0
P077	12	24	90	40 - 60	2.0
P078	12	48	90	40 - 60	2.0
P079	15	5	90	40 - 60	2.0
P080	15	24	90	40 - 60	2.0
P081	15	48	90	40 - 60	2.0

Hidrolik el presinde üretilen örnekler, akabinde laboratuvar tipi etüve (Resim 3.13) yerleştirilerek farklı sıcaklık ve sürelerde termal kür işlemlerine tabi tutulmuştur. Kür işlemi tamamlanan örnekler laboratuvar ortamında ilgili testlerin yapılacağı güne kadar da açık ortamda (Resim 3.14) bekletilmiştir.



**Resim 3.11** Saf su cihazı.



**Resim 3.12** Çimento mikseri.



**Resim 3.13** Laboratuvar tipi etiv.



**Resim 3.14** Geopolimer pastalar.

### 3.5 Fiziksel ve Mekanik Testler

Puzolanik aktivite deneylerinde mekanik testler için otomatik kontrollü laboratuvar tipi çimento presi kullanılmıştır (Resim 3.15 ve Resim 3.16). Testlerde 7, 28 ve 90 günlük harç örnekleri kullanılmıştır. Geopolimer pasta örneklerinde mekanik deneylerde 7 günlük örnekler kullanılmış olup mekanik özellikler TS EN 196-1'e (TS EN 196-1 2002) göre belirlenmiştir. Geopolimer pastaların fiziksel ve basınç dayanımı testlerinde her bir örnek grubundan üç örneğin ortalama değerleri alınmıştır.



**Resim 3.15** Eğilme dayanım testi.



**Resim 3.16** Basınç dayanım testi.

Çalışmada üretilen tüm örnekler, fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla 24 saat boyunca su tankına yerleştirilmiştir. Bu örneklerin; su emme, görünen porozite, birim hacim ağırlık ve görünür yoğunluk gibi fiziksel özellikleri Arşimet prensibine göre belirlenmiştir. Örneklerin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi sırasında; örnekler su tankından alınarak, su içerisinde asılı ağırlıkları ve suya doymun yüzey kuru ağırlıkları belirlenmiştir. Ardından ilgili örnekler etüvde değişmez ağırlığa gelinceye kadar kurutulup tekrar tartılmıştır. Elde edilen bu değerler yardımıyla örneklerin; görünen porozite, birim hacim ağırlık ve görünür yoğunluk değerleri TS EN 772-4 (2000)'e göre, su emme değerleri ise TS EN 771-1 (2005)'e göre belirlenmiştir.

### **3.6 SEM Analizleri**

Geopolimer pasta örneklerinin morfolojik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla LEO 1430 VP model SEM cihazı ile seçilen örnekler üzerinde SEM analizleri yapılmıştır.

## 4. BULGULAR

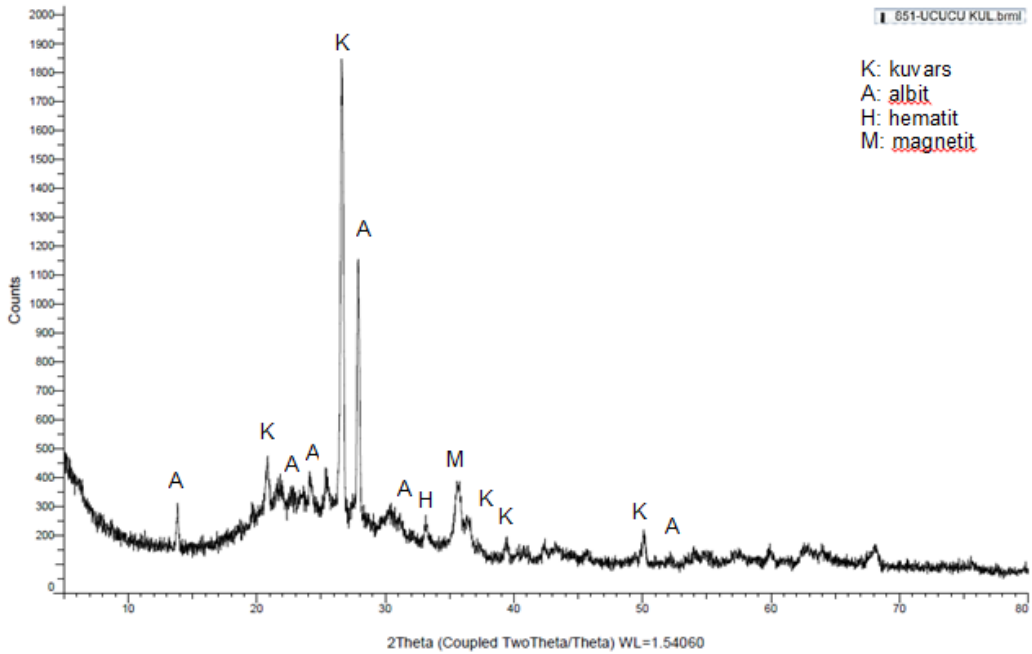
### 4.1 Hammadde Analizleri

XRF analiz sonuçlarına göre; uçucu külün toplam  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$  değeri % 81.71, CaO değeri ise % 4.31'dir. Bu verilere göre kullanılan uçucu kül, ASTM C 618-08a (2000)'ya göre F sınıfı uçucu küldür. Uçucu külden kütlece silika/alümina oranı ise ( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 2.69'dur (Çizelge 4.1). Uçucu külün yoğunluğu  $2.01 \text{ gr/cm}^3$ 'tür.

**Çizelge 4.1** UK'nın XRF kimyasal analiz sonuçları.

Oksit (%)	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	MgO	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{SO}_3$	CaO	K.K.	Toplam
Uçucu kül	49.81	18.50	13.40	4.56	0.55	1.84	1.45	4.31	3.52	97.94

Uçucu külün XRD analizinden elde edilen verilere göre ise uçucu külden; kuvars, magnetit, hematit ve albit gibi minerallerin varlığı tespit edilmiştir (Şekil 4.1).



**Şekil 4.1** UK'nın XRD difraktogramı.

UK'nın lazer tane boyut analizinden elde edilen verilere göre uçucu külün; % 10'u

15.965  $\mu\text{m}$ , % 50'si 84.752  $\mu\text{m}$  ve % 90'ı ise 231.334  $\mu\text{m}$ 'den daha küçük tane boyutuna sahiptir (Çizelge 4.2).

**Çizelge 4.2** UK'nın lazer tane boyut analizi sonuçları.

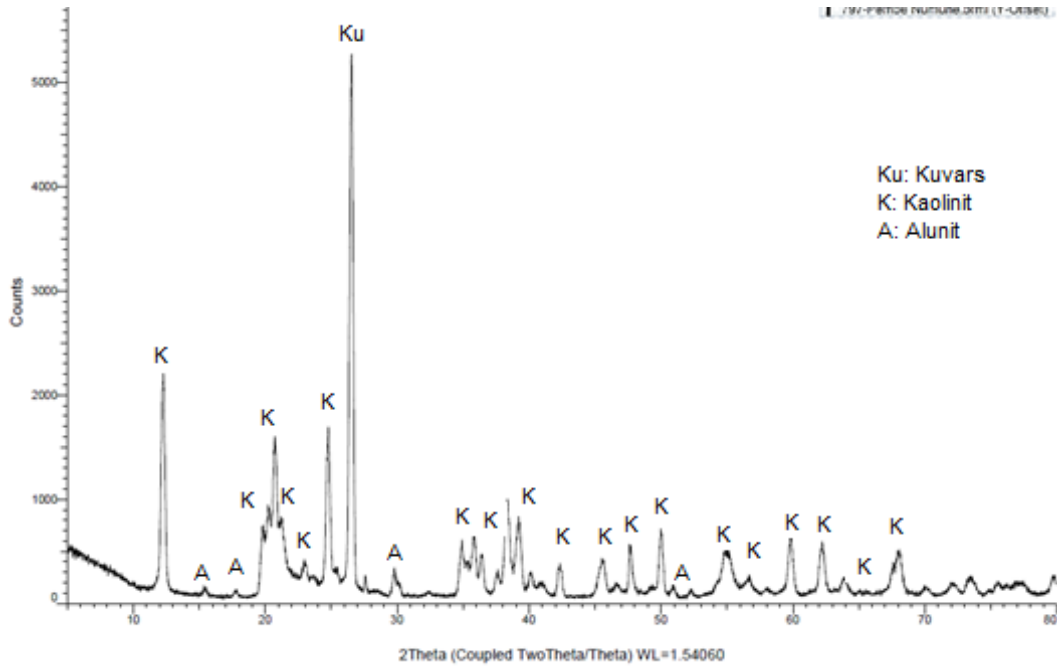
Malzeme	$d_{10}$ ( $\mu\text{m}$ )	$d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	$d_{90}$ ( $\mu\text{m}$ )
Uçucu kül	15.965	84.752	231.334

XRF analiz sonuçlarına göre; kaolinde toplam  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  değeri % 86.21'dir ve ASTM C 618 (2000)'e göre puzolan olarak kullanılacak malzemelerde gerekli görülen kimyasal değeri sağlamaktadır (Çizelge 4.3).

**Çizelge 4.3** Kaolin malzemesine ait XRF kimyasal analiz sonuçları.

Oksit (%)	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	MgO	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{SO}_3$	CaO	K.K.	Toplam
Kaolin	53.06	32.33	0.82	0.03	0.02	0.41	1.44	0.14	10.38	98.63

Kaolin malzemesine ait XRD analizinden elde edilen verilere göre ise kaolinde; kuvars, kaolinit ve alunit gibi minerallerin varlığı tespit edilmiştir (Şekil 4.2).



**Şekil 4.2** Kaoline ait XRD difraktogramı.

Kaolin malzemesinin lazer tane boyut analizinden elde edilen verilere göre kaolinin; %

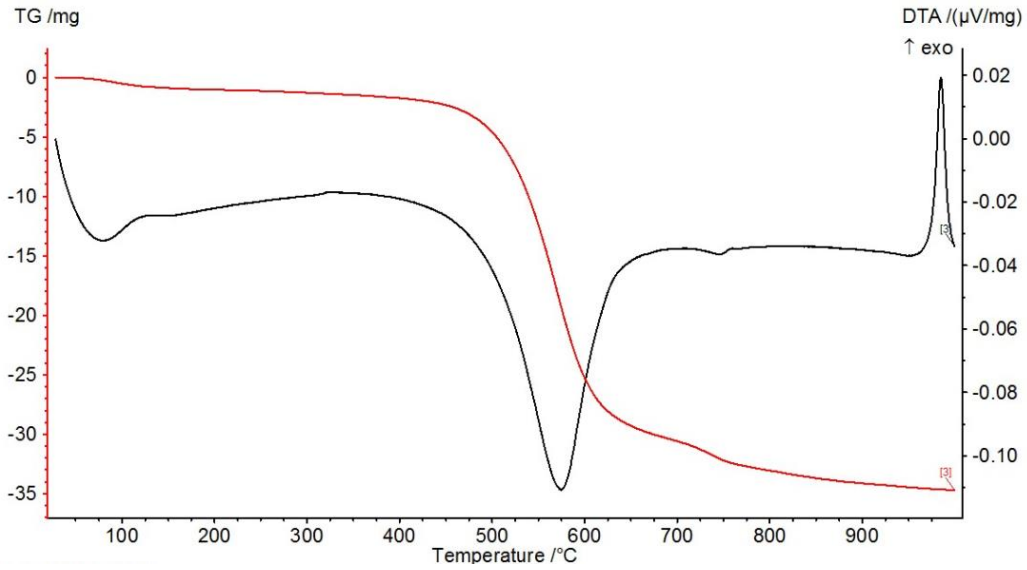


10'u 1.220  $\mu\text{m}$ , % 50'si 11.518  $\mu\text{m}$  ve % 90'ı ise 73.055  $\mu\text{m}$ 'den daha küçük tane boyutuna sahiptir (Çizelge 4.4).

**Çizelge 4.4** Kaolin malzemesine ait lazer tane boyut analizi sonuçları.

Malzeme	$d_{10}$ ( $\mu\text{m}$ )	$d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	$d_{90}$ ( $\mu\text{m}$ )
Kaolin	1.220	11.518	73.055

Kaolin malzemesinin termal davranışlarının belirlenebilmesi amacıyla, kaolin örneğine DTA-TG analizleri yapılmıştır. Analizlerden elde edilen veriler Şekil 4.3'de gösterilmiştir. Verilen grafikte görüldüğü üzere kaolin kili termodinamik olarak 574  $^{\circ}\text{C}$ 'de endotermik pik göstererek metakaoline dönüşüm yapmıştır. DTA verilerine göre, 982  $^{\circ}\text{C}$ 'de ki ekzotermik pikin ise yeni oluşan metakaolin bünyesinde müllit fazın varlığına sebep olduğu düşünülmektedir. TG analiz verileri incelendiğinde ise kaolin kilinin 1000  $^{\circ}\text{C}$ 'de ki kızdırma kaybı değerinin %10.19 olduğu belirlenmiştir.



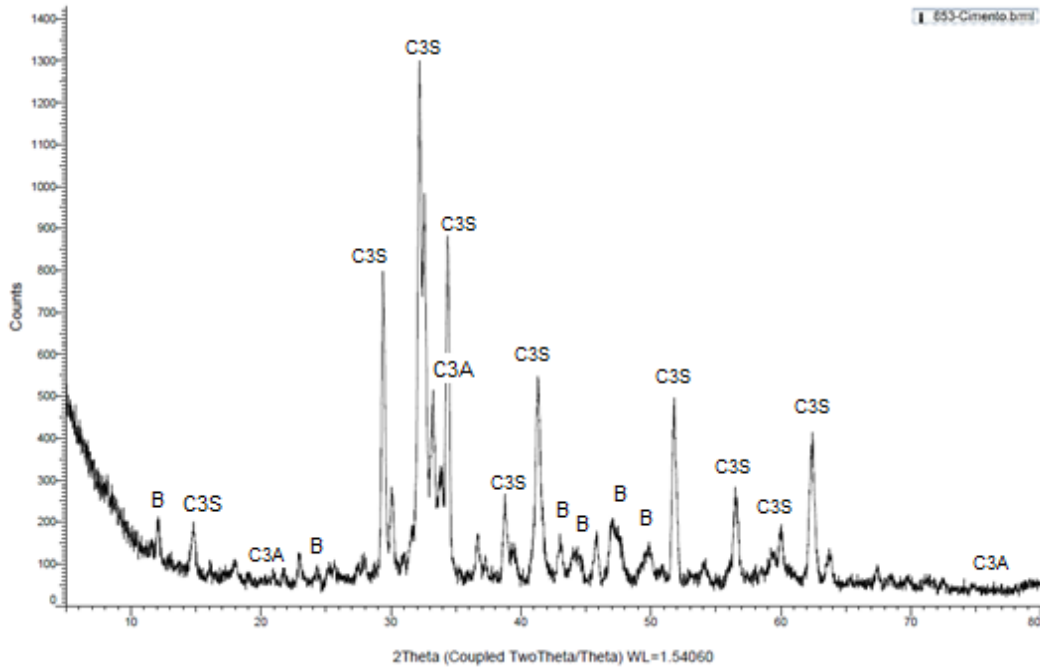
**Şekil 4.3** Kaoline ait DTA-TG analiz grafiği.

Puzolanik aktivite deneylerinde kullanılan çimentonun XRF kimyasal analiz sonuçları Çizelge 4.5'de gösterilmiştir. Elde edilen verilere göre çimentonun bünyesinde % 63.9 oranında CaO bulunurken, örneğin kızdırma kaybı değerinin ise % 1.74 olduğu belirlenmiştir.

**Çizelge 4.5** Çimento malzemesine ait XRF kimyasal analiz sonuçları.

Oksit (%)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	CaO	K.K.	Toplam
Çimento	16.66	4.62	3.75	1.92	0.79	1.27	4.18	63.90	1.74	98.83

Çimentonun XRD analiz grafiği Şekil 4.4’de gösterilmiştir. Analizden elde edilen verilere göre çimento bünyesinde; tri kalsiyum silikat (C<sub>3</sub>S), tri kalsiyum alüminat (C<sub>3</sub>A) ve brownmillerit gibi minerallerinin varlığı tespit edilmiştir.



**Şekil 4.4** Çimentoya ait XRD difraktogramı.

Çimento malzemesinin lazer tane boyut analizinden elde edilen verilere göre çimentonun; % 10’u 1.852 µm, % 50’si 17.713 µm ve % 90’ı ise 46.203 µm’den daha küçük tane boyutuna sahiptir (Çizelge 4.6).

**Çizelge 4.6** Çimento malzemesine ait lazer tane boyut analizi sonuçları.

Malzeme	d <sub>10</sub> (µm)	d <sub>50</sub> (µm)	d <sub>90</sub> (µm)
Çimento	1.852	17.713	46.203

Geopolimer malzeme üretiminde kullanılacak olan MK’nın mineralojik ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesi amacıyla hammaddelere uygulanmış olan; lazer tane boyut analizi, XRF kimyasal analizi ve XRD analizleri uygulanmıştır. Bu bağlamda, MK’nın

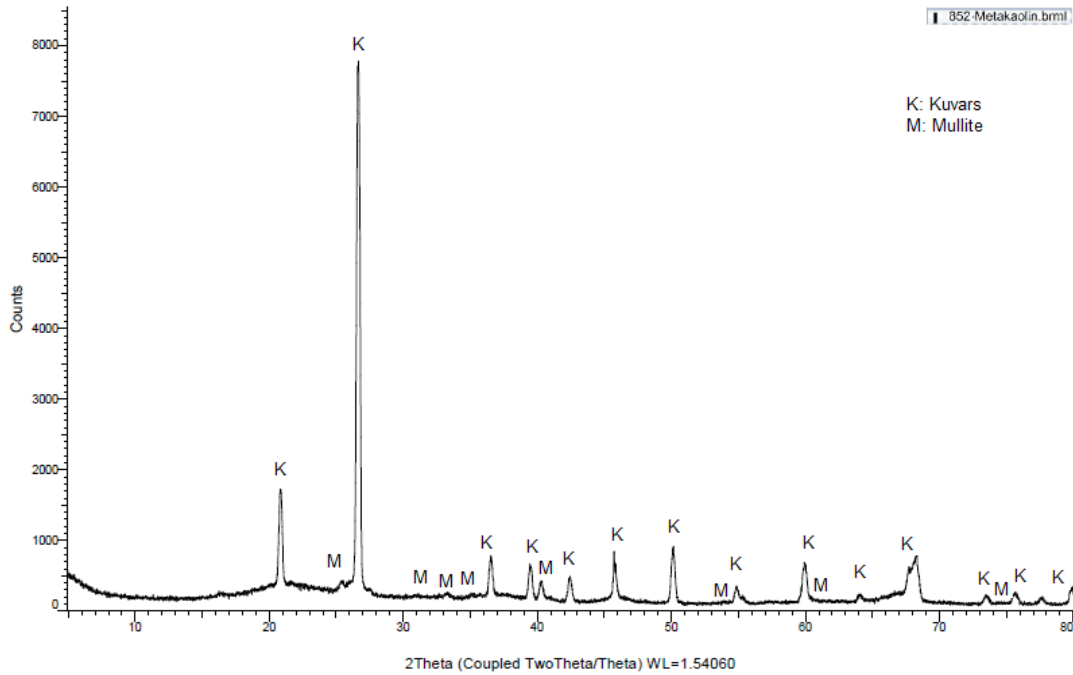
XRF analiz sonuçları Çizelge 4.7’de verilmiştir. MK’nın, % 61.61 oranında SiO<sub>2</sub> içerdiği görülmektedir. Kaolin malzemesinde ise SiO<sub>2</sub> oranı % 53.06’dır. MK malzemesinde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oranı % 35.02 iken, kaolinde bu oran % 32.33 olarak karşımıza çıkmıştır. Kalsinasyon işlemi sonrasında malzemedeki toplam “SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>” oranında % 11.24’lük bir artış gerçekleştiği görülmektedir.

**Çizelge 4.7** MK (Metakaolin) malzemesine ait XRF kimyasal analiz sonuçları.

Oksit (%)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	CaO	K.K.	Toplam
Metakaolin	61.61	35.02	0.89	0.06	0.03	0.50	0.08	0.15	0.27	98.61

MK’nın XRD grafiği Şekil 4.5’de gösterilmiştir. XRD difraktogramına göre MK bünyesinde kuvars ve mullit minerallerinin varlığı tespit edilmiştir.

MK malzemesinin lazer tane boyut analizinden elde edilen verilere göre MK’nın; % 10’u 1.187 µm, % 50’si 11.696 µm ve % 90’ı ise 56.344 µm’den daha küçük tane boyutuna sahiptir (Çizelge 4.8). Kaolin kilinin lazer tane boyut analizi değerleriyle kıyaslandığında MK tane boyutunun biraz daha ince olduğu belirlenmiştir. Metakaolinin yoğunluğu ise 2.69 gr/cm<sup>3</sup>’tür.



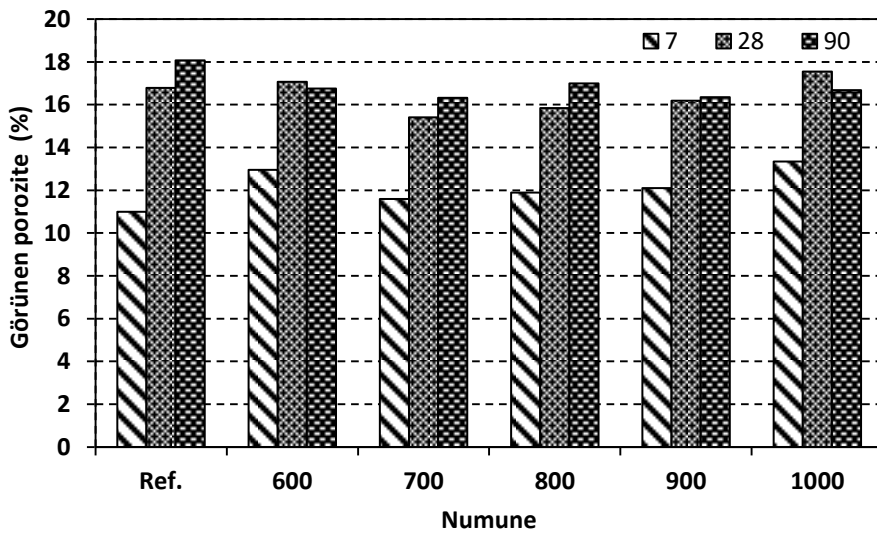
**Şekil 4.5** 1000 °C’de kalsine edilen Metakaoline (MK) ait XRD difraktogramı.

**Çizelge 4.8** Metakaolin (MK) malzemesine ait lazer tane boyut analizi sonuçları.

Malzeme	d <sub>10</sub> (µm)	d <sub>50</sub> (µm)	d <sub>90</sub> (µm)
Metakaolin	1.187	11.696	56.344

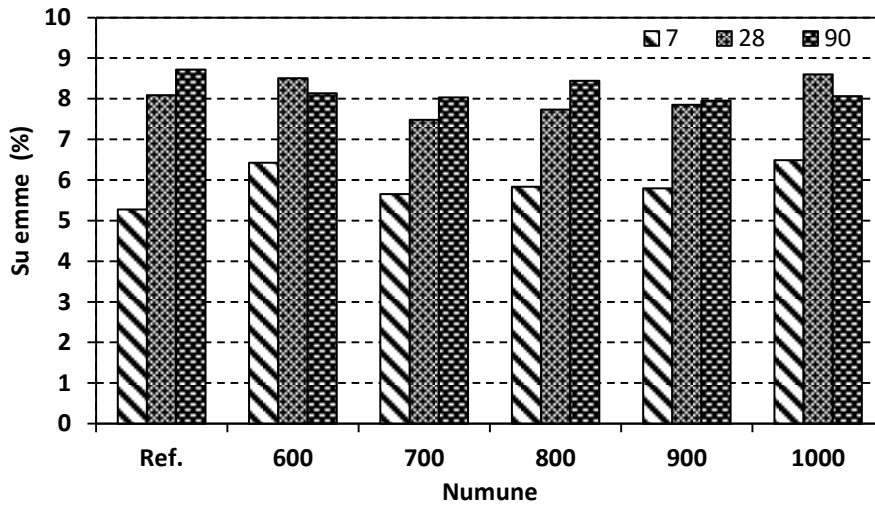
#### 4.2 Puzolanik Aktivite Deneyleleri

Puzolanik aktivite deneyleleri için hazırlanan harç örneklerinden elde edilen fiziksel özellikler aşağıda verilen grafiklerde gösterilmiştir. Buna göre, 7 günlük harçların görünen porozitesi dikkate alındığında referans harçların % 11 ile en düşük porozite oranına sahip olduğu görülmüştür. MK katkıli harçlarda ise görünen porozite oranlarının arttığı ve 1000 °C’de sinterlenen MK katkıli harç örneklerinin % 13.3 ile en yüksek porozite oranlarına sahip olduğu görülmüştür (Şekil 4.6). 7 günlük harçlarda, MK’nın 700 °C ve üzerindeki sıcaklıklarda kalsinasyonu ile birlikte porozite oranları artmıştır. 28 günlük harç örneklerinde ise referans örneklerde porozite oranı % 16.8 iken en yüksek porozite oranı 1000 °C’de kalsine edilen MK katkıli harç örneklerinde % 17.5 olarak elde edilmiştir. 90 günlük harç örneklerinde, 7 ve 28 günlük harçlarda elde edilen verilerin aksine en yüksek porozite oranı referans örneklerde % 18.1 olarak elde edilmiştir. Bununla birlikte MK kalsinasyon sıcaklığının porozite oranları üzerindeki etkisi değişken olmuş ve MK katkıli harçlarda en yüksek porozite oranı % 17 ile 800 °C’de kalsine edilen örneklerde elde edilmiştir (Şekil 4.6).



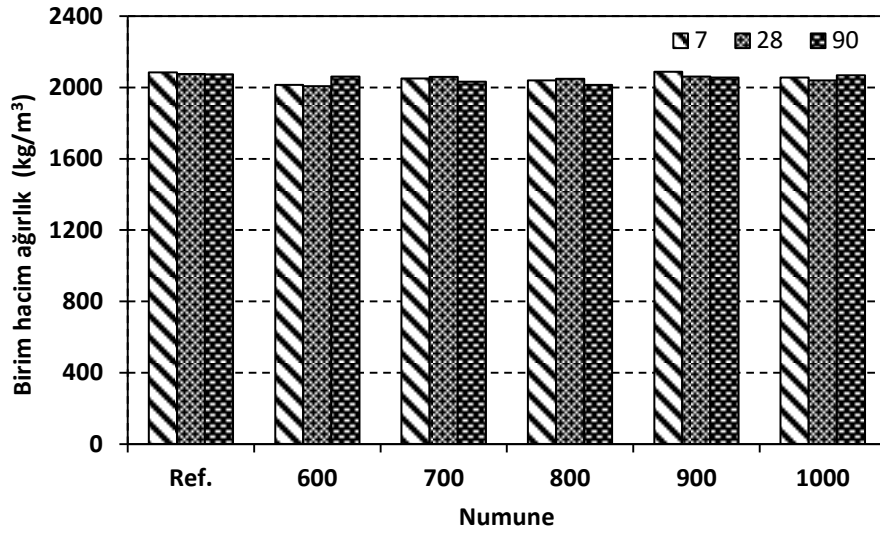
**Şekil 4.6** Harçların görünen porozite oranları.

Harçların su emme oranları, görünen porozite oranlarındaki eğilimlerle benzerdir. Buna göre 7 günlük harç örneklerinde en düşük su emme oranları referans harçlarda % 5.3 olarak elde edilmiştir. En yüksek su emme oranı ise 1000 °C’de kalsine edilen MK katkılı harçlarda % 6.5’tir. 28 günlük harçlarda ise sırasıyla en düşük ve en yüksek su emme oranları, 700 °C’de kalsine edilen MK katkılı harçlarda % 7.5, 1000 °C’de kalsine edilen MK katkılı harçlarda ise % 8.6 olarak elde edilmiştir. 90 günlük harçlarda ise en yüksek su emme oranları referans örneklerden elde edilmiştir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7 Harçların su emme oranları.

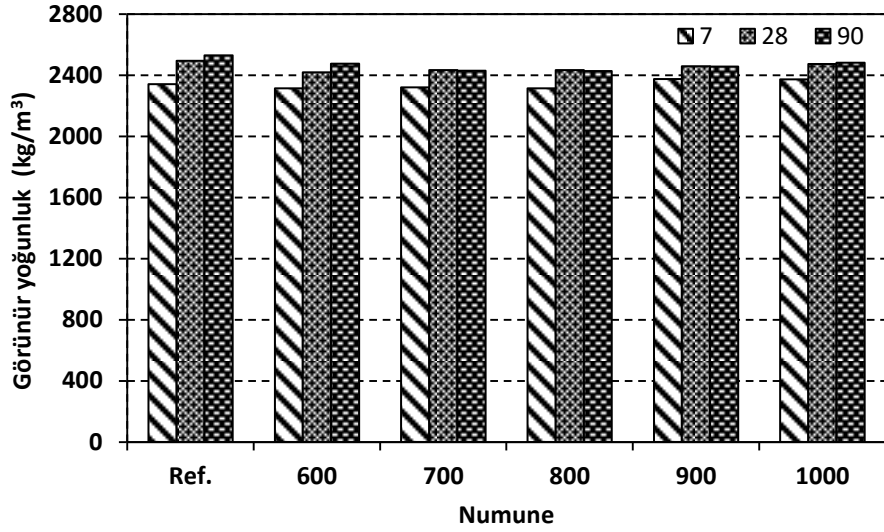
Birim hacim ağırlık değerleri açısından elde edilen verilere göre, referans örneklerde artan kür süresine bağlı olarak birim hacim ağırlıklarda doğrusal düşüşler gerçekleşmiştir. MK katkılı harçlarda ise kür süresine bağlı olarak birim hacim ağırlık değerleri değişkenlik göstermiştir. MK katkılı harç örneklerinin hazırlanması sırasında işlenebilirliğin ve kıvamın referans örneklerle benzer olmasını sağlamak için karışımlara ekstra su ilave edilmiştir. İlave edilen ekstra su MK katkılı örneklerde referans karışımlarına göre kalıba daha az malzeme girmesine sebep olarak birim hacim ağırlıkların referans örneklere kıyasla biraz daha düşük seviyelerde kalmasına neden olmuştur. MK katkılı ve 7 günlük harçlarda birim hacim ağırlık değerleri 2014.4 – 2088.2 kg/m<sup>3</sup>; 28 günlük harçlarda 2006.5 – 2060.6 kg/m<sup>3</sup>; 90 günlük harçlarda ise 2013.8 - 2067.7 kg/m<sup>3</sup> arasında değişmektedir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8 Harçların birim hacim ağırlık değerleri.

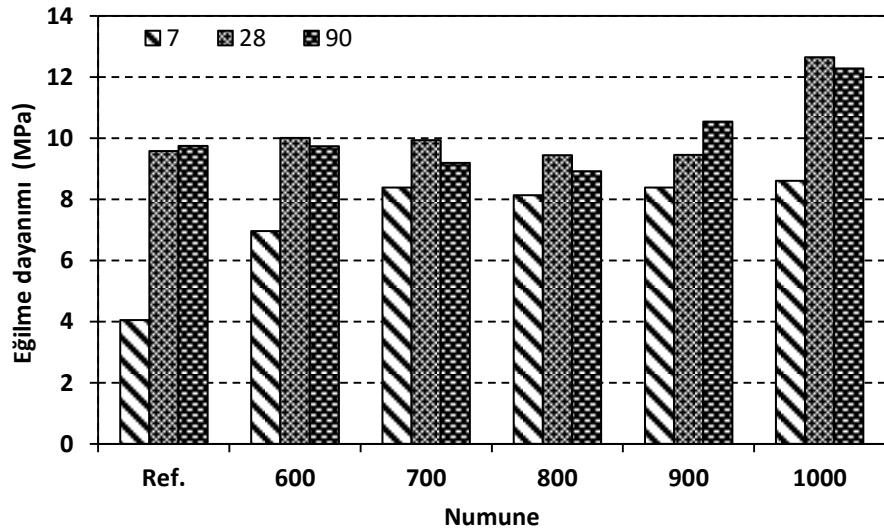
Malzemenin kapalı boşlukları hariç olarak hesaplanan yoğunluğuna, görünür yoğunluk denilmektedir. Harçlardan elde edilen görünür yoğunluk değerleri incelendiğinde ise uygulanan kür süresinin artması ile örnek bünyesindeki C-S-H jel miktarının arttığı düşünülmektedir. Bu durumda malzeme bünyesinde bulunan boşlukların kapanması ve dolayısıyla malzeme yoğunluğunun artması gerekmektedir.

700 °C ve üzerindeki sıcaklıklarda kalsine edilen MK katkılı harçlarda, örneklere uygulanan kür süresinin artması ile birlikte örneklerin görünür yoğunluk değerlerinde artışlar gerçekleşmiştir. Bununla birlikte bu örneklerde 28 ve 90 günlük harçların yoğunluk değerlerinin birbirine çok yakın olduğu da gözlenmiştir. Bu artışların bünyede daha fazla C-S-H jelleri oluşturmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. 28 ve 90 günlük kür sürelerinde referans harçların görünür yoğunlukları en yüksek seviyelerdedir. 7 günlük harçlarda ise 900 ve 1000 °C'de kalsine edilen MK katkılı örneklerin görünür yoğunluklarının referans örneklerden daha yüksek seviyelerde olduğu gözlenmiştir. MK katkılı harçlarda, 7 günlük ve 900 °C'de kalsine edilen MK katkılı örneklerde 2375.7 kg/m<sup>3</sup>; 28 ve 90 günlük örneklerde ise 1000 °C'de kalsine edilen MK katkılı örneklerde sırasıyla; 2472.3 kg/m<sup>3</sup> ve 2481.4 kg/m<sup>3</sup> ile en yüksek görünür yoğunluk değerleri elde edilmiştir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9 Harçların görünür yoğunluk değerleri.

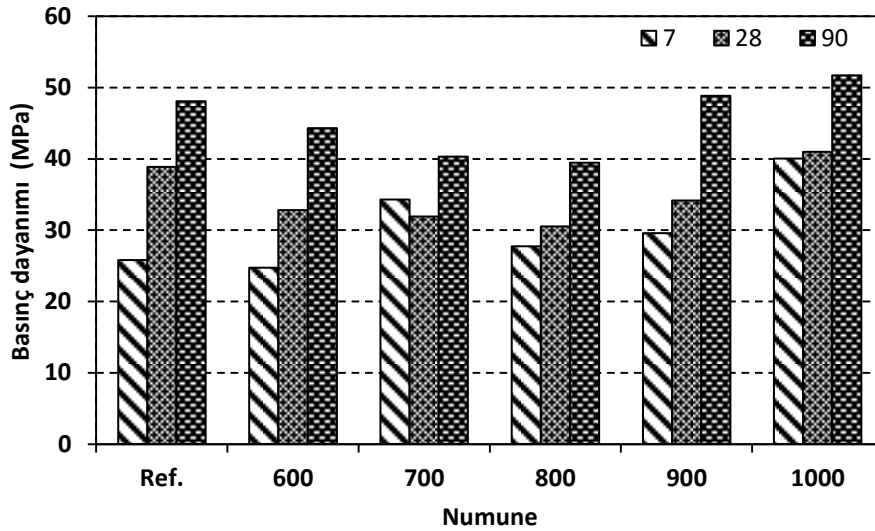
Tüm kür süreleri için 1000 °C’de kalsine edilen MK katkılı harçların en yüksek eğilme dayanım değerlerine sahip oldukları belirlenmiştir. Bu örneklerde 7 günlük harçlardan 8.6 MPa, 28 günlük harçlardan 12.6 MPa ve 90 günlük harçlardan ise 12.3 MPa’lık eğilme dayanım değerleri elde edilmiştir. Referans harçlardan ise 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanım değerleri sırasıyla; 4.0 MPa, 9.6 MPa ve 9.7 MPa olarak elde edilmiştir. MK katkılı örneklerde 7 günlük kür süresi sonunda eğilme dayanım değerleri arasında çok büyük bir farklılık bulunmamakla birlikte artan kür süresi ile birlikte 1000 °C’de kalsine edilen MK katkılı harçların diğer MK katkılı harçlara göre daha büyük bir dayanım gelişimi sağladığı belirlenmiştir (Şekil 4.10).



Şekil 4.10 Harçların eğilme dayanımı değerleri.

Harçların diğer bir mekanik özelliği olan basınç dayanım değerleri incelendiğinde ise, 7 gün kür uygulanan örneklerde 700 °C ve üzerindeki sıcaklıklarda kalsine edilen MK katkılı harçların basınç dayanım değerleri, referans harçlarından daha yüksek değerlerde elde edilmiştir. Bununla birlikte 28 ve 90 günlük su kürü uygulaması sonucunda ise sadece 1000 °C'de kalsine edilen MK katkılı harçların referans örneklerinden daha yüksek basınç dayanım değerlerine sahip oldukları gözlenmiştir.

Tüm örnekler bir arada değerlendirildiğinde; 7, 28 ve 90 günlük su kürü uygulanan harçlarda 1000 °C'de kalsine edilen MK katkılı örneklerin en yüksek basınç dayanım değerlerine sahip oldukları belirlenmiştir. Bu örneklerde 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım değerleri sırasıyla; 40.0 MPa, 41.0 MPa ve 51.7 MPa olarak elde edilirken; aynı örneklerin puzolanik aktivite indeksleri ise yine sırasıyla; % 155.24, % 105.40 ve % 107.55 olmuştur (Şekil 4.11).



Şekil 4.11 Harçların basınç dayanımı değerleri.

Eğilme dayanımı ve basınç dayanımı değerleri bir arada incelendiğinde; tüm örnek grupları ve kür süreleri de dikkate alındığında, MK'ya uygulanan kalsinasyon sıcaklığının 1000 °C olması ile bu örneklerin puzolanik aktivite olarak daha reaktif oldukları kanaatine varılmıştır.



### 4.3 Geopolimer Pastaların Fiziksel Özellikleri

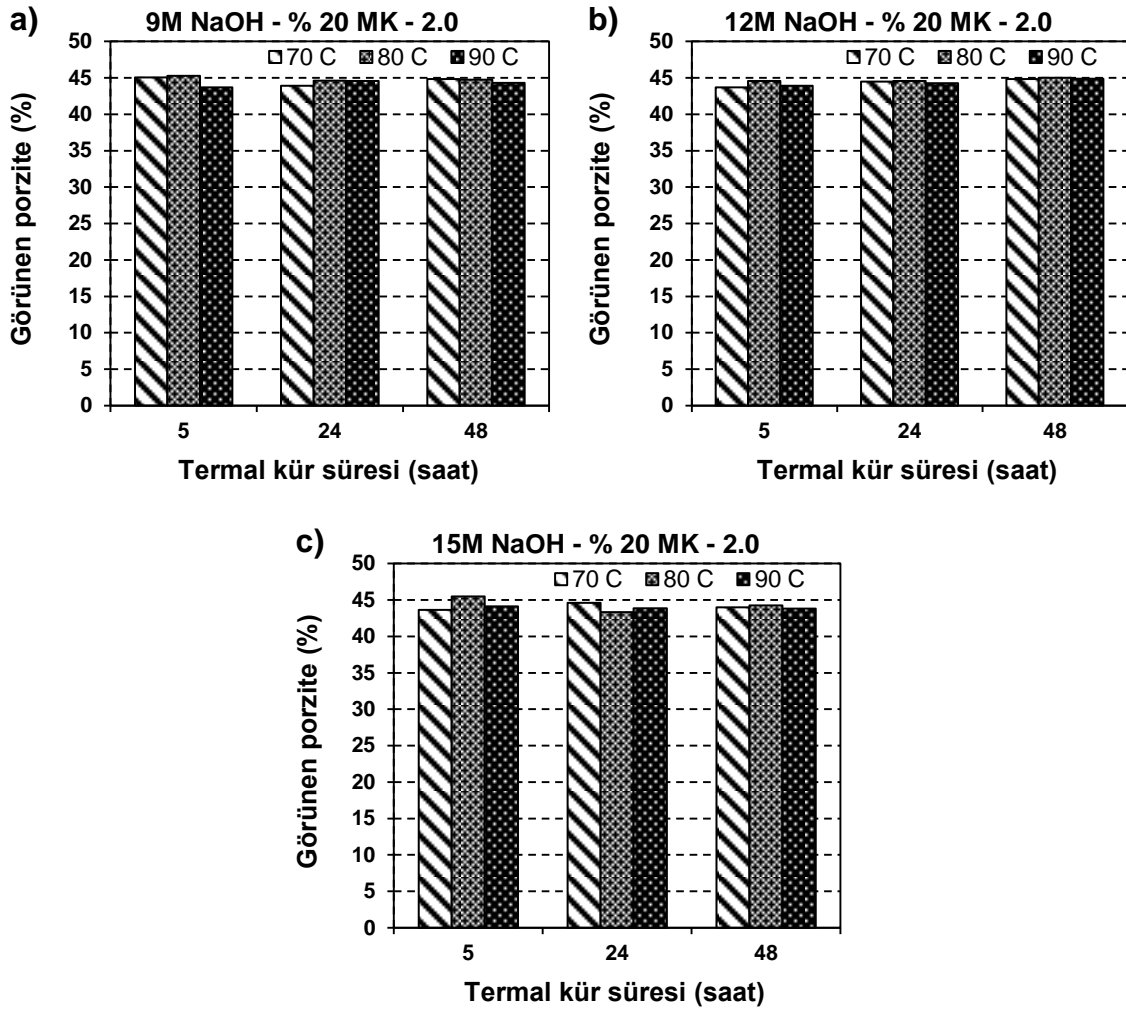
Tez çalışmasında üretilen geopolimer pastalardan elde edilen fiziksel özellikler bu bölümde sunulmuş ve tartışılmıştır.

9M NaOH ile aktifleştirilen pastaların görünen porozite oranları % 43.7 - % 45.3 arasında değişmektedir (Şekil 4.12 (a)). Uygulanan termal kür süresi ve kür sıcaklığındaki farklılıkların görünen porozite oranları üzerindeki etkisinin değişken olduğu göze çarpmaktadır. Bununla birlikte elde edilen verilerin birbirine çok yakın olduğu da göz ardı edilmemelidir. 70 °C'de 5 saat süre ile kür edilen örneklerde % 45.0 ile en yüksek görünen porozite oranı elde edilirken; 80 °C'de ve 90 °C'de kür edilen örneklerde en yüksek görünen porozite oranları sırasıyla % 45.3 ile 5 saat kür edilen örneklerde ve % 44.6 ile 24 saat süre ile kür edilen örneklerde elde edilmiştir. Bununla birlikte sadece 48 saat termal kür uygulanan geopolimer pasta örneklerinde uygulanan kür sıcaklığının artması ile birlikte görünen porozite oranlarında azalmalar olduğu görülmüştür (Şekil 4.12 (a)).

12M NaOH ile aktifleştirilmiş geopolimer pastalardan elde edilen görünen porozite oranları Şekil 4.12 (b)'de gösterilmiştir. Pastalarda porozite oranları % 43.7 - % 45.0 arasında değişmiştir.

12M NaOH ile aktifleştirilen geopolimer pastalarda (Şekil 4.12 (b)) görünen porozite oranları tüm sıcaklıklarda kür süresinin artması ile artmıştır. Termal kür sıcaklıkları dikkate alındığında ise en yüksek porozite oranları 80 °C'de kür edilen geopolimer pasta örneklerinden elde edilmiştir.

Geopolimer pastalarda 15M NaOH ile aktifleştirilen serilerde görünen porozite oranları % 43.3 - % 45.5 arasındadır. 90 °C'lik kür uygulaması yapıldığında artan kür süresi ile birlikte görünen porozite oranlarında azalmalar olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.12 (c)).

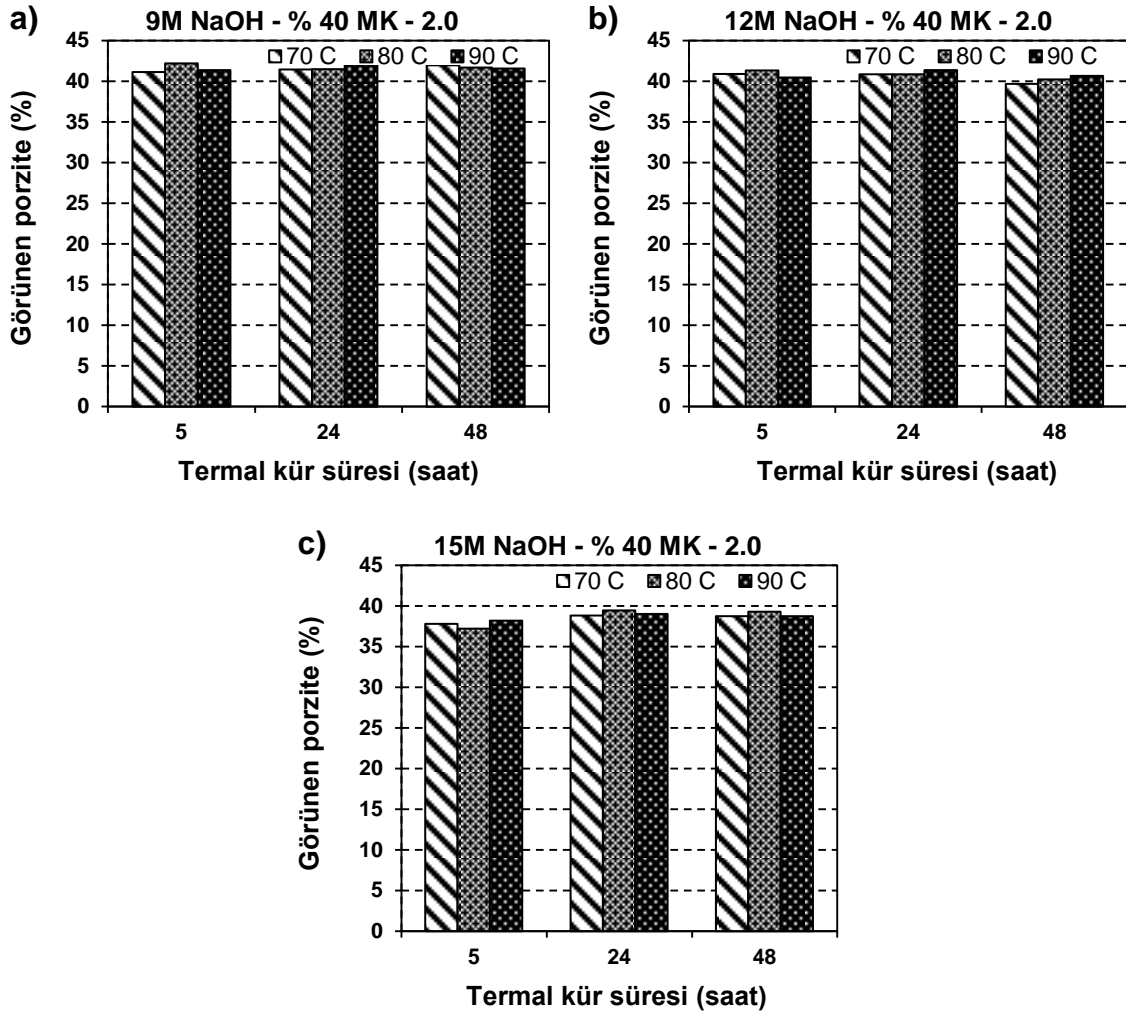


**Şekil 4.12** Ağırlıkça % 20 metakaolin içerikli geopolimer pastaların görünen porozite oranları.

% 40 MK katkılı geopolimer pastaların görünen porozite oranları Şekil 4.13’de gösterilmiştir. 9M NaOH ile aktiveleştirilen geopolimer pastaların görünen porozitesi % 41.1 - % 42.2 arasında değişmiştir. Aynı molarite oranlarındaki % 20 MK katkılı örneklerle kıyaslama yapıldığında bünyedeki MK katkı oranının artması, görünen porozite oranlarını küçük bir oranda azaltmıştır.

Geopolimer pastaların 70 °C’de kür edilen örneklerinde uygulanan kür süresinin artması ile birlikte porozite oranlarında artışlar olduğu görülmüştür (Şekil 4.13 (a)). Bununla birlikte 24 saat kür edilen örneklerde kür sıcaklığının artırılması porozite oranlarını artırırken, daha uzun olan 48 saatlik kür uygulamasında örneklerin porozite oranlarının azaldığı tespit edilmiştir.

12M NaOH ile aktifleştirilen (Şekil 4.13 (b)) geopolimer pastalarda, 70 ve 80 °C’de termal kür uygulanan pastaların görünen poroziteleri artan kür süreleri ile birlikte azalmıştır. 90 °C’de kür edilen örneklerde ise kür sürelerinin porozite oranları üzerine etkisi net değildir ve değişkendir.



Şekil 4.13 Ağırlıkça % 40 metakaolin içerikli geopolimer pastaların görünen porozite oranları.

Geopolimer pasta üretiminde 15M NaOH ile aktifleştirilen pastalardan elde edilen porozite oranları Şekil 4.13 (c)’de gösterilmiştir. Bu örneklerde genel olarak 24 saat kür uygulanan örneklerde porozite değerlerinin arttığı, 48 saat kür uygulanan örneklerde ise 24 saat kür edilen örneklere göre biraz daha düşük porozite oranları elde edildiği belirlenmiştir. Örneklerde tüm kür sıcaklıklarında 24 saat kür edilen örneklerde en yüksek porozite oranları elde edilirken; aynı örneklerin 5 saat kür edilen pastalarında ise

en düşük porozite oranları elde edilmiştir. Karışımlarda kullanılan NaOH konsantrasyonunun etkisinin ise net olmadığı ve değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir (Şekil 4.13 (c)).

Geopolimer pastalarda görünen porozite oranları % 37.2 - % 39.5 arasında değişkenlik göstermiştir. Bununla birlikte geopolimer pasta bünyesinde artan MK katkı oranının tüm serilerde görünen porozite değerlerini düşürmüştür.

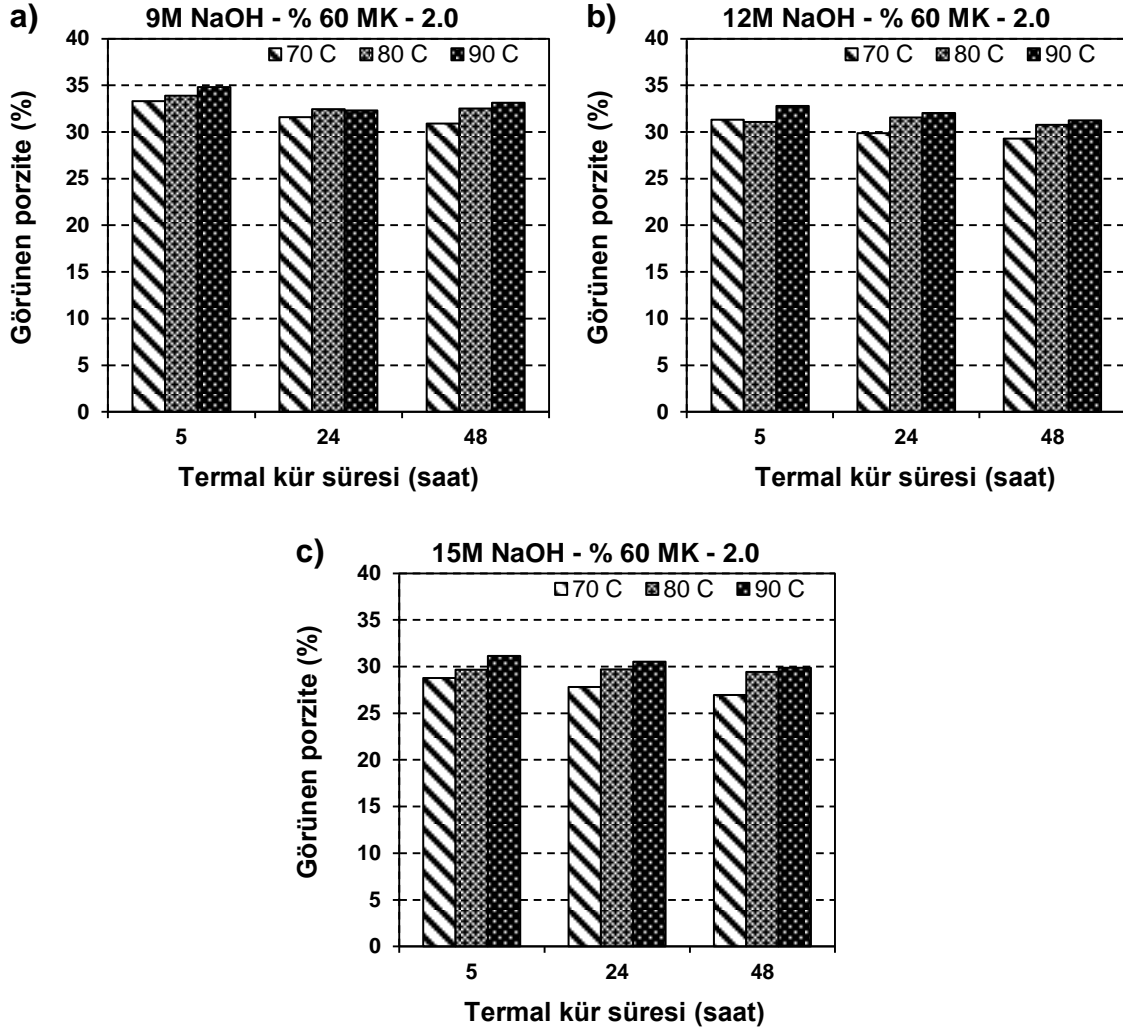
Geopolimer pasta üretiminde kullanılan MK katkı oranının % 60 olduğu örneklere ait görünen porozite oranları Şekil 4.14'de gösterilmiştir. 9M NaOH ile aktifleştirilen örneklerde porozite oranları % 30.9 - % 34.8 arasında değişmiştir (Şekil 4.14 (a)). Bununla birlikte geopolimer pasta üretiminde kullanılan MK katkı oranının artması ile birlikte örneklerin görünen porozite oranlarının azaldığı da gözlenmiştir.

Şekil 4.14 (a)'da görülen pastaların porozitesi incelendiğinde; 70 °C'de kür edilen örneklere uygulanan kür süresinin artması porozite oranlarını azaltıcı bir etki oluşturmuştur. Tüm sıcaklıklarda en yüksek porozite oranları 5 saat kür edilen örneklerde elde edilmiştir. 80 ve 90 °C'de kür edilen örneklerde en düşük porozite oranları 24 saat kür edilen örneklerde elde edilirken, 70 °C'de kür edilen örneklerde en düşük porozite oranları 48 saat kür edilen pastalardan elde edilmiştir.

12M NaOH ile aktifleştirilen geopolimer pastalarda (Şekil 4.14 (b)) 70 ve 90 °C'de kür edilen örneklerde uygulanan kür sıcaklığının artması ile birlikte porozite değerleri azalma gösterirken, 80 °C'de kür edilen örneklerde porozite değerleri kür sürelerine göre değişkenlik göstermiştir. Bununla birlikte 24 ve 48 saat kür edilen pastalarda kür sıcaklığının artması porozite oranlarını arttırmıştır. 12M NaOH ile aktifleştirilen örneklerde porozite oranları % 29.3 - % 32.8 arasındadır.

Şekil 4.14 (c)'de 15M NaOH ile aktifleştirilen geopolimer pastalara ait porozite oranları gösterilmiştir. Elde edilen verilere göre her bir kür süresine bağlı olarak uygulanan kür sıcaklığının artması ile birlikte porozite oranları artış göstermiştir. Bununla birlikte 70 ve 90 °C'de kür edilen örneklerde uygulanan kür süresinin artması ile pastaların

porozite oranlarının azaldığı tespit edilmiştir. 80 °C’de kür edilen örneklerde ise uygulanan kür süresinin etkisi net değildir. 15M NaOH ile aktifleştirilen örneklerde porozite oranları % 26.9 - % 31.1 arasında değişmiştir.



Şekil 4.14 Ağırlıkça % 60 metakaolin içerikli geopolimer pastaların görünen porozite oranları.

Yapı malzemelerinde, görünen porozite oranları ile su emme oranları arasındaki ilişkiler benzerlik göstermektedir. Dolayısıyla geopolimer pastaların su emme oranlarının, görünen porozite oranları ile aynı eğilimleri göstermesi beklenmektedir.

Literatürde bulunan bazı çalışmalarda, NaOH konsantrasyonundaki artışların su emme değerlerini azalttığı belirtilmiştir (Jeyasehar *et al.* 2013). Yine daha önceden yapılan çalışmalarda geopolimer harç üretiminde daha yüksek alkali aktivatörler bulunduğu

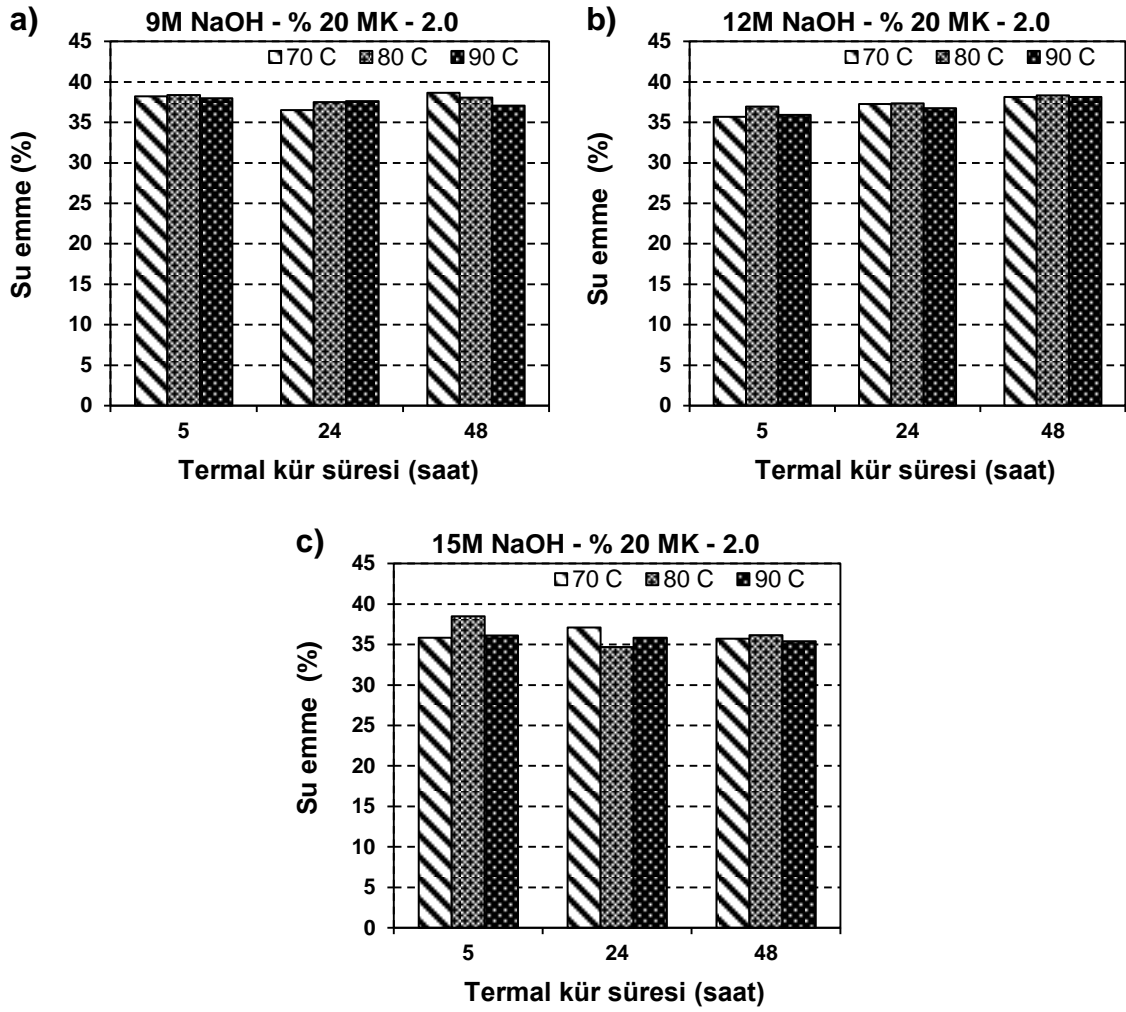
su emme ve görünen porozite değerlerinin daha düşük seviyelerde kaldığı belirtilmiştir (Thokchom *et al.* 2009, Ghosh and Gosh 2012).

9M NaOH ile aktifleştirilen % 20 MK katkılı geopolimer pastaların su emme oranları Şekil 4.15 (a)'da gösterilmiştir. Geopolimer pastalarda 80 ve 90 °C'de kür edilen örneklerde, uygulanan kür süresinin uzaması ile örneklerin su emme oranları azalmıştır. 9M NaOH ile aktifleştirilen örneklerde su emme oranları % 36.5 - % 38.7 arasında değişmiştir.

12M NaOH ile aktifleştirilen örneklerde su emme oranlarının, 9M NaOH ile aktifleştirilen örneklere kıyasla biraz daha düşük seviyelerde olduğu görülmüştür. Geopolimer pastalarda (Şekil 4.15 (b)), en yüksek su emme oranları 48 saat kür edilen örneklerden elde edilmiştir.

Şekil 4.15 (b)'de görüldüğü üzere örneklere uygulanan kür süresinin artması ile birlikte örneklerin su emme oranlarında artışlar olduğu görülmüştür. Kür sıcaklığındaki değişikliklerin ise su emme oranlarında net bir etki yapmadığı gözlenmiştir. 12M NaOH ile aktifleştirilen örneklerde su emme oranları % 35.7 - % 38.3 arasında değişmiştir.

%20 MK katkılı geopolimer pastaların 15M NaOH ile aktifleştirilen örneklerine ait su emme oranları Şekil 4.15 (c)'de gösterilmiştir. Örneklere uygulanan kür süresinin ve kür sıcaklığının, su emme oranlarına etkisi net değildir ve değişkendir. Örnekler içerisinde sadece 90 °C'de kür edilen geopolimer pastalarda uzayan kür süreleri, su emme oranlarında azaltıcı bir etki oluşturmuştur. 15M NaOH ile aktifleştirilen örneklerde su emme oranları % 34.7 - % 38.5 arasında değişmiştir.



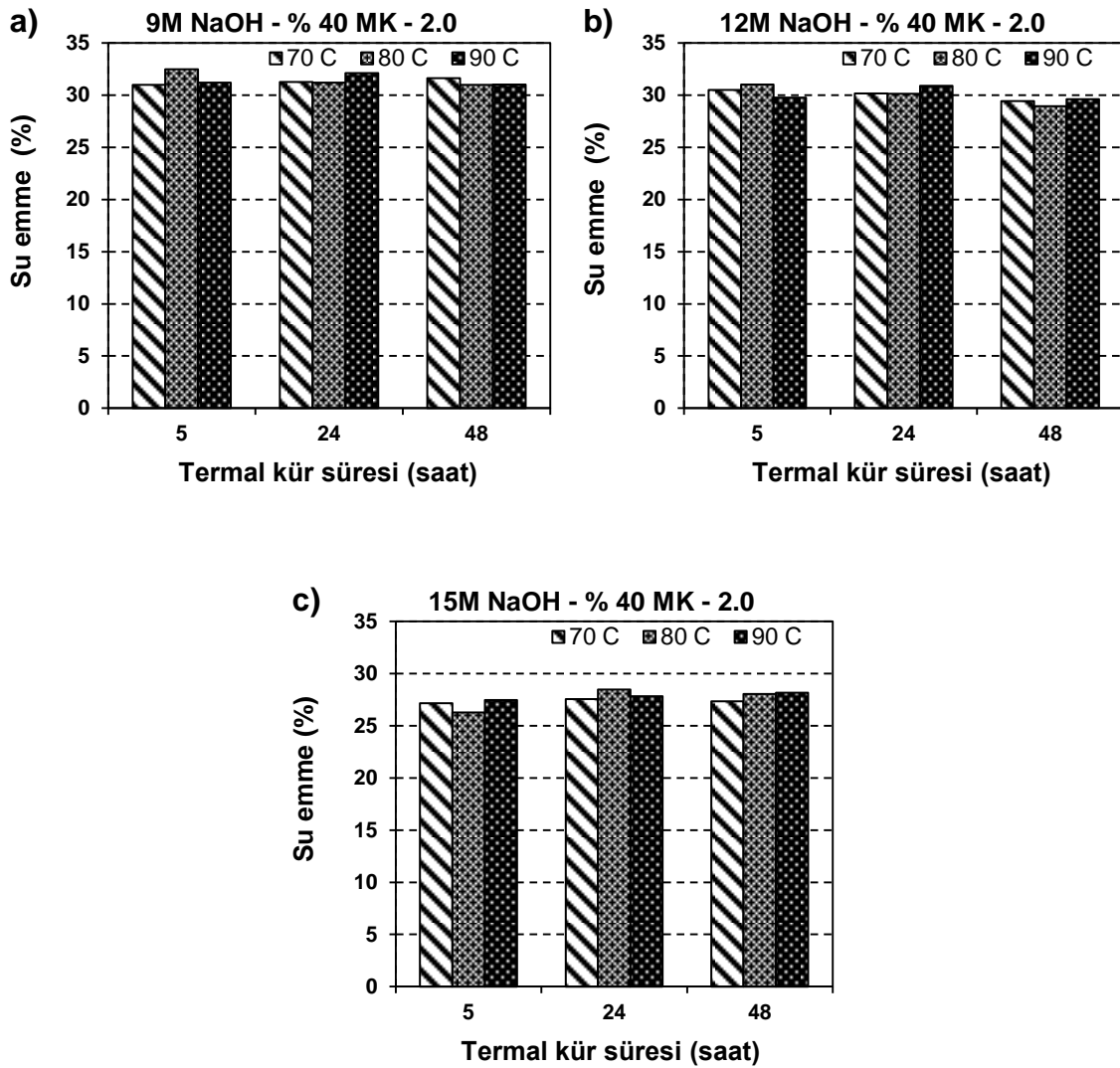
Şekil 4.15 Ağırlıkça % 20 metakaolin içerikli geopolimer pastaların ağırlıkça su emme oranları.

Şekil 4.16'da, % 40 MK katkılı geopolimer pastalara ait su emme oranları verilmiştir. Grafiklerde de görüldüğü üzere kullanılan NaOH konsantrasyonunun su emme değerlerini farklı oranlarda etkilediği gözlenmiştir. 9M NaOH ile aktifleştirilen geopolimer pastalara ait veriler incelendiğinde; 70 °C'de kür edilen örneklerin uzayan kür süreleri ile birlikte su emme oranlarının arttığı, 80 °C'de kür edilen örneklerde ise uzayan kür süreleri ile birlikte su emme oranlarının azaldığı gözlenmiştir. Tüm kür sürelerinde uygulanan kür sıcaklığı örnekler üzerinde farklı sonuçlar vermiştir (Şekil 4.16 (a)).

12M NaOH ile aktifleştirilmiş geopolimer pastalarda (Şekil 4.16 (b)), örneklerin su emme oranları % 28.9 - % 31.0 arasında değişmiştir. Bununla birlikte üretilen tüm

örnek gruplarında 70 ve 80 °C’de kür edilen örneklerde uzayan kür süreleri örneklerin su emme oranlarını azaltmıştır.

15M NaOH ile aktifleştirilen geopolimer pastalarda su emme oranları diğer örneklere göre daha düşük seviyelerde gerçekleşmiştir. 15M NaOH ile aktifleştirilmiş geopolimer pastaların (Şekil 4.16 (c)), örneklerin su emme oranları % 26.3 - % 28.5 arasında değişmiştir. Pastalarda (Şekil 4.16 (c)) sadece 90 °C’de kür edilen örneklerin uzayan kür süreleri ile birlikte; 48 saat kür edilen pastalarda ise artan kür sıcaklığı ile birlikte su emme oranları artmıştır.



Şekil 4.16 Ağırlıkça % 40 metakaolin içerikli geopolimer pastaların ağırlıkça su emme oranları.

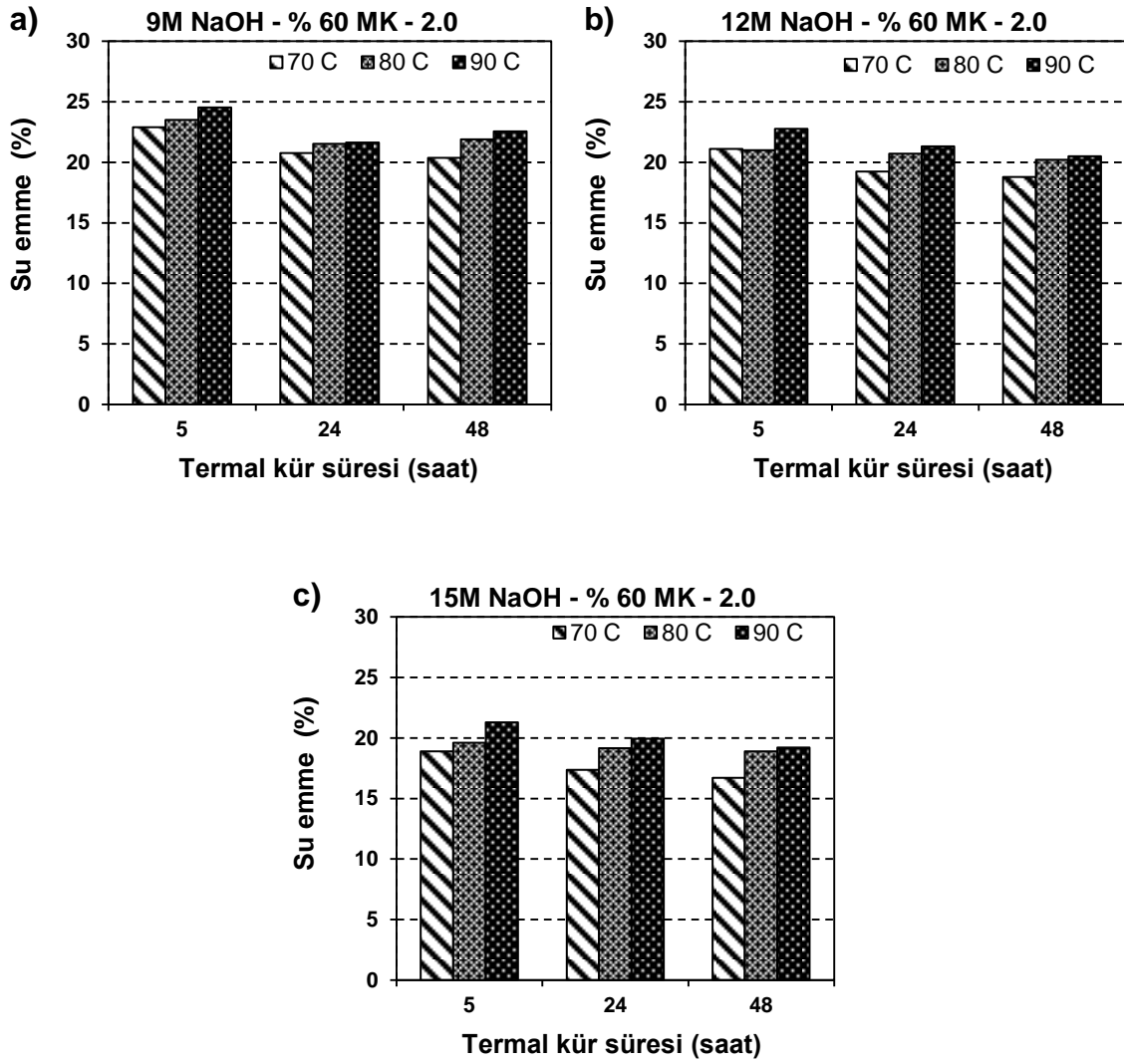


Şekil 4.17’de % 60 MK katkılı geopolimer pastalara ait su emme oranları verilmiştir. 9M NaOH ile aktifleştirilen geopolimer pasta örneklerinde sadece 70 °C’de kür edilen örneklerde artan kür süresi ile birlikte su emme oranları azalma göstermiştir. Diğer sıcaklıklarda kür edilen örneklerde ise kür süresi ile su emme oranları arasında doğrusal bir ilişki bulunmamaktadır. Pasta örneklerinde kür sıcaklıklarının artması ile su emme oranları artış göstermiştir (Şekil 4.17 (a)). Örneklerde su emme oranları % 20.4 - % 24.5 arasında değişmiştir.

12M NaOH ile aktifleştirilen örneklerde genel olarak kür sıcaklığının arttırılması ile su emme oranlarının arttığı; bunun yanında kür sürelerinin artması ile su emme oranlarının azalma eğiliminde olduğu göze çarpmıştır. Bu örnek gruplarında 5 saat kür edilen örneklerde kür sıcaklıkları ile su emme oranları arasında doğrusal bir ilişki bulunmamaktadır. Örneklerde su emme oranları % 18.8 - % 22.8 arasında değişmiştir. Tüm örnekler içerisinde 5 saat kür edilen pastalarda en yüksek su emme oranlarının elde edildiği tespit edilmiştir (Şekil 4.17 (b)).

15M NaOH ile aktifleştirilmiş (Şekil 4.17 (c)) pasta örneklerinde, tüm kür sürelerinde artan kür sıcaklıkları ile birlikte su emme oranlarının arttığı ve en yüksek su emme oranlarının 5 saat kür edilen pastalardan elde edildiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte kür sürelerinde artışın su emme oranlarını azalttığı gözlenmiştir.

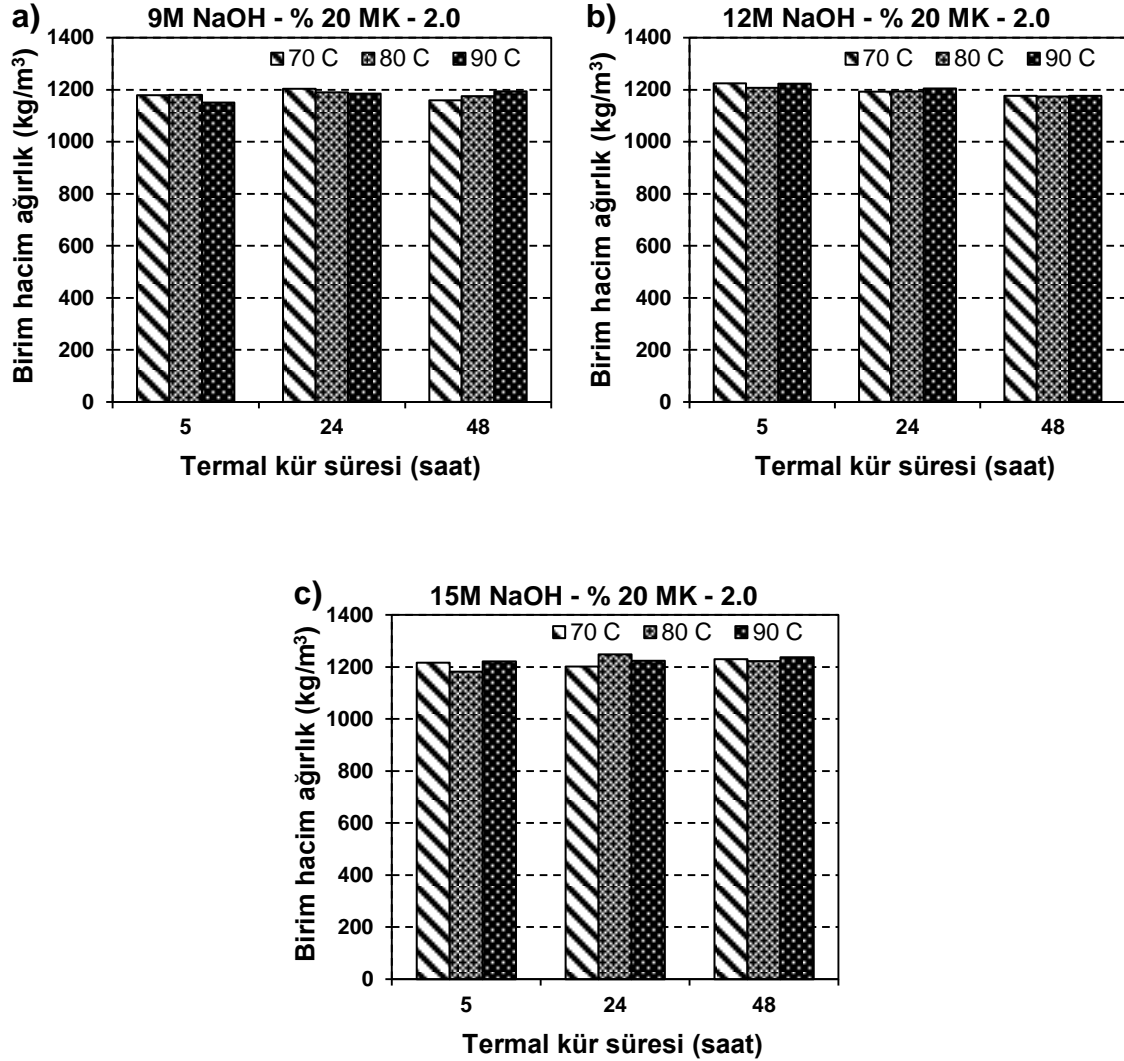
Genel olarak su emme oranları incelendiğinde, pastaların üretiminde kullanılan NaOH molaritesinin artması ile birlikte örneklerin bünyesinde geopolimerizasyon sürecinin daha iyi geliştiği ve bünyenin daha az bir boşluk oranına sahip oldukları gözlenmiştir. Dolayısıyla örneklerin hazırlanmasında kullanılan NaOH konsantrasyonunun artması ile su emme ve porozite oranlarının azaldığı belirlenmiştir. Özellikle % 40 ve % 60 MK katkılı örneklerde NaOH artışına paralel olarak su emme ve porozite oranlarında doğrusal düşüşler gerçekleşmiştir.



**Şekil 4.17** Ağırlıkça % 60 metakaolin içerikli geopolimer pastaların ağırlıkça su emme oranları.

Geopolimer pastalardan % 20 MK katkılı örneklere ait birim hacim ağırlıklar Şekil 4.18'de, görünür yoğunluklar ise Şekil 4.19'de gösterilmiştir. 9M NaOH ile aktifleştirilmiş pastalarda birim hacim ağırlıklar; 24 saat kür edilen örneklerde kür sıcaklığının artması ile azalırken, 48 saat kür edilen örneklerde artan kür sıcaklığı birim hacim ağırlıkları arttırmıştır (Şekil 4.18 (a)). Aynı örneklerin görünür yoğunluklarında ise sadece 48 saat kür edilen örneklerde artan kür sıcaklığının görünür yoğunlukları arttırdığı gözlenmiştir. 9M NaOH ile aktifleştirilen örneklerde sadece 80 °C'de kür edilen örneklerin kür sürelerinin artması ile görünür yoğunlukları azaltmıştır (Şekil 4.19 (a)).

12M NaOH ile aktive edilmiş geopolimer pastalarda 24 saat kür edilen örneklerde uygulanan kür süresinin artması ile birim hacim ağırlıklar artarken, diğer kür sürelerinde uygulanan kür sıcaklığının etkisi doğrusal değildir (Şekil 4.18 (b)). Bununla birlikte tüm kür sıcaklıklarında kür sürelerinin uzaması ile bünyede daha fazla gözenek oluşumu gerçekleşmesine bağlı olarak örneklerin birim hacim ağırlıkları azalmıştır.

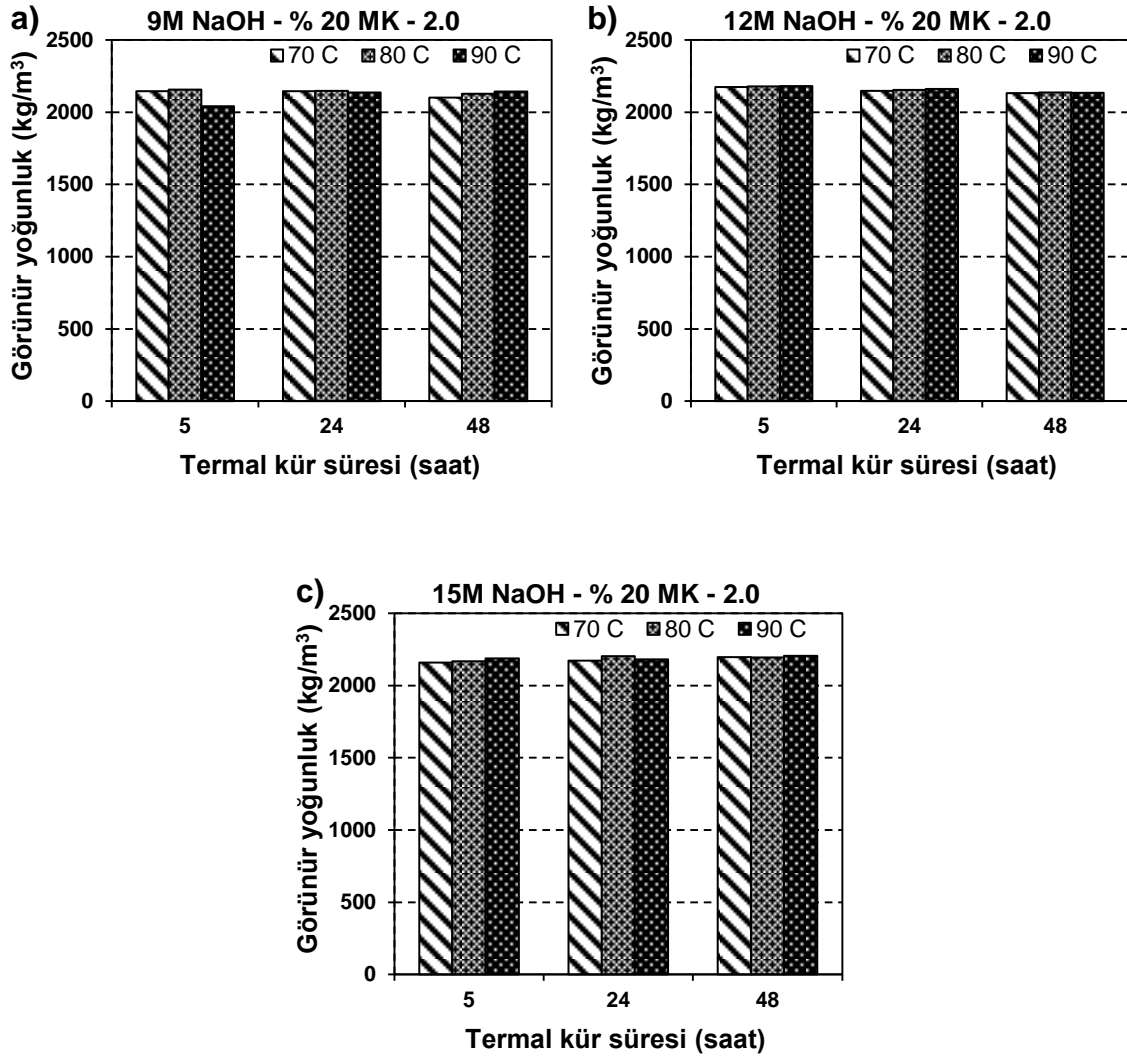


Şekil 4.18 Ağırlıkça % 20 metakaolin içerikli geopolimer pastaların birim hacim ağırlıkları.

12M NaOH ile aktive edilen örneklerin görünür yoğunluk değerleri incelendiğinde ise örneklerde kür süresinin uzamasıyla yoğunluk değerleri doğrusal olarak azalmış, kür sıcaklığının arttırılmasıyla da artmıştır (Şekil 4.19 (b)).

15M NaOH ile aktive edilmiş 70 ve 80 °C’de kür edilen pastalarda kür süresinin birim hacim ağırlıklara etkisi net değildir. 90 °C’de kür edilen örneklerde, uygulanan kür süresinin artması ile birlikte örneklerin birim hacim ağırlıkları artmıştır (Şekil 4.18 (c)).

15M NaOH ile aktive edilen geopolimer pastaların birim hacim ağırlık ve görünür yoğunluk değerleri bir arada değerleri değerlendirildiğinde, genellikle uygulanan kür sıcaklıklarının ve sürelerinin değerler üzerindeki etkisinin değişken olduğu ve doğrusal bir ilişkinin oluşmadığı gözlenmiştir.

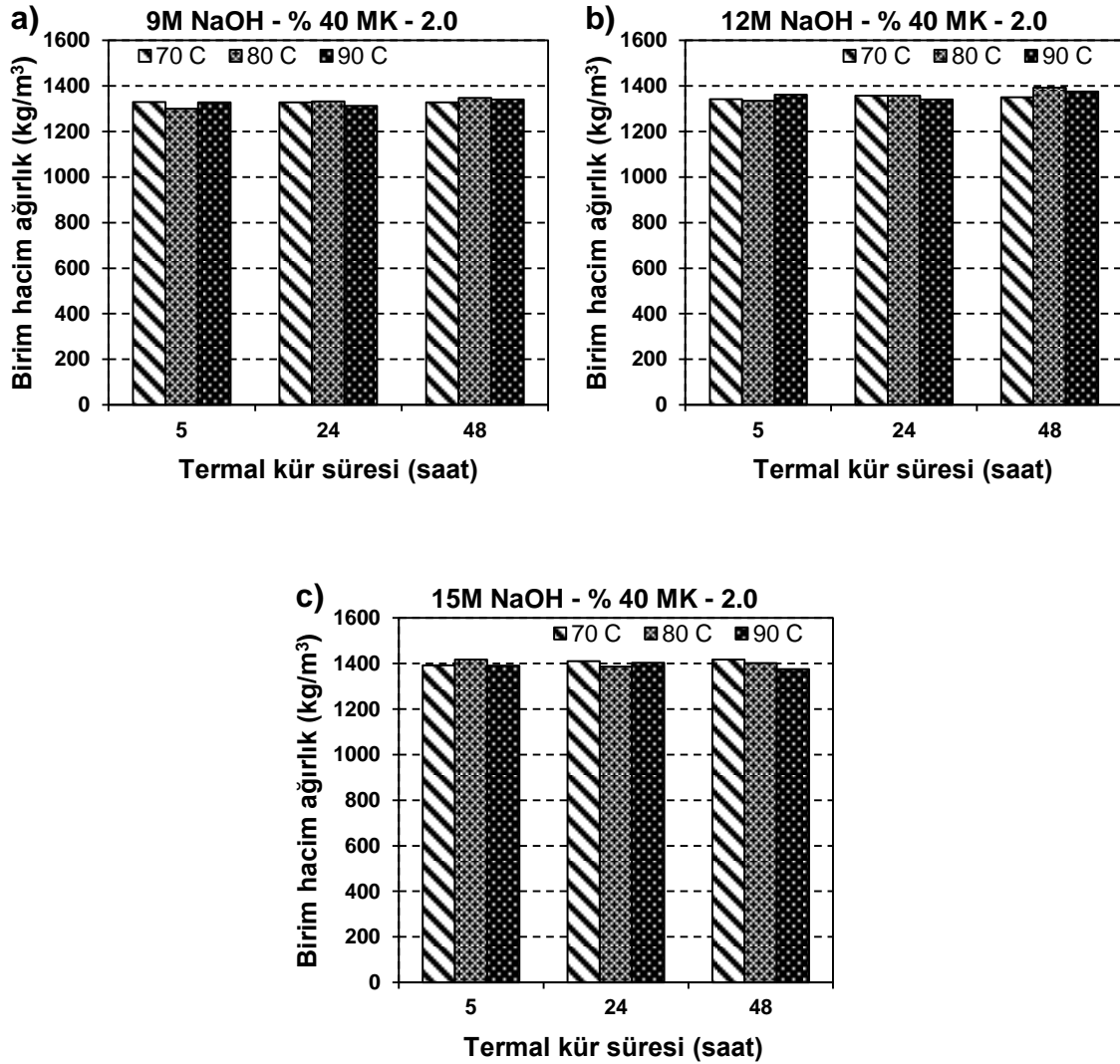


Şekil 4.19 Ağırlıkça % 20 metakaolin içerikli geopolimer pastaların görünür yoğunlukları.

Metakaolin katkısının % 20 olarak kullanıldığı geopolimer pastalarda; 9M, 12M ve 15M NaOH ile aktive edilmiş örneklerden elde edilen birim hacim ağırlık değerleri

sırasıyla  $1150.2 \text{ kg/m}^3$  -  $1203.1 \text{ kg/m}^3$ ;  $1174.4 \text{ kg/m}^3$  -  $1224.3 \text{ kg/m}^3$ ;  $1182.2 \text{ kg/m}^3$  -  $1248.5 \text{ kg/m}^3$  arasında değişmektedir.

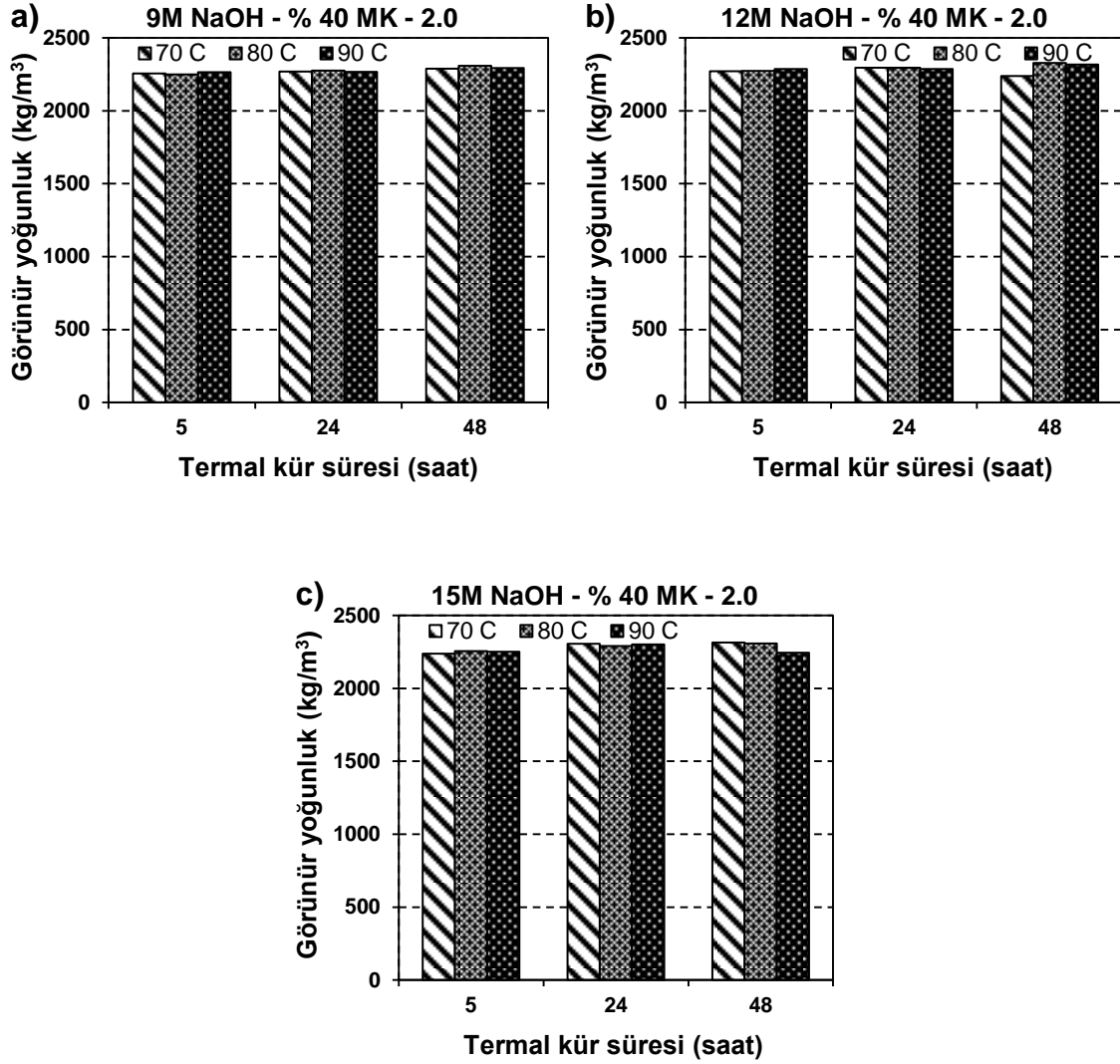
Metakaolin katkısının % 20 olarak kullanıldığı geopolimer pastalarda; 9M, 12M ve 15M NaOH ile aktive edilmiş örneklerden elde edilen görünür yoğunluk değerleri ise sırasıyla  $2042.0 \text{ kg/m}^3$  -  $2156.7 \text{ kg/m}^3$ ;  $2131.6 \text{ kg/m}^3$  -  $2180.9 \text{ kg/m}^3$ ;  $2159.4 \text{ kg/m}^3$  -  $2204.6 \text{ kg/m}^3$  arasında değişmiştir.



Şekil 4.20 Ağırlıkça % 40 metakaolin içerikli geopolimer pastaların birim hacim ağırlıkları.

Geopolimer pastalardan % 40 MK katkılı örneklere ait birim hacim ağırlık ve görünür yoğunluk değerleri Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’de gösterilmiştir. 9M NaOH ile aktive

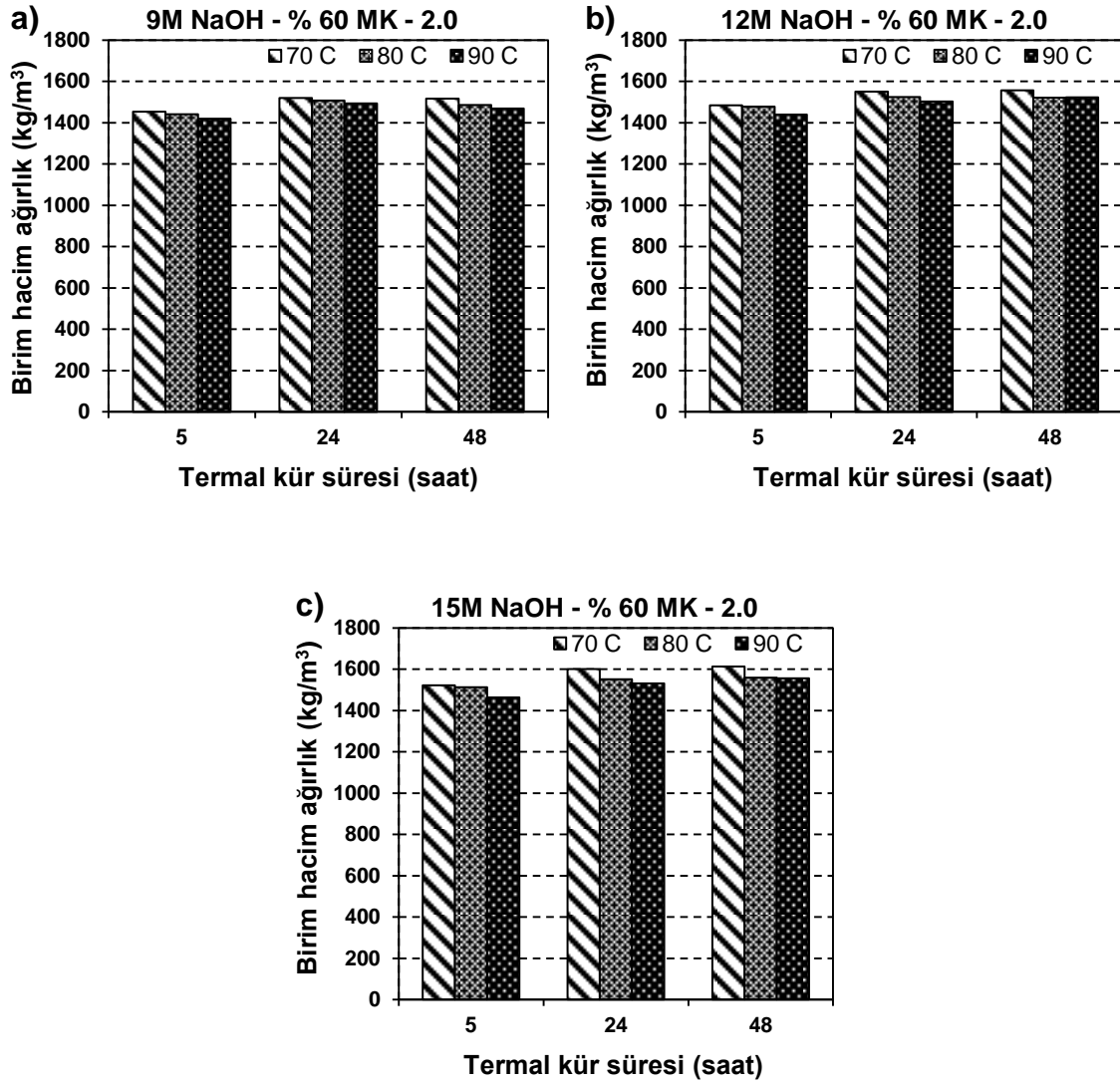
edilen ve 80 °C’de kür edilen örneklerde uygulanan kür süresinin artması ile birlikte birim hacim ağırlık değerlerinin arttığı görülmüştür (Şekil 4.20 (a)). Aynı örneklere uygulanan kür süresinin artması ise görünür yoğunluk değerlerini arttırıcı bir etki oluşturmuştur (Şekil 4.21 (a)). Bununla birlikte aynı kür süreleri dikkate alındığında, artan kür sıcaklığının görünür yoğunluk değerleri üzerine etkisi değişkendir.



**Şekil 4.21** Ağırlıkça % 40 metakaolin içerikli geopolimer pastaların görünür yoğunlukları.

12M NaOH ile aktive edilen örneklerde sadece 80 °C’de kür uygulaması yapıldığında uygulanan kür süresinin arttırılması ile birim hacim ağırlıklar artmıştır (Şekil 4.20 (b)). 5 saat kür edilen örneklerin görünür yoğunlukları artarken (Şekil 4.21 (b)); 48 saat kür edilen örneklerde yoğunluk değerleri azalmıştır.

15M NaOH ile aktive edilen ve 70 °C’de kür edilen örneklerde artan kür süresi ile birlikte birim hacim ağırlıklar artmıştır. 48 saat kür edilen örneklerde ise uygulanan kür sıcaklığının artması birim hacim ağırlıkları azaltmıştır (Şekil 4.20 (c)). 70 ve 80 °C’de kür edilen örneklerde artan kür süresinin görünür yoğunluk değerlerini arttırdığı tespit edilmiştir (Şekil 4.21 (c)). 48 saat kür edilen örneklerde ise kür sıcaklığının artırılması yoğunluk değerlerini azaltmıştır.



Şekil 4.22 Ağırlıkça % 60 metakaolin içerikli geopolimer pastaların birim hacim ağırlıkları.

Metakaolin katkısının % 40 olarak kullanıldığı geopolimer pastalarda; 9M, 12M ve 15M NaOH ile aktive edilmiş örneklerden elde edilen birim hacim ağırlık değerleri sırasıyla  $1299.9 \text{ kg/m}^3 - 1346.3 \text{ kg/m}^3$ ;  $1333.8 \text{ kg/m}^3 - 1391.2 \text{ kg/m}^3$ ;  $1374.7 \text{ kg/m}^3 -$

1417.5 kg/m<sup>3</sup> arasında değişmektedir. Metakaolin katkısının % 40 olarak kullanıldığı geopolimer pastalarda; 9M, 12M ve 15M NaOH ile aktive edilmiş örneklerden elde edilen görünür yoğunluk değerleri ise sırasıyla 2248.8 kg/m<sup>3</sup> – 2308.8 kg/m<sup>3</sup>; 2238.3 kg/m<sup>3</sup> – 2328.6 kg/m<sup>3</sup>; 2238.1 kg/m<sup>3</sup> – 2313.8 kg/m<sup>3</sup> arasında değişmiştir

Şekil 4.22’de, % 60 MK katkılı geopolimer pastalara ait yoğunluk değerleri gösterilmiştir. Elde edilen verilere göre, 9M NaOH ile aktive edilmiş ve 70 °C’de kür edilen örneklerde uygulanan kür süresinin uzaması ile birlikte birim hacim ağırlıklar azalmıştır. Bununla birlikte tüm kür sürelerinde artan kür sıcaklığı birim hacim ağırlıkları azaltmıştır (Şekil 4.22 (a)).

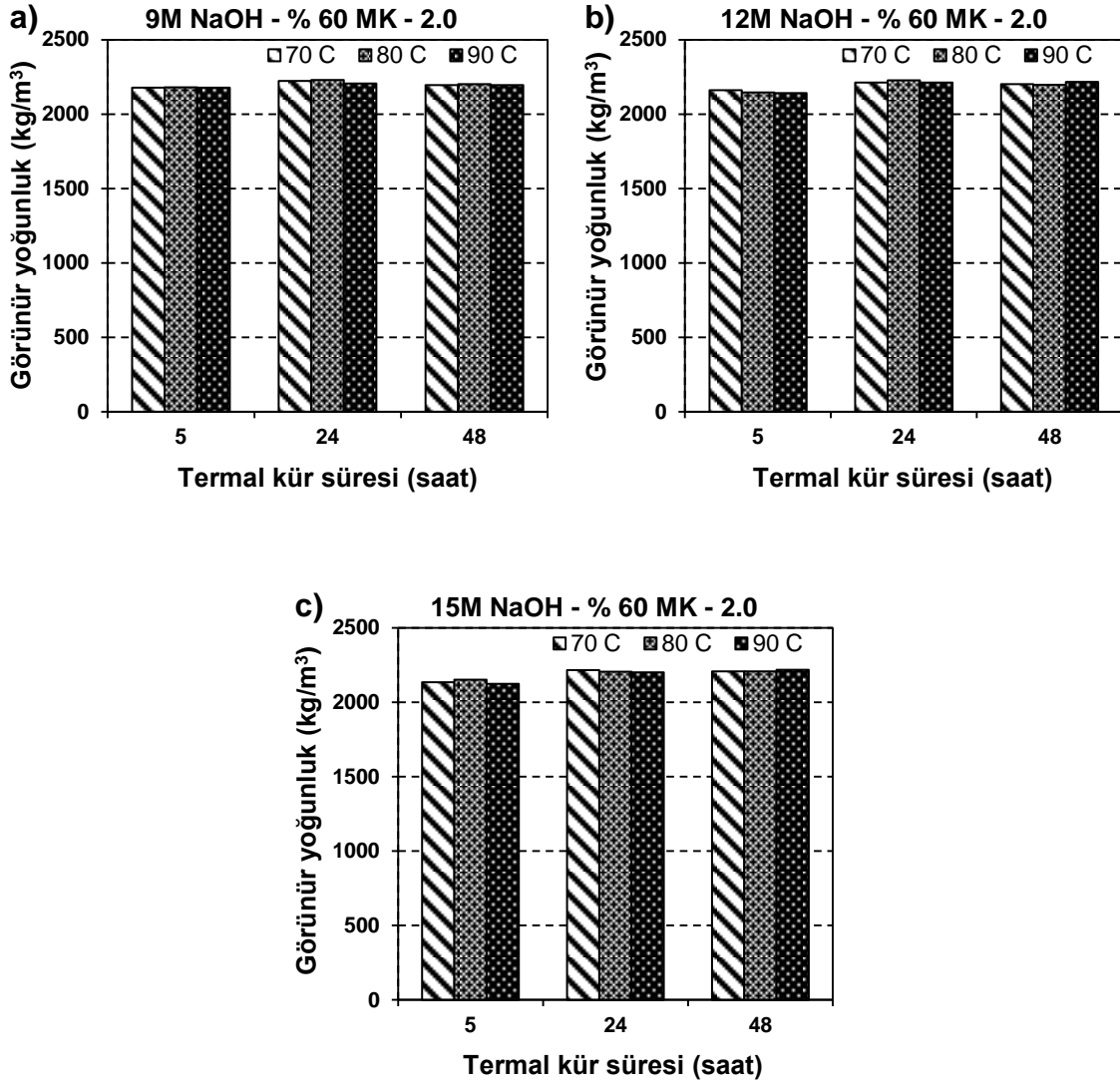
Aynı geopolimer pastaların görünür yoğunluk değerleri incelendiğinde örneklerin görünür yoğunluklarının birbirine çok yakın değerlerde olduğu görülmüştür (Şekil 4.23 (a)). 12M NaOH ile aktive edilmiş örneklerin birim hacim ağırlıkları Şekil 4.22 (b)’de gösterilmiştir. Örneklerde uygulanan kür sıcaklığının azalması ve uygulanan kür süresinin artması ile birlikte birim hacim ağırlıklar artma eğilimindedir.

15M NaOH ile aktive edilmiş örneklerde, tüm kür sıcaklıklarında uygulanan kür süresinin artması birim hacim ağırlıkları arttırırken, uygulanan kür sıcaklıklarının artması birim hacim ağırlıkları düşürmüştür (Şekil 4.22 (c)).

Metakaolin katkısının % 60 olarak kullanıldığı geopolimer pastalarda; 9M, 12M ve 15M NaOH ile aktive edilmiş örneklerden elde edilen birim hacim ağırlık değerleri sırasıyla 1419.1 kg/m<sup>3</sup> – 1520.6 kg/m<sup>3</sup>; 1439.9 kg/m<sup>3</sup> – 1557.4 kg/m<sup>3</sup>; 1462.5 kg/m<sup>3</sup> – 1612.4 kg/m<sup>3</sup> arasında değişmektedir.

Metakaolin katkısının % 60 olarak kullanıldığı geopolimer pastalarda; 9M, 12M ve 15M NaOH ile aktive edilmiş örneklerden elde edilen görünür yoğunluk değerleri ise sırasıyla 2176.6 kg/m<sup>3</sup> – 2229.8 kg/m<sup>3</sup>; 2141.7 kg/m<sup>3</sup> – 2227.5 kg/m<sup>3</sup>; 2124.0 kg/m<sup>3</sup> – 2218.0 kg/m<sup>3</sup> arasında değişmiştir.





Şekil 4.23 Ağırlıkça % 60 metakaolin içerikli geopolimer pastaların görünür yoğunlukları.

#### 4.4. Geopolimer Pastaların Basınç Dayanım Özellikleri

Kısa zaman periyotları için daha yüksek dayanımların amaçlandığı durumlarda, örneklerin hızlı dayanım kazanabilmeleri için kür sıcaklığının artırılması önemlidir (De Vargas *et al.* 2011). Alkali konsantrasyonundaki artış geopolimerlerin dayanım gelişimini arttırmaktadır fakat fazla hidroksit iyon konsantrasyonu çok erken yaşlarda alüminosilikat jel çökmesine sebep olmakta ve geopolimerlerin düşük dayanımına sebep olmaktadır (Lee and Van Deventer 2002). Daha yüksek NaOH konsantrasyonu hammadde partiküllerini çözmede daha etkindir ve daha iyi bir geopolimerizasyonla

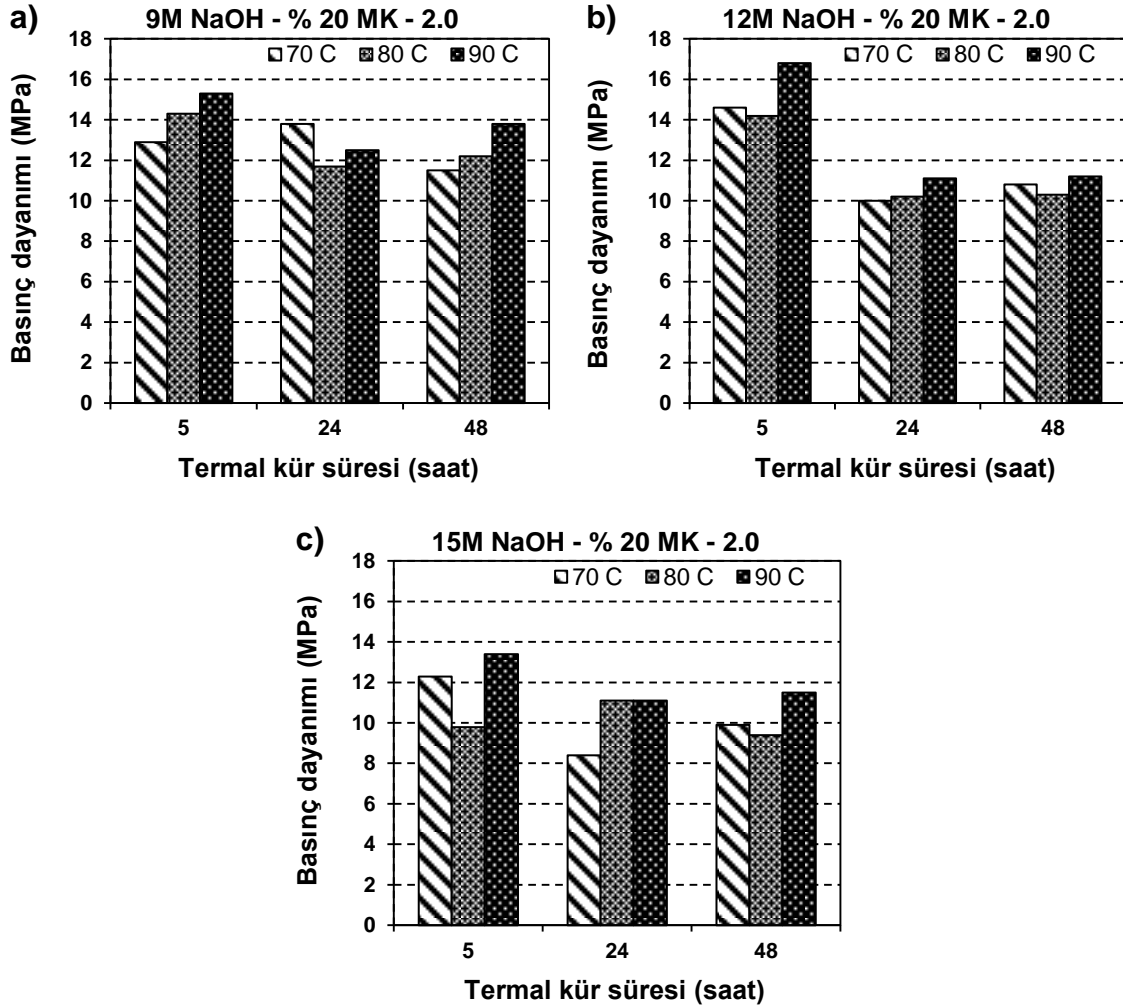
sonuçlanabilmektedir (Alvarez-Ayuso *et al.* 2008). Geopolimer malzemenin mekanik dayanımında kullanılan alkali tuzun konsantrasyonu, kür sıcaklığından daha önemlidir. Aynı zamanda sodyum silikat solüsyonu ile NaOH beraber kullanıldığında erken yaşlarda dayanıma katkı yaptığı fakat uzun dönemlerde dayanımı önemli bir şekilde etkilemediği belirtilmektedir (Fernandez-Jimenez *et al.* 1999).

Geopolimerlerin basınç dayanımlarına aktivatör konsantrasyonu önemli etki yapmaktadır. İdeal aktivatör konsantrasyonu geopolimerin dayanımında artış gerçekleştirmektedir. Bu ideal konsantrasyonun ötesinde malzemenin geopolimer yapısını değiştirebilecek alkali aktifleştirilmiş matris de bulunan serbest OH<sup>-</sup> iyonlarından dolayı malzemenin mekanik özelliklerinde kayıplar da oluşabilmektedir. Geopolimerlerin yaşı ve kür sıcaklığı da örneklerin basınç dayanımında etkili olan diğer değişkenlerdir. Bununla birlikte bu değişkenlerin etkili olabilmesi için geopolimerizasyon süresinde ortamda yeterli aktivatör konsantrasyonu bulunmalıdır (De Vargas *et al.* 2011).

Tez çalışmasında üretilen geopolimer pastaların basınç dayanımları sırasıyla Şekil 4.24 – Şekil 4.26’da gösterilmiştir. Elde edilen verilere göre; 9M NaOH ile aktive edilmiş örneklerde düşük alkali ortamından dolayı, hammadde partiküllerinden düşük miktarda Si ve Al iyonları çözülmüş ve neticede nispeten daha düşük basınç dayanım değerleri elde edilmiştir (Şekil 4.24). Buna ilaveten düşük bir alkali solüsyonunun kullanılması ile zayıf bir kimyasal reaksiyon oluşacağı da literatürde belirtilmiştir (Puertas *et al.* 2000). Yüksek konsantrasyonlu NaOH çözeltisinde silika ve alüminanın daha fazla süzülmesinden dolayı, hazırlanan örneklerin basınç dayanımlarının NaOH konsantrasyonunun artmasıyla artacağı beklenmektedir (Chindaprasirt *et al.* 2009). Yüksek molaritede (15M), OH<sup>-</sup> konsantrasyonu yeterli derecede yüksek olduğundan hammaddenin çözünmesi hızlanmakta fakat bünyede polikondensasyon aksamaktadır (Zuhua *et al.* 2009). Metakaolin katkısının % 20 olduğu ve 9M NaOH ile aktive edilmiş örneklerin basınç dayanım değerleri Şekil 4.23’de gösterilmiştir. Geopolimer malzeme bünyesinde, örneklerde en yüksek basınç dayanımı 15.3 MPa ile 90 °C’de ve 5 saat kür edilen pastalardan elde edilmiştir (Şekil 4.24 (a)). Bununla birlikte 5 ve 48 saatlik kür sürelerinde, örneklerin maruz kaldığı termal kür sıcaklıklarındaki artışlar bünyede daha

fazla geopolimerleşme sağlayarak basınç dayanım değerlerini arttırmıştır.

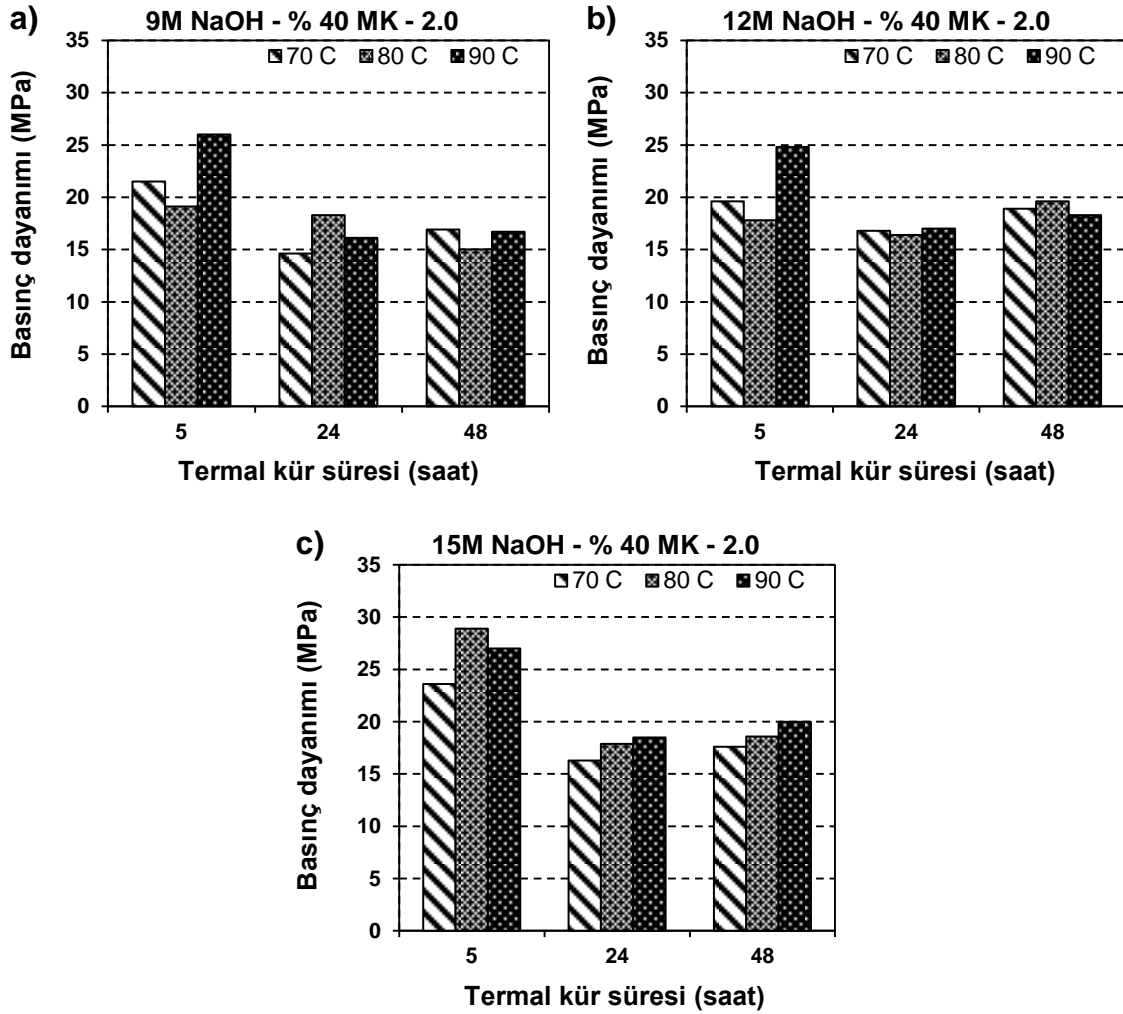
Geopolimer pastaların hazırlanmasında kullanılan NaOH molaritesindeki artışlar genel olarak örneklerin basınç dayanımlarını arttırmıştır. 12M NaOH ile aktive edilmiş örneklerde ve 90 °C'de 5 saat kür edilen pastalarda 16.8 MPa ile en yüksek basınç dayanım değeri elde edilmiştir (Şekil 4.24 (b)).



Şekil 4.24 Ağırlıkça % 20 metakaolin içerikli geopolimer pastaların basınç dayanımları.

15M NaOH ile aktive edilen örneklerden (Şekil 4.24 (c)) elde edilen basınç dayanım değerlerine göre pastalardan 90 °C'de 5 saat kür edilen örneklerden 13.4 MPa ile en yüksek basınç dayanım değerleri elde edilmiştir.

Metakaolin katkısının % 20 olduğu geopolimer pastalarda uygulanan kür sıcaklığının ve kür süresinin basınç dayanım değerleri üzerine etkisinin genel anlamda değişken olduğu gözlenmiştir. Uygulanan kür sıcaklıkları ve kür süreleri dikkate alındığında ise en yüksek basınç dayanım değerlerinin 90 °C kür uygulamalarından elde edildiği gözlenmiştir. Aynı zamanda pastalarda en uygun kür süresinin 5 saat olduğu göze çarpmaktadır. Tüm veriler incelendiğinde ise % 20 MK katkılı geopolimer pastalar için 90 °C’de 5 saatlik kür uygulamasının ideal termal kür prosesi olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.25 Ağırlıkça % 40 metakaolin içerikli geopolimer pastaların basınç dayanımları.

Geopolimer pastaların üretiminde kullanılan MK katkısının arttırıldığı ve bu katkının % 40 olduğu örneklere ait basınç dayanım değerleri Şekil 4.25’de gösterilmiştir. Burada da

görülebileceği üzere karışımlara eklenen MK katkısının % 40 olduğu örneklerde basınç dayanım değerleri önemli oranda değişiklik göstermiştir. MK katkısının artmasıyla örneklerin basınç dayanımlarında olumlu artışlar olmuştur. Üretilen geopolimer pastalarda kullanılan NaOH molaritesi dikkate alındığında her üç molaritede de en yüksek basınç dayanımlarının 5 saat kür edilen örneklerden elde edildiği görülmüştür. 9M ve 12M NaOH ile aktive edilmiş örneklerde ideal termal kür süresinin 90 °C; 15M NaOH ile aktive edilmiş geopolimer pastalarda ise ideal termal kür süresinin 80 °C olduğu belirlenmiştir.

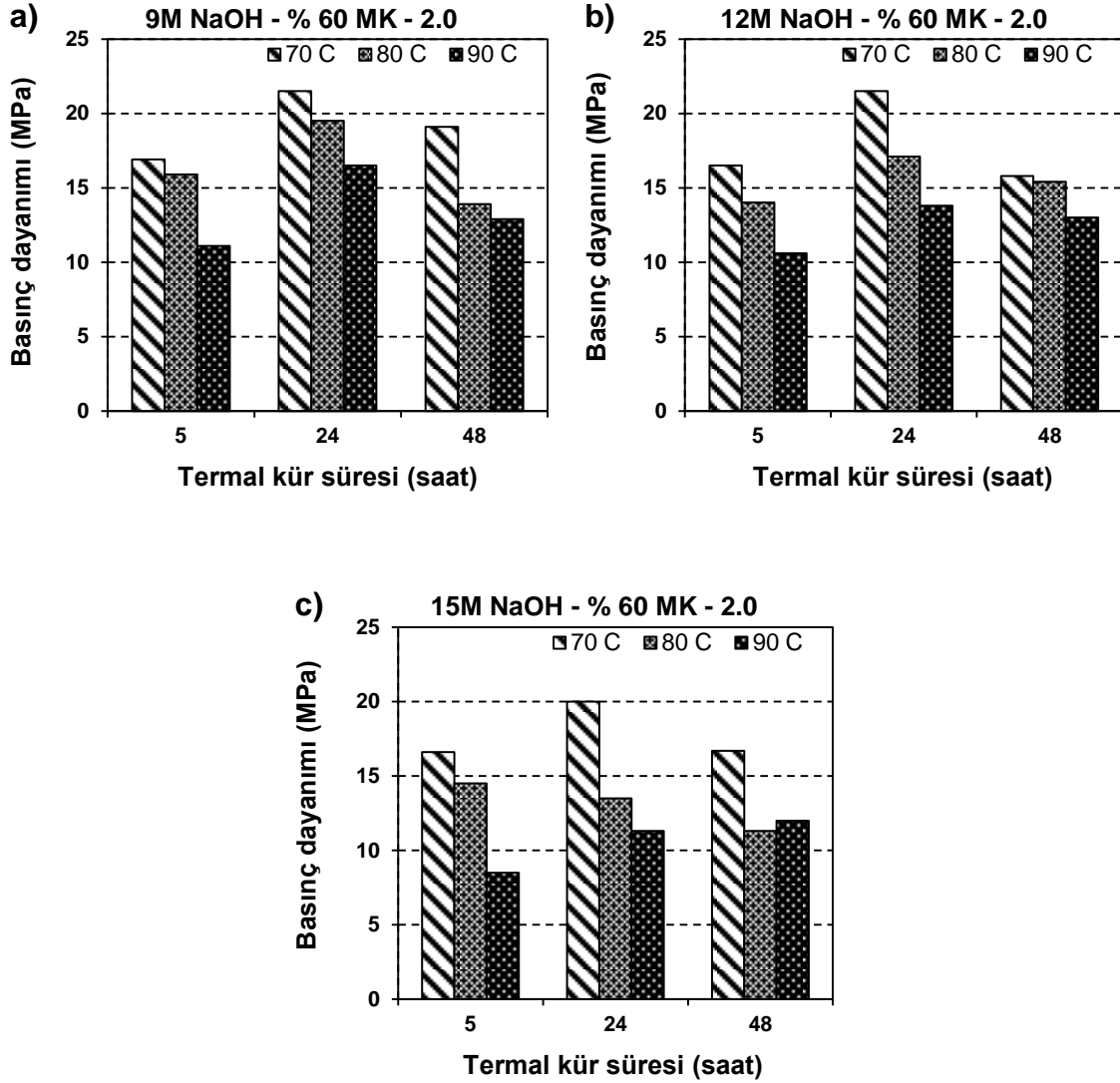
Elde edilen basınç dayanım değerleri dikkate alındığında, en yüksek basınç dayanım değeri 28.9 MPa (Şekil 4.25 (c)) olarak elde edilmiştir.

9M ve 12M NaOH ile aktive edilmiş geopolimer pastalarda uygulanan kür sıcaklığının ve kür sürelerinin örnek basınç dayanım değerlerine etkisi doğrusal değildir ve değişkendir (Şekil 4.25 (a ve b)). Bu nedenle kür prosesinde dalgalanmalar olduğu gözlenmiştir. 15M NaOH ile aktive edilen geopolimer pastalarda ise; örneklere uygulanan kür sürelerinin 24 ve 48 saat olduğu örneklerde uygulanan kür sıcaklığının artması ile birlikte örneklerin basınç dayanımları artmıştır.

Bu verileri dikkatle incelememiz durumunda % 40 MK katkılı geopolimer pastalarda kullanılan NaOH konsantrasyon oranının 15M olduğu örneklerde, uygulanan kür sıcaklığı ve sürelerinin sonuçlar üzerinde belirgin bir etkisi olduğu görülmektedir. Bu aşamada yüksek konsantrasyon kullanılması durumunda termal kür prosesinin malzeme bünyesindeki kimyasal reaksiyonlar üzerinde etkili olduğu ortaya çıkmıştır. Literatürde verilen bilgiler incelendiğinde de geopolimerizasyon süresince NaOH molaritesinin kür sıcaklık ve sürelerine göre kimyasal aktivasyonda daha önemli olduğu belirtilmiştir. Bu aşamada nispeten daha düşük molarite oranları ile aktive edilen geopolimer pastaların basınç dayanımları üzerine, uygulanan kür prosesinin etkilerinin değişken olduğu söylenebilmektedir.

Şekil 4.26'da geopolimer pasta üretiminde % 60 MK kullanılan örneklere ait basınç dayanım değerleri gösterilmiştir. Basınç dayanım verileri dikkatlice incelendiğinde;

geopolimer pasta üretiminde kullanılan MK katkı oranının örneklerin basınç dayanım değerleri üzerine önemli bir etkisi olduğu ortaya çıkmıştır. Grafikler incelendiğinde geopolimer pasta üretiminde en ideal MK katkı oranının % 40 olduğu, bu oranı % 60 MK katkısının izlediği saptanmıştır. Geopolimer pastalarda genel olarak en düşük basınç dayanımları % 20 MK katkılı örneklerde elde edilmiştir.



Şekil 4.26 Ağırlıkça % 60 metakaolin içerikli geopolimer pastaların basınç dayanımları.

Şekil 4.26'daki grafiklerde de görüldüğü üzere % 60 MK katkılı geopolimer pastalarda, diğer MK katkı oranlarından farklı olarak en ideal termal kür sıcaklığının 70 °C olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla geopolimer pasta üretiminde % 20 ve % 40 MK katkılı

örneklerde ideal kür sıcaklığının 90 °C olduğu düşünüldüğünde, bünyedeki MK katkı oranının artmasıyla gerekli olacak termal kür sıcaklıklarının belirli bir oranda azalacağı da tespit edilmiştir. Bununla birlikte % 20 ve % 40 MK katkılı geopolimer pastalarda en ideal kür süresinin 5 saat'lik kür süreleri olduğu; % 60 MK katkılı geopolimer pastalarda ise en ideal termal kür süresinin 24 saat olduğu da ortaya çıkarılmıştır.

Geopolimer pastalarda kullanılan MK oranının % 60 olduğu örneklerde uygulanan kür sıcaklıklarının artması ile elde edilen basınç dayanım değerleri doğrusal olarak azalmıştır. Metakaolin malzemesi kil kökenlidir ve kil benzeri malzemelerinde suyu emen ve adsorbe eden bir özelliği bulunmaktadır. Bu özelliklerinde dolayı, geopolimer pastalara uygulanan kür sıcaklıklarının yükselmesi durumunda MK malzemesinin bünyesine aldığı suyu daha erken kaybetmesi neticesinde daha zayıf bir alkali reaksiyonun oluştuğu ve bu nedenle artan sıcaklıkların basınç dayanımları etkilediği düşünülmektedir.

% 60 MK katkılı geopolimer pasta örneklerinde 9M ile 12M NaOH ile aktive edilmiş örneklerin 70 °C'de 24 saat süre ile kür edilmeleri durumunda 21.5 MPa ile en yüksek basınç dayanım değerleri elde edilmiştir (Şekil 4.26 (a ve b)).

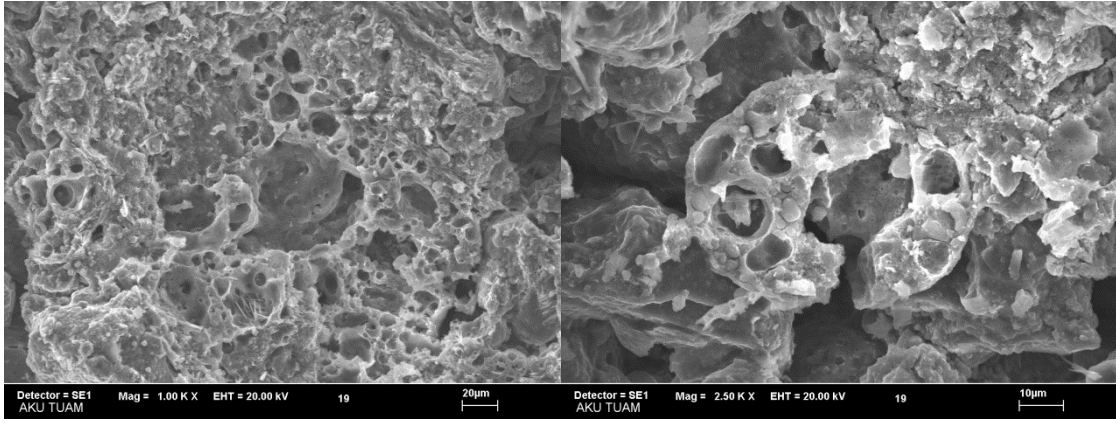
Geopolimer pastaların hazırlanmasında kullanılan MK katkı oranının miktarına göre, örneklerden elde edilen en yüksek basınç dayanım değerlerinin farklı molaritelerde ortaya çıktığı gözlenmiştir. Buna göre MK katkı oranının % 20 olduğu geopolimer pastalarda 12M NaOH (Şekil 4.24 (b)); % 40 olduğu geopolimer pastalarda 15M NaOH (Şekil 4.25 (c)) ve % 60 olduğu geopolimer pastalarda ise 9M NaOH konsantrasyon oranlarının en yüksek basınç dayanım değerlerini sağladığı tespit edilmiştir (Şekil 4.26 (a)).

Genel olarak basınç dayanım değerleri incelendiğinde, geopolimer pasta üretiminde kullanılan MK katkısının % 40'a kadar yapıldığı örneklerde ideal termal kür sıcaklığının 90 °C ve ideal kür süresinin 5 saat olduğu; MK katkısının % 60 olduğu pastalarda ise ideal termal kür sıcaklığı ve süresinin sırasıyla 70 °C ve 24 saat olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte genel olarak en yüksek basınç dayanım değerleri % 40

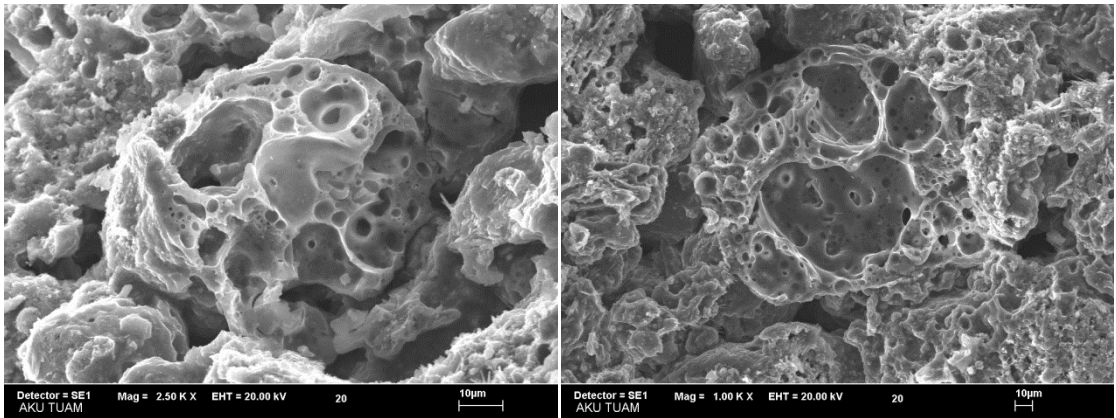
MK katkılı geopolimer pastalardan; en düşük basınç dayanım değerleri ise % 20 MK katkılı geopolimer pastalardan elde edilmiştir. Sonuç olarak geopolimer pastaların basınç dayanım değerleri 8.4 MPa – 28.9 MPa arasında değişkenlik göstermiştir.

#### 4.5. Geopolimer Pastaların SEM Görüntüleri

Geopolimer pastalardan elde edilen SEM görüntüleri Şekil 4.1 – Şekil 4.5’de gösterilmiştir. Elde edilen görüntüler incelendiğinde bünyedeki MK katkı oranının artması ile örnek morfolojisinin daha yoğun olduğu ve gözenekliliğin azaldığı gözlenmiştir.



**Resim 4.1** Geopolimer pastalardan P055 örneğine ait SEM resimleri.

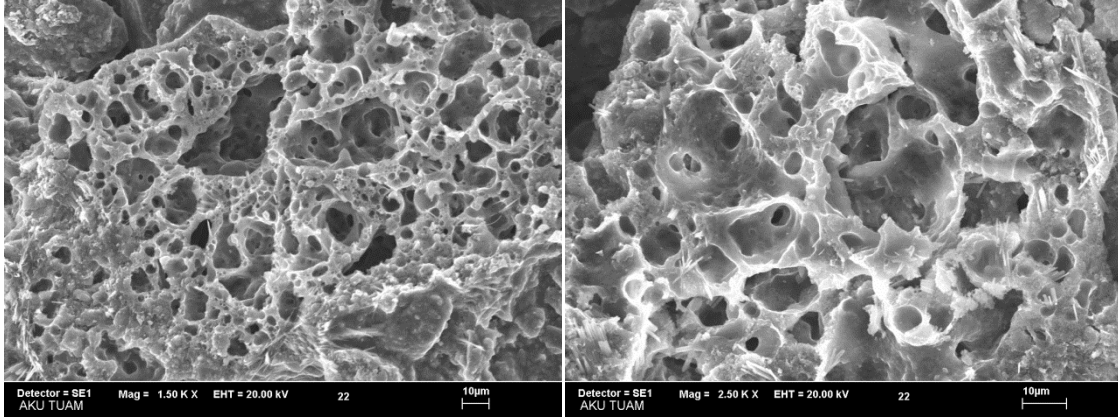


**Resim 4.2** Geopolimer pastalardan P058 örneğine ait SEM resimleri.

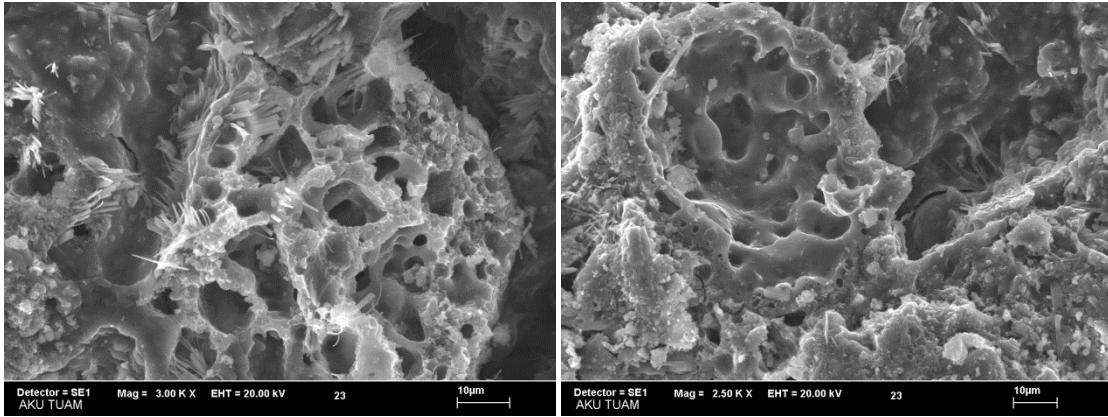
Geopolimer pastaların üretiminde kullanılan NaOH molaritesindeki artışların geopolimerleşme mekanizmasını arttırdığı ve bunun neticesinde örnek bünyesinde ağısı



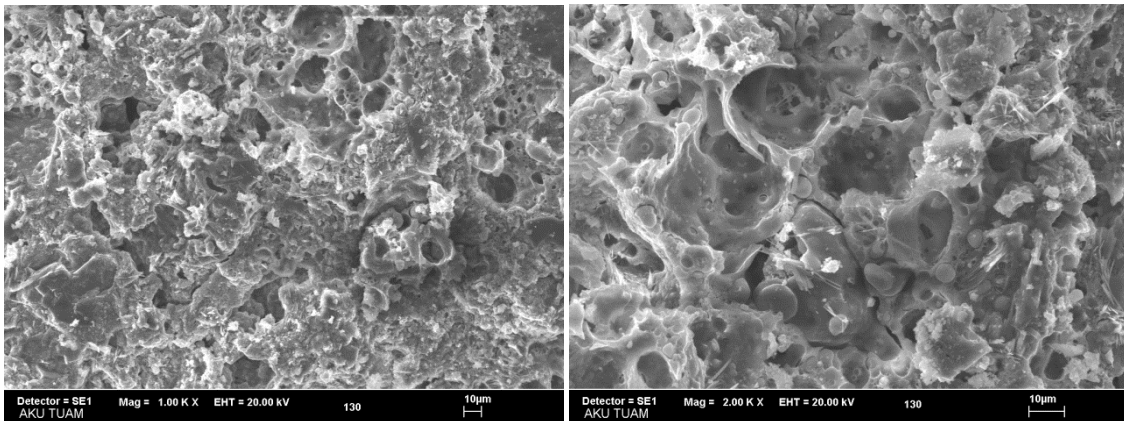
yapının arttığı gözlenmiştir. SEM görüntüleri çekilen örnekler içerisinde en yüksek ağırlık ve gözenek yapısına sahip olan P064 nolu geopolimer pastalarda 26 MPa'lık basınç dayanımı elde edilmiştir (Resim 4.3).



**Resim 4.3** Geopolimer pastalardan P064 örneğine ait SEM resimleri.



**Resim 4.4** Geopolimer pastalardan P067 örneğine ait SEM resimleri.



**Resim 4.5** Geopolimer pastalardan P023 örneğine ait SEM resimleri.

## 5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Geopolimer üretiminde kullanılan uçucu kül, XRF analizlerine göre F sınıfı uçucu kül sınıfında yer almaktadır. Metakaolin malzemesinde ise kalsinasyon işleminden sonra kaolin malzemesine göre toplam “SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>” oranında % 11.24'lük bir artış gerçekleşmiştir. Dolayısıyla metakaolin malzemesinin geopolimerizasyon süresince daha reaktif bir davranış göstermesi beklenmiştir.

XRD analizlerinden elde edilen verilere göre uçucu külden; kuvars, magnetit, hematit ve albit gibi mineraller bulunurken; Kaolin'de kuvars, kaolinit ve alunit gibi mineraller, metakaolin bünyesinde ise kuvars ve mullit gibi minerallerinin varlığı tespit edilmiştir.

Puzolanik aktivite deneylerinden elde edilen verilere göre; basınç dayanımı deneylerinde 7, 28 ve 90 günlük su kürü uygulanan harçlarda 1000 °C'de kalsine edilen MK katkılı örneklerin en yüksek basınç dayanım değerlerine sahip oldukları belirlenmiştir.

Bu örneklerde 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım değerleri sırasıyla; 40.0 MPa, 41.0 MPa ve 51.7 MPa olarak elde edilirken; aynı örneklerin puzolanik aktivite indeksleri ise yine sırasıyla; % 155.24, % 105.40 ve % 107.55 olmuştur. Bu örneklerde 7 günlük harçlardan 8.6 MPa, 28 günlük harçlardan 12.6 MPa ve 90 günlük harçlardan ise 12.3 MPa'lık eğilme dayanım değerleri elde edilmiştir.

Eğilme ve basınç dayanımı değerleri bir arada incelendiğinde; tüm örnek grupları ve kür süreleri de dikkate alındığında, MK üretiminde kaolin kiline uygulanan kalsinasyon sıcaklığının 1000 °C olması durumunda malzemenin puzolanik özellikler bakımından daha reaktif olduğu belirlenmiştir.

Geopolimer pastaların üretiminde MK katkı oranının % 20 olduğu örneklerde 12M; % 40 olduğu örneklerde 15M ve % 60 olduğu örneklerde ise 9M NaOH konsantrasyon oranlarının en yüksek basınç dayanım değerlerini sağladığı tespit edilmiştir.

Geopolimer pasta üretimindeki basınç dayanım değerleri incelendiğinde, % 40'a kadar MK katkısının yapıldığı örneklerde ideal termal kür sıcaklığının 90 °C ve ideal kür süresinin 5 saat olduğu; MK katkısının % 60 olduğu pastalarda ise ideal termal kür sıcaklığı ve süresinin sırasıyla 70 °C ve 24 saat olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte genel olarak en yüksek basınç dayanım değerleri % 40 MK katkılı geopolimer pastalardan; en düşük basınç dayanım değerleri ise % 20 MK katkılı geopolimer pastalardan elde edilirken, geopolimer pastaların basınç dayanım değerleri 8.4 MPa – 28.9 MPa arasında değişkenlik göstermiştir.

## 6. KAYNAKLAR

- Alvarez-Ayuso, E., Querol, X., Plana, F., Alastuey, A., Moreno, N., Izquierdo, M., Font, O., Moreno, T., Diez, S., Vazquez, E. and Barra, M. (2008). Environmental, physical and structural characterisation of geopolymer matrixes synthesised from coal (co-combustion) fly ashes. *J Hazard Mater*, **154**: 175–183.
- ASTM C 618 (2000). Standart Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, Annual Book of ASTM Standart, No. 04.02.
- Bakharev, T. (2005). Geopolymeric materials prepared using class F fly ash elevated temperature curing. *Cem Concr Res*, **35**:1224–1232.
- Chindapasirt, P., Chareerat, T. and Sirivivananon, V. (2007). Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. *Cem Concr Compos*, **29**: 224–229.
- Chindapasirt, P., Jaturapitakkul, C., Chalee, W. and Rattanasak, U. (2009). Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers. *Waste Manage*, **29**: 539–543.
- Criado, M., Palomo, A. and Fernandez-Jimenez, A. (2005). Alkali activation of fly ashes. Part 1: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products. *Fuel*, **84**: 2048–2054.
- Çelik, Ö. (2004). Farklı İnceliklerdeki Tras ve Uçucu Külün Çimento Dayanımlarına Etkisi. Pamukkale Üniversitesi, *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **10 (3)**, 333-337.
- De Vargas, A. S., Dal Molin, D. C. C., Vilela, A. C. F., Da Silva, F. J., Pavao, B. and Veit, H. (2011). The effects of Na<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub> molar ratio, curing temperature and age on compressive strength, morphology and microstructure of alkali-activated fly ash-based geopolymers, *Cement & Concrete Composites*, **33**: 653-660.
- Fernandez-Jimenez, A. and Palomo, A. (2003). Characterisation of fly ashes Potential reactivity as alkaline cements. *Fuel*, **82**: 2259–2265.
- Fernandez-Jimenez, A. and Palomo, J. (2005). Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: effect of the activator. *Cem Concr Res*, **35**: 1984–1992.

- Fernandez-Jimenez, A., Palomo, J. G. and Puertas, F. (1999). Alkali-activated slag mortars: Mechanical strength behaviour, *Cement and Concrete Research*, **29**: 1313-1321.
- Ghosh, K. and Gosh, P. (2012). Effect of % Na<sub>2</sub>O and % SiO<sub>2</sub> on apparent porosity and sorptivity of fly ash based geopolymer. *IOSR J Eng*, **2(8)**: 96–101.
- Gikunoo, E. (2004). Effect of Fly Ash Particles on the Mechanical Properties and Microstructure of Aluminium Casting Alloy A534, Master of Science, University of Saskatchewan, The College of Graduate Studies and Research, Saskatchewan, Canada.
- Güler, G., Güler E., İpekoğlu H. and Mordoğan H. (2005). Uçucu Küllerin Özellikleri ve Kullanım Alanları Dokuz Eylül Üniversitesi, Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, İzmir – Türkiye.
- Hu, M., Zhu, X. and Long, F. (2009). Alkali-activated fly ash-based geopolymers with zeolite or bentonite as additives. *Cem Concr Compos*; **31(10)**: 762–768.
- Jeyasehar, C. A., Saravanan, G. and Ramakrishnan, A. K. (2013). Kandasamy. Strength and durability studies on fly based geopolymer bricks. *Asian J Civ Eng*, **14(6)**: 797–808.
- Karlhans W. (1990). Fly Ash in Concrete, ISBN: 0419157905, Spon Pres., 18-19.
- Lecomte, I., Henrist, H., 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.
- Lee, W. K. and Van Deventer, J. S. J. (2002). The effects of inorganic salt contamination on the strength and durability of geopolymer. *Colloids Surf A*, **211(2–3)**: 115–126.
- Li, Q., Xu, H., Li, F., Li, P., Shen, L. and Zhai, J. (2012). Synthesis of geopolymer composites from blends of CFBC fly and bottom ashes, *Fuel*, **97**: 366–372

- Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Endüstriyel Alt Maddeler Alt Komisyonu (1995). Seramik-Refrakter-Cam Hammaddeleri Çalışma Grubu Raporu Cilt I, T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı, Yayın No: DPT : 2418 – ÖİK: 477.
- Melek, M. T. (2010). Metekaolin Katkılı Harçların Bazı Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans Tezi, Eskişehir – Türkiye
- Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J. and Jalali, S. (2008). Alkali-activated binders: A review. Part 2. About materials and binders manufacture, *Construction and Building Materials*, **22**: 1315-1322.
- Palomo, A., Grutzeck, M. W. and Blanco, M. T. (1999). Alkali – activated fly ashes A cement for the future, *Cement and Concrete Research*, **29**: 1323-1329.
- Panias, D., Giannopoulou, I. P. and Perraki, T. (2007). Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-based geopolymers. *Colloids Surf A*; **301**: 246–254.
- Pelin T., Bahadır E., Fehime K., Asım Y. (2009). Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, ISBN: 975-8136-18-6, TÇMB/AR-GE/Y03.03, Ankara-Türkiye.
- Poon, C.S., Kou, S.C. and Lam, L.,L. (1999). An Innovative Method in Producing High Early Strength PFA Concrete, *Modern Concrete Materials; Binders, Additions and Admixtures*, 131-138, ISBN: 0727728229, Thomas Telford Pres.
- Provis, J. L., Yong, C. Z., Duxson, P. and Van Deventer, J. S. J. (2009). Correlating mechanical and thermal properties of sodium silicate-fly ash geopolymers, *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, **336**: 57–63.
- Puertas, F., Martinez-Ramirez, S., Alonso, S. and Vazquez, T. (2000). Alkali-activated fly ash/slag cement. Strength behaviour and hydration products. *Cem Concr Res*, **30**: 1625–1632.
- Rattanasak, U. and Chindaprasirt, P. (2009). Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer, *Minerals Engineering*, **22**: 1073-1078.

- Schmucker, M. and Mac Kenzie, K. J. D. (2004). Microstructure of sodium polysialate siloxo geopolymer. *Ceram Int*, **31**: 433–437.
- Seyhan, Ğ. (1971). Volkanik kaolin oluşumu ve andezit problemleri, *Maden Tetkik ve Arama Dergisi* **76**, 124-134.
- Somna, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P. and Chindapasirt (2011). NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature, *Fuel*, **90**: 2118-2124.
- Swanepoel, J. C. and Strydom, C. A. (2002). Utilisation of fly ash in a geopolymeric material, *Applied Geochemistry*, **17**: 1143-1148.
- Thokchom, S., Ghosh, P. and Ghosh, S. (2009). Effect of water absorption, porosity and sorptivity on durability of geopolymer mortars. *ARPJ Eng Appl Sci*, **4(7)**: 28–32.
- TS EN 196-1, (2002). Çimento Deney Metotları- Bölüm 1: Dayanım (Methods of testing cement – Part 1: Determination of strength). TSE, Ankara – Türkiye.
- TS EN 197-1, (2002). Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, TSE, Ankara – Türkiye.
- TS EN 771-1, (2005). Kagir Birimler, Özellikler- Bölüm 1: Kil kâgir birimler (Tuğlalar) (Specification for masonry units – Part 1: Clay masonry units). TSE, Ankara-Türkiye.
- TS EN 772-4, (2000). Kagir Birimler, deney metotları – Bölüm 4: Tabii taskâgir birimlerin toplam ve görünen porozitesi ile bosluksuz ve bosluklu birim hacim kütlelerinin tayini (Methods of test for masonry units – Part 4: Determination of real and bulk density and of total and open porosity for natural stone masonry units). TSE, Ankara-Türkiye.
- Van, Jaarsveld, J. G. S., van Deventer, J. S. J. and Lukey, G. C. (2003). The characterisation of source materials in fly ash-based geopolymers, *Materials Letters*, **57**: 1272–1280.
- Vu, D. D. (2002). Strength Properties of Metakaolin-Blended Paste, Mortar and Concrete. Delft University Press, Netherlands.

- Wu, H. C. and Sun, P. (2007). New building materials from fly ash-based lightweight inorganic polymer, *Construction and Building Materials*, **21**: 211–217.
- Xu, A. (1997). Fly Ash in Concrete, Part-3, Waste Materials Used in Concrete Manufacturing, Editor: Satish Chandra, Sweden.
- Yazıcı, H. (2004). Termik Santral Atığı Yapay Alçı-Uçucu Kül-Taban Külü Esaslı Yapı Malzemesi Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir-Turkey.
- Zuhua, Z., Xiao, Y., Huajun, Z. and Yue, C. (2009). Role of water in the synthesis of calcined kaolin-based geopolymer. *Appl Clay Sci*, **43(2)**: 218–223.



## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Samet GİRGIN  
Doğum Yeri ve Tarihi : Altıntaş, 1991  
Yabancı Dili : İngilizce  
İletişim (Telefon/e-posta) : 0554 3211963 / samet.girgin@windowslive.com

### Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Kütahya Anadolu Teknik Lisesi, (2005 – 2009)  
Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, (2009 – 2013)  
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, (2014 – 2016)

### Yayınları (SCI ve diğer) :

1. Görhan, G., Kürklü, G., **Girgin, S.**, “Likit/Katı Oranı ve Sıkıştırma Basıncının Geopolimer Pasta Basınç Dayanımına Etkisi”, 6. Ulusal katı atık yönetimi kongresi, 1-4 Eylül 2014.
2. Görhan, G., Kürklü, G., **Girgin, S.**, “Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Pasta Basınç Dayanım Özelliklerine  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  Oranının Etkisi”, 2. International Symposium on Environment and Morality, 24-26 October 2014, 332-337.