



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**METAKAOLİN TABANLI PİŞİRİLMİŞ TAŞ
TOZU ATIĞI İKAMELİ KOLEMANİT VE
BORAKS PENTA HİDRAT KATKILI
GEOPOLİMER HARÇLARIN FİZİKSEL VE
MEKANİK ÖZELLİKLERİ**

Mehmet AKTÜRK

DOKTORA TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Aralık-2021
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Mehmet AKTÜRK tarafından hazırlanan “Metakaolin Tabanlı Pişirilmiş Taş Tozu Atığı İkameli Kolemanit ve Boraks Penta Hidrat Katkılı Geopolimer Harçların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri” adlı tez çalışması 16/12/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Murat OLGUN

.....

Danışman

Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN

.....

Üye

Prof. Dr. Cengiz Duran ATİŞ

.....

Üye

Doç. Dr. Ali KÖKEN

.....

Üye

Doç. Dr. Sadık Alper YILDIZEL

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Selçuk Üniversitesi (Konya Teknik Üniversitesi) BAP Koordinatörlüğü tarafından **18201068** nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Mehmet AKTÜRK

Tarih: 16/12/2021

ÖZET

DOKTORA TEZİ

METAKAOLİN TABANLI PIŞIRILMIŞ TAŞ TOZU ATIĞI İKAMELİ KOLEMANİT VE BORAKS PENTA HİDRAT KATKILI GEOPOLİMER HARÇLARIN FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Mehmet AKTÜRK

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN
II.Danışman: Prof. Dr. İlker Bekir TOPÇU
2021, 146 Sayfa**

**Jüri
Prof. Dr. Murat OLGUN
Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN
Prof. Dr. Cengiz Duran ATİŞ
Doç. Dr. Ali KÖKEN
Doç. Dr. Sadık Alper YILDIZEL**

Günümüz dünyasında sahip olduğu avantajlardan dolayı sıklıkla kullanılan geleneksel beton ve harçlara alternatif olarak üretilen geopolimerler, yüksek puzolanik aktiviteye sahip bağlayıcıların alkali aktivatörler ile aktivasyonu sonucunda ortaya çıkan yüksek dayanım değerlerine, düşük enerji tüketimine ve düşük CO₂ salınımına sahip son derece çevreci malzemelerdir. Bu çalışmada geopolimer üretiminde bağlayıcı olarak, puzolanik aktivitesi son derece yüksek olan ve kaolin kilinin kalsine edilmesiyle elde edilen metakaolin kullanılmıştır. İkame malzemesi olarak asfalt şantiyelerinden temin edilen atık malzeme niteliğindeki pişirilmiş taş tozu atığı kullanılmıştır. Katkı olarak ise ülkemiz için son derece stratejik öneme sahip bor minerallerinden kolemanit ve boraks penta hidrat kullanılmıştır. Çalışma kapsamında ana bağlayıcı olan metakaolin kullanılarak geopolimer harçlar üretilmiş ve bu numuneler referans olarak alınmıştır. Bunun dışında ikame malzemesi olarak pişirilmiş taş tozu atığı sırasıyla %10, %20 ve %30 ikame oranlarında metakaolinin yerine ikame edilmiştir. Katkı malzemesi olarak ise kolemanit ve boraks penta hidrat sırasıyla %5, %10 ve %15 katkı oranlarında metakaoline ilave edilmiştir. Tüm geopolimer harç karışımlarında alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit (SH) ve sodyum silikat (SS) kullanılmıştır. Ana deneylere geçilmeden Taguchi optimizasyon yöntemi kullanılarak kum/bağlayıcı oranı, likit/bağlayıcı oranı, SS/SH oranı ve sodyum hidroksit'in molaritesi olmak üzere harç bileşenlerinin optimum değerleri bulunmuş ve bu değerler tüm karışımlarda kullanılmıştır. Üretilen geopolimer harçlara fiziksel özelliklerin tespiti için birim hacim ağırlık tayini, yayılma testi, priz sürelerinin tayini, görünen özgül ağırlık tayini, hacimsel özgül ağırlık tayini, su muhtevası, su emme oranı tayini ve boşluk oranı tayini deneyleri yapılmıştır. Mekanik özelliklerin tespiti için 7, 28 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Mikroyapısal özelliklerinin tespiti için ise çeşitli görüntüleme teknikleri kullanılmıştır.

Üretilen geopolimer harçlara uygulanan deneyler sonucunda, 7., 28. ve 90. gündeki eğilme ve basınç dayanımlarında tüm karışımlar içinde en yüksek değerler metakaolin bağlayıcılı harçlarda elde edilmiştir. Mekanik dayanım değerleri ve fiziksel özellikler birarada düşünüldüğünde metakaolin bağlayıcılı geopolimer harçlarda %20 oranında pişirilmiş taş tozu atığının ikame edilebileceği, %10 oranında kolemanitin ve %5 oranında boraks penta hidratın katkı olarak kullanılabileceği görülmüştür. Harçların fiziksel özelliklerine bakıldığında işlenebilme değeri en iyi olan numunelerin pişirilmiş taş tozu atığı ile

Üretilen numuneler olduğu görülmüştür. Ayrıca bor minerallerinin özellikle de kolemanit katkısının su emme oranını ve boşluk yüzdesini azaltarak geopolimer harca önemli bir fayda sağladığı görülmüştür. SEM görüntüleri de bor minerallerinin sağladığı katkıyı teyit eder niteliktedir. Mikroyapısal açıdan baktığımızda ise harcın karakterizasyonun genel olarak iyi olduğu ve iyi bir geopolimerizasyon bağı oluşturduğu görülmüştür. Geopolimer harcın mikroyapısal karakterizasyonuna negatif olarak etki eden karışımların pişirilmiş taş tozu atığı kullanılan numuneler olduğu görülmüştür. Bor minerallerinin katkı malzemesi olarak kullanıldığı karışımlarda ise bor minerallerinin harcın karakterizasyonu üzerine pozitif bir etki yaptığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Geopolimer harç, metakaolin, pişirilmiş taş tozu atığı, kolemanit, alkali aktivatör



ABSTRACT

PhD THESIS

PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF METAKAOLIN BASED HEAT-TREATED STONE POWDER WASTE SUBSTITUTION COLEMANITE AND BORAX PENTA HYDRATE ADDITIVE GEOPOLYMER MORTARS

Mehmet AKTURK

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering**

**Advisor: Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN
II. Advisor: Prof. Dr. İlker Bekir TOPÇU**

2021, 146 Pages

**Jury
Prof. Dr. Murat OLGUN
Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN
Prof. Dr. Cengiz Duran ATİŞ
Assoc. Prof. Dr. Ali KÖKEN
Assoc. Prof. Dr. Sadık Alper YILDIZEL**

Due to their advantages, the geopolymers are produced to be an alternative to traditional concrete and mortars frequently used in today's world, and they are extremely eco-friendly materials with high strength values, low energy consumption and low CO₂ emissions resulting from the activation of the binders having high pozzolanic activity with the alkaline activators. In this study, the metakaolin having an extremely high pozzolanic activity and obtained by the calcination of the kaolin clay was used as the binder of the geopolymer production. The heat-treated stone powder waste having the quality of waste material obtained from asphalt worksites was used as the substitute material. The boron minerals colemanite and borax penta hydrate having extremely strategic importance for our country were used as the additives. Within the scope of the study, geopolymer mortars were produced using the main binder metakaolin and taken as the reference. Additionally, the heat-treated stone powder waste was replaced as the substitute material instead of metakaolin at 10%, 20% and 30% replacement rates, respectively. As the additive materials, colemanite and borax penta hydrate were added to metakaolin at 5%, 10% and 15% additive ratios, respectively. Sodium hydroxide (SH) and sodium silicate (SS) were used as alkali activators in all geopolymer mortar mixtures. Before starting the main experiments, the optimum values of the mortar components such as the amount of binder, liquid/binder ratio, SS/SH ratio and the molarity of sodium hydroxide were obtained by using the Taguchi optimization technique and used in all mixtures. In order to determine the physical properties of the produced geopolymer mortars, the spreading test and the tests to determine the unit volume weight, setting time, apparent specific gravity, volumetric specific gravity, water content, water absorption rate and the void ratio were carried out. In order to determine the mechanical properties, the flexural and compressive strength tests of 7, 28 and 90 days were performed. Moreover, various imaging techniques were used to determine the microstructural properties.

As a result of the tests applied on the produced geopolymer mortars, the highest flexural and compressive strength values of 7th, 28th and 90th days were obtained in the metakaolin binder mortars among all the mixtures. When the mechanical strength values and the physical properties are considered

together, it was observed that 20% of the heat-treated stone powder waste can be substituted in metakaolin binder geopolymer mortars, and 10% colemanite and 5% borax penta hydrate can be used as additives. Considering the physical properties of the mortars, it was seen that the samples having the best workability values were produced with the heat-treated stone powder waste. In addition, it was observed that the boron minerals, especially the colemanite additives, provided a significant benefit to the geopolymer mortar by reducing the water absorption rate and the void percentage. SEM images also confirmed the contribution of boron minerals. From the microstructural point of view, it was seen that the characterization of the mortar was good in general and it formed a good geopolymerization bond. The mixtures negatively affected the microstructural characterization of the geopolymer mortar were observed to be the samples using the heat-treated stone powder waste. It was also observed that the boron minerals presented a positive effect on the characterization of the mortar for the mixtures where the boron minerals were used as additives.

Keywords: Geopolymer mortar, metakaolin, heat-treated stone powder waste, colemanite, alkaline activator



ÖNSÖZ

Doktora eğitimimin her aşamasında bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım, her türlü zorluk karşısında yanımda olan ve yardımlarını esirgemeyen değerli danışman hocam Sn. Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN ve ikinci danışman hocam Sn. İlker Bekir TOPÇU'ya teşekkürlerimi en kalbi duygularım ile sunarım.

Tez çalışması sırasında, özellikle geopolimer harçların sistematığı ile alakalı bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen, Tez İzleme Komitesi üyeleri Sn. Prof. Dr. Cengiz Duran ATİŞ ve Sn. Prof. Dr. Murat OLGUN'a teşekkür ederim.

Bu tez çalışması Selçuk Üniversitesi (Konya Teknik Üniversitesi) BAP Koordinatörlüğü tarafından desteklenmiştir. Selçuk Üniversitesi (Konya Teknik Üniversitesi) BAP Koordinatörlüğü'ne desteklerinden dolayı teşekkür ediyorum.

Bugünlere gelmemde büyük emekleri olan babam Nurullah AKTÜRK, annem Latife AKTÜRK, kardeşim Fatma Betül YILDIRIM'a, doktora eğitimim boyunca yanımda olan sabırla, süreç boyunca desteklerini esirgemeyen eşim Emine Aytaç AKTÜRK ile oğlum Ahmet Ömer AKTÜRK ve kızım Zeynep AKTÜRK'e teşekkürlerimi sunuyorum.

Mehmet AKTÜRK
KONYA-2021

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vi
ÖNSÖZ	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
1.2. Tezin Amacı.....	6
1.3. Hipotez.....	7
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	9
3. GEOPOLİMERLER	20
3.1. Genel Değerlendirme	20
3.2. Geopolimerlerin Tarihi	25
3.3. Geopolimer Sentezi.....	26
3.3.1. Ana malzemeler	26
3.3.2. Alkali aktivatörler	30
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	32
4.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler	32
4.1.1. Metakaolin	32
4.1.2. Pişirilmiş taş tozu atığı.....	33
4.1.3. Kolemanit.....	35
4.1.4. Boraks penta hidrat	36
4.1.5. Standart rilem kumu.....	37
4.1.6. Alkali aktivatörler	38
4.1.7. Geopolimer harç üretimi	40
4.2. Deneysel Çalışmalar	44
4.2.1. Taze haldeki geopolimer harçlar üzerine yapılan deneyler	44
4.2.2. Sertleşmiş haldeki geopolimer harçlar üzerinde yapılan deneyler	48
4.2.3. SEM analizi.....	52
4.2.4. XRD analizi	57
4.3. Taguchi Optimizasyon Yöntemi	57
4.3.1. Metakaolin bağlayıcılı geopolimer harç numunelerinin 7 günlük eğilme dayanımlarının değerlendirilmesi	63
4.3.2. Metakaolin bağlayıcılı geopolimer harç numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımlarının değerlendirilmesi	66
4.3.3. Metakaolin bağlayıcılı geopolimer harç numunelerinin 7 günlük basınç dayanımlarının değerlendirilmesi	69
4.3.4. Metakaolin bağlayıcılı geopolimer harç numunelerinin 28 günlük basınç dayanımlarının değerlendirilmesi	72

4.3.5. Optimum karışım oranlarının belirlenmesi ve değerlendirme	75
4.4. Ön Deneme Karışımları	75
4.5. Geopolimer Harçlarda Hedef Tasarım.....	91
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	93
5.1. Taze Haldeki Geopolimer Harçlara Uygulanan Deneylerin Sonuçları	93
5.1.1. Priz alma süresinin tayini deneyi (vicat aleti) sonuçları	93
5.1.2. İşlenebilirlik deney (Yayılma tablası) sonuçları	95
5.1.3. Taze haldeki geopolimer harçlarda birim hacim ağırlığı tayini deney sonuçları.....	97
5.2. Sertleşmiş Haldeki Geopolimer Harçlar Üzerinde Yapılan Deneylerin Sonuçları	98
5.2.1. Eğilme dayanımı deneyi sonuçları.....	98
5.2.2. Basınç dayanımı deneyi sonuçları	100
5.2.3. Eğilme ve basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	103
5.2.4. Hedef tasarım dayanım değerleri ile elde edilen eğilme ve basınç dayanımları arasındaki ilişki	105
5.2.5. Üretilen geopolimer harçların görünen özgül ağırlık sonuçları.....	111
5.2.6. Üretilen geopolimer harçların hacimsel özgül ağırlık sonuçları.....	113
5.2.7. Üretilen geopolimer harçların su muhtevası tayini sonuçları	115
5.2.8. Üretilen geopolimer harçların boşluk oranı tayini sonuçları	117
5.2.9. Üretilen geopolimer harçların ağırlıkça su emme oranlarının tayini sonuçları	119
5.2.10. XRD analiz sonuçları.....	121
5.2.11. SEM analiz sonuçları	123
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	133
6.1. Genel Bilgi	133
6.2. Sonuçlar	133
6.3. Öneriler	138
KAYNAKLAR	139
ÖZGEÇMİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.6

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

μm	Mikron
ρm	Taze harcın birim hacim ağırlığı
Al	Alüminyum
b	Prizma kare kesitin uzunluğu
B_2O_3	Borik asit
Ca	Kalsiyum
CO_2	Karbon dioksit
d	Prizma kesitinin yüksekliği
F	Prizmanın ortasına uygulanan maksimum kuvvet
K	Potasyum
KOH	Potasyum Hidroksit
K_2SO_4	Potasyum bikarbonat
l	Mesnet silindirleri arasındaki uzaklık
m_1	Kalıbın ağırlığı
m_2	Kalıp ve taze harcın ağırlığı
Na	Sodyum
NaOH	Sodyum Hidroksit
Na_2O	Sodyum Oksit
Na_2SO_4	Sodyum Sülfat
Na_2SiO_3	Sodyum Silikat
Na_2CO_3	Sodyum Karbonat.
O	Oksijen
P	Prizmanın kırıldığı anda ortasına uygulanan kuvvet
Rc	Basınç dayanımı
Rf	Eğilme dayanımı
Si	Silisyum
SiO_2	Silisyum dioksit
T	Sıcaklık
W/mK	Isı iletkenlik katsayısı
V	Kalıbın hacmi

Kısaltmalar

AAC	Alkali aktive cüruf
AAM	Alkali aktive malzemeler
ANOVA	Varyans analizi
B	Bağlayıcı
BDH	Boraks deka hidrat
BS	İngiliz Standardı
BPH	Boraks penta hidrat
FTIR	Fourier dönüşümü kızılötesi
GDA	Geri dönüştürülmüş agrega
GEP	Gen ekspresyon programlama
GPC	Geleneksel portland çimentosu
K	Kolemanit
KÇM	Katkılı çimentolu malzemeler
L	Likit
M	Molarite
MK	Metakaolin
N	Gürültü
NF	Fransız standardı
NMR	Nükleer manyetik rezonans
ÖGYFC	Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu
PTTA	Pişirilmiş taş tozu atığı
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SH	Sodyum hidroksit
S	Sinyal
SP	Süper plastikleştirici
SS	Sodyum silikat
XRD	X ışını kırınım analizi
TK	Taban külü
TS	Türk standardı
TYM	Tepki yüzey metodu

1. GİRİŞ

Dünyadaki bütün ülkeler çevresel, sosyal ve ekonomik alanlarda farklı sorunları daha sürdürülebilir bir şekilde çözüme kavuşturmak için büyük çaba sarf etmektedirler. Endüstriyel ölçekte bakıldığında inşaat endüstrisi özelinde, sürekli şekilde artan şehir nüfusları ve bununla paralel olarak gelişen ve sürekli büyüyen sanayiye bağlı olarak artan bakım ve onarım faaliyetleri, giderek fazlaşan nüfusa paralel olarak artan ihtiyaç gereği altyapı uygulamaları ile büyük çapta kentsel dönüşüm projeleri gibi uygulamalar çevresel, sosyal ve ekonomik anlamda pek çok problemleri beraberinde getirmektedir. İnşaat uygulamaları özelinde, dünya ölçeğinde yoğun bir şekilde tüketilen ve özellikle gelişmekte olan ülkelerin altyapı ihtiyaçlarını karşılayan bağlayıcısı portland çimentosu olan betonarme uygulamalarına ihtiyacın devam edeceği düşünüldüğünde, bu ihtiyacı giderecek ölçekte en uygun yöntem ve teknikler geliştirilmesiyle söz konusu etkilere karşı çok daha sürdürülebilir bir şekilde çözümler getirmek çok büyük önem taşımaktadır. Gelişen teknoloji ile birlikte ortaya çıkan altyapı ihtiyacı ve bu ihtiyacı karşılama anlamında beton bütün dünyada en önemli yapı malzemesi haline gelmiştir. Betonun mekanik dayanım değerlerinin yüksekliği ve yüksek durabilite performansından dolayı dünya çapında yılda 10 milyar tondan fazla beton üretilmekte ve kullanılmaktadır (Aitcin, 2000; Flatt ve ark., 2012; Juenger ve ark., 2011). Betonun olumlu tüm özelliklerine rağmen üretiminde kullanılan portland çimentosunun çevreye %5 ile %8 oranında CO₂ salınımı yapmasından dolayı küresel ısınmada önemli bir role sahiptir. Bu çerçevede düşünüldüğünde geopolimer beton ve harçlar geleneksel betona en uygun alternatif yapı malzemeleri olarak karşımıza çıkmaktadır (Castaldelli ve ark., 2013). Geopolimer üretimiyle ilgili tarihsel sürece baktığımızda ilk defa 1957 yılında Glukhovsky tarafından alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve bağlayıcı olarak yüksek fırın cürufu (YFC) kullanılarak geopolimer üretimi gerçekleştirilmiştir (Pacheco ve ark., 2008). Geopolimer beton ve harçlar günümüzde artan sanayi üretimi ve faaliyetleri düşünüldüğünde dünyada kullanılan en yaygın yapı malzemelerinden bir tanesi olarak karşımıza çıkmaktadır (Hao ve ark., 2015). Davidovits'in üç boyutlu alüminasilikat esaslı bir bağlayıcı olarak tanımladığı, geopolimerler katı haldeki bir alüminasilikat ile alkali aktivatörlerden konsantrasyonu yüksek sıvı alkali hidroksit veya silikat çözeltisinin reaksiyonu sonucunda oluşmaktadır (Davidovits, 1991). Alkali çözeltilerde hızlı bir şekilde çözülerek serbest halde SiO₄ ve AlO₄ tetrahedral yapılarını oluşturan alüminasilikatlarda, reaksiyonun başlaması ve ilerlemesi ile birlikte SiO₄ ve AlO₄ tetrahedral yapıları oksijen (O)

atomları ile bağ kurar ve polimerik Si-O-Al bağını oluşturur (Khale ve Chaudhary, 2007). Geopolimerizasyon olarak tanımlanan bu reaksiyon polikondenzasyon sonucu gerçekleşir. Bağlayıcı olarak genelde doğal alüminasilikat esaslı olan ve atık niteliği taşıyan uçucu kül, pirinç kabuğu külü, yüksek fırın cürufu gibi malzemeler geopolimerlerde kullanılmaktadır (Heikal ve ark., 2014). Bağlayıcı olarak doğal alüminasilikat esaslı malzemeleri içeren geopolimerlerde (hibrit portland çimentosu) N-A-S-H ve C-A-S-H gibi jel yapılarının oluştuğu tahmin edilmektedir (Garcia ve ark., 2011). Geopolimer beton ve harçlarla ilgili günümüz çalışmalarında, genellikle mekanik dayanım özelliklerinin tespiti (Yardımcı ve ark., 2015; Aydın ve Yardımcı, 2015; Fernandez ve ark., 1999; Wang ve ark., 1994; Criado ve ark., 2007), geopolimerin yapısının durabiliteye etkisi (Bakharev, 2005; Fernandez ve ark., 2007), ile çevresel etkiler (Weil ve ark., 2009) üzerinde araştırmalar yoğunlaşmıştır.

21. yüzyılda dünya genelinde çevre duyarlılığının artması ve bu bağlamda kullanılan yapı malzemelerinin tasarımında ve uygun malzeme seçiminde teknik özelliklerin yanı sıra çevresel etkilerinin değerlendirilmesi önem kazanmıştır. Geleneksel betona alternatif malzeme anlamında dünya çapında birçok araştırma yapılmaktadır. Yapılan araştırmalarda geleneksel betona alternatif olarak öne çıkan ürünlerden bir tanesi de geopolimer beton ve harçlardır. Son yıllarda sürekli gelişme gösteren inşaat sektöründe en çok kullanılan yapı malzemesi portland çimento bağlayıcılı geleneksel betondur. Geleneksel beton üretiminde bağlayıcı olarak kullanılan portland çimentosu ucuz olması ve her yerde bulunabilen doğal hammaddeler kullanılarak çok yüksek sıcaklıklarda (1500°C) yakılarak puzolanik aktivite kazanmasıyla çimento fabrikalarında üretilen bir malzemedir. Portland çimentosunun bağlayıcı özellik kazanabilmesi için içilebilir nitelikteki şebeke suyuyla reaksiyona girmesi gerekmektedir. Şebeke suyu portland çimentosuyla tepkimeye girerek suya dayanıklı bir tepkime ürünü ortaya çıkar ve bu ürün yapılaşmada kullanılacak kadar olumlu mekanik özelliklere sahip çok önemli bir malzemedir. Ancak, portland çimentosunun bu olumlu mekanik özelliklerine rağmen klinker üretiminde yaklaşık 1500°C sıcaklığa, elde edilen klinkerin öğütülmesi içinde yüksek miktarda enerji tüketimine ihtiyaç duyulduğundan ve fırında gerçekleşen reaksiyonlar ve üretim esnasında büyük oranda fosil yakıt kullanılması dolayısıyla yüksek miktarda karbondioksit (CO₂) gazının salınımına sebep olmasından dolayı betonda bağlayıcı olarak çimento yerine alternatif malzeme arayışları son dönemde artmıştır. Bu çalışmada elde edilecek veriler ışığında geopolimer harçlarda bağlayıcı olarak metakaolin ile pişirilmiş taş tozunun belirli oranlarda kullanılması ve bunlara kolemanit ve boraks penta

hidrat adlı bor atıklarının belirli yüzdelere karıştırılmasının geopolimer harçların mekanik ve fiziksel özellikleri üzerinde ne gibi sonuçlar oluşturacağını belirlemek hedeflenmiştir. Elde edilebilecek olumlu sonuçlar ışığında, çevreci, CO₂ salınımı düşük, enerji tüketimi az, üretim fiyatı makul derecede düşük, erken yaşlarda yüksek dayanıma sahip olan ve dayanım kazanma hızı fazla olan geopolimerlerin kullanımının artırılması hem enerji tasarrufu hem de çevre korunumuna katkı sağlayacaktır.

Dünya genelinde sanayi ve teknolojiye gelişimle beraber artan CO₂ salınımının %5'i, çimento sektöründen kaynaklanmaktadır (Shi ve ark., 2011). 2014 yılı itibarıyla tüm dünyada çimento üretiminin ciddi anlamda artarak 4,3 milyar tona ulaştığı belirtilmiştir (Chindoprasirt ve ark., 2007). Beton üretiminde yoğun bir şekilde kullanılan çimentonun çevreye verdiği olumsuz etkilere karşılık çevre korumasını daha sürdürülebilir hale getirmek için, bağlayıcı anlamında çimentonun yerine geçebilecek ve onun görevini üstlenebilecek bağlayıcı malzemelerin üretimi kapsamında ortaya konan çeşitli çalışmalar son zamanlarda giderek hız kazanmıştır. Bu bağlamda alternatif bağlayıcı malzeme niteliğindeki kaolin kilinin yüksek sıcaklıklarda kalsine edilmesi sonucu ortaya çıkan metakaolinin yanı sıra yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi endüstriyel atıkların sodyum hidroksit, sodyum silikat, potasyum hidroksit ve potasyum silikat gibi çeşitli alkali aktivatörlerle aktivasyon kazanması sonucu bağlayıcı yapı malzemesi üretmek ve kullanmak mümkün olabilmektedir (Hardjito ve Fong, 2010). Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi endüstriyel atıkların geopolimer üretiminde bağlayıcı malzeme olarak, alkali aktivatörlerle beraber kullanılması ve geri dönüşümün sağlanması açısından harçların üretilmesi çalışmaları 1960 yılların başından itibaren başlamış ve günümüzde de halen devam etmektedir (Khater, 2012). Geopolimer üretiminde metakaolin gibi kaolin kilinin yüksek sıcaklıklarda kalsine edilmesi sonucu ortaya çıkan ürünler dışında, bağlayıcı anlamında kireç, uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi doğal ve endüstriyel faaliyetlerden kaynaklanan atık malzemelerin alkali aktivatörlerle kullanımı da sıklıkla olmaktadır (Nuruddin ve ark., 2011). Geopolimer harçlarda, basınç dayanımının yüksekliği, yüksek sıcaklık direnci, aşınma dayanıklılığının yüksekliği gibi pozitif özelliklerin yanı sıra, sülfata direnç özelliğinde düşüklük, yüksek kılcallık gibi negatif özelliklerde görülmektedir. Geopolimerlerde donma-çözülme dirençleri artması için boşluk yapısının azaltılması gerekmektedir (Nath ve Sarker, 2012). Beton üretimi sırasında çimento ve su arasındaki hidratasyon neticesinde çimento hamuru sertleştiğinde yapısında su bulunan C-S-H jelleri olduğundan dolayı refrakter (ateşe dayanıklı) bir yapı oluşturmak anlamında bağlayıcı olarak kullanılamamaktadır. Ancak, geopolimerlerin meydana gelmesi

sonucunda yapısında gözlenen N-A-S-H jellerinde ise su bulunmamaktadır. Geopolimerler üretilirken, karışımı oluşturabilmek için kullanılan su işlenebilirlik için kullanılmakta ve geopolimerin priz alarak kuruması sırasında buharlaşan su geopolimer içerisinde süreksiz ve küçük boşluklar bırakarak geopolimerden uzaklaşmaktadır. Bu şekilde suyun buharlaşması sonucu geopolimere hafiflik, ısı yalıtım özelliğinin iyileşmesi, yangına karşı direncin artması gibi pozitif özellikler kazandırmaktadır (Komnitsas ve Zahoraki, 2007a).

Dünya üzerinde çok az bulunan elementlerden birisi olan bor elementinin yeryüzündeki dağılımının çok düşük miktarda olması buna karşın, belli lokasyonlardaki bor konsantrasyonlarının aşırı miktarda artış göstermesi, ekonomik bor yataklarının oluşumunu beraberinde getirmiştir. Türkiye’de bulunan borat yataklarının tamamı, volkanizma neticesinde oluşmuş yataklar olarak sınıflandırılmıştır. Bigadiç ve Sultançayır (Balıkesir), Kestelek (Bursa), Emet (Kütahya) ve Kırka (Eskişehir)’da borat yatakları mevcuttur. Bor minerallerinin oluşum sürecinde kumtaşı, çakıltası, kıltaşı, kireçtaşı, şeyil, marn, ve tüf ardalanmalı (yaşlandırarak) istif içinde; kıltaşı, çamurtaşı, şeyil ve tüfler içinde oluşum süreçleri tamamlanmıştır (Helvacı, 1977). Türkiye’de bulunan bütün yataklarda, bor minerali içeren birimlerden önce ve sonra olmak üzere yaygın olarak kireçtaşı çökelimi yapılarına rastlanmıştır. Türkiye’de bulunan borat yatakları, dünyanın en büyük ve yüksek tenörü (değerli metal miktarı)’ne sahip olup, Kolemanit yataklarında, %30, üleksit yataklarında, %29 ve boraks yataklarında %25 gibi bir orana sahiptir. Türkiye bor mineralleri açısından dünya ihtiyacını büyük oranda uzun yıllar karşılayacak boyutta yataklara sahiptir. Bor mineralleri içerisinde en yaygın olanı kolemanit mineralidir. Kolemanit Kırka (Eskişehir) dışındaki diğer tüm borat yataklarında en fazla bulunan bor mineralidir. Türkiye’nin bor yataklarının rezerv ve tenör bakımından dünyada rakibi yoktur (Helvacı, 1977). Dünyada bulunan bütün ülkeler yaygın olarak kullanılan üleksit ve kolemanit mineralleri açısından Türkiye’ye bağımlı halde bulunmaktadır. Bütün dünya’da ekonomik olarak bilinen katma değerleri çok yüksek olan ve kullanım alanları bakımından stratejik öneme sahip olan üç önemli bor minerali vardır: boraks , üleksit ve kolemanit. Bor mineralleri, bugünün modern dünyasında endüstride büyük oranda kullanım alanı bulmakta olup, ekonomik ve ticari boyutta üleksit ve kolemanit mineralinin büyük bir kısmı Bigadiç ve Emet bölgelerinde bulunmaktadır. Boraks minerali ise büyük oranda Kırka (Eskişehir)’da üretilmektedir. Sanayi ve Endüstri alanında kullanılan ürünlerden en önemlisi boraks penta hidrat (Helvacı, 1977).

Yılda yaklaşık 1,3 milyar ton bor üreten Türkiye bor rezervi olarak dünyada birinci sırada bulunmakta ve dünya bor rezervinin yaklaşık %60 gibi önemli bir kısmını elinde tutmaktadır. Türkiye’de çıkarılan başlıca bor bileşikleri kolemanit, üleksit ve boraks şeklinde sıralanabilir (Boncukçuoğlu ve ark., 2005). Türkiye dünyada bulunan en büyük kolemanit yataklarına sahiptir. Türkiye’de bulunan bor madeni yatakları özellikle Kırka, Emet, Bigadiç, Kestekte’dir. Eti Maden İşletmelerinin mineral bazında rezerv miktarları düşünüldüğünde birinci sırada kolemanit minerali ikinci sırada ise %24 ile boraks rezervi gelmektedir (Ünlü ve ark., 2011; Aydoğan ve ark., 2011). Eskişehir’de bulunan Kırka Bor İşletme Müdürlüğü’nde ortalama %25 oranında B_2O_3 tenörlü üretilen tüvenan tinkal 30 yıla yakın bir süredir konsantratör tesislerinde zenginleştirilmektedir. Tüvenan tinkalin zenginleştirilmesinde iki teknik ön plana çıkmaktadır. Bunlardan birincisi Konsantrasyon yöntemidir ki: bu yöntemde temel prensip cevherin kırılarak ufalanması ve suyla yıkanarak yüzey killerinin cevherden uzaklaştırılması esasına dayanmaktadır. Yapılan işlem sonucunda ortaya %32 B_2O_3 tenörlü konsantre tinkal (boraks) çıkmaktadır. Ancak, konsantre tinkal üretim işlemi esnasında çok miktarda su kullanılmakta olup, sonuçta ortaya sulu atık çıkmakta ve bu atıklar ancak atık barajlarında depolanabilmektedir. Konsantrasyon tüvenan tinkalin zenginleştirilmesine yönelik diğer bir proses de kalsinasyondur. Kalsinasyon işlemi esnasında tinkal (boraks) genleşerek şişer (Batar ve ark., 1998 ; Şahin ve Bultçu, 2002; Şahin ve ark., 2005). Tinkalin genleşmesi $100^{\circ}C$ ’nin üzerinde başlar ve $217^{\circ}C$ ’ye kadar genleşmenin %87’lik kısmı tamamlanır (Aydoğan ve ark., 2011). $217^{\circ}C$ ’ye kadar meydana gelen genleşme %240’ı bulmaktadır. Kalsinasyonla birlikte meydana gelen genleşme işlemi sırasında tüvenan tinkalin içerdiği kil gibi gang mineralleri tinkal (boraks) yapısının içine hapsolür. Bu sebeple tinkalin killerden ayrılması gerekmekte olup, bunu teminen kalsine tinkalin parçalanmak suretiyle ufalanması ve daha sonra da tinkalin iç yapısına hapsolmüş killerin serbest hale getirilmesiyle beraber tinkalden ayrılması için seperasyon (ayırma) işlemi nin yapılması gerekmektedir.

1.2. Tezin Amacı

Literartürde, uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi yüksek puzolanik aktiviteye sahip atık malzemeler ile alkali aktifleştiriciler kullanılarak geopolimer beton ve harçlar araştırmacılar tarafından yoğun bir şekilde üretilmiş ve geopolimer beton ve harç üretebilmek için örnek numunelere ısı kürü uygulanmak suretiyle nihai dayanımlar üzerinde son derece etkili sonuçlar elde edilmiştir. Ancak, geopolimerlerin üretiminde kaolin kilinin kalsine edilmesiyle elde edilen ve puzolanik karakteristikte olan metakaolin ile birlikte atık bir malzeme niteliğindeki pişirilmiş taş tozunun pek kullanılmadığı görülmektedir. Bu tez çalışmasının amacı yüksek puzolanik aktiviteye sahip metakaolin ve pişirilmiş taş tozunu belirli oranlarda kullanarak geopolimer harçları elde edebilmek ve bu harçların içerisinde ülkemizde bol miktarda bulunan kolemanit ve boraks penta hidrat gibi bor minerallerini karıştırarak bor minerallerinin geopolimer harçlar üzerine olumlu (basınç dayanımının hızlı bir şekilde gelişimi, asit ve yanmanın etkilerine karşı direnç gösterme, priz alma süresinin kısa olması, donma-çözülme etkilerine karşı gösterilen direncin yeterli olması) ortaya çıkarabilmek ve böylelikle bol hammadde kaynaklarına sahip çevreci, CO₂ salınımı düşük, enerji tüketimi az, üretim fiyatı düşük, erken dayanımı yüksek olan ve bu dayanım kazanma özelliğine hızla ulaşabilen geopolimer harçları üretebilmektir. Üretilen geopolimer harçların içerisinde bileşen olarak bulunan bor minerallerinin (kolemanit, ve boraks penta hidrat) geopolimer harçların fiziksel ve mekanik özellikleri (basınç dayanımı, eğilme dayanımı)'ne gibi etkileri olacağını araştırmaktır. Metakaolin, Türkiye'de yaygın miktarda bulunan kaolinin 700-800°C'de kalsine edilmesiyle üretilen malzeme olduğu için, tezin ana hedefi, çeşitli malzemelerin (ikame ve katkı) eklenmesiyle metakaolin tabanlı geopolimer kompozitlerin performansını araştırmaktır.

Tezin amaçları:

- 1- Ana bağlayıcı metakaolin olmak üzere üretilen geopolimer harçlara, atık bir malzeme olma niteliğindeki pişirilmiş taş tozu ikamesinin ve bor minerallerinden kolemanit ile boraks penta hidrat katkılarının harçların fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine etkisini incelemek.
- 2- Geopolimer harç numunelerini üretebilmek için harç bileşenlerinin optimum oranlarını belirleyebilmek adına Taguchi optimizasyon yöntemini kullanarak optimum karışım oranlarını ortaya çıkarmak.

3- Pişirilmiş taş tozu atığını %10, %20 ve %30 gibi farklı oranlarda ikame ederek atık bir malzemeyi değerlendirmek ve optimum bir ikame oranı belirleyebilmek.

4- Bor minerallerinden kolemanit ve boraks penta hidrat'ı %5, %10 ve %15 gibi farklı oranlarda katkı malzemesi olarak kullanmak ve bor mimerallerinin geopolimer harçlarda gösterebileceği olumlu özellikleri ortaya çıkarmak.

5- Üretilen geopolimer harçların fiziksel özellikleri ve mikroyapısal karakterizasyonuna ikame ve katkı malzemelerinin etkisini incelemek.

6- Üretilen geopolimer harçların taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve XRD analizleri ile birlikte mikroyapısal karakterizasyonunu belirlemek.

Bu araştırma, hidrolik bağlayıcı niteliğindeki çimentonun, çevreye dost geopolimerlerle değiştirilmesi açısından önemli bir kaynak oluşturmaktadır. Geopolimerler ve özellikle metakaolin bağlayıcılı geopolimerler açısından araştırmacıların günümüzde önemli miktarda çalışmalara imza atmalarına rağmen, pişirilmiş taş tozu atığı ikame edilmek suretiyle yapılan çalışmalar hemen hemen yok denecek kadar azdır. Bu nedenle, bu çalışma, geopolimer harçlarda dayanım davranışı ve fiziksel özelliklerin belirlenmesi dışında mikroyapısal karakterizasyonun belirlenmesi anlamında oldukça önemlidir.

1.3. Hipotez

Geopolimer harçları üretirken bağlayıcı olarak yüksek puzolanik aktiviteye sahip metakaolin ve pişirilmiş taş tozunu belirli oranlarda kullanılarak gerek geopolimer harçlarda atık bir malzeme olan ve daha önce pek kullanılmayan pişirilmiş taş tozunun ince taneli yapısı ve yüksek puzolanik aktivitesinden (%75) yararlanılarak geopolimer harçların işlenebilirliği ve mekanik dayanımları artacak, gerek se atık bir malzeme değerlendirilmiş olacak ve üretilecek geopolimer harcın maliyeti azalmış olacaktır. Doğal olarak volkanizmanın bir ürünü olan ve doğrudan geopolimer bağlayıcılı sistemlerde kullanılacak toz haldeki pişirilmiş taş tozu atığının diğer alüminasilikat kaynaklarına göre (cüruf, uçucu kül vb.) tane çapı oldukça düşüktür. Bu yönüyle bakıldığında asfalt fabrikalarında proses gereği belirli gradasyonlardaki agregaların yüksek sıcaklık fırınlarına (150°C) sokulup belirli bir süre ısıtılması ve sonra agregaların üzerlerinde pişmiş halde bulunan tozların vakumlanarak atık malzeme niteliği kazanıp depolanması sonucu oluşan pişirilmiş taş tozu ilave bir öğütme ve yakma işlemi gerektirmeden yüksek puzolanik aktivite (%75) kazanacak ve daha ekonomik geopolimer harçlar üretmek mümkün

olacaktır. Bunların yanı sıra bağlayıcılarla beraber belirli yüzdelere kullanılacak bor mineralleri (kolemanit ve boraks penta hidrat) ile üretilen geopolimer harçların mekanik ve fiziksel özelliklerinde iyileşme olacağı ve böylelikle çevreci, CO₂ salınımı düşük, enerji tüketimi az, üretim fiyatı düşük, erken dayanımı yüksek olan ve bu dayanım kazanma özelliğine hızla ulaşabilen geopolimerlerin kullanımının artırılması ile hem enerji tasarrufu sağlanacak hem de çevreci bir malzeme elde edilecektir. Literatür çalışmalarında geopolimer harçlar üretilirken yüksek puzolanik aktiviteye sahip alternatif bağlayıcılar arasında sıkça kullanılan metakaolinin dezavantajlarından biri de geopolimer harçlarda priz süresini kısaltarak, yayılmayı düşürmesi ve böylece işlenebilmeyi azaltmasıdır. Özellikle molaritenin artmasına paralel olarak işlenebilme de azaltmakta olup bağlayıcı olarak metakaolinle beraber pişirilmiş taş tozu atığı kullanımı ile birlikte pişirilmiş taş tozu atığının ince taneli yapısından dolayı işlenebilme artacaktır

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Geopolimerlerin tanımı bir inorganik polimer karışım elde etmek amacıyla alüminosilikat içeren malzemelerin alkali aktivatörler ile tepkimesinin sonucu olarak meydana gelen ürünleri ifade eder. Geopolimerlerin sıfır çimento yaklaşımı ve hali hazırda günümüz beton endüstrisinde en çok kullanılan çimentoya nazaran zarar vermeyen bir bağlayıcı olması sebebiyle birçok araştırmacıyı beton içerisinde agrega bağlayıcı malzeme olarak değerlendirilmesi noktasında araştırma yapmaya itmiştir (Embong ve ark., 2016).

Gourley ve Johnson, 2005 yılında yaptıkları çalışmada, geopolimerlerin yapısal olarak cama benzer bir ağ yapısına sahip olduğunu göstermiş ve bir hidrat olan GPC'nin aksine, ısıya (ve özellikle yanmaya) direncin büyük ölçüde gelişmiş olduğunu ortaya koymuştur. Numuneler incelendiğinde gözenek yapısında bulunan suyun mutlak hacminin düşük ve gözenek yapısının da sürekli olduğu görülmüştür. Bu sebeple, geopolimerlerin bozulma şeklinin, patlayarak suyun serbest bırakılması ya da toz haline getirilmesi değil de 1000°C'in üzerindeki sıcaklıklarda erimesiyle gerçekleştiğini göstermişlerdir.

Fernandez-Jimenez ve ark., 2007 yılında yaptıkları çalışmada, alkali aktivatörlerle aktive edilen ve bağlayıcı olarak uçucu kül kullanılan harç numunelerini sülfat direnci açısından deneye maruz bırakmışlardır. İncelemenin ilk aşamalarında dayanımda dalgalanmalar görülmüş bu dalgalanmalardan sonra, hem %4,4 Na₂SO₄ çözeltisine batırılmış numunelerde hem de havada kür edilen kontrol numunelerinde dayanım artışı gözlenmiştir. Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltileri ile hazırlanan ve alkali aktivatörler ile aktive edilen uçucu kül bağlayıcılı numunelerin sülfat direncinde önemli bir farklılık gözlenmemiştir. Alkali aktivatör ile aktive edilen bağlayıcının elektron mikroskobu, Na₂SO₄ çözeltisinde 365 gün kaldıktan sonra malzemenin gözeneklerinde Na₂SO₄ tuzlarının kristallerini ortaya çıkarmıştır.

Arıöz ve ark., 2008 yılında yaptıkları çalışmada, yapısında yüksek oranda kalsiyum içeren uçucu kül bağlayıcı geopolimerik tuğlaları ısıtma işlemine tabi tutmuşlar ve sonrasında ısıtma işleminin geopolimerlerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine ne gibi etkiler yaptığını incelemişlerdir. Uygulamada izlenen proses gereği bağlayıcı malzeme C sınıfı uçucu kül, alkali aktivatör olarak sodyum silikat, sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit çözeltileri kullanılarak basınç yoluyla şekillendirme yöntemi kullanılarak geopolimerik tuğlalar üretilmiştir. Geopolimerik tuğlaların şekillendirme işlemine tabi tutulmasından 1 gün sonra numuneler 60°C sıcaklıkta etüvde ve buhar odasında ayrı ayrı

olmak üzere 2 saat, 24 saat ve 72 saat süreyle ısıtılma işlemine tabi tutulmuşlardır. Geopolimerik tuğlaların üretimden 7 gün sonra tuğla numunelerinin basınç dayanımı, yoğunluk ve su emme miktarları belirlenmek suretiyle ısıtılma işleminin tipinin ve süresinin geopolimerik tuğlaların fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde ne gibi etkiler yaptığı incelenmiştir. Çalışma sonucunda C sınıfı uçucu kül değerlendirildiğinde numunelerin basınç dayanımlarının 9-12 MPa arasında çıktığı ve bu numunelerin yoğunluklarının ise 1,23-1,32 g/cm³ arasında olduğu, su emme değerlerinin ise %26 ile %36 arasında çıktığı görülmüştür. Çalışmada numuneler üzerine uygulanan ısıtılma işlem süresinin C sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen geopolimerik tuğlaların basınç dayanımları üzerinde olumlu bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Bunun dışında numunelere uygulanan ısıtılma işleminin süresi ile ısıtılma işlem tipinin tuğlaların yoğunlukları üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Etüv fırınında ısıtılma işlem gören geopolimerik numuneler için ısıtılma işlem süresinin artması ile birlikte numunelerin su emme değerlerinin de arttığı gözlemlenmiştir.

Topçu ve Toprak, 2009 yılında yaptıkları çalışmada, bağlayıcı olarak taban külü kullanılmış ve bu bağlayıcı malzeme ile alkali aktivatörler kullanılarak hafif geopolimer harçlar üretilmiştir. Çalışmada termik santrallerden elde edilen atık malzeme niteliğindeki taban külünün (TK) alkali aktivatörlerle aktive edilerek hafif geopolimer harç üretilmesi hedeflenmiştir. Bu hedefe yönelik olarak öğütülmüş taban külü kullanılarak, alkali aktivatör bağlamında sodyum hidroksit (SH) ve sodyum silikat (SS) çözeltileri kullanılarak 4x4x16 cm boyutlarında prizmatik çimentosuz harç karışımları elde edilmiştir. Hafif geopolimer harç numunelerine 20 saat süreyle 75°C’de etüv fırınında veya laboratuvarında 20°C’de hava küründe olmak üzere iki farklı kür uygulanmıştır. İki farklı kür uygulanan numunelere 1. günde, 7. günde ve 28. günde uygulanan deneylerle numunelerin birim ağırlık, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımları belirlenmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre en uygun harç numunesinin birim ağırlığı 1,59 kg/dm³, basınç dayanımı 18,51 MPa ve 80 donma-çözülme çevrimi sonucunda ortaya çıkan dayanım kaybının %11,5 olduğu görülmüştür. Geopolimer harç numunesinin 400°C sıcaklığa kadar termal stabilitesini koruduğu görülmüştür.

Brooks ve ark., 2010 yılında yaptıkları çalışmada, bağlayıcı olarak uçucu kül kullanılan ve alkali aktivatörlerle aktive edilerek üretilen yüksek performansa sahip geopolimer betonun ve geopolimer hafif betonun donma ve çözülme davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmada geopolimer üretiminde bağlayıcı olarak uçucu kül ve agregaları (ince ve kaba), alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ile konsantre halde sodyum silikat ve ek su kullanılarak homojen bir elde edilene kadar karıştırılmış ve geopolimer

betonlar 75x100x406 mm boyutlarında prizmatik numuneler üretilmiştir. Ayrıca hafif geopolimer beton üretiminde alüminyum tozu kullanılmıştır. Üretilen geopolimer numuneler daha sonra kuru bir atmosfer ortamına çıkarılarak (40°C-90°C) yerleştirilmişlerdir. Daha sonra 12 saat süre dolduktan sonra kalıptan çıkarılmıştır. Araştırmayı yapanlar numuneler üzerine donma-çözülme etkilerini incelemişler ve devamında ASTM C 666'ya göre suyun içinde donma ve çözülme deneyinin (-18°C'den 5°C'ye kadar değişen sıcaklıklarda) gerçekleştiği daha şiddetli deneme de yapmışlardır. Çalışmada üretilen karışımlar, hava sürükleyicili bir katkıyla veya katkısız olmak üzere iki şekilde hazırlanmıştır.

Rovnanik ve Al, 2010 yılında yaptıkları çalışmada, metakaolin tabanlı geopolimer harçlara kür sıcaklığının etkisini incelemişler ve kür sıcaklığının geopolimerlerin yapısına ve sertleşme gelişimine etkisinin araştırılması için farklı deneyler yapmışlardır. Çalışmada kür sıcaklığı (10°C, 20°C, 40°C, 60°C ve 80°C) ve kür süresinin geopolimerlerin mekanik özelliklerden basınç ve eğilme dayanımı üzerine etkisini araştırmışlardır. Ayrıca yine kür sıcaklığı ve kür süresinin gözenek dağılımı üzerine etkisini araştırmışlar ve böylelikle alkali aktivatörle aktive edilmiş metakaolin esaslı geopolimer harçların kür sıcaklığı ve kür süresinin harçların mikroyapısı üzerindeki etkisini araştırmayı amaçlamışlardır. Çalışma sonucunda, geopolimer harçlarda artan gözenek büyüklüğü ile beraber kümülatif gözenek hacmi ile yükselen sıcaklık arasında olan ilişkiyi ortaya koymuş ve bu da mekanik özellikleri etkilemiştir. Bunların dışında kızılötesi spektroskopi deneyi ile de reaksiyon sürecinin izlenmesinin mümkün olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Thokchom ve ark., 2010 yılında yaptıkları çalışmada, bağlayıcı malzeme olarak uçucu kül kullandıkları geopolimer harçların sülfat çözeltisindeki performansını araştırmışlar ve bu kapsamda sülfat çözeltisi olarak magnezyum sülfat çözeltisini kullanmışlardır. Bu bağlamda uçucu kül bağlayıcılı geopolimer harç örneklerinin performansını ortaya koyabilmek amacıyla deneysel bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada, kalsiyum içeriği düşük olan uçucu kül bağlayıcı olarak, sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltisi alkali aktivatör olmak üzere geopolimer harç numuneleri üretildi ve termal özellikler iyileştirildi. Ağırlık bağlamında %10 magnezyum sülfat çözeltisi, üretilen numunenin 24 haftaya kadar ıslatılması için kullanılmıştır. Geopolimer harç numunelerin performansı görsel olarak görünümü, solüsyonun pH'ındaki ve ağırlıktaki değişim ile maruz kalma süresi boyunca basınç dayanımındaki değişimler açısından incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Başlangıç olarak yumuşak fakat sonra sert kristaller haline dönüştürülen harç numunesinin yüzeyinde beyaz birikimler oluşmuştur. Magnezyum sülfat Çözeltisi-

nin pH değeri ilk haftalarda kayda değer bir şekilde artmış olup, bu durum üretilen harç numunelerinden alkalilerin migrasyonu (madde aktarımı)'nu göstermektedir. 24 haftalık sürenin sonunda, numunelerin ağırlıkları çok az arttı ve sıkıştırma kuvveti kaybı %56'ya ulaştı.

Bucher ve ark., 2011 yılında yaptıkları çalışmada, metakaolin esaslı geopolimer beton üretmişler ve bu üretimde bağlayıcı olarak metakaolin, alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanarak hava sürükleyicisiz bir geopolimer beton üretmişlerdir ve betonun donma direncini incelemişlerdir. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre geopolimer betonun 28 günlük basınç dayanımı 55 Mpa olarak ölçülmüştür. 7x7x28 cm boyutlarındaki geopolimer numuneler üzerinde (standart olarak 28 günde deney yapılmış) Fransız standardı NF P18-424'e göre Donma-çözülme deneyi yapılmıştır. Çalışma sonucunda hava sürükleyici yokluğunun geopolimer betonlarda sadece 40 donma-çözülme döngüsünden sonra büyük ağırlık kaybına yol açtığı gözlenmiştir.

Fu ve ark., 2011 yılında yaptıkları çalışmada, bağlayıcı olarak yüksek fırın cürufunun kullanıldığı ve alkali aktivatörlerden sodyum hidroksit ve sodyum silikat ile aktive edilen geopolimer betonların (AAC) ASTM C666 ve GB/T50082-2009 standartlarına göre donma-çözülme döngülerinde meydana gelen mekanik hasarı incelemişlerdir. Geopolimer üretiminde kullanılan sodyum silikatın modülü 3,34'tür. 5 adet deney koduyla üretilen 100x100x400 mm boyutunda geopolimer betonlar ve her kod başına altı numuneyle değerlendirilme yapılmıştır. Değerlendirme sonucunda kütle ve dinamik elastik modül belirlenmiş olup, daha sonra her 25 döngüde olmak üzere toplam 300 döngüye kadar değerler ölçülmüştür.

Jumrat ve ark., 2011 yılında yaptıkları çalışmada, bağlayıcı olarak uçucu kül kullanılarak üretilen geopolimer harçların dielektrik özellikleri ve sıcaklık profilini incelemişlerdir. Çalışmada bağlayıcı olarak uçucu kül kullanılan taze haldeki geopolimer harçların karışım özelliklerinin ve karışım yüzdelерinin dielektrik özelliklerine ve sıcaklık profiline etkisi araştırılmıştır. Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) kullanılmıştır. Çalışmada geopolimerin işlenebilirliği için eklenen suyun işlenebilmeyi arttırdığı görülmüştür. Ayrıca, kıyaslama yapmak amacıyla üretilen çimento esaslı harçlara göre bütün geopolimer harçların priz başlangıç ve bitiş sürelerinin çimento esaslı harçlarından daha az olduğu görülmüştür. Üretilen geopolimer harçlarda dielektrik özellikleri ve yüzey sıcaklığını bulabilmek için harçlar oda sıcaklığında 24 saatlik geopolimerizasyon periyodu boyunca sürekli ölçülmüştür. Yapılan ölçümlerde elde edilen sonuçlara göre, geopolimer harçların dielektrik özelliklerinin ve yüzey

sıcaklığının harcın karıştırılmasından sonra zamanla artma eğiliminde olduğunu görülmüştür. Ayrıca geopolimer harçların karıştırılmasından hemen sonra en yüksek dielektrik özelliğe ve yüzey sıcaklığına sahip olduğu görülmüştür. Buna ilave olarak likit oranı fazla olan yani daha sıvı bileşenlere sahip geopolimer numunelerin dielektrik özelliklerinin (ϵ' ve ϵ'') daha yüksek olduğu görülmüştür. Yapılan çalışma ile özellikle uçucu kül esaslı geopolimer harçların karışımın oranına ve karıştırıldıktan sonraki zamana bağlı olmak kaydıyla mikrodalga enerjisi uygulandığında özelliklerinin iyileştirilebileceği görülmüştür.

Binici ve ark., 2012 yılında yaptıkları çalışmada, bağlayıcı olarak yüksek fırın cürufu ile uçucu kül, alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit agrega olarak ise silis kumu ve pomza esaslı malzemeler kullanarak geopolimer harçlar üretmişlerdir. Araştırmacılar üretilen geopolimer harçları fiziksel, mekanik ve radyasyon geçirgenlik özelliklerini, tespit etmişlerdir. Çalışmanın amacı yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis kumu ve pomzanın sodyum hidroksit ile aktive edilmek suretiyle geopolimer beton üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılmasıdır. Bu amaçla çalışma kapsamında 4x4x16 cm ve 10x10x10 cm boyutlarında geopolimer beton harçlar üretilmiştir. Geopolimer numunler 20 saat süresince 100°C ve 150°C sıcaklığındaki etüv küründe sıcaklığa tabi tutulmuştur. Sıcaklığa tabi tutularak sertleşen geopolimer harç numuneleri üzerinde su emme, birim hacim ağırlık, eğilme dayanımı, basınç dayanımı, ultrasonik ses geçirgenlik deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, yüksek fırın cürufu bağlayıcılığı numunenin su emme oranının diğer numunelere göre daha düşük çıktığı görülmüştür. Su emme değerleri fazla olan geopolimer numunelerin ultrasonik ses geçirgenlik hızlarının da daha düşük görülmüştür. Ayrıca yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen numunelerin eğilme ve basınç dayanımlarının da diğerlerine göre çok daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu sonuçlarda yola çıkılarak ultrasonik ses geçiş hızları ile basınç dayanımı arasında belirli bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar daha boşluksuz geopolimerlerin basınç dayanımlarının daha yüksek olduğunu bize söylemektedir. Radyoaktif geçirgenlik kriterine göre ise numunenin yüksek fırın cürufu ile elde edilen geopolimerin en az radyasyon etkisine maruz olan yapılarda kullanılabileceği görülmüştür.

Pelisser ve ark., 2013 yılında yaptıkları çalışmada, bağlayıcısı metakaolin olan geopolimer harçların mekanik özelliklerini incelemişler ve elastisite modülü, sertlik, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, eğilme modülü ve mikroyapısal analizi belirlemek için farklı deneyler yapmışlardır. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre, geopolimer harçların, dayanım özellikleri ve elastisite modülü dikkate alındığında araştırmacılar

metakaolin esaslı geopolimer harçların portland çimento esaslı harçlarından daha iyi sonuçlar verdiğini görmüşlerdir. Buna ek olarak, hem metakaolin esaslı geopolimer harçların hem de normal portland çimento esaslı harçlarının mikromekanik özelliklerinin benzer bir davranış gösterdiği görülmüştür. Ancak metakolin esaslı geopolimer harçlar daha iyi deformasyon kapasitesine ve çekme dayanımına sahiptir.

Görhan ve Kürklü, 2014 yılında yaptıkları çalışmada, bağlayıcı malzeme olarak uçucu kül, alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit kullanarak ürettikleri geopolimer cephe kaplama malzemesi üretmişler ve bu malzeme üzerine alkali tuz İçeriğinin ne gibi etkiler yapabileceğini araştırmışlardır. Çalışmada ortaya konan hedef doğrultusunda piyasa genelinde üretimi yapılan cephe kaplama malzemesi olarak kullanılan malzemeler incelenmiş ve mevcut boyutlara yakın olacak şekilde önek geopolimer cephe kaplamaları üretilerek bu malzemelere ait özellikler araştırılmıştır. Geopolimer örneklerin üretiminde kullanılan bağlayıcı malzeme niteliğindeki uçucu kül Kütahya Seyitömer Termik Santralinden temin edilen uçucu kül olup, karışımlarda standart rilem kumu kullanılmıştır. Deneylerde alkali aktivatör olarak; sodyum silikat solüsyonu (SS), sodyum hidroksit (SH) ve potasyum hidroksit (KOH) kullanılmıştır. Hazırlanan geopolimer harçlar, 215x65x15 mm boyutlarında ahşap kalıplara dökülerek, sonrasında vibrasyon yapılmak suretiyle cephe kaplama malzemesi elde edilmiştir. Daha sonra geopolimer örnekler laboratuvar tipi etüve yerleştirilerek 24 saat süre ile 85°C sıcaklıkta termal küre tabi tutulmuş ve böylece sertleşerek dayanım kazanması sağlanmıştır. Çalışma sonucunda, geopolimerlere uygulanan üretim yönteminin piyasada bulunan diğer cephe kaplama malzemelerine oranla, daha gözenekli örneklerin üretimine olanak sağladığı görülmüştür. Bununla birlikte örnekler üzerinde yapılan donma-çözülme deneylerinde geopolimer cephe kaplama malzemelerinin önemli bir hasara uğramadığı gözlemlenmiştir.

Burciaga-Díaz ve ark., 2016 yılında yaptıkları çalışmada, bağlayıcı olarak cüruf ve metakaolin, alkali aktivatör olarak ise sodyum silikat kullanarak ürettikleri geopolimer harçlarda kür sıcaklığının geopolimer harçların uzun vadede reaksiyonları üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir. Çalışma kapsamında kübik numuneler üzerinde basınç dayanımı ve mikroyapısal bileşimi değerlendirmek için sırasıyla numuneler 20°C, 60°C ve 70°C sıcaklıklarda 520 güne kadar sürekli küre tabi tutulmuşlardır. Deney sonucunda taze harç numunelerinin yüksek sıcaklıklarda kür edilmesinin erken yaşlarda basınç dayanımı gelişiminin hızlanmasına karşın uzun vadede, 20°C’de küre tabi tutulan numunelerde daha iyi sonuçlar alındığı görülmüştür.

İnti ve ark., 2017 yılında yaptıkları çalışmada, dünya çapında araştırmacıların karbon ayak izini azaltmaya yönelik olarak bağlayıcı anlamında portland çimentosunun yerine alternatif malzemeler bulmak için son yıllarda yoğun bir çaba içinde oldukları belirtilmektedir. Bu kapsamda alkali aktivatör anlamında düşük oranda molariteye sahip sodyum hidroksit geopolimer harçlar üretilmiş ve bu harçların üretimi sırasında uygulanan kür şartlarının harçlara etkisi araştırılmıştır. Çalışma sonucunda geleneksel betona alternatifin büyük oranda uçucu kül, sodyum silikat ve sodyum hidroksit veya potasyum hidroksitten oluşan geopolimerlerin olduğu görülmüştür. Deneysel çalışmalar sırasında dayanım gelişimi açısından yüksek molarite önemli olsa bile yüksek molariteye sahip sodyum hidroksit ile çalışmada tehlikeli bir ortam oluştuğu için, bu çalışmanın odak noktasını, düşük molariteye (4 M) sahip sodyum hidroksitin geopolimer harçlar için uygun olup olamayacağını araştırmaktır. Molekül ağırlığı düşük geopolimerin dayanımında kür sıcaklığı rejiminin etkisini belirlemek için tahribatsız deney yöntemleriyle beraber geleneksel sıkıştırma ve gerilme dayanımı testleri birlikte gerçekleştirilmiştir. Deneylerde düşük molaritelerde alkali aktivatör kullanımının yeterli dayanım değerlerine ulaşılabilceği ileri sürülmüştür. Geopolimer üretimlerinde kür sıcaklığında veya kür süresinde veya her ikisinde de değerin arttığı durumlarda dayanımında arttığı görülmüştür. Bununla birlikte, daha yüksek sıcaklıkta kür süresi de uzatılırsa dayanımın düştüğü tespit edilmiştir. Kür rejimininde optimizasyona gitmek için düşük molaritede sodyum hidroksit ile üretilen geopolimerin uzun sürede dayanıklılığını belirlemek için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulduğu görülmüştür.

Lahoti ve ark., 2017 yılında yaptıkları çalışmada, metakaolin esaslı geopolimer harçlar üretmişler ve üretilen bu harçlarda kullanılan bileşenlerden Si/Al (molar oranın) oranının, su/bağlayıcı miktarının (kütle oranının), Al/Na (molar oranın), oranının ve H₂O/Na₂O (molar oranın) oranının geopolimerlerin basınç dayanımı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda elde edilen veriler ışığında metakaolin esaslı geopolimer harçlarda Si/Al oranının en önemli parametre olduğu, ikinci olarak Al/Na oranının en önemli parametre olduğu görülmüştür. Son olarak ise metakaolin esaslı geopolimer harçlarda geleneksel portland çimentosundan farklı olarak su/bağlayıcı oranının basınç dayanımını etkileyen en önemli faktör olmadığı görülmüştür.

Rostami ve Behfarnia, 2017 yılında yaptıkları çalışmada, bağlayıcı olarak silis dumanı kullanarak alkali aktivatörlerle aktive edilmiş geopolimer beton üretmişlerdir. Çalışmada geopolimer betonda cürufun silis dumanı yerine ikame edilmesinin geopolimer betonun basınç dayanımına ve permeabilitesine olabilecek etkileri araştırılmıştır.

Çalışmada elde edilen sonuçlar ışığında silis dumanı varlığının alkalilerle aktive edilmiş cüruf betonunun basınç dayanımını arttırmakla beraber, permeabilitesini azalttığı görülmüştür. Bununla beraber suyla yapılan kürün en uygun en uygun kür yöntemini oluşturduğunu tespit etmişlerdir.

Sukontasukkul ve ark., 2018 yılında yaptıkları çalışmada, ürettikleri geopolimere çelik ve polipropilen lif takviyesinin geopolimerin eğilme dayanımı performansını nasıl etkilediğini görmek istemişlerdir. Çalışmada elde edilen sonuca göre çelik ve polipropilen liflerin geopolimerin eğilme dayanımını, tokluğunu ve kalan dayanımını arttırdığı görülmüştür.

Atabey ve ark., 2020 yılında yaptıkları çalışmada, bağlayıcı olarak F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen geopolimer harcın alkali aktivatörün türünün, Na miktarının taşıma özelliklerine ne gibi bir etkisi olabileceğini araştırmışlardır. Çalışmada alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit çözeltisi ve sodyum silikat kullanılmıştır. Bunun yanında 24 adet sodyum hidroksit kombinasyonu kullanılmıştır. Deneylerde alkali aktivatör, Na miktarı anlamında uçucu kül ağırlığının %6, %9, %12 ve %15'ini içerdiği görülmektedir. Geopolimer harç örneklerine 100°C kür sıcaklığında 24 saat süreyle kür uygulamışlardır. Geopolimer harç karışımlarının Na miktarlarının %6'dan %15'e çıkarılmasıyla beraber geopolimer numunelerinde taşıma özelliklerinin iyileştirildiği görülmüştür. Deneysel anlamda elde edilen sonuçlara bakıldığında %15 Na oranı ile daha iyi sonuçların elde edildiği görülmüştür. Bunun dışında alkali aktivatör olarak sadece sodyum hidroksit ile üretilen harçların sodyum hidroksit-sodyum silikat karışım kombinasyonu ile yapılan geopolimer harçlara göre daha iyi taşıma özellikleri gösterdiği belirlenmiştir.

Shahmansouri ve ark., 2020 yılında yaptıkları çalışmada, geopolimer betonda bağlayıcı olarak kullanılan yüksek fırın cürufunun yüzde ile ifade edildiğinde %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında doğal zeolit ve silika dumanı ile kısmen yer değiştirilmesinin, bununla birlikte alkali aktivatör anlamında sodyum silikat çözeltisi ile birlikte farklı konsantrasyonlarda üretilen (4 M, 6 M ve 8 M) sodyum hidroksit çözeltisinin kullanımının basınç dayanımı sonuçları üzerindeki etkisini deneysel olarak bir araştırma içinde belirlemeye çalışmışlardır. Deneysel çalışmada elde edilen sonuçlara göre, artan sodyum hidroksit çözelti konsantrasyonunun betonun basınç dayanımını düşürdüğünü belirlemişlerdir. Bunun tersine, geopolimer betona doğal zeolit ve silis dumanı eklenmesi ile birlikte basınç dayanımının arttığı görülmüştür. Bunlara ek olarak, yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer betonun basınç dayanımını tahmin etmek maksadıyla matema-

tiksel modeller geliştirebilmek için gen ekspresyon programlama (GEP) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde deneysel sonuçlar kullanılarak, yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer beton üretimi için son derece kapsamlı ve güvenilir bir basınç dayanımı veritabanı elde edilmiştir. Elde edilen veritabanı, 117 farklı karışımdan üretilen toplamda 351 adet numunenin basınç dayanımı sonuçlarını kapsamaktadır. Neticede modelleme için girdi parametreleri olarak en etkili beş parametre olan numunelerin yaşı, sodyum hidroksit çözeltisi konsantrasyonu, doğal zeolit miktarı, silis dumanı miktarı ve geopolimer betonun yüksek fırın cürufu içeriği kabul edilmiştir. Sonuçların bize söylediği önerilen matematiksel modellerin doğru olduğu ve yüksek tahmin kabiliyetine sahip olduğudur.

Fakhrian ve ark., 2020 yılında yaptıkları çalışmada, geri dönüştürülmüş beton agregası (GBA) içeren geopolimerleri yüksek sıcaklıklara maruz bırakılması durumunda oluşabilecek basınç dayanımını ve kütle kaybını tahmin edebilmek için gen ekspresyon programlama (GEP) kullanarak 20 adet model geliştirmişlerdir. Deneysel çalışma için modellemede 32 farklı karışım tasarımından üretilen 160 adet numunenin sonuçları kullanılmıştır. Modellerin geliştirilmesinde, yöntem olarak toplam veri setlerinin içinden %80'i eğitim aşamasında geri kalan kısımda ise %20'si doğrulama aşamasında kullanılmıştır. Geopolimer betona tatbik edilen sıcaklık (T), agrega anlamında geri dönüştürülmüş beton agregasının ikame oranı ve katkı anlamında süper plastikleştirici (SP) katkının katılma yüzdesi olmak üzere üç girdi değişkeni dikkate alınmıştır. Modellemede 0,95 ile 0,99 değerlerinde korelasyon katsayısına sahip eğitim ve doğrulama aşamaları, göstermiştir ki önerilen modeller öngördüğü sonuçlar ile deneysel sonuçlar arasında uygun tutarlılık oranına sahiptir. Bunun dışında, istatistiksel analizlerin sonuçları, GEP'in yüksek sıcaklıklara maruz kalındığı durumlarda geri dönüştürülmüş beton agregası içeren geopolimer harçların hem basınç dayanımını hem de kütle kaybını tahmin etme kabiliyetine sahip olduğunu göstermiştir.

Rehman ve ark., 2020. yaptıkları çalışmada, bağlayıcı olarak uçucu kül ve cüruf kullanarak, alkali aktivatörlerle aktivasyon sonucunda sentetik hafif agregalı hafif geopolimer beton üretmişlerdir. Ayrıca kıyaslama yapmak amacıyla çimento esaslı geleneksel beton üretmişlerdir. Portland çimento esaslı beton ile hafif geopolimer beton karşılaştırıldığında hafif geopolimer betonun geleneksel betona oranla daha iyi basınç dayanımına, daha iyi yarmada çekme dayanımına ve ultrases geçiş hızına sahip olduğu tespit edilmiştir.

Durak ve ark., 2021 yaptıkları çalışmada, bağlayıcı olarak uçucu külün kullanıldığı ve alkali aktivatörler ile oluşan alkali aktivasyon ile üretilen geopolimer harç

numunelerinde ısıl kürlenme aşamasından önceki (yeni bir parametre oluşturmak) ön dinlenme süresinin fiziksel özellikleri, eğilme ve basınç dayanımı ve mikroyapısı üzerinde ne gibi etkiler oluşturabileceğini araştırmışlardır. Bu kapsamda, araştırmacılar deneysel çalışmada geopolimer harç numunelerini ısıyla küre tabi tutmadan önce 0, 1, 2, 3, 7, 14 ve 28 gün boyunca laboratuvar ortam koşullarında hazırlamış ve ön dinlendirmelerini yapmışlardır. Yapılan ön dinlenme sürecinden sonra geopolimer numuneler 75°C sıcaklığında bir fırında 2 gün süreyle ısı kürüne tabi tutulmuşlardır. Geopolimerler ısı kürüne tabi tutulmadan önceki taze haldeyken bir ön dinlenme süresine tabi tutulan harç ve hamur numuneleri, kıyaslama yapmak için ön dinlenmesiz olarak üretilen kontrol numuneleri ile karşılaştırmışlardır. Geopolimer harç numuneleri üzerinde fiziksel ve mekanik özelliklerden su emme, gözeneklilik, özgül ağırlık, kılcallık, eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve aşınma direnci testleri yapılmıştır. Geopolimer hamur numuneleri üzerinde izotermal kalorimetre, XRD ve SEM analizleri yapılmak üzere, mikro yapısal araştırmalar için deneyler gerçekleştirmişlerdir. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre ısı kürüne tabi tutulma öncesi ön dinlenme periyoduna tabi tutulan numunelerin mekanik dayanımlarının referans (ön dinlenmesiz) numunelere göre önemli ölçüde arttığı tespit edilmiştir. Ancak ön dinlenme sebebiyle örneklerin kapilarite katsayısı, su geçirgenliği ve gözeneklilik oranları referans örneklerle göre azalmış ve ön dinlendirmenin dayanıklılıkla ilgili özellikleri rehabilite ettiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca yukarıda verilen bulguları destekleyen reaksiyon kinetiği ile birlikte SEM analizi sonuçları sayesinde, ön dinlenme süresinin geopolimerik reaksiyon ürünlerini arttırdığı tespit edilmiş bununla daha yoğun bir mikro yapıya neden olduğu görülmüştür.

Shahmansouri ve ark., 2021 yaptıkları çalışmada, bağlayıcı olarak yüksek fırın cürufu, alkali aktivatör olarak ise sodyum hidroksit kullanarak üretilen geopolimer betonlarda yüksek fırın cürufunun doğal zeolit ve silis dumanı gibi puzolanlarla ikamesinin, sodyum hidroksit konsantrasyonunun geopolimer betonun mekanik özelliklerine etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Bu amaçla, çeşitli geopolimer harç karışımlarının basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve çekme dayanımları ölçülmüştür. Bunun dışında, puzolanik özelliğe sahip yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer betonun basınç dayanımı, eğilme ve çekme dayanımlarını en yüksek seviyeye ulaştırmak amacıyla tasarımda kullanılan değişkenlerin optimum değerlerini belirlemek maksadıyla tepki yüzey metodu (TYM) kullanılmıştır. Genel anlamda sonuçlar değerlendirildiğinde, sodyum hidroksit konsantrasyonunun artmasıyla beraber basınç dayanımı değerinin azaldığını, sodyum hidroksit konsantrasyonunun 6 M olduğunda 4 M ve 8 M'a kıyasla en yüksek

eğilme ve çekme dayanımlarının elde edildiği görülmüştür. Bunun dışında ayrıca, doğal zeolit kullanımının yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer betonların basınç dayanımı, eğilme ve çekme dayanımı değerlerini bağlayıcı anlamında ağırlıkça %10'luk ikamede sırasıyla yaklaşık %4, %6 ve %20 oranlarında arttırdığı görülmüştür. Yüksek fırın curufunun silis dumanı ile ikame edilmesinde ise geopolimer betonun basınç dayanımı, eğilme ve çekme dayanımı değerlerini bağlayıcı anlamında ağırlıkça %30 ikamede sırasıyla %30, %20 ve %25'e kadar iyileştirdiği görülmüştür. Deneysel çalışmada optimizasyon sonuçları değerlendirildiğinde, yüksek fırın curufunun 60,29 kg (yani %15,9 oranında) doğal zeolit ile yer değiştirerek ve 5,28 M sodyum hidroksit kullanarak basınç dayanımı, eğilme ve çekme dayanımı değerleri açısından optimum üçlü koşulların elde edilebileceği görülmüştür. Optimum anlamda koşullar, yüksek fırın curufunun 113,79 kg (yani %30 oranında) silis dumanı ile ikame edilmesi ve 6,19 M'de sodyum hidroksit kullanılmasıyla olmuştur.

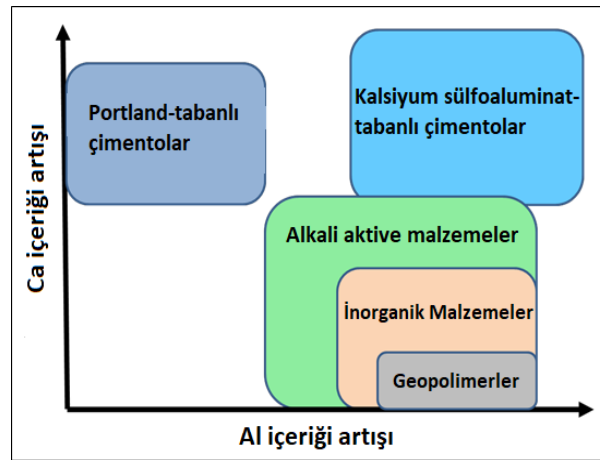
3. GEOPOLİMERLER

3.1. Genel Değerlendirme

Alkali aktivatörlerin çimento esaslı malzemelerde ilk kullanımı 1930'lu yıllara denk gelmektedir. İlk önce potasyum hidroksit ile öğütülmüş cüruf tozu karışımının priz özelliklerinin belirlenmesi ile araştırmalar başlamıştır. Daha sonra yapılan çalışmalarda potasyum hidroksit ile sodyum solüsyonlarının cüruf la reaksiyona girmesi ve sonucunda baz ve alkalın tuz kullanılmak suretiyle içeriğinde cüruf bulunan klinkersiz çimento üretimi çalışmalarının devam ettiği görülmektedir. 1957 yılında ise yapılan bir çalışmada, sulu ve susuz alüminasilikatlar kullanılarak çimentolu karışımlar elde edilmiştir. Dünya üzerinde bulunan doğal haldeki minerallerin kimyasal kompozisyonlarıyla birlikte kristal yapılarının da çeşitli proses ve yöntemlerle değiştirilmesi sonucunda üretilen geopolimerlere, inorganik polimer adı da verilir. Bu inorganik polimerler hem kristal halde, hem de amorf halde olabilir. Bünyesinde Al ve Si oksitli bileşikler barındıran doğal mineraller kullanılarak, alkali aktivatörlerle birlikte ortaya çıkan geopolimerler jeolojik oluşumlu kayalara benzerlik gösterirler. 1978 yılında geopolimerleri ilk olarak tanımlayan ve sınıflandıran kişi Prof. J. Davidovits olmuştur. Davidovits'in geopolimer adını uygun görmesinin nedeni geopolimer oluşumu sırasında meydana gelen reaksiyonun termoset (ısıtıldığında sertleşen) polimerlerin polikondenzasyon (polimerleşme reaksiyonu) reaksiyonuna benzerlik göstermesidir. Polikondenzasyon'un farklı ısı etki ve kimyasal etkilerle monomerler arasındaki bağların değişmesi ve bu sayede moleküller içindeki atomların enerji düzeylerinin değişmesi ile gerçekleşen reaksiyonları ifade eder. Davidovits böylece doğada aglomerasyon (primer partiküllerin birleştirilmesi) sonucunda oluşan jeolojik kayaların laboratuvarında sentetik olarak üretilebileceğini ortaya koymuştur. Aynı zamanda Prof. J. Davidovits Mısır Piramitlerinin inşası sırasında doğal taşlar yerine geopolimer malzemelerin kurulan kalıplara döküldüğünü iddia etmektedir. Amorf haldeki kil (kaolin, bentonit) ve benzeri malzemeler kullanılarak polimerize silikat veya alüminosilikat içeren bileşiklerin alkali ortamda sentezlenmesi esasına dayanan geopolimerlerde yüksek sıcaklıklara çıkılmak suretiyle ergitme söz konusu olmayıp alkali ortamda Si-O-Al ve Si-O-Si kovalent bağ oluşumları ile polimerizasyonun ilerlediği görülmektedir. Geopolimerlerin üretiminde kullanılan alkali aktivatörlerden alkali silikatların Si:Al oranı modül olarak ifade edilir. 1982 yılında Fransa'da, alkali aktivatörlerin kaolinit, kireç taşı ve dolomit ile karıştırılması sonucunda

elde edilen geopolimerler Davidovits tarafından üretilmiştir (Shi ve ark., 2006). Eski yapılarda yapılan incelemeler neticesinde Mısır piramitlerinin ve Roma’da bulunan amfi tiyatronun mikroyapısı incelenmiş ve sertleşmiş haldeki geopolimerik malzemelerin mikroyapısıyla piramitlerin ve amfi tiyatronun mikroyapısının birbirine benzediği görülmüştür. Bu sebeple eski yapıların üretiminde doğal malzemelerden daha çok geopolimerizasyon sürecine tabi olarak üretimin etkili olduğu savunulmaktadır. Konuya açıklık getirebilmek için, araştırmacılar dünya çapında çalışmaya devam etmektedirler (Li ve ark., 2004).

Geopolimer kavramı ile imal edilen gerek düşük teknoloji ve gerekse yüksek teknoloji tüm ürünlerde molekül yapısını belirleyen faktörler: bağlayıcı olarak jeolojik toprak kaynağı ve alkali aktifleştirici alkali silikatların toplam Si:Al molar oranı olarak söylenebilir. Düşük kalsiyum içeriği sayesinde ayırt edilebilen, alkali aktivatörlerle aktive edilen çimentolu malzemeler ailesinin bir üyesi olan geopolimerlerin kimyasal açıdan gruplandırılmasının şematik detayı Şekil 3.1. (Provis, 2014)’de verilmektedir. Purdon tarafından (Purdon, 1940) yapılan ilk çalışmada öğütülmüş halde granüle yüksek fırın cürufalarının (ÖGYFC) aktive edilebilmesi için alkali aktivatörlerden sodyum hidroksit çözeltileri kullanılmış ve beton üretimi için uygun çimentolu malzemeler üretilmiştir. Geopolimerlerde kalsiyum içeriği (ağırlıkça %3), geopolimerlerin ortam sıcaklığında daha hızlı sertleşmesini sağlamak görevini görür (Temuujin, 2009). Geopolimerin en belirgin farklılığı bağlayıcı görevi üstlenen fazın, suda çözünmeye karşı nispeten daha dirençli olan silikat ve alüminat gruplarının üç boyutlu tetrahedral (dört yüzlü) jel çerçevesine bağlı alüminyum ve silisyum içeriğine sahip bir alkali alüminasilikat jelinden oluşmasıdır.



Şekil 3.1. Geopolimerlerin kimyasal bakımdan gruplandırılmasının şematik detayı (Provis, 2014)

Geopolimer üretim prosesinde, geopolimerin karışım aşamasında kullanılan su sadece işlenebilirlik için kullanılmakta olup, geopolimerin kuruması sırasında geopolimer içerisinde küçük ve süreksiz boşluklar bırakarak geopolimerden uzaklaşmaktadır. Geopolimeri terk eden su sonucunda ortaya çıkan yapı geopolimere hafiflik, ısıya karşı direnç ve yangına karşı direnç gibi pozitif özellikler kazandırmaktadır (Rangan, 2008). Geopolimerler üretilirken dayanım anlamında en yüksek değerlerin sodyum silikat içeren alkali aktivatörler ile elde edildiği görülmektedir. Ayrıca kütle oranı anlamında $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranı ve atomik oran anlamında Si/Al oranı arttıkça basınç dayanımının arttığı görülmektedir. Yüksek basınç dayanımına direkt etki eden faktörün Si/Al atomik oranı olduğu görülmektedir.

Geopolimerler oluşum mekanizmasından dolayı hızlı şekilde basınç dayanımı gelişimi, asidik etki ve yangına karşı yüksek direnç, priz alma süresinin kısalması, donma ve çözülme etkilerine karşı makul derecede direnç göstermesi gibi birçok pozitif özelliğe sahiptirler (Luukkonen ve ark., 2016). Geopolimer beton ve harçlar mekanik dayanım değerlerine çok hızlı bir şekilde ulaşabilmeleri sebebiyle inşaat uygulamalarında karşılaşılabilecek olumsuzlukları en aza indirme potansiyeline sahip olduklarından alkali aktivatörlerle aktive edilmiş geopolimer beton ve harçlar üzerinde uzun yıllardır çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Geopolimer beton ve harçlar kimyasal alkali aktivatörler ve su ile reaksiyona girerek kısmen veya tamamen çözünebilen toz bağlayıcılardan elde edilirler. Toz bağlayıcıları genel olarak, öğütülmüş yüksek fırın cürufu, uçucu kül gibi atık malzemeler ile kalsine edilmiş kaolin kili (metakaolin) şeklinde sıralayabiliriz. Alkali aktivatörler ise yaygın olarak sodyum hidroksit, sodyum silikat, potasyum hidroksit, potasyum silikat gibi alkali çözeltileridir. Geopolimerlerin basınç dayanımı gelişimine alkali aktivatör konsantrasyonu önemli derecede etki yapmaktadır. Neredeyse bütün killi toprak türleri (kaolin kili, montmorillonit, pirofilit, muskovit, klorit ve laterit vb.) alkali aktivatörlerle (sodyum silikat, potasyum silikat, sodyum hidroksit, potasyum hidroksit) ile reaksiyona girerek ısı etkisinde sertleşmektedir. Killi toprak türleri içinde özellikle kaolin kilinin yapısında yüksek oranda bulunan Al ve Si elementlerinin oksitli bileşiklerinden dolayı bağlayıcılık ve hacimsel tokluk sağlayan monomerler oluşabilmektedir.

Geopolimerizasyonun oluşum ve gelişim süreci karışım içerisindeki alkali aktivatör tuzların da etkisiyle ekzotermik (ısı veren) bir süreçtir. Geopolimerizasyonda ortaya çıkan su moleküllerinin dehidratasyonu (sıvı kaybı) geopolimer polikondenzasyonunda (polimerleşme reaksiyonu) önemli bir rol oynar. Bağlayıcı olarak kullanılan bazı

malzemelerden basınç dayanım özelliği olmayan zayıf yapıda karışımlar elde edilirken uygun oranlarda Al-Si bileşiği barındıran ve serbest kalsiyumun düşük olduğu mineral kompozisyondaki uçucu küllerle (F tipi uçucu kül) veya 700°C-800°C’de kalsine edilmiş metakaolin gibi ham maddelerle yüksek dayanım ve dayanıklılık özellikleri olan malzemeler elde edilebilmektedir. Kalsine edilmemiş kaolin kili ile daha düşük basınç dayanımı elde edilmektedir (Rangan ve ark., 2005). Geopolimer üretimi için hammaddeye uygulanan etüv işlemi sayesinde, boşluk suyunun ve karbonlu bileşiklerin ayrışması ve kompozisyon içerisinde bulunan mineral element ve bileşiklerin enerji düzeylerinin yükselmesi ile beraber daha kolay iyonize olmaları sağlanmakta ve böylelikle üretilcek ürünün reolojik özellikleri iyileşebilmektedir (Brew ve Mackenzie, 2007). Geopolimer karışımlarda sıcaklık kürü 40°C–100°C arasında tutularak polimerizasyon süreci uzatılır. Böylece üretilmek istenilen geopolimer malzemelerin özellikleri de iyileştirilmiş olur.

Geopolimer sentezinde kullanılabilen endüstriyel yan ürünlerin birçoğu, yoğun şekilde yağış gibi şiddetli hava şartlarında çevre sorunlarına sebep olacak atık barajlarda biriktirilerek toplanmaktadır. Bütün bu olaylar, ortaya çıkabilecek su baskını ve su şebekesinin kirlenmesi ile taşkın veya istinat duvarlarının yırtılmasına yol açabilecek durumları ortaya çıkarabilmektedir. 2008 yılının aralık ayında Amerika’nın Tennessee eyaletinde Roane Contry’de bulunan Kinston Fosil fabrikasındaki bir olayda, iki defa ortalama yağış ve donma-çözülme döngüsünün istinat duvarını yıktığı ve sonucunda 12 hektardan fazla kül çamurunun biriktiği ve bu kül çamurunun Emory Nehri’ne dökülmeden önce 1,8 metreye kadar derinlikte olduğu gözlenmiştir (Stephans, 2009).

Geopolimerlerde ideal alkali aktivatör konsantrasyonunun geopolimerin dayanımında artışa neden olduğu görülmüştür. Bu ideal konsantrasyonun dışında numunenin geopolimerik yapısını farklılaştırabilecek alkali aktivatörlerle aktive edilmiş matris de bulunan serbest OH⁻ iyonlarından dolayı malzemenin mekanik özelliklerinde kayıplar da ortaya çıkabilmektedir. Geopolimerlerin yaşı ve geopolimere uygulanan kür sıcaklığı da numunelerin basınç dayanımında etkili olan diğer etkenlerdir. Bu değişkenlerin etkili olmasında en önemli faktör geopolimerizasyon süresinde ortamda yeterli miktarda alkali aktivatör konsantrasyonu bulunmasıdır (De Vargas ve ark., 2011). Geopolimerlerde bütün bileşiklerin oksijen atomlarını paylaştığı polimerik Si-O-Al-O kafesi vardır bu kafes de SiO₄ ve AlO₄ bileşiklerinden oluşur. Alüminyumun denge değerinin 4 olmasından dolayı oksijene göre negatif bir denge yaratır. Bu negatif dengeden dolayı K⁺, Na⁺ ve Ca⁺² gibi katyonların varlığı matristeki dengeyi sağlayabilmek için mutlaka ge-

reklidir (Swanepoel ve Strydom, 2002). Teknik anlamda mühendislik malzemesi olan geopolimerler, kaynak kullanma anlamında büyük imkanlara sahiptir. Ayrıca endüstriyel atık malzeme niteliğindeki uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi malzemeler ve yan ürünlerinden de elde edilebilmektedirler. Diğer taraftan beton ve harçların kullanımında geopolimer malzemelerin artırılması hem enerji tasarrufu sağlayacak hem de çevre korunumuna katkıda bulunacaktır. Doğada hammadde halinde bulunan alüminasilikatlar düşük göreceli sıcaklıklarla ($600^{\circ}\text{C} \sim 700^{\circ}\text{C}$), ısıtılma tabi tutularak uygun geopolimerik hammaddeler elde edilir. Isıl işlem uygulamak için gereken enerjinin az olması, az miktarda CO_2 açığa çıkması büyük bir avantaj sağlamaktadır. Geopolimer beton ve harçlar alüminasilikat içeren reaktif (reaksiyonel) malzemelerin, aktivasyon eşiği yüksek alkali aktivatör çözeltilerle düzenli bir şekilde karıştırılmasıyla sentezlenebilirler. Geopolimer üretiminden sonra oda sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta küre tabi tutulabilirler. Kür süresi olarak kısa bir zaman içinde belirli bir dayanım değerine ulaşabilirler. Geopolimer üretim prosesi gereği basit bir teknikle hazırlanabilmesinden, iyi bir hacim stabilitesine sahip olmasından ve geopolimeri oluşturan bağlayıcıların büzülme değerlerinin diğer bağlayıcılara oranla daha düşük olmasından dolayı avantajlı bir malzeme haline gelmektedirler. Ayrıca geopolimerler, üretimini izleyen ilk 4 saatlik süreçte hızlı bir şekilde priz almaya başlayarak 28.günde alacağı nihai basınç dayanımının yaklaşık %70'ini bu sürede kazanabilirler ve tüm ömrü boyunca kazanacağı dayanımından önemli miktarda düşüş yaşamadan dış koşullara ve çevre şartlarına karşı dayanıklılık özelliklerini koruyabilmektedirler. Geopolimer beton ve harçların olumlu özelliklerinden bir diğeri ise 1200°C 'ye varan sıcaklıklarda bile dayanıklılık özelliklerini koruyabilmeleri ve düşük, ($24 \text{ W/mK} \sim 0.3 \text{ W/mK}$) ısı iletkenlik katsayısına sahip olmalarıdır (Swanepoel ve Strydom, 2002).

Geopolimer üretiminde kullanılabilecek nitelikte endüstriyel atık malzemelerin, özellikle uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun proses gereği temini, üretim yeri ve miktarı ile çeşitli sınırlamalar vardır. Bundan dolayı geleneksel beton imalatında kullanılan portland çimentosunun oranını düşürebilmek amacıyla katkılı çimentolu malzemeler (KÇM'ler) kullanılmaktadır. Bu durum geopolimer sentezindeki alkali aktivatörler malzemeler (AAM) ile potansiyel bağlayıcıların kullanım miktarını azaltmaktadır. Dünya genelinde üçüncü dünya ülkelerinde atık malzeme niteliğindeki uçucu kül ve yüksek fırın cürufu üretimi sınırlıdır, bundan dolayı yerel çimentolu bağlayıcı üretimi killer gibi alternatif bağlayıcıyı içeren katkılı çimentolu bağlayıcıların (KÇM'ler) geliştirilmesi gerekmektedir (Scrivener, 2011).

3.2. Geopolimerlerin Tarihi

Tarihi süreç incelendiğinde yunanlılar ve romalıların, medeniyetlerini kurarken Pantheon ve Kolezyum gibi anıtsal nitelikte yapılar inşaa ettiklerini ve bu yapılarda beton kullandıklarını görmekteyiz. Bu dönemde kullanılan betonlar, bağlayıcı malzeme anlamında kireç, volkanik kül ve killer gibi puzolanlar kullanılarak elde edilen çimento-ya dayanmaktadırlar. Mısır medeniyetinin kilometre taşlarından biri olan Giza'daki Keops piramidinin inşasına ait teoride, alkali aktivatör ile aktive edilmiş alüminasilikat esaslı malzemeler kullanılarak yerinde döküm yöntemiyle bloklar inşaa edilmiştir (Demortier, 2004). Tarihsel dönemde daha geriye gittiğimizde çimentolu malzemelerin, Sumeria'da (milattan önce 3600) kullanıldığını (Bauer, 2007), aynı şekilde Mısır'da (milattan önce 2500) (Davidovits, 2008c) ve Roma'da (Davidovits 1999; Davidovits, 2008c) kullanıldığını görmekteyiz.

Geçen yüzyılda yapılan çalışmalar kapsamında 1940 yılına gelindiğinde Purdon, bağlayıcı malzeme anlamında yüksek fırın cürufu kullanarak alkali aktivasyonu üzerine çalışmalar yapmıştır. Yaptığı çalışmada bağlayıcı olarak Belçika cürufu ve ağırlıkça %10'a kadar sodyum hidroksit çözeltisi kullanmış ve ağırlıkça %5 ile %8 aralığında beton için maksimum 25 MPa'a kadar dayanım elde etmiştir. Bunun dışında Purdon, suyun varlığında sodyum hidroksit üretebilmek için tepkimeye giren kalsiyum hidroksit ve sodyum karbonat karışımlarının değiştirilip değiştirilemeyeceğini araştırmış ve reaksiyon mekanizmasında sekonder (ikincil) reaksiyon tarafından serbest bırakılan sodyum hidroksitin cürufun sodyum karbonat prizini ayarladığını göstermiştir. Bağlayıcı anlamında kullanılan cürufa kalsiyum hidroksit ve sodyum karbonat ilavesi sayesinde üretilen çimentonun sertleşmesini sağlamak için sadece su eklemenin yeterli olduğunu görmüştür. Purdon, alkali aktivatörün, bağlayıcı cürufun priz alması ve sertleşmesi için bir katalizör (belirleyici) görevi gördüğünü ve o şekilde hareket ettiğini iddia etmiştir (Purdon, 1940). Geopolimerlerle ilgili devam eden çalışmalarda 1950'li yıllara gelindiğinde Ukrayna'da Glukhovsky ve daha sonradan Krivenko, o zamana kadar devlet kontrolündeki ekonomi sayesinde kısıtlı imkanlar yüzünden geleneksel portland çimentosu (GPÇ) hammaddelerinin eksikliğinden kaynaklanan alkali aktivatörlerle aktive edilmiş bağlayıcı sistemleri geliştirmiştir. Çalışmalarını devam ettiren Glukhovsky, volkanik kayaların zeolitlere dönüşümü için ortaya çıkan doğal süreçlerinin faydalı olabileceği ve bu şekilde elde edilen yapı ürünlerinin çimentolu sistemlerde uyarlanıp yürütülebileceğini bulan ilk kişi olmuştur. Glukhovsky, Roma ve eski Mısır medeniyetleri tarafından kul-

lanılan bağlayıcı malzemeleri analiz etmiş ve bu bulgulara dayanarak alkali endüstriyel atıklarla karıştırılmış cürufları içeren alüminasilikata dayanan ve zemin çimentolar adını verdiği bağlayıcılar geliştirmiştir. 1960'lı yıllara gelindiğinde toplu konut, demiryollarında kullanılan traversler, suyun drenajı için kullanılan drenaj kanalları, sulama kanalları, döşeme, prekast levhalar ve bloklar gibi uygulamalarda cüruf esaslı sistemler kullanılarak üretilmiştir (Krivenko, 2005).

Geopolimeri ilk defa adlandıran Davidovits ise 1970 ve 1973'te Fransa'da meydana gelen katastrofik (doğal afet niteliğinde) yangınların sonrasında alkali aktive çimentoları araştırmaya başlamıştır. Bu araştırmada amaç, yanıcı olmayan, bir nevi plastiğe benzeyen ısı ve ateşe dayanıklı malzemeler geliştirebilmek olmuştur. Davidovits araştırmalarında ağırlıklı olarak bağlayıcı anlamında metakaolin kullanarak yeni malzemeler üretmiş ve bunlara geopolimer adını vermiştir (Davidovits, 1989).

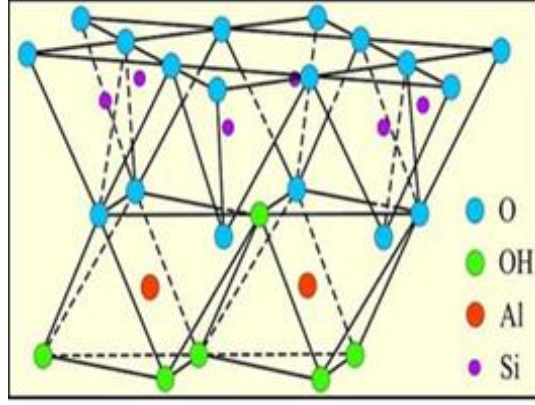
3.3. Geopolimer Sentezi

3.3.1. Ana malzemeler

Geopolimerin sentezlenmesinde kullanılan ana malzemeleri, bağlayıcı anlamında kalsiyum cürufu (Komnitsas ve ark., 2007b), uçucu küller (Van Jaarsveld ve Van Deventer, 1999), endüstriyel atık malzemesi olarak uçucu kül (kömür külü) (Hart ve ark., 2006) ve killeri (Lecomte ve ark., 2001), ile birlikte kaolinit ve metakaolin (kalsine edilmiş kaolin kili) gibi geniş kapsamda alüminasilikat kaynaklarından elde edilebilir (Van Jaarsveld ve Van Deventer, 1999), (Lecomte ve ark., 2001), (Barbosa ve ark., 2000). Metakaolin (kalsine edilmiş kaolin kili), inşaat endüstrisi özelinde diğer alüminasilikat kaynaklarına kıyasla aktivasyon anlamında çok daha agresif ve efektif bir rol oynamakta ve yüksek saflıkları nedeniyle geopolimerlerde bağlayıcı olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Alonso ve Palomo, 2001).

3.3.1.1. Metakaolin

Kaolinit (kaolin kili)'in yapısal olarak kimyasal bileşimi $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ şeklinde olup 1:1 kil mineralidir bu durum yapısal anlamda parçanın bir tetrahedral silika tabakası ve bir oktahedral alümina tabakasından oluştuğu anlamına gelir (Mitchel ve Soga, 2005). Bir kaolinitin (kaolin kili) yapısı Şekil 3.2. de verilmiştir. Yapısal olarak kaolinit açısından zengin olan kayalar Çin Kili, Beyaz Kil veya kaolin olarak bilinir ve adlandırılırlar. Kaolin kili, sanayide porselen üretiminde geleneksel olarak kullanılan ince beyaz renkli bir kil mineralidir. Kaolin terimi Çin Kaolinginden türemiştir. Metakaolin kaolin kilinin kalsine edilmiş hali olup, $Al_2Si_2O_5(OH)_4 \rightarrow Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 + 2H_2O$ reaksiyonu beyaz renkli ile ilişkili kil minerali kaolinitin bir dehidroksillenmiş formunu oluşturmaktadır. Sıcaklık olarak 100°C-200°C arasında kaolinitler ile ilişkili kil minerali kaolinitin bir dehidroksillenmiş formunu oluşturmaktadır. Sıcaklık olarak 100°C-200°C arasında kaolinitle, adsorbe edilmiş suyunun çoğunu kaybederler ve 500°C-800°C aralığında, kaolinitler dehidroksilasyon yoluyla su kaybederek kalsine olur ve puzolanik aktivite kazanırlar. Sıcaklık kaolinitin (kaolin kili)'nin metakaolin'e dehidroksillenmesi (bileşik suyunun uzaklaştırılması) ile meydana gelen ve kimyasal olarak bağlı hidroksil iyonlarının uzaklaştırılması için büyük miktarda enerjiye ihtiyaç duyduğu için endotermik (ısıya ihtiyaç duyan) procestir; bundan dolayı, yüksek yüzey alanı içeren bir geçiş fazı (reaktif formda silis ve amorf alümina) üreterek kristal yapıyı bozar. Kaolin kilinin kalsine edilmesi ile elde edilen metakaolin çok büyük oranda puzolanik karakteristiğe sahip reaktif bir malzemedir. Kaolin kilinin daha yüksek sıcaklıkta yakılması, kuvars ve mullite yeniden kristalleşmeye neden olur (Shvarzman ve ark., 2003). Araştırmalarda farklı miktarlarda amorf faz (metakaolin) içeren kaolin killeri gibi kaolinit özellikte malzemelerin dehidroksilasyonu ve bu proses üzerinde ısı işlem parametrelerinin etkisi araştırılmıştır (Shvarzman ve ark., 2003). Kalsinasyon sıcaklığı olarak 450°C'nin altındaki sıcaklıklarda, kaolin dehidroksilasyon derecesinin nispeten düştüğü ve 0,18'in altına indiği görülmektedir. Sıcaklık değeri 450°C ile 570°C arasında, dehidroksilasyon derecesinin keskin bir şekilde yükselerek 0,95'e ulaştığı ve son olarak 570°C ile 700°C arasında, kaolinitin tamamen dehidroksile edildiği görülmüştür.



Şekil 3.2. Bir kaolinit tabakasının yapısı (Grim, 1962)

Günümüzde metakaolin, hızlı dayanım kazanma ve alkali aktifleştirici çözeltilerle iyi bir birleşme mekanizması oluşturması nedeniyle, geopolimer beton ve harçlarda sıklıkla kullanılan bir bağlayıcı niteliğindedir (Yong ve ark., 2017; Mobili ve ark., 2016; Duan ve ark., 2016; Sun ve Vollpracht, 2018). Davidovits, geopolimer üretiminde bağlayıcı anlamında birçok puzolanik karakteristikte malzemeyi incelemiş ve sonuçlara göre, metakaolin-cüruf esaslı geopolimerlerin gerek çevreci olmaları gerekse mekanik ve dayanıklılık performansı açısından en iyi sonuçları veren kompozitler olduğunu kabul etmiştir (Davidovits, 2008b; Davidovits, 1991).

3.3.1.2. Pişirilmiş taş tozu atığı

Asfalt fabrikalarında belirli gradasyonlardaki agregaların yüksek sıcaklık fırınlarına (150°C) sokulup belirli bir süre ısıtılması ve sonra üzerlerinde pişmiş halde bulunan tozların vakumlanarak atık malzeme niteliği kazanıp depolanması sonucu oluşan pişirilmiş taş tozu atıkları (PTTA) yol kaplaması üretilirken agrega ile bitüm arasında maksimum aderans sağlanması amacıyla proses gereği agregaların üzerindeki tozların bertaraf edilmesi amacıyla doğal olarak ısıya tabi tutularak ek bir enerjiye ihtiyaç duyulmadan yüksek puzolanik aktivite (%75) kazanırlar.

3.3.1.3. Kolemanit

Bor mineralleri kalsiyum borat adıyla da bilinen ve yaygın bir kullanım alanı bulunan kolemanit minerali Türkiye’de Kırka hariç bütün borat yataklarında en çok bulunan bor mineralidir. Bunun dışında diğer önemli borat mineralleri boraks (sodyum borat) olarak adlandırılan mineraller ve üleksit (sodyum-kalsiyum borat) mineralini içermektedir. Boraks minerali Türkiye’de sadece Kırka’da görülmektedir. Kolemanit ve üleksit büyük oranda Emet ve Bigadiç bölgelerinde üretilmektedir. Türkiye’deki mevcut olan bor yatakları tenör (değer) ve rezerv bakımından tüm dünyada en başta gelmektedir. Bununla birlikte dünya çapında kolemanit ve üleksit mineralleri çok geniş manada kullanım alanına sahiptir. Boratlar, yapısal olarak B_2O_3 içeriği ve borik asit olarak ifade edilir ve piyasada satılır (Helvacı, 1977). Borat mineralleri sanayi ve endüstride borik asit içeren veya bunu sağlayan bir bileşik şeklinde ifade edilir. Farklı miktarda borik asit içeren mineraller vardır. Bu minerallerin en çok karşımıza çıkanı üleksit, boraks (boraks penta hidrat boraks, boraks deka hidrat) ve kolemanittir. Dünya genelinde bor ihtiyacının %90’ına yakın bir kısmını kapsayan bu üç mineral (üleksit, boraks, kolemanit)’in üretiminde Türkiye ve ABD olmak üzere çok az ülkede üretilmektedir. Dünya çapında borat üretiminde lider bir ülke olabilmek adına Türkiye büyük gayret ve çalışmalar yapmıştır. Bor ürünlerinin katma değerleri de çok yüksektir. Son yıllarda dünyada teknolojinin gelişmesiyle beraber farklı sanayi ve endüstri alanlarında kullanılan bor ürünlerinin miktarı artmaktadır. Bununla birlikte sanayide ham veya yarı mamül ürünlerin yerine uç ürünler kullanılmakta ve yatırımlarda bu doğrultuda değişmektedir. Ekonomik anlamda yarar sağlayan tortul yataklarını oluşturan borat mineralleri, dünya genelinde ABD, Güney Amerika ve Türkiye’de bulunan bu yatakların çoğunun yapısı esas olarak Na ve Ca’nın hidratlanmış boratlarından oluşmaktadır.

3.3.1.4. Boraks penta hidrat

Doğada genel olarak renksiz ve saydam olarak bulunan boraks penta hidrat içindeki bazı maddeler nedeniyle pembe, gri, sarımsı renklerde de bulunabilir. Kimyasal olarak $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ formülü ile ifade edilir ve sertliği 2-2,5, özgül ağırlığı $1,81 \text{ g/cm}^3$ olan boraks penta hidrat’ın B_2O_3 içeriği %36,6’dır. Boraks penta hidrat suyunu kaybederek kolaylıkla tinkalkonite dönüşebilir. Kil ile birlikte ara katkılı tinkalkonit ve üleksit bir arada bulunabilir. Türkiye’de Eskişehir Kırka’da çıkarılmaktadır.

3.3.2. Alkali aktivatörler

Geopolimerde bağlayıcı malzeme niteliğinde seçilen puzolanik karakteristikteki malzemenin aktivasyonu, geopolimerizasyon işlemi ile mekanik olarak sağlam bağlayıcı bir malzemenin üretilmesinde en önemli faktördür. Alkali aktivatörler, aktivasyon sırasında çözeltide bulunan silis ve alümin içeren yapıların çökmesini ve kristalleşmesini sağlarlar. OH^- , reaktivite anlamında bir katalizör vazifesini ifa eder ve metal katyon (elektronu protondan az olan), yapısal anlamda bir ürün oluşturmaya ve tetrahedral alüminyum vasıtasıyla negatif çerçeveyi dengeleme işini yapar (Rangan, 2008). Geopolimerizasyonda başlangıçtaki tepkime mekanizması, alkali aktivatörün, puzolanik karakteristikteki malzemeyi çözme ve reaktif silika ve alüminyumunu çözelti haline getirme kabiliyetini içerir. Puzolanik malzemeler, alkali aktivatör çözeltilerle karıştırıldığında, yapısal olarak camsı bileşenleri hızlı bir şekilde çözülür. Reaksiyon sonucu oluşan jelin iyi bir şekilde kristalize bir yapıya dönüşmesi için yeterli zaman veya yer yoktur. Sonuçta ortaya mikro kristal, amorf veya yarı amorf bir yapı çıkar (Khale ve Chaudhary, 2007).

Geopolimerde kullanılabilecek en bilinen alkali aktivatörleri sodyum hidroksit, sodyum silikat, Na_2SO_4 (sodyum sülfat), Na_2CO_3 (sodyum karbonat), K_2CO_3 (potasyum karbonat), KOH (potasyum hidroksit), potasyum silikat, K_2SO_4 (potasyum sülfat) ve çimento klinkeri şeklinde sıralayabiliriz (Khale ve Chaudhary, 2007).

3.3.2.1. Sodyum hidroksit

Geopolimer üretiminde alkali aktivasyonda rol oynayan en önemli alkali aktivatörlerden biri olan sodyum hidroksit geopolimer üretiminde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Sodyum hidroksitte aktivasyon seviyesini bir K^+ iyon gibi muhafaza edemez, bununla birlikte sodyum katyonları potasyum katyonlarından daha küçük olduğu için ve daha iyi bir zeolitlenme sağladığı için daha kolay bir şekilde macun ağı boyunca hareket edebilir (Rangan, 2008).

3.3.2.2. Sodyum silikat

Geopolimer üretiminde alkali aktivasyonu sağlayan malzemelerden biri olan sodyum silikatlar veya potasyum silikatlar, elde edilirken 1100°C'yi aşan yüksek sıcaklıklarda sodyum karbonat (Na_2CO_3) veya potasyum karbonat (K_2CO_3) ile kum (SiO_2) basınçlı buhara tabi tutulur ve bu şekilde kaynaşma sağlanarak elde edilen ürüne cam suyu adı verilir. Cam suyu yarı-viskoz bir çözeltidir (Fernandez-Jimenez ve ark., 2005). Cam suyu puzolanik karakteristikteki bağlayıcılarla geopolimerizasyon reaksiyonu başlatmak için yeterli aktivasyon potansiyeline sahip olmadığından alkali aktivasyonda tek başına nadir kullanılır. Genellikle, alkali aktivasyonu ve bu şekilde üretilen geopolimer numunenin dayanımını arttırmak için takviye edici nitelikte sodyum hidroksit veya potasyum hidroksit ile birlikte karıştırılır. Geopolimerizasyonla ilgili yapılan deneysel çalışmalarda en çok kullanılan alkali aktivatörler, sodyum hidroksit, potasyum hidroksit, sodyum silikat ve potasyum silikat şeklindedir. Geopolimerler, genel olarak amorf yapıda alüminasilikatlardan oluşan ve toz haldeki bağlayıcı maddelerin alkali aktivatörlerden hidroksitler ve silikatlar veya bunların farklı oranlarda karışımı ile elde edilen yüksek PH içeriğine sahip malzemeleri ifade eder. Karışımdan sonra, iki farklı bileşen seramiğe benzer mikro anlamda bir amorf yapıyı oluşturabilmek için, önce erime ve sonrasında yoğunlaşma reaksiyonuna maruz kalırlar (Van Deventer ve ark., 2010).

4. MATERYAL VE YÖNTEM

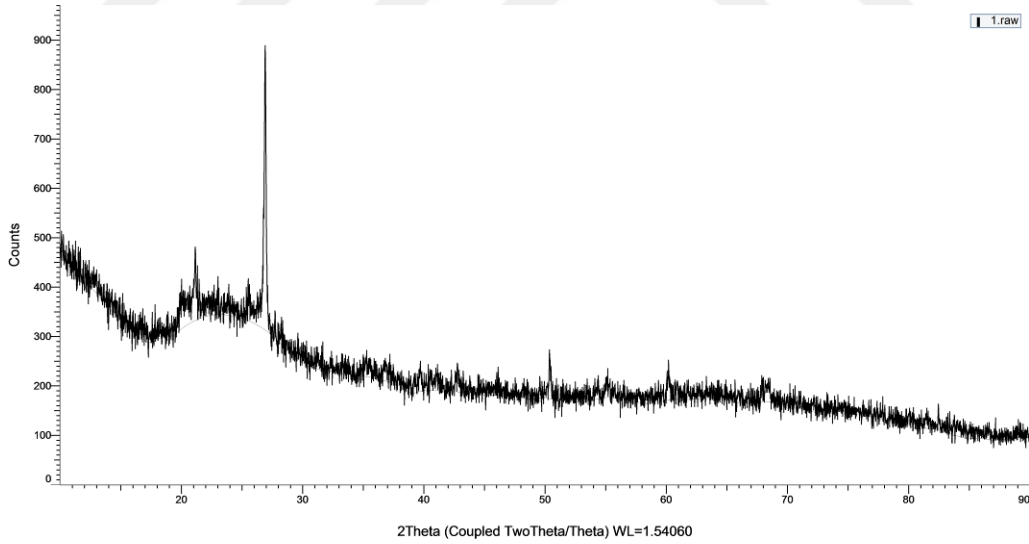
4.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler

4.1.1. Metakaolin

Bu tez çalışmasında kullanılan ana bileşenlerden metakaolin (kalsine edilmiş kaolin kili), Kaolin Endüstriyel Mineraller San. ve Tic. A.Ş. (İstanbul) firmasından temin edilmiştir. Özgül ağırlığı $2,52 \text{ g/cm}^3$ 'tür. silis+alümin+demir oksit oranı %97,18'dir. Pozolanik aktivitesi çok yüksektir. Firmadan temin edilen metakaolinin kimyasal bileşimi Çizelge 4.1. de XRD kırınım deseni ise Şekil 4.1. de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Metakaolinin kimyasal bileşimi

kimyasal analiz (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	B ₂ O ₃	kızdırma kaybı
MK	56,10	40,23	0,85	0,55	0,19	0,16	0,51	0,24	-	1,10



Şekil 4.1. Deneylerde kullanılan metakaolinin X ışını kırınımı (XRD) deseni

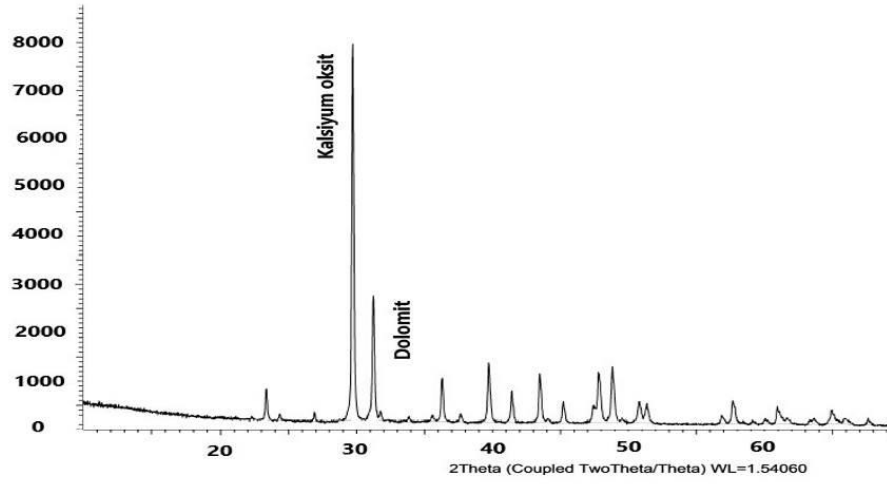
Deneylerde kullanılan metakaolinin $45 \mu\text{m}$ elek üzerinde kalan miktarı % 0,70 olduğundan ince tanelidir. Deneylerde bu durum metakaolinin çok reaktif olabileceğini gösterir. Çünkü bağlayıcı malzemelerde daha küçük parçacıklar daha yüksek bir yüzey alanı oluşturur ve dolayısıyla reaksiyonlara daha fazla maruz kalırlar. Deneylerde kullanılan metakaolinin fotoğrafı Şekil 4.2. de verilmiştir.



Şekil 4.2. Deneylerde kullanılan metakaolin

4.1.2. Pişirilmiş taş tozu atığı

Asfalt fabrikalarında belirli gradasyonlardaki agregaların yüksek sıcaklık fırınlarına (150°C) sokulup belirli bir süre ısıtılması ve sonra agregaların üzerlerinde pişmiş halde bulunan tozların vakumlanarak atık malzeme niteliği kazanıp depolanması sonucu oluşan pişirilmiş taş tozu atıkları doğal olarak ısıya tabi tutularak ek bir enerjiye ihtiyaç duyulmadan yüksek puzolanik aktivite (%75) kazanırlar. Dolayısıyla ek bir enerjiye ihtiyaç duyulmadan yüksek puzolanik aktiviteye sahip bir atık elde edilmesi ve bu atığın değerlendirilmesi anlamında pişirilmiş taş tozu çok büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada kullanılan Pişirilmiş taş tozu atığı Meram Belediyesi Asfalt Fabrikasından bila bedel olarak temin edilmiş olup, özgül ağırlığı $2,70 \text{ g/cm}^3$ 'tür, pişirilmiş taş tozu atığının X ışını kırınımı (XRD) deseni Şekil 4.3. de, kimyasal birleşimi Çizelge 4.2. de, fotoğrafı Şekil 4.4. te verilmiştir. Pişirilmiş taş tozu atığı çalışma kapsamında deneylerde metakaolin ana bağlayıcısının yerine %10, %20 ve %30 oranlarında ikame edilerek kullanılmıştır.



Şekil 4.3. Pişirilmiş taş tozu atıklarının X ışını kırınımı (XRD)

Çizelge 4.2. Pişirilmiş taş tozunun atığının kimyasal bileşimi

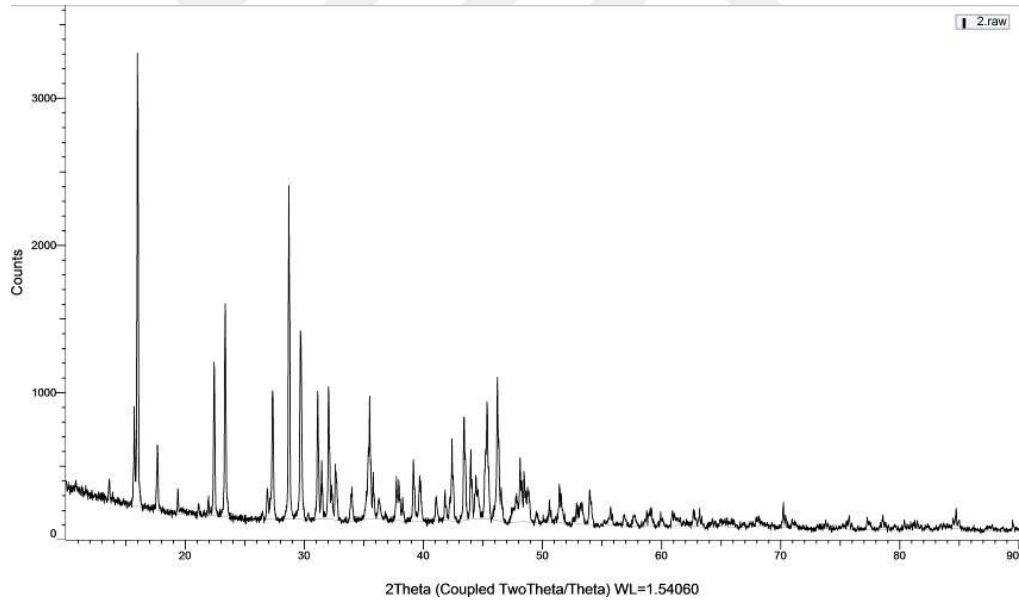
Kimyasal analiz (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	B ₂ O ₃	Kızdırma kaybı
PTTA	4,08	1,62	0,58	0,11	43,00	9,34	0,19	-	-	1,35



Şekil 4.4. Deneylerde kullanılan pişirilmiş taş tozu atığı

4.1.3. Kolemanit

Türkiye Dünya genelinde ve ülkemizde en yaygın bilinen kalsiyum borat bileşiği kolemanittir. Türkiye bor yataklarının önemli cevherlerinden bir olan kolemanit $2\text{CaO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$; formülü ile ifade edilir ve kısa prizmatik kristaller veya masif agregalar halinde renksiz, beyaz, sarımsı beyaz ve gri renkte bulunur. Kolemanitin en çok kullanıldığı yerlerden bazıları cam, çimento ve demir-çelik sektörüdür. Minerale uygulanan zenginleştirme yöntemleri sayesinde konsantr performansı odaklı hedef değerlere ulaşmak mümkün olmaktadır. Bu çalışmada metakaolinle beraber katkı malzemesi olarak kullanılan kolemanit Eti Maden Bigadiç Bor İşletmesinden bila bedel temin edilmiştir. Karışımlarda kullanılan katkı oranları sırasıyla %5, %10 ve %15 şeklindedir. Kolemanitin özgül ağırlığı $2,42 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Kolemanitin kimyasal bileşimi Çizelge 4.3. de, X ışını kırınımı (XRD) deseni Şekil 4.5. de ve toz haldeki fotoğrafı Şekil 4.6. da verilmiştir.



Şekil 4.5.Kolemanit atığı X ışını kırınımı (XRD)

Çizelge 4.3. Kolemanitin kimyasal bileşimi

Kimyasal analiz (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	B ₂ O ₃	Kızdırma kaybı
K	5,00	0,40	0,08	-	27,00	3,00	-	0,50	40,00	25,00

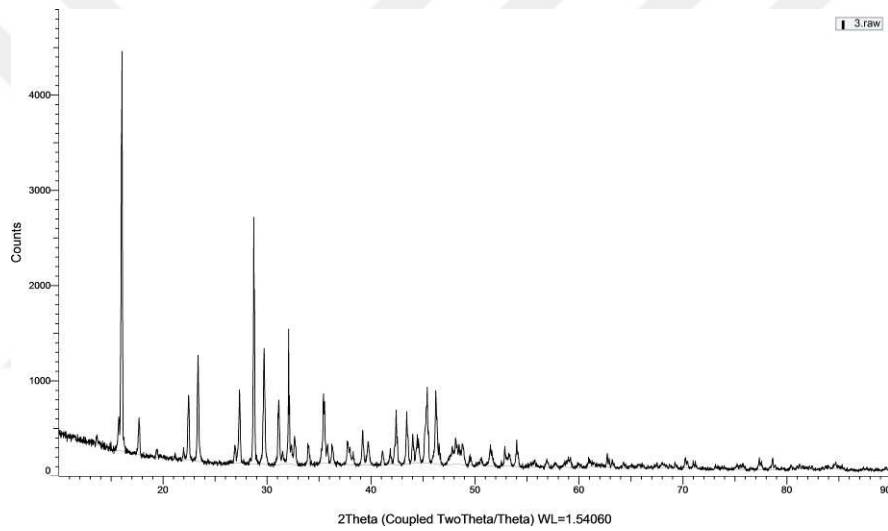
**Şekil 4.6.** Deneylerde kullanılan kolemanit

4.1.4. Boraks penta hidrat

Doğada genel olarak renksiz ve saydam olarak bulunan boraks penta hidrat içindeki bazı maddeler nedeniyle pembe, gri, sarımsı renklerde de bulunabilir. Kimyasal olarak $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ formülü ile ifade edilir ve sertliği 2-2,5, özgül ağırlığı 1,81 g/cm³'tür. Bu tez çalışmasında metakaolinle beraber katkı malzemesi olarak kullanılan ve Eti Maden Kırka Bor İşletmesinden bila bedel temin edilen boraks penta hidratın fotoğrafı Şekil 4.7. de, X Işınımı kırınımı (XRD) deseni Şekil 4.8. de verilmiştir.



Şekil 4.7. Deneylerde kullanılan boraks penta hidrat



Şekil 4.8. Boraks penta hidrat X ışını kırınımı (XRD)

4.1.5. Standart rilem kumu

Çalışmada üretilen geopolimer harç karışımlarının hazırlanması için $1,352 \text{ kg/m}^3$ birim ağırlığa ve $2,563 \text{ g/cm}^3$ özgül ağırlığa sahip standart rilem kumu (Şekil 4.9.) kullanılmıştır. Geopolimer harç karışımlarında kullanılan BS EN 196-1'e uygun standart rilem kumu, Trakya Limak Çimento Sanayi T.A.S. çimento fabrikasından temin edilmiştir. Standart kumun yapılan elek analizi sonuçlarına göre sınır değerleri Çizelge 4.4. te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Standart rilem kumunun sınır değerleri

Özellik	Tane büyüklüğü (mm)					
	0,08	0,16	0,5	1,0	1,6	2,0
Kalan (%)	99	87	72	34	6	0
Sınır (%)	99+1	87+5	67+5	33+5	7+5	0

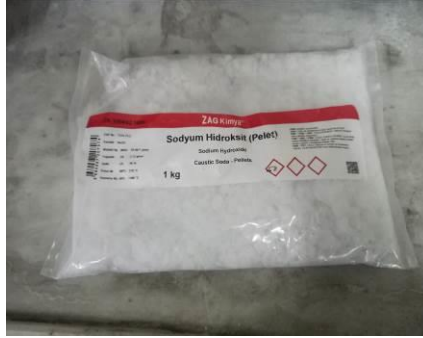
**Şekil 4.9.** Deneylerde kullanılan standart rilem kumu

4.1.6. Alkali aktivatörler

Çalışmada alkali aktivatör olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanılmıştır. sodyum silikat çözeltisinin $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ molar oranı 3'tür. Katı pelet halde bulunan ve Zag Kimya firmasından temin edilen sodyum hidroksit'in fotoğrafı Şekil 4.10. da verilmiştir. Sodyum_hidroksit çözeltisi, saf su içinde sodyum hidroksit parçacıklarının (%97 saflık) çözülmesiyle 12 M'lık bir konsantrasyonla hazırlanan sodyum hidroksit çözeltisinin fotoğrafı Şekil 4.11. de verilmiştir. Özkimsan Kimya firmasından temin edilen ve deneylerde kullanılan sodyum silikatın fotoğrafı Şekil 4.12. de verilmiştir. Sodyum hidroksit ve sodyum silikatın kimyasal özellikleri Çizelge 4.5. ve Çizelge 4.6. da verilmiştir.

Çizelge 4.5. Sodyum hidroksitin kimyasal özellikleri

NaOH(%)	Na ₂ CO ₃ (%)	Cl (%)	SO ₄ (%)	Al (%)	Fe (%)
97,0	0,3	≤ 0,01	≤ 0,01	≤ 0,002	≤ 0,002

**Şekil 4.10.** Deneylerde kullanılan sodyum hidroksit**Şekil 4.11.** Deneylerde kullanılan 12 M sodyum hidroksit çözeltisi**Çizelge 4.6.** Sodyum silikatın kimyasal özellikleri Fe (%) ağır metaller (Pb gibi)

Na ₂ O (%)	SiO ₂ (%)	Yoğunluk (g/ml) (20°C)	Fe (%)	Ağır metaller (Pb gibi) (%)
8,2	27,0	1,360	≤ 0,005	≤ 0,005



Şekil 4.12. Deneylerde kullanılan sodyum silikat

4.1.7. Geopolimer harç üretimi

Çalışma kapsamında üretilen 40x40x160 mm prizmatik deney kalıplarında ana bağlayıcı malzeme metakaolin olmak üzere ikame malzemesi anlamında farklı oranlarda pişirilmiş taş tozu atığı, katkı malzemesi anlamında ise bor minerallerinden kolemanit minerali ve boraks penta hidrat minerali kullanılarak üretilen geopolimer harçların kodlanmasındaki sistematığe örnek vermek gerekirse; 100MK, bağlayıcısı %100 metakaolin olan geopolimer harçlar kastedilmiştir. 90MK10PTTA, bağlayıcı olarak %90 metakaolin ikame anlamında ise, %10 pişirilmiş taş tozu atığı kullanılarak üretilen geopolimer harçlar kastedilmiştir. 100MK5K, bağlayıcısı %100 metakaolin olan katkı malzemesi %5 kolemanit kullanılarak üretilen geopolimer harçlar kastedilmiştir. Bu kapsamda geopolimer üretimi için yapılan çalışmada deneylerin kodlanması Çizelge 4.7. de verilmiştir. Geopolimer üretimi için yapılan deneysel çalışma Şekil 4.13. te, geopolimer harçların hazırlanmasında kullanılan manuel çimento mikseri Şekil 4.14. (a) da, geopolimer harç hazırlama işlemi Şekil 4.14. (b) de, geopolimer harçların yerleştirilmesinde kullanılan sarsma tablası Şekil 4.15. te, geopolimer harçların ısıtılmasında kullanılan laboratuvar etüvü Şekil 4.16. da, geopolimer harç numunelerinin bileşen miktarları ise, Çizelge 4.8. de verilmiştir. Çalışma kapsamında üretilen geopolimer harç numunelerinin kür dolabında gösterimi Şekil 4.17. (a) da deney öncesi ortama çıkarılan numuneler Şekil 4.17. (b) de verilmiştir.



Şekil 4.13. Geopolimer üretimi için yapılan deneysel çalışma



(a) Manuel çimento mikseri



(b) Geopolimer harç hazırlama

Şekil 4.14. Geopolimer harçların hazırlanması **a)** Manuel çimento mikseri **b)** Geopolimer harç hazırlama



Şekil 4.15. Geopolimer harçların yerleştirilmesinde kullanılan sarsma tablası



Şekil 4.16. Geopolimer harçların ısıtılmasında kullanılan laboratuvar etüvü

Çizelge 4.7. Deneylerin kodlanması

Deney kodu	Deneyin açıklımı
100MK	%100 Metakaolin bağlayıcılı harç
90MK10PTTA	%10 Pişirilmiş taş tozu atığı ikameli harç
80MK20PTTA	%20 Pişirilmiş taş tozu atığı ikameli harç
70MK30PTTA	%30 Pişirilmiş taş tozu atığı ikameli harç
100MK5K	%5 Kolemanit katkılı harç
100MK10K	%10 Kolemanit katkılı harç
100MK15K	%15 Kolemanit katkılı harç
100MK5BPH	%5 Boraks penta hidrat katkılı harç
100MK10BPH	%10 Boraks penta hidrat katkılı harç
100MK15BPH	%15 Boraks penta hidrat katkılı harç

Çizelge 4.8. Geopolimer harç numunelerinin bileşen miktarları

Deney kodu	MK (gr)	PTTA (gr)	K (gr)	BPH (gr)	SH (gr)	SS (gr)	Kum (gr)
100MK	675	0	0	0	270	405	1350
90MK10PTTA	607,5	67,5	0	0	270	405	1350
80MK20PTTA	540	135	0	0	270	405	1350
70MK30PTTA	472,5	202,5	0	0	270	405	1350
100MK5K	675	0	33,75	0	270	405	1350
100MK10K	675	0	67,5	0	270	405	1350
100MK15K	675	0	101,25	0	270	405	1350
100MK5BPH	675	0	0	33,75	270	405	1350
100MK10BPH	675	0	0	67,5	270	405	1350
100MK15BPH	675	0	0	101,25	270	405	1350



(a) Kür dolabı



(b) Deney öncesi çıkarılan numuneler

Şekil 4.17. Üretilen geopolimer harç numuneleri a) Kür dolabı b) Deney öncesi çıkarılan numuneler

4.2. Deneysel Çalışmalar

4.2.1. Taze haldeki geopolimer harçlar üzerine yapılan deneyler

4.2.1.1. Priz alma süresinin tayini deneyi (vicat aleti)

Priz başlangıç ve bitiş zamanı beton ve harçlar önemli bir zamandır. Beton ve harçlarda prize başlama süresi 1 saatten az olmamalı, priz bitiş süresi ise 10 saatten fazla olmamalıdır. Geopolimer harç numunelerinde priz başlama ve bitiş sürelerinin tespiti için vicat aleti kullanılarak priz süresinin tayini deneyi yapılmaktadır. Priz süresinin tayini deneyi için Şekil 4.18. (a) da verilen vicat cihazına takılmış olan iğne British Standardına (BS) göre ayarlanmış olup Türkiye’de sadece tek iğne kullanılmaktadır. Priz sürelerinin tayini deneyi $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta ve nispi nemi %50-%60 olan bir oda içinde yapılmıştır. Vikat aletine iğnesi takılmış ve iğne cam levhaya değdiği anda sıfırı gösterecek şekilde ayarlanmıştır. Daha sonra vikat halkası ve cam levha ince yağ ile yağlanmıştır. Hazırlanan geopolimer harç numuneleri yağlanan vicat halkası ve cam levha içerisine dökülmüştür. Deney süresinde vicat halkasının sarsılmamasına dikkat edilmiştir. Vikat iğnesi halka içerisindeki hamurun üst yüzüne değecek kadar yavaşça indirilmiş ve yan taraftaki vida ile sıkıştırılmıştır. Daha sonra belirli aralıklarla örneği 15 dk, kol bırakılarak pastanın içine girmesi sağlanmış ve iğnenin pastaya batması tamamlandıktan sonra okuma yapılmıştır. İğnenin ucu ile taban plakası arasındaki mesafeyi veren bu değer, sıfır anından itibaren geçen süre ile birlikte kaydedilmiştir. İğne bir defa batırılan yere tekrar batırılmamış ve her batırılışından sonra bir bez veya süzgeç kâğıdı ile silinmiştir. İğnenin aynı numuneye batırılma işlemi, iğnenin pastaya batırıldığı noktalar arasındaki veya kalıp kenarından en az 10 mm mesafe olacak şekilde ve 15 dakikalık uygun zaman aralıklarıyla tekrarlanmıştır. İğne her seferinde hamurun değişik alanlarına batırılmıştır. Geopolimer harç hamuruna batan iğne cam levhaya 3-5 mm uzakta kaldığı an priz başlangıç süresi olarak alınmış ve kaydedilmiştir. Taban plakasının üzerinde bulunan kullanılmış dolu kalıp, priz sonu süresi tayini için ters çevrilmiştir. Böylece priz sonu süresinin tayini, pastanın başlangıçta taban plakası ile temas eden yüzeyi üzerinde yapılabilmektedir. Priz başlama süresinin tayini deneyindeki gibi okumalar alınmış ve iğne en çok 1 mm girinceye kadar devam edilmiş ve en çok 1 mm girince priz sonu olarak tespit edilip kaydedilmiştir (TS EN 196-3). Deneyin yapılışı Şekil 4.18. (b) de verilmiştir.



(a) Vicat aleti



(b) Deneyin yapılışı

Şekil 4.18. Priz başlangıç ve bitiş sürelerinin tayini a) Vicat aleti b) Deneyin yapılışı

4.2.1.2. İşlenebilirlik deneyi (Yayılma tablası)

Tez Çalışması kapsamında üretilen metakaolin tabanlı pişirilmiş taş tozu ikameli kolemanit ve boraks penta hidrat katkılı geopolimer harçlara TS EN 1015-3 standardında belirtilen kıvam deneyi yayılma tablası metodu ile uygulanmıştır. Sodyum hidroksit ve sodyum silikat ile aktive edilmiş taze geopolimer harç karışımları Şekil 4.19. (a) da görülen üst iç çapı 70 mm taban iç çapı 100 mm ve yüksekliği 50 mm olan konik kap yayılma tablası ortasına yerleştirilerek, içine 2 tabaka halinde harç yerleştirilerek sıkıştırma işlemi yapılmıştır. Her tabakaya 25'er kez şişlenerek sıkıştırılmış ve sıkıştırılan harcın en üst tabakasının yüzeyi düzeltilip konik kap yukarı doğru çekilerek alınmıştır. Daha sonra yayılma tablası üzerindeki harcın 1,25 cm yükseklikten 15 saniyede 15 düşüş yaptırılması için yayılma tablasının kolu çevrilmiştir. Yayılan harcın 2 farklı yönden çapları ölçülmüş ve ortalamaları alınarak cm cinsinden ifade edilmiştir. Çalışmada üretilen geopolimer harç numunelerinin deney öncesi hazırlanan numune Şekil 4.19. (a) da, yayılan harç Şekil 4.19 (b) de ve yayılması tamamlanan geopolimer harcın yayılma çapının ölçülmesi ise Şekil 4.19. (c) de verilmiştir.



(a) Yayılma deneyi öncesi hazırlanan numune



(b) Yayılan harç



c) Yayılma çapının ölçülmesi

Şekil 4.19. İşlenebilirlik deneyi a) Yayılma deneyine hazırlanan numune b) Yayılan harç

c) Yayılma çapının ölçülmesi

4.2.1.3. Birim hacim ağırlığı tayini

Taze haldeki geopolimer harçların birim hacim kütlesi TS 1015-6'ya göre bulunmuştur. Deney yöntemi, bilinen hacimdeki harç kütlesinin hesaplanmasını içermektedir. Belirli bir hacim içerisinde sıkıştırılarak yerleştirilmiş taze haldeki geopolimer harcın birim hacmine isabet eden ağırlığın g/cm^3 olarak ifade edilmesini içerir. Geopolimer harç numunelerinin üretiminde kullanılan 40x40x160 mm boyutlarında prizmatik kalıp ağırlığının tayini Şekil 4.20. (a) da, kalıp+numune ağırlığı tayini Şekil 4.20. (b) de verilmiştir. Geopolimer harçların birim hacim ağırlıkları Denklem 4.1. e göre hesaplanmıştır.

$$\rho_m = (m_2 - m_1) / V \quad (4.1)$$

ρ_m : Taze harç birim hacim ağırlığı (gr/cm³)

m_1 : Kabın ağırlığı (gr)

m_2 : Kabın ve taze harcın ağırlığı (gr)

V : Kabın Hacmi (cm³)'ini ifade eder.



(a) Kalıp ağırlığının tayini



(b) Kalıp+numune ağırlığı tayini

Şekil 4.20. Taze halde birim hacim ağırlık tayini **a)** Kalıp ağırlığının tayini **b)** Kalıp+numune ağırlığı tayini

4.2.2. Sertleşmiş haldeki geopolimer harçlar üzerinde yapılan deneyler

4.2.2.1. Eğilme dayanımı deneyi

Ön deneylerde olduğu gibi, esas deneyler için üretilen (40x40x160 mm) boyutlarındaki geopolimer harç örnekleri eğilme dayanımını saptamak için orta noktasından yüklenmiş basit kiriş metodu ile eğilme dayanımı tayini deneyine tabi tutulmuştur. Yükleme yapıldığı yön ile örneğin yükü aldığı üst yüzeyin tam 90° açı yapmasına dikkat edilerek ve yükleme örneğin tam orta noktasına yapılıp, örnek kırılana kadar devam etmiştir. TS EN 196-1, 2002. Çimento deney metodları–Bölüm 1: dayanım standardına uygun olarak hazırlanan harçlar 40x40x160 mm boyutlarındaki kalıplara yerleştirildikten sonra sıkıştırma işlemine tabi tutulmuştur. 7, 28 ve 90 günlük süreler dolduğunda, TS EN 1015-11 standardına uygun olarak eğilme deneyi uygulanmıştır. Şekil 4.21. de görüldüğü gibi mesnet açıklığı 100 mm, yükleme hızı 50 N/s olacak şekilde tek noktadan kırılincaya kadar yükleme uygulanmıştır. İlk olarak eğilme dayanımı için her gruptan 3'er adet numune 7., 28. ve 90. günlerde kırılarak Prizmanın ortasına uygulanan maksimum kuvvet bulunmuştur. Daha sonra sonuçların aritmetik ortalamaları alınarak Denklem 4.2. kullanılarak eğilme dayanımı değeri bulunmuştur. Mekanik dayanım değerlerinin bulunması için kullanılan eğilme ve basınç presisi Şekil 4.21. de verilmiştir. Eğilme deneyine tabi tutulan ve ikiye ayrılan geopolimer harç numuneleri de Şekil 4.22. de verilmiştir.

Eğilme dayanımı, (4.2) denklemine göre bulunmaktadır.

$$R_f = 1,5 (F \cdot \ell / b^3) \quad (4.2)$$

Burada;

R_f : Eğilme dayanımı, (N/mm²)

b : Prizmanın kare kesitinin kenar uzunluğu, (40 mm)

F : Prizmanın ortasına uygulanan maksimum kuvvet, (Newton)

ℓ : Mesnet silindirlerin eksenleri arasındaki uzaklık, (100 mm).



Şekil 4.21. Eğilme ve basınç presi



Şekil 4.22. Eğilme deneyine tabi tutulan ve ikiye ayrılan geopolimer harç numuneleri

4.2.2.2. Basınç dayanımı deneyi

Eğilme deneyine tabi tutularak ikiye ayrılan 40x40x160 mm boyutundaki numuneler basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur. Deneysel çalışma TS EN 1015-11 standardına uygun olarak yapılmıştır. Daha önce eğilme deneyi sonucunda ikiye ayrılan prizma numuneler üzerine basınç dayanım deneyi uygulanmıştır. Parçalanmış numuneler Her bir yarım örnek (40x40 mm) deney presinin yükleme başlıkları arasına yerleştirilerek F yükü uygulanmış ve yüklemeye sabit bir hızla ve darbe etkisi yapmayacak şekilde örnek kırılincaya kadar devam edilmiştir. Kırılmanın olduğu anda deney presinin gösterdiği en büyük yük kaydedilmiş bu basınç kuvvetini vermiştir. Eğilme deneyinde ikiye bölünmüş 3 adet prizma numuneden elde edilen 6 adet numunenin ortalama basınç yükü değeri bulunmuştur. Basınç dayanım değeri Denklem 4.3. ile hesaplanmıştır.

$$R_c = F_c / b^2 \quad (4.3)$$

Burada;

R_c : Basınç dayanımı, (N/mm²)

b : Basınç plakasının kenar uzunluğu, (40 mm)

F_c : Kırılma anında uygulanan en büyük kuvvet, (Newton)

4.2.2.3. Görünen özgül ağırlık, hacimsel özgül ağırlık, boşluk oranı, su muhtevası, ağırlıkça su emme oranı deneyleri

Çalışma kapsamında üretilen 40x40x160 mm boyutlarındaki geopolimer harç numuneleri 24 saat süreyle 60°C etüv kürüne maruz bırakıldıktan sonra 28.günde kuru halde (hava kurusu) (D) hassas terazide tartımları yapılmıştır. Daha sonra aynı numuneler 48 saat süresince etüvde tutularak değişmez ağırlığa getirilip fırın kurusu ağırlığı (A) tespit edilmiştir. Daha sonra 48 saat boyunca oda sıcaklığında su içinde bekletilip çıkarıldıktan sonra doygun kuru yüzey ağırlığı (B) bulunmuştur. Arşimed prensibinden yararlanarak su içindeki ağırlığı (C) tespit edilmiştir. Su muhtevası, hacimsel özgül ağırlık, görünen özgül ağırlık, boşluk oranı ve ağırlıkça su emme oranı sonuçları verilen ilgili bağıntılar ile hesaplanmıştır. İlgili bağıntılar Denklem 4.4., Denklem 4.5., Denklem 4.6., Denklem 4.7., Denklem 4.8. de verilmiştir. Deneyler için kullanılan arşimed terazisi Şekil 4.23. te verilmiştir.

$$\text{Su muhtevası (\%)} = [(D-A)/D] \times 100 \quad (4.4)$$

$$\text{Hacimsel özgül ağırlık} = A/(B-C) \quad (4.5)$$

$$\text{Görünen özgül ağırlık (g/cm}^3\text{)} = A/(A-C) \quad (4.6)$$

$$\text{Boşluk oranı (\%)} = [(B-A)/(B-C)] \times 100 \quad (4.7)$$

$$\text{Ağırlıkça su emme oranı (\%)} = [(B-A)/(A)] \times 100 \quad (4.8)$$

A= Kuru halde tespit edilen ağırlığı (etüv kuru)

B= Doygun kuru yüzey ağırlığı (gr)

C= Su içinde tespit edilen ağırlık (gr)

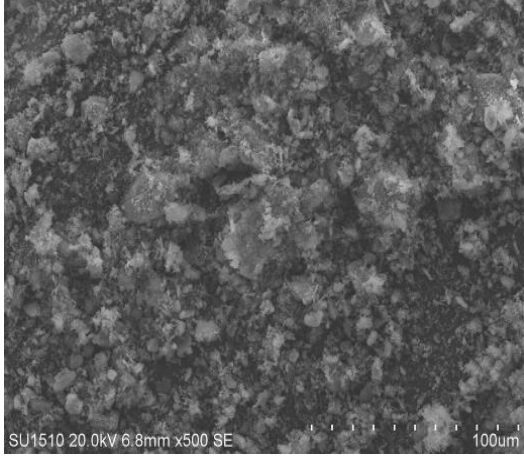
D=Kuru haldeki ağırlık (hava kuru) (gr)



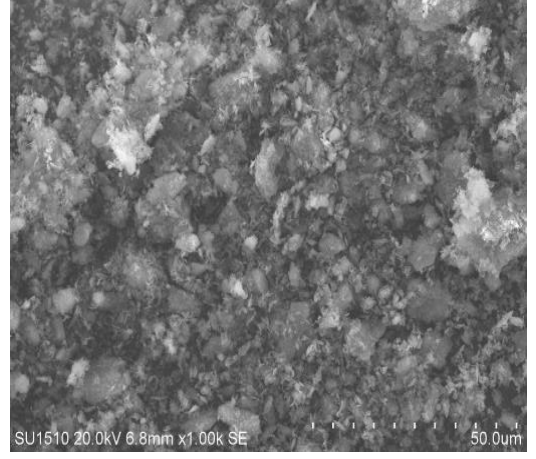
Şekil 4.23. Arşimed terazisi

4.2.3. SEM analizi

Farklı deney kodlarında üretilen geopolimer harç numuneleri için, Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) cihazı ile görüntüleme, numuneye gönderilen hızlandırılmış elektronların numunenin atomları ile etkileşmesi sonucunda saçılan elektronların farklı dedektörler vasıtasıyla analiz edilmesi esasına dayanmaktadır. Bu saçılmaların değerlendirilmesi ile malzeme içerisindeki yapıların mikro ve nano mertebesinde görüntüleme analizi yapılabilir. Çalışmada üretilen geopolimerler kendiliğinden iletken olmadığı için, numuneler bir mikro/paladyum püskürtmeli kaplayıcı kullanılarak kaplanmış ve mikrograf toplanması sırasında hiçbir çizik veya görüntü dengesizliği olmadığından emin olunmuş ve geopolimer harç numuneleri püskürtme cihazı kullanılarak iletken bir tabakayla kaplatılmıştır. Kaplama yaklaşık olarak 15 dakika sürmektedir. Taramalı elektron mikroskopları çalışma prensibi, geleneksel ışık mikroskopları gibidir, ancak ışık elektronlarla değiştirilir. Çözünürlük, büyütme ve alan derinliği aynı özelliklere dayanmaktadır, ancak ışık mikroskobu ve elektron mikroskobu arasındaki teknoloji, ışığın ve elektronların farklı doğasından dolayı farklıdır. Üretilen geopolimer harçların mekanik özelliklerinin belirlendiği numunelerden alınan küçük parçalar taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. SEM fotoğrafları Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (BİTAM)'nde çekilmiştir. SEM cihazı ile iletken olmayan numunelerde daha ayrıntılı ve net görüntü alınabilmesi için kaplama cihazı kullanılarak 50 kez, 100 kez, 500 kez, 1000 kez, 3000 kez, 5000 kez ve 10000 kez gibi farklı büyütme oranları kullanılarak büyütülmüş ve aşağıdaki SEM görüntüleri elde edilmiştir. Deneylerde kullanılan metakaolinin 500 kez ve 1000 kez büyütülmüş SEM içyapı görüntüleri Şekil 4.24. (a) ve (b) de, 5000 kez ve 10000 kez büyütülmüş SEM içyapı görüntüleri Şekil 4.25. (a) ve (b) de, pişirilmiş taş tozu atığının 500 kez ve 1000 kez büyütülmüş SEM içyapı görüntüleri Şekil 4.26. (a) ve (b) de, 5000 kez ve 10000 kez büyütülmüş SEM içyapı görüntüleri Şekil 4.27. (a) ve (b)'de, kolemanitin 500 kez ve 1000 kez büyütülmüş SEM içyapı görüntüleri Şekil 4.28. (a) ve (b) de, 5000 kez ve 10000 kez büyütülmüş SEM içyapı görüntüleri Şekil 4.29. (a) ve (b) de, boraks penta hidratin 100 kez ve 500 kez büyütülmüş SEM içyapı görüntüleri Şekil 4.30. (a) ve (b) de , 1000 kez ve 5000 kez büyütülmüş SEM içyapı görüntüleri Şekil 4.31. (a) ve (b) de verilmiştir.

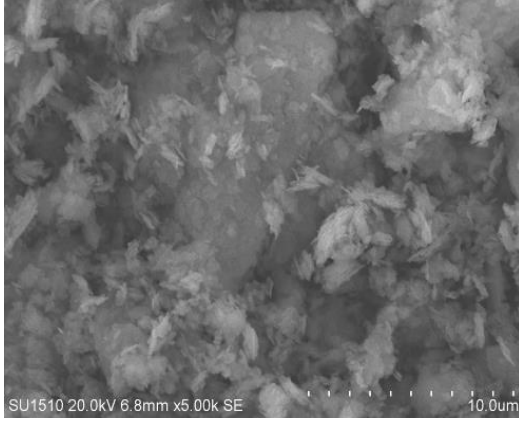


(a) 500 kez büyütülmüş

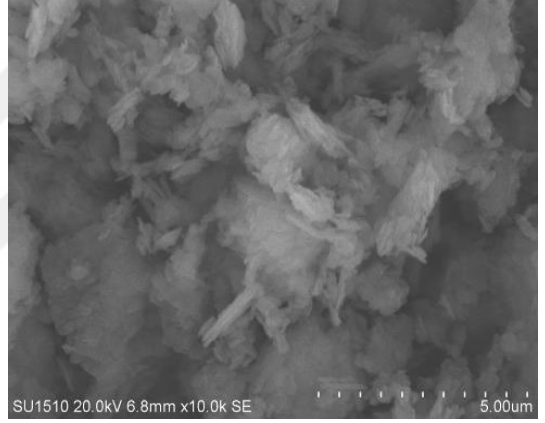


(b) 1000 kez büyütülmüş

Şekil 4.24. Metakaolinin SEM içyapı görüntüleri **a)** 500 kez büyütülmüş **b)** 1000 kez büyütülmüş

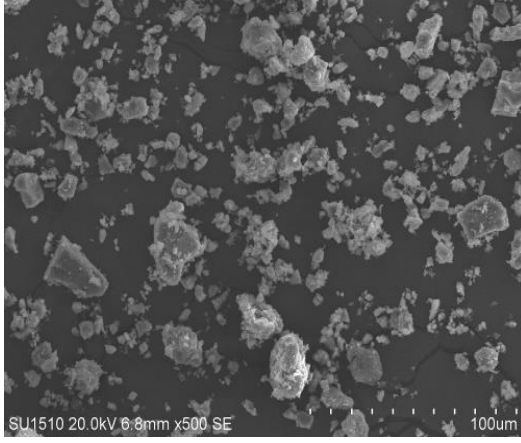


(a) 5000 kez büyütülmüş

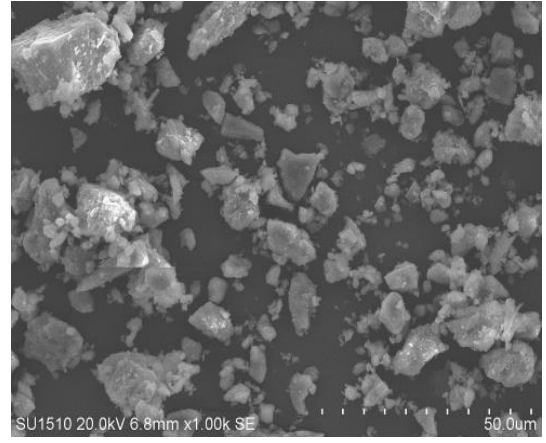


(b) 10000 kez büyütülmüş

Şekil 4.25. Metakaolinin SEM içyapı görüntüleri **a)** 5000 kez büyütülmüş **b)** 10000 kez büyütülmüş

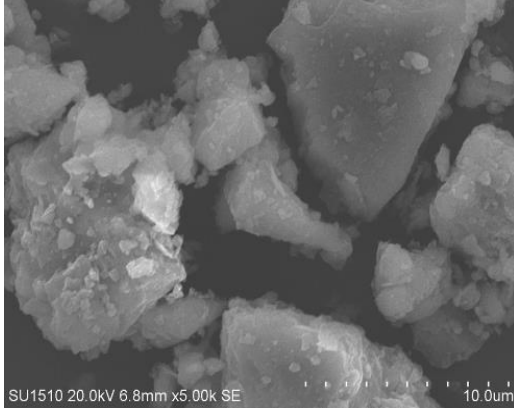


(a) 500 kez büyütülmüş

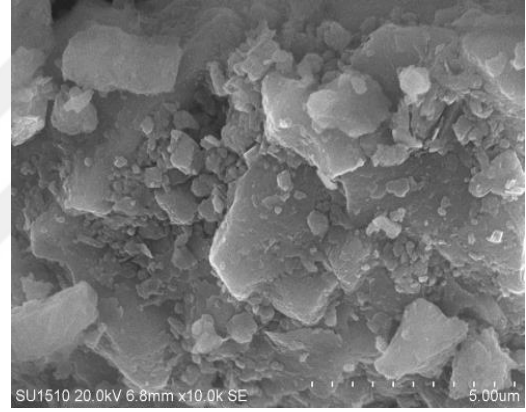


(b) 1000 kez büyütülmüş

Şekil 4.26. Pişirilmiş taş tozunun SEM içyapı görüntüleri **a)** 500 kez büyütülmüş **b)** 1000 kez büyütülmüş

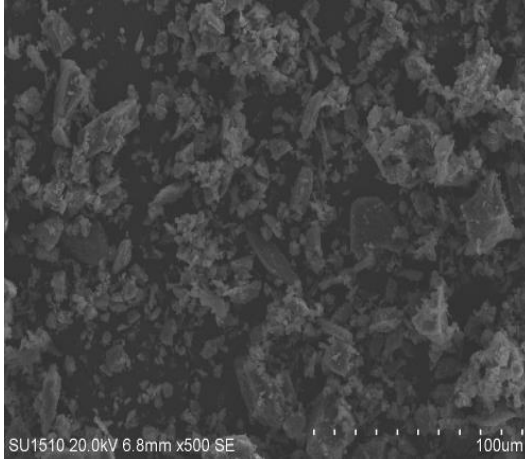


(a) 5000 kez büyütülmüş

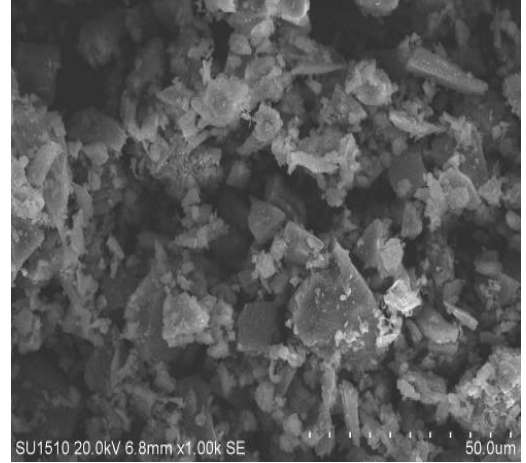


(b) 10000 kez büyütülmüş

Şekil 4.27. Pişirilmiş taş tozunun SEM içyapı görüntüleri **a)** 5000 kez büyütülmüş **b)** 10000 kez büyütülmüş

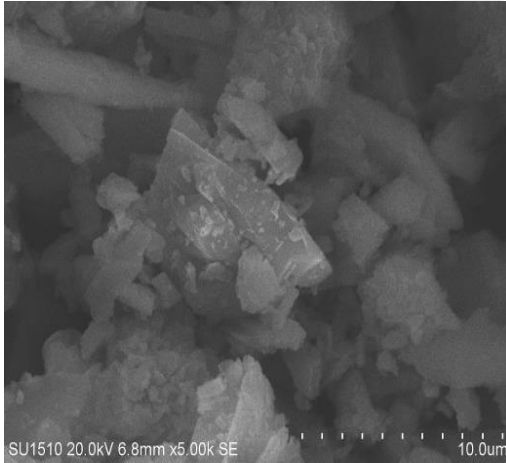


(a) 500 kez büyütülmüş

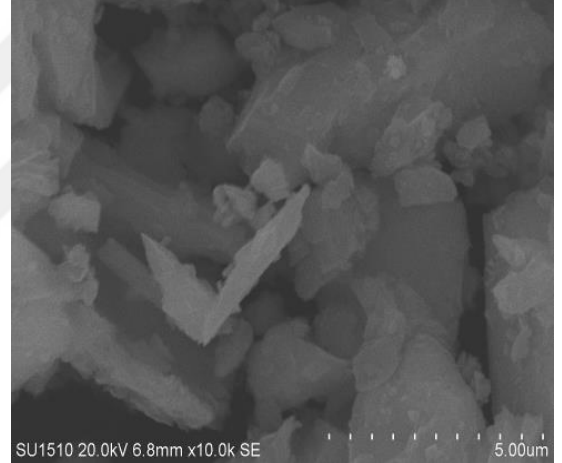


(b) 1000 kez büyütülmüş

Şekil 4.28. Kalkanitin SEM içyapı görüntüleri **a)** 500 kez büyütülmüş **b)** 1000 kez büyütülmüş

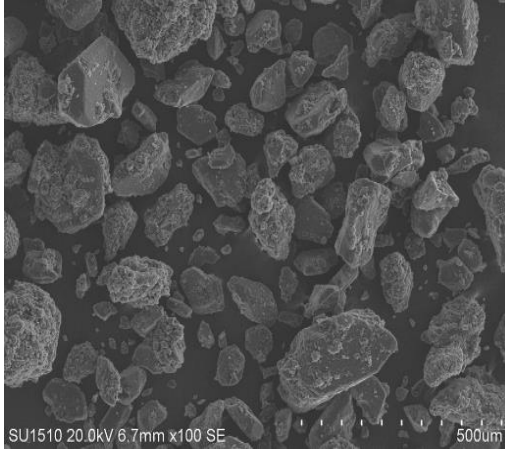


(a) 5000 kez büyütülmüş

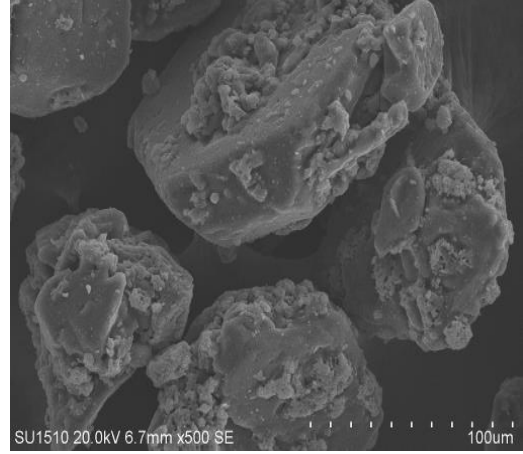


(b) 10000 kez büyütülmüş

Şekil 4.29. Kalkanitin SEM içyapı görüntüleri **a)** 5000 kez büyütülmüş **b)** 10000 kez büyütülmüş

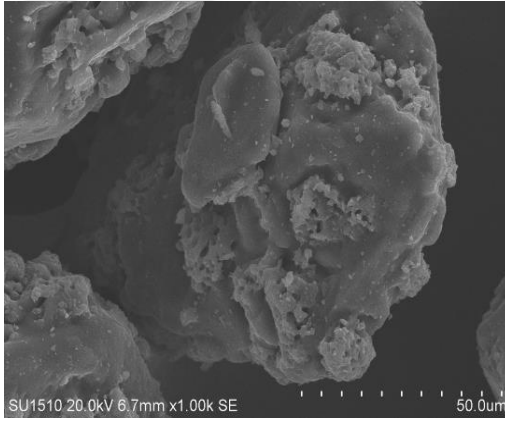


(a) 100 kez büyütülmüş

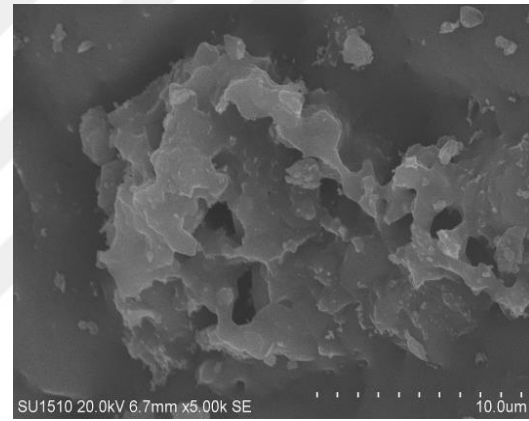


(b) 500 kez büyütülmüş

Şekil 4.30. Boraks penta hidratın SEM içyapı görüntüleri **a)** 100 kez büyütülmüş **b)** 500 kez büyütülmüş



(a) 1000 kez büyütülmüş



(b) 5000 kez büyütülmüş

Şekil 4.31. Boraks penta hidratın SEM içyapı görüntüleri **a)** 1000 kez büyütülmüş **b)** 5000 kez büyütülmüş

4.2.4. XRD analizi

XRD cihazı, X-ışınları toz kırınım ölçümü yöntemi kullanılarak kristal tanelerin sahip olduğu minerolojik bileşimlerinin bulunması prensibine göre çalışmaktadır. Bu kapsamda çalışma için üretilen geopolimer harç bileşenlerinden metakaolinin, pişirilmiş taş tozu atığının, kolemanit mineralinin ve boraks penta hidrat mineralinin XRD'leri ölçülmüştür. Ayrıca, %100 metakaolin bağlayıcılı geopolimer harçlar ile %30 pişirilmiş taş tozu atığı ikameli harçlar, %15 kolemanit katkısı ve %15 boraks penta hidrat katkısı kullanılarak üretilen geopolimer harç numunelerinde XRD ölçümleri yapılmıştır. XRD ölçümleri Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (İL-TEK)'nde yapılmıştır.

4.3. Taguchi Optimizasyon Yöntemi

Taguchi yöntemi az sayıda deney yaparak tam faktörlü çalışma sonuçlarını vermeyi hedefleyen bir optimizasyon yöntemidir. Bu teknik, optimizasyon ve parametrik analiz çalışmalarında maliyeti düşürmek, sonuçlara daha kısa sürede ulaşmak ve parametrelerin sonuç üzerindeki etkilerini belirlemek için geliştirilmiş olan güçlü bir alternatif optimizasyon yöntemidir. Taguchi optimizasyon yöntemi, japon mühendis ve bilim adamı Dr. Genichi Taguchi'nin 1940'lı yıllarda başladığı çalışmalarında geliştirdiği ve 1980'li yıllardan sonra tüm dünyada yaygın olarak kullanılmaya başlanan bir tekniktir. Taguchi, çeşitliliği düşürmek amacıyla deney tasarımını performans kriteri olarak kullanılmak üzere, sinyal/gürültü oranı olarak adlandırılan bir dizi istatistik geliştirmiştir. Taguchi, uygulamadaki problemleri hedefin türüne göre üçe ayırmış ve her biri için farklı bir sinyal/gürültü (S/N) oranı tanımlanmıştır. Bunlar: en büyük-en iyi, normal-en iyi ve en küçük-en iyidir (Pignatiello, 1998).

Taguchi yönteminin orijinine inerek, 1920'lerde ünlü İngiliz istatistikçi Sir Ronald Fisher tarafından, tarım alanında araştırmalar yaptığı sırada deney tasarımının temelleri atılmıştır. Bunun dışında Fisher, deney verilerini analiz edebilmek için bugün çok kullanılan varyans analizi (ANOVA) yöntemini de geliştirmiştir. Yöntem, hızlı bir şekilde, Amerika'da tarımsal üretimin geliştirilmesi anlamında yararlı olmuş ve çok fazla uygulama alanı bulmuş ve Amerika'nın tarım alanında dünyada en önde gelen ülke olmasını sağlamıştır (Canıyılmaz, 2001).

Taguchi optimizasyon yönteminde parametre sayısının ve seviyelerinin az olduğu deneylerde tam parametrelili deney tasarımı uygulanabilmektedir. Örneğin 3 parametrelili ve her parametrenin de 2 seviyeli olduğu bir deneysel çalışma için $2^3=8$ adet deney yapılması gerekmektedir. Bu durum zaman ve maliyet açısından ciddi derecede tasarruf sağlamaktadır. 7 parametrelili ve 3 seviyeli bir araştırma için ise tam parametrelili deney tasarımına göre $3^7=2187$ adet deney yapılması gerekmektedir. Bu sayı, zaman, maliyet ve değerlendirme açısından uygulanması oldukça zor bir deney sayısıdır. Bu gibi durumlarda başvurulacak yöntemlerden birisi de kısmi parametrelili deney tasarımıdır. Bu tasarımda bütün kombinasyonun oldukça küçük bir bölümü örnek olarak seçilip deneyler yapılmakta ve sonuçlar değerlendirilmektedir. Deneyler, seçilen bir grup üzerinde yapıldığı için gerçek durumu yansıtmayabilmektedir (Lochner ve Matar, 1990). Ayrıca, bu yöntemde aynı deney tasarımı için seçilen farklı gruplarla farklı sonuçlar bulunabilmektedir. Araştırmacılar tarafından kolaylıkla uygulanabilen bu yöntem ile sonuçlara ulaşmak ve değerlendirmek standartlaştırılmıştır. Bu yöntem kalite-kontrol amaçlı ürün üretimi ve parametre tasarımı için geliştirilmiş olmakla birlikte, oldukça farklı alanlar içinde uygulanmaktadır. Taguchi yöntemi, deney sayısı çok fazla olan araştırmalarda büyük kolaylıklar sağlamak ve tam parametrelili tasarıma alternatif olarak kullanılabilir.

Taguchi yöntemi ile hedef değerler veya tahmin edilen değerler, kontrol edilebilen parametreleri ve seviyelerini içeren ortogonal dizinler ile belirlenmektedir. Seçilen ortogonal dizini ile oldukça az sayıda deney veya çalışma yapılarak parametrelerin sonuca etkileri araştırılabilmektedir. Ayrıca bu yöntem ile yapılmamış olan diğer deney sonuçları ile maksimum ve minimum değerler de tahmin edilebilmektedir. Taguchi yöntemi, son yıllardaki bilgisayar teknolojisindeki hızlı ilerlemelerin sonucunda, çeşitli bilimsel araştırmalarda, endüstri ürünleri tasarımları ve deney tasarımlarında kullanılmaktadır. Çalışma kapsamında farklı faktör seviyeleri için taguchi yöntemi ile geliştirilen çeşitli ortogonal dizi tabloları Çizelge 4.9. da verilmiştir.

Çizelge 4.9. Farklı faktör seviyeleri için ortogonal diziler tablosu

Taguchi ortogonal dizi	Parametreler	Seviyeler	Taguchi yöntemi deney sayısı	Tam faktöriyel deney sayısı
L4 (2 ³)	3	2	4	8
L8 (2 ⁷)	7	2	8	128
L9 (3 ⁴)	4	3	9	81
L16 (4 ⁵)	5	4	16	1024
L16 (2 ¹⁵)	15	2	16	32768

Taguchi yönteminde optimizasyon kriteri olarak performans-istatistiği (S/N: sinyal gürültü oranını) kullanılmaktadır. S/N oranı, standart sapma yerine ölçülebilir bir değer olarak kullanılmaktadır. En basit hali ile S/N oranı, ortalamanın (sinyal) standart sapmaya (gürültü) oranıdır.

En düşük en iyi olduğu durumda Y'nin hedef değeri sıfırdır. En küçük değer en iyi durumu için sinyal/gürültü oranı Denklem 4.9.'da verilmiştir.

$$S/N = -10 \log[1/n \sum_i Y_i^2] \quad (4.9.) \text{ (Kackar, 1989)}$$

S/N: sinyal – gürültü oranı

N: Bir deney kombinasyonunda yapılan tekrar sayısı

Y_i: i deneyin sonucudur

En büyük en iyi olduğu durumda Y'nin hedef değeri sonsuzluktur örneğin beton eğilme dayanımı, beton basınç dayanımı gibi. En büyük değer en iyi durumu için sinyal/gürültü oranı Denklem 4.10. da verilmiştir.

$$S/N = -10 \log[1/n \sum_i 1/Y_i^2] \quad (4.10.) \text{ (Kackar, 1989)}$$

Nominal en iyi olduğu durumda ikili toleransı olan bir karakteristiğimiz olduğunda nominal değer hedefdir. Yani bütün parçalar bu değere getirilirse, varyasyon sıfır olur ve en iyisidir örneğin ürün boyutları gibi. Hedef değer en iyi durumu için sinyal/gürültü oranı Denklem 4.11.'de verilmiştir.

$$S/N = -10 \log[1/n \sum_i y_i^2 / S_i^2] \quad (4.11.) \text{ (Kackar, 1989)}$$

Kalite karakteristiği kategorisine bakılmaksızın, daha yüksek bir S/N oranı daha iyi kalite özelliklerine karşılık gelir. Bu nedenle, proses parametrelerinin optimal seviyesi en yüksek S/N oranına sahip seviyedir.

Bu Çalışmada yapılan deneylerden (7 ve 28 günlük eğilme dayanımı ve basınç dayanımı deneyleri) elde edilen veriler kullanılarak S/N oranları, Denklem 4.10. a göre hesaplanmıştır. S/N oranları hesaplandıktan sonra grafik olarak çizilerek S/N'yi maksimum yapan parametre seviyesi optimum seviye olarak alınmıştır. Çalışmada kullanılan L9 (3^4) 4 parametrelili ve 3 seviyeli ortogonal dizisi Çizelge 4.10. da verilmiştir. Çizelge'deki P1, P2, P3 ve P4: çalışmada seçilen parametreleri, her deney numarası satırındaki rakamlar ise çalışmadaki parametrelerin seviyelerini göstermektedir.

Çizelge 4.10. Ortogonal dizin L9(3^4)

Deney No	Parametreler ve parametre seviyeleri			
	P1	P2	P3	P4
L1	1	1	1	1
L2	1	2	2	2
L3	1	3	3	3
L4	2	1	2	3
L5	2	2	3	1
L6	2	3	1	2
L7	3	1	3	2
L8	3	2	1	3
L9	3	3	2	1

Bu çalışmada geopolimer harç üretiminde bağlayıcı olarak metakaolin kullanımında optimum karışım oranını elde etmek için Taguchi deney tasarımı kullanılmıştır. Metakaolin bazlı geopolimerlerin optimal karışım oranını bulunmak için, L9 (3^4) ortogonal dizisine göre 4 parametrelili ve 3 seviyeli bir deney tasarımı kurulmuştur. İncelenen 4 parametre: kum/bağlayıcı oranı (2,5, 2,25 ve 2), likit/bağlayıcı (L/B) oranı (0,80, 0,90 ve 1), sodyum silikat/sodyum hidroksit (SS/SH) oranı (1, 1,5 ve 2), ve sodyum (SH) molariteleri (8 M, 10 M ve 12 M) şeklinde olup, parametrelerin değerleri Çizelge 4.11. de verilmiştir. Taguchi deney tasarımı kullanılarak kurulan L9 (3^4) ortogonal dizisine göre toplam 9 karışım hazırlanmıştır. Bileşen parametre değerleri ve karışım oranları (LM1 - LM9) Çizelge 4.12. ve Çizelge 4.13. de verilmektedir..

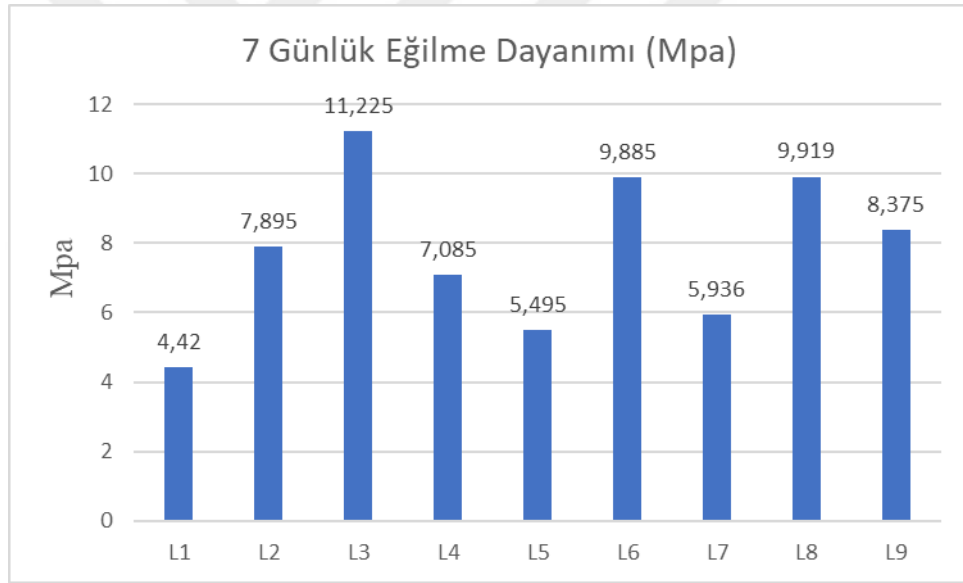
Karıştırma işlemi sırasında, bağlayıcı olarak metakaolin karıştırıcıya kuru halde ilave edilmiş, devamında bir gün önce hazırlanan ve oda sıcaklığında bekletilen farklı molaritelerdeki sodyum hidroksit çözeltileri ile sodyum silikat çözeltisi karıştırıcıya ilave edilmiş ve karışım homojen hale gelinceye kadar 2 dakika süreyle karıştırılmıştır. Daha sonra karıştırıcıya standart rilem kumu kuru halde ilave edilmiş ve 3 dakika daha karıştırıcıda karıştırılmıştır. Geopolimer harçların karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra, 40x40x160 mm boyutlarındaki kalıplara dökülmüş, sarsma tablasında 50 düşüş olacak şekilde gerekli vibrasyon uygulanmıştır. Üretimi ve vibrasyonu tamamlanan geopolimer harçlar laboratuvar etüvünde 24 saat süreyle 60°C sıcaklığa tabi tutulmuş ve test gününe kadar kapalı bir dolapta ortam kürüne tabi tutulmuştur. Çalışma kapsamında üretilen ve 7., 28. ve 90. günde eğilme ve basınç dayanımı tespiti deneyine tabi tutulan geopolimer harçların 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları Çizelge 4.14. de, Şekil 4.32., Şekil 4.34., Şekil 4.36. ve Şekil 4.38. de verilmiştir.

Çizelge 4.14. Taguchi yöntemi için deneme karışımlarının eğilme ve basınç dayanımları (Mpa)

Deney kodu	7 günlük eğilme dayanımı	28 günlük eğilme dayanımı	7 günlük basınç dayanımı	28 günlük basınç dayanımı
L1	4,420	4,594	21,954	22,542
L2	7,895	8,138	46,841	47,504
L3	11,225	11,924	69,241	71,747
L4	7,085	7,379	43,251	45,545
L5	5,495	5,565	27,295	28,190
L6	9,885	10,065	58,962	60,195
L7	5,936	6,132	26,254	27,950
L8	9,919	10,068	58,231	60,043
L9	8,375	8,575	45,871	47,162

4.3.1. Metakaolin bağlayıcılı geopolimer harç numunelerinin 7 günlük eğilme dayanımlarının değerlendirilmesi

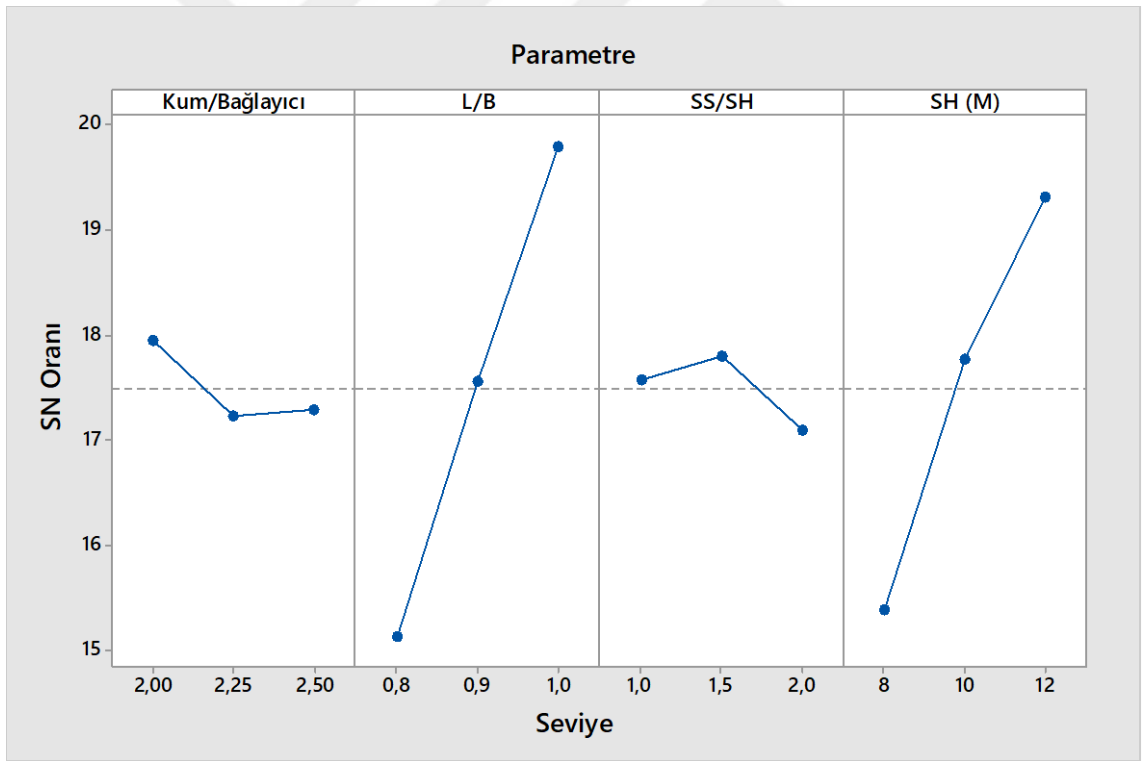
Çizelge 4.13. de verilen oranlarının kullanılarak üretilen metakaolin bazlı geopolimer harç numunelerin 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımlarının sonuçları Çizelge 4.14. de verilmiştir. Yapılan analiz sonucunda deney sonuçları için hesaplanan S/N değerleri Çizelge 4.15. de ve ortalama SN değerleri Çizelge 4.16. da verilmektedir. Aynı zamanda 7 günlük eğilme dayanımları da grafiksel olarak Şekil 4.32. de verilmiştir. Ortalama S/N değeri, verilen parametrenin S/N değeri eklenerek ve daha sonra 3'e bölünerek hesaplanmıştır. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar (7 günlük eğilme dayanımları) kullanılarak S/N değerleri, en büyük-en iyi performans-istatistiği (S/N) baz alınarak Denklem 4.10. a göre hesaplanmıştır.



Şekil 4.32. Taguchi yöntemi için deneme karışımlarının 7 günlük eğilme dayanımı

Çizelge 4.15. S/N değerleri (7 günlük eğilme dayanımı için)

Kum/bağ.					
Deney No	oranı	L/B	SS/SH	SH (M)	S/N
L1	2,5	0,80	1	8	12,91
L2	2,5	0,90	1,5	10	17,94
L3	2,5	1	2	12	21,00
L4	2,25	0,80	1,5	12	17,00
L5	2,25	0,90	2	8	14,80
L6	2,25	1	1	10	19,90
L7	2	0,80	2	10	15,47
L8	2	0,90	1	12	19,93
L9	2	1	1,5	8	18,46



Şekil 4.33. Ortalama S/N değerlerinin ana etki grafiği (7 günlük eğilme dayanımı için)

Çizelge 4.16. Ortalama S/N değerleri (7 günlük eğilme dayanımı için)

Seviye	Kum/Bağ. oranı	L/B oranı	SS/SH oranı	SH (M)
Seviye 1	17,95	15,13	17,58	15,39
Seviye 2	17,24	17,56	17,80	17,77
Seviye 3	17,29	19,79	17,09	19,31

S/N'yi maksimum yapan parametre seviyeleri optimum seviyeleridir. Sonuçlar incelendiğinde, 7 günlük eğilme dayanımları kullanılarak hesaplanan S/N değerleri şunu ifade etmektedir: Kum/bağlayıcı oranının 1. seviyesinde, likit/bağlayıcı oranının 3. seviyesinde, sodyum silikat/sodyum hidroksit oranının 2. seviyesinde ve sodyum hidroksit molaritesinin 3. seviyesinde optimum oranların olduğu görülmektedir. 7 günlük eğilme için ortalama S/N değerleri Çizelge 4.16. da verilmiştir. S/N değerleri için ana etki grafiği minitab 17 programı kullanılarak elde edilmiş ve Şekil 4.33. de verilmiştir. 7 günlük eğilme dayanımı dikkate alındığında kum/bağlayıcı oranı azaldıkça eğilme dayanımı artmıştır. Sonuçlarda görüldüğü gibi, kum/bağlayıcı oranını 1. seviyesi olan 2 kullanıldığı durumda dayanımda artış oluşmuştur. Maksimum eğilme dayanımı likit/bağlayıcı oranının 3. seviyesi olan 1 oranında karışıma kullanılması ile elde edilmiştir. Geopolimerlerin 7 günlük eğilme dayanımını alkali aktivasyondan dolayı en çok L/B oranı, en az kum/bağlayıcı oranı etkilemiştir.

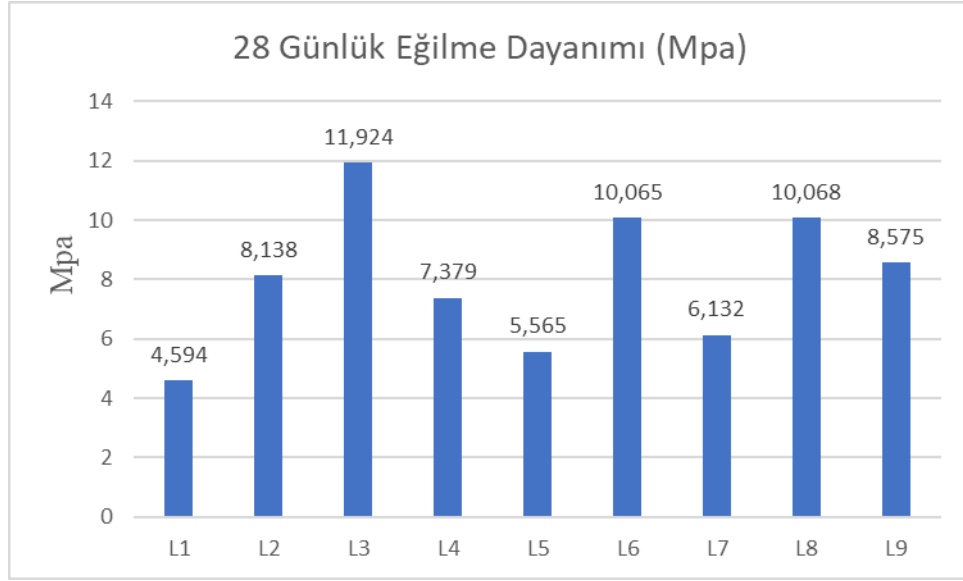
Sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 1,5'a yükseldikçe 7 günlük eğilme dayanımı maksimum değere ulaşmıştır. Sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 2'e yükseltildiğinde, 7 günlük eğilme dayanımı tekrar azalmıştır. Yani maksimum 7 günlük eğilme dayanımı sodyum silikat/sodyum hidroksit oranının 2. seviyesi olan 1,5 oranında karışıma kullanılması ile elde edilmiştir. Maksimum 7 günlük eğilme dayanımı, sodyum hidroksit molaritesinin 3. seviyesi olan 12 M ile elde edilmiştir. 8 M sodyum hidroksit kullanıldığında, 7 günlük eğilme dayanımı en düşüktür. Sodyum hidroksit molaritesi açısından dayanım parametresine göre optimum molarite 12 M olmalıdır.

4.3.2. Metakaolin bağlayıcılı geopolimer harç numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımlarının değerlendirilmesi

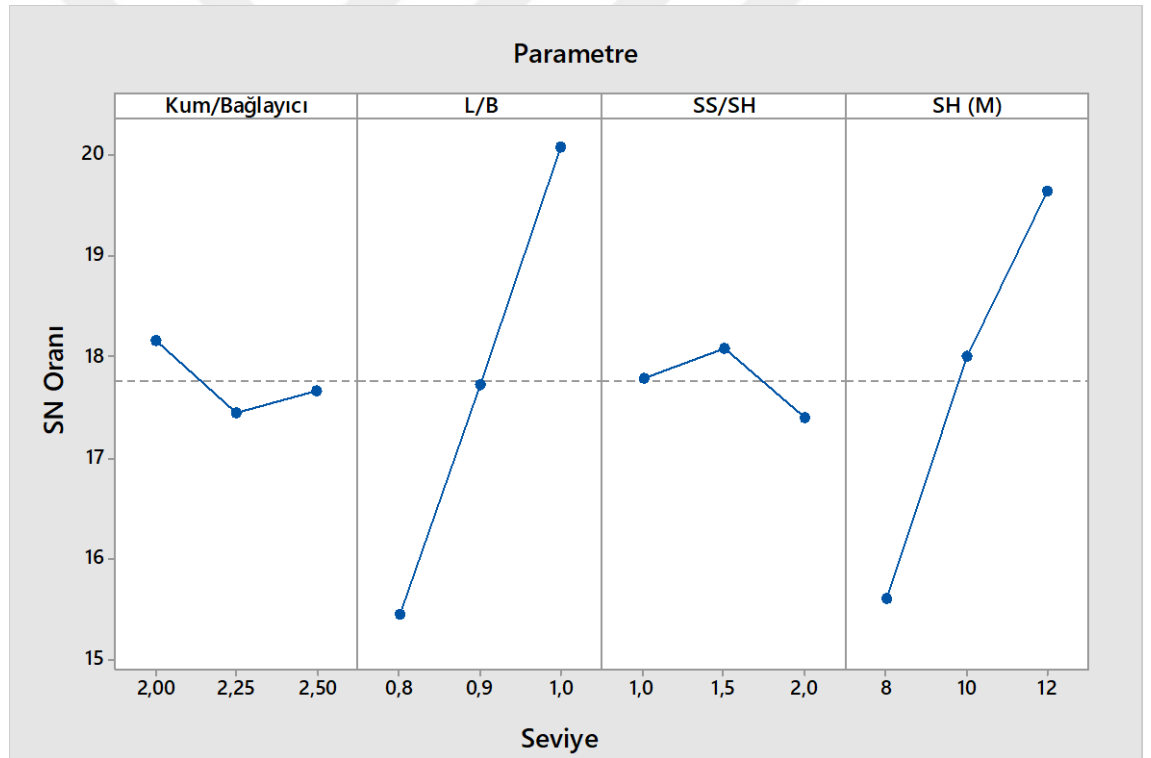
Çizelge 4.13. de verilen oranlarının kullanılarak üretilen metakaolin bazlı geopolimer harç numunelerin 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımlarının sonuçları Çizelge 4.14. de verilmiştir. Yapılan analiz sonucunda deney sonuçları için hesaplanan S/N değerleri Çizelge 4.17. de ve ortalama SN değerleri Çizelge 4.18. de verilmektedir. Aynı zamanda 28 günlük eğilme dayanımları da grafiksel olarak Şekil 4.34. te verilmiştir. Ortalama S/N değeri, verilen parametrenin S/N değeri eklenerek ve daha sonra 3'e bölünerek hesaplanmıştır. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar (28 günlük eğilme dayanımları) kullanılarak S/N değerleri, en büyük-en iyi performans-istatistiği (S/N) baz alınarak Denklem 4.10. a göre hesaplanmıştır.

Çizelge 4.17. S/N değerleri (28 günlük eğilme dayanımı için)

Deney No	Kum/Bağ. oranı	L/B	SS/SH	SH (M)	S/N
L1	2,5	0,80	1	8	13,24
L2	2,5	0,90	1,5	10	18,21
L3	2,5	1	2	12	21,52
L4	2,25	0,80	1,5	12	17,36
L5	2,25	0,90	2	8	14,90
L6	2,25	1	1	10	20,05
L7	2	0,80	2	10	15,75
L8	2	0,90	1	12	20,05
L9	2	1	1,5	8	18,66



Şekil 4.34. Taguchi yöntemi için deneme karışımlarının 28 günlük eğilme dayanımı



Şekil 4.35. S/N değerlerinin ana etki grafiği (28 günlük eğilme dayanımı için)

Çizelge 4.18. Optimum S/N değerleri (28 günlük eğilme dayanımı için)

Seviye	Kum/Bağ. oranı	L/B oranı	SS/SH oranı	SH (M)
Seviye 1	18,66	15,45	17,79	15,61
Seviye 2	17,44	17,73	18,08	18,01
Seviye 3	17,66	20,08	17,40	19,65

Yapılan analiz sonucunda deney sonuçları için hesaplanan ortalama S/N değerleri Çizelge 4.18. de verilmiştir. S/N'yi maksimum yapan parametre seviyeleri optimum seviyeleridir. Sonuçlar incelendiğinde, 28 günlük eğilme dayanımları kullanılarak hesaplanan S/N değerleri şunu ifade etmektedir: Kum/bağlayıcı oranının 1. seviyesinde, likit/bağlayıcı oranının 3. seviyesinde, sodyum silikat/sodyum hidroksit oranının 2. Seviyesinde ve sodyum hidroksit molaritesinin 3. seviyesinde optimum oranların olduğu görülmektedir. 28 günlük eğilme için ortalama S/N değerleri için ana etki grafiği minitab 17 programı kullanılarak elde edilmiş ve Şekil 4.35. te verilmiştir. 28 günlük eğilme dayanımı dikkate alındığında kum/bağlayıcı oranı azaldıkça eğilme dayanımı artmıştır. Sonuçlarda görüldüğü gibi, kum/bağlayıcı oranının 1. seviyesi olan 2 kullanıldığı durumda dayanımda artış oluşmuştur. Maksimum eğilme dayanımı likit/bağlayıcı oranının 3. seviyesi olan 1 oranında karışıma kullanılması ile elde edilmiştir. Geopolimerlerin 28 günlük eğilme dayanımını alkali aktivasyondan dolayı en çok L/B oranı, en az kum/bağlayıcı oranı etkilemiştir.

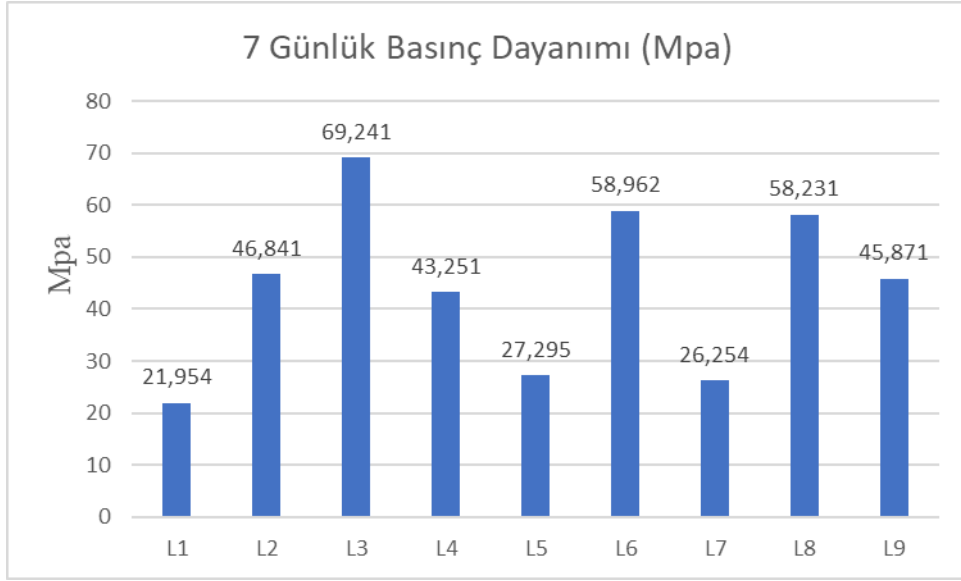
Sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 1,5'a yükseldikçe 28 günlük eğilme dayanımı maksimum değere ulaşmıştır. Sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 2'e yükseltildiğinde, 28 günlük eğilme dayanımı tekrar azalmıştır. Yani maksimum 28 günlük eğilme dayanımı sodyum silikat/sodyum hidroksit oranının 2. seviyesi olan 1,5 oranında karışıma kullanılması ile elde edilmiştir. Maksimum 28 günlük eğilme dayanımı, sodyum hidroksit molaritesinin 3. seviyesi olan 12 M ile elde edilmiştir. 8 M sodyum hidroksit kullanıldığında, 28 günlük eğilme dayanımı en düşüktür. Sodyum hidroksit molaritesi açısından dayanım parametresine göre optimum molarite 12 M olmalıdır.

4.3.3. Metakaolin bağlayıcılı geopolimer harç numunelerinin 7 günlük basınç dayanımlarının değerlendirilmesi

Çizelge 4.13. de verilen oranlarının kullanılarak üretilen metakaolin bağlayıcılı geopolimer harç numunelerin 7 günlük basınç dayanımlarının sonuçları Çizelge 4.14. de verilmiştir. Yapılan analiz sonucunda deney sonuçları için hesaplanan S/N değerleri Çizelge 4.19. da ve ortalama SN değerleri Çizelge 4.20. de verilmektedir. Aynı zamanda 7 günlük basınç dayanımları da grafiksel olarak Şekil 4.36. da verilmiştir. Ortalama S/N değeri, verilen parametrenin S/N değeri eklenerek ve daha sonra 3'e bölünerek hesaplanmıştır. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar (7 günlük basınç dayanımları) kullanılarak S/N değerleri, en büyük-en iyi performans-istatistiği (S/N) baz alınarak Denklem 4.10. a göre hesaplanmıştır.

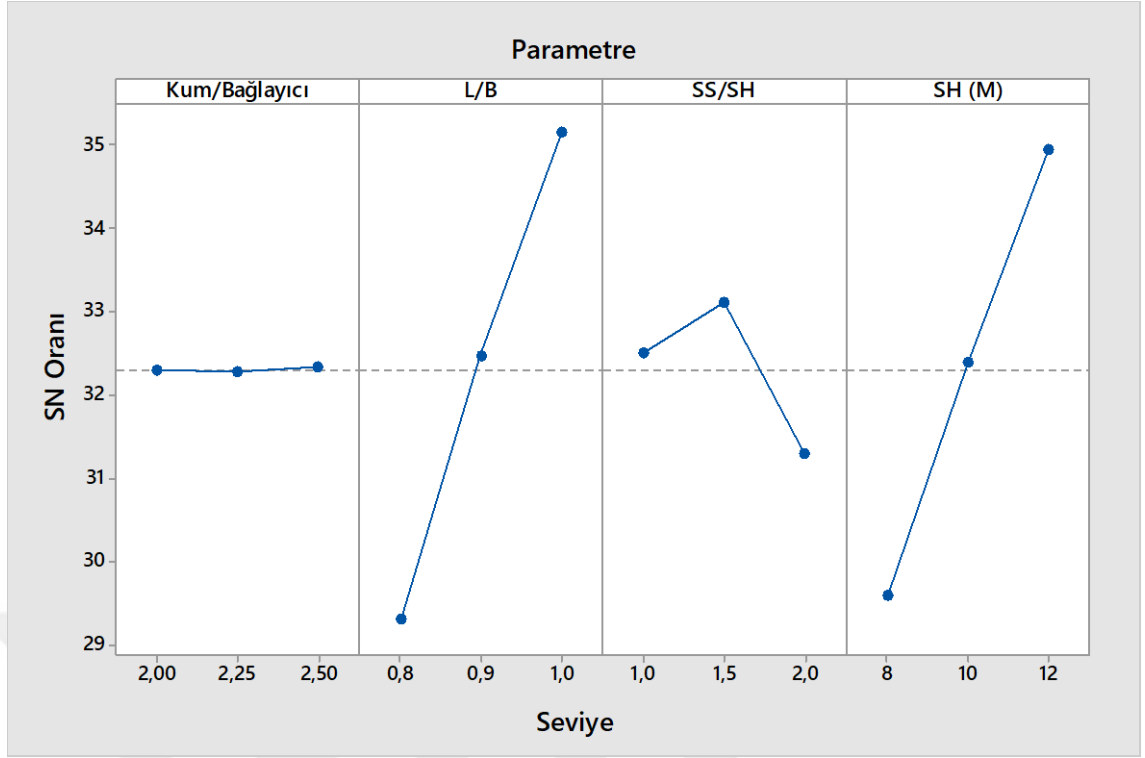
Çizelge 4.19. S/N değerleri (7 günlük basınç dayanımı için)

Deney No	Kum/Bağ. oranı	L/B oranı	SS/SH oranı	SH (M)	S/N
L1	2,5	0,80	1	8	26,83
L2	2,5	0,90	1,5	10	33,41
L3	2,5	1	2	12	36,80
L4	2,25	0,80	1,5	12	32,72
L5	2,25	0,90	2	8	28,72
L6	2,25	1	1	10	35,41
L7	2	0,80	2	10	28,38
L8	2	0,90	1	12	35,30
L9	2	1	1,5	8	33,23



Şekil 4.36. Taguchi yöntemi için deneme karışımlarının 7 günlük basınç dayanımı

S/N'yi maksimum yapan parametre seviyeleri optimum seviyeleridir. Sonuçlar incelendiğinde, 7 günlük basınç dayanımları kullanılarak hesaplanan S/N değerleri şunu ifade etmektedir: Kum/bağlayıcı oranının 3. seviyesinde, likit/bağlayıcı oranının 3. seviyesinde, sodyum silikat/sodyum hidroksit oranının 2. seviyesinde ve sodyum hidroksit molaritesinin 3. seviyesinde optimum oranların olduğu görülmektedir. 7 günlük basınç dayanımı için ortalama S/N değerleri için ana etki grafiği minitab 17 programı kullanılarak elde edilmiş ve Şekil 4.37. de verilmiştir.



Şekil 4.37. S/N değerlerinin ana etki grafiği (7 günlük basınç dayanımı için)

Çizelge 4.20. Ortalama S/N değerleri (7 günlük basınç dayanımı için)

Seviye	Kum/Bağ. oranı	L/B oranı	SS/SH oranı	SH (M)
Seviye 1	32,31	29,31	32,51	29,59
Seviye 2	32,28	32,48	33,12	32,40
Seviye 3	32,35	35,15	31,30	34,94

7 günlük basınç dayanımı dikkate alındığında bağlayıcı miktarı arttıkça basınç dayanımı artmıştır. Sonuçlarda görüldüğü gibi, kum/bağlayıcı oranının 3. seviyesi olan 2.5 kullanıldığı durumda dayanımda artış oluşmuştur. Maksimum basınç dayanımı likit/bağlayıcı oranının 3. seviyesi olan 1 oranında karışıma kullanılması ile elde edilmiştir. Geopolimerlerin 7 günlük basınç dayanımını alkali aktivasyondan dolayı en çok L/B oranı, en az kum/bağlayıcı oranı etkilemiştir.

Sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 1,5'a yükseldikçe 7 günlük basınç dayanımı maksimum değere ulaşmıştır. sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 2'e yükseltildiğinde, 7 günlük basınç dayanımı tekrar azalmıştır. Yani maksimum 7 günlük basınç dayanımı sodyum silikat/sodyum hidroksit oranının 2. seviyesi olan 1,5 oranında karışıma kullanılması ile elde edilmiştir. Maksimum 7 günlük basınç dayanımı, sodyum

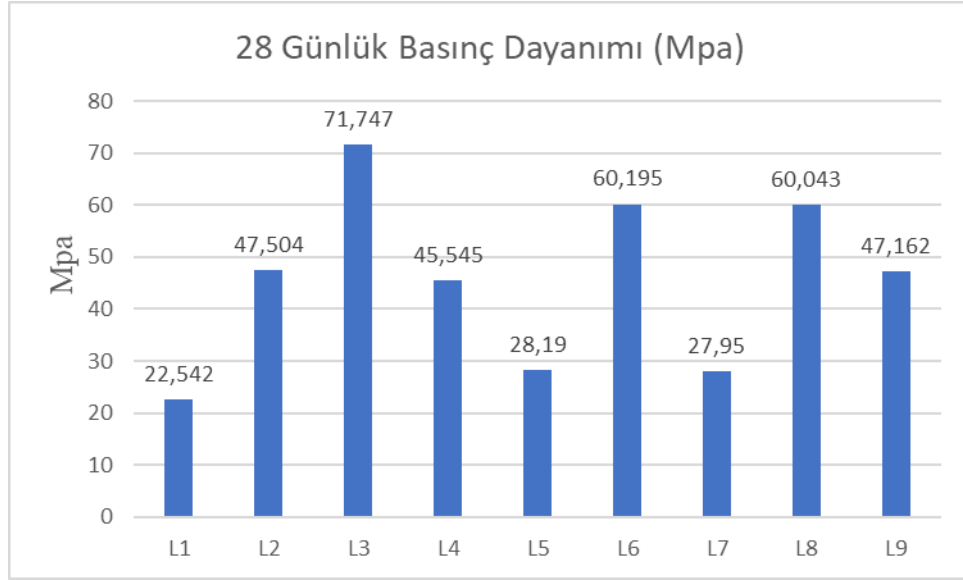
hidroksit molaritesinin 3. seviyesi olan 12 M ile elde edilmiştir. 8 M sodyum hidroksit kullanıldığında, 7 günlük basınç dayanımı en düşüktür. Sodyum hidroksit molaritesi açısından dayanım parametresine göre optimum molarite 12 M olmalıdır.

4.3.4. Metakaolin bağlayıcılı geopolimer harç numunelerinin 28 günlük basınç dayanımlarının değerlendirilmesi

Çizelge 4.13. de verilen oranlarının kullanılarak üretilen metakaolin bazlı geopolimer harç numunelerin 28 günlük basınç dayanımlarının sonuçları Çizelge 4.14. de verilmiştir. Yapılan analiz sonucunda deney sonuçları için hesaplanan S/N değerleri Çizelge 4.21. de ve ortalama SN değerleri Çizelge 4.22. de verilmektedir. Aynı zamanda 28 günlük basınç dayanımları da grafiksel olarak Şekil 4.38. te verilmiştir. Ortalama S/N değeri, verilen parametrenin S/N değeri eklenerek ve daha sonra 3'e bölünerek hesaplanmıştır. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar (28 günlük basınç dayanımlar) kullanılarak S/N değerleri, en büyük-en iyi performans-istatistiği (S/N) baz alınarak Denklem 4.10. a göre hesaplanmıştır.

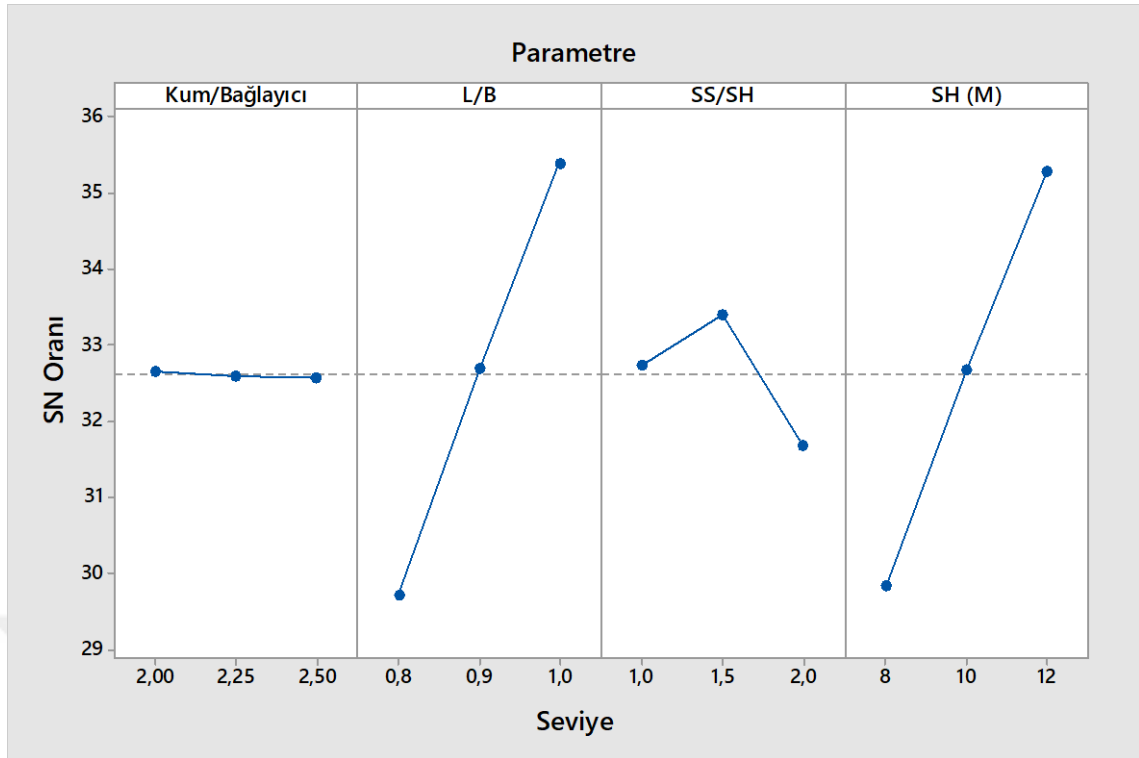
Çizelge 4.21. 28 günlük basınç dayanımları için S/N değerleri sonuçlarını

Deney No	Bağlayıcı	L/B	SS/SH	SH (M)	S/N
L1	2,5	0,80	1	8	27,06
L2	2,5	0,90	1,5	10	33,53
L3	2,5	1	2	12	37,12
L4	2,25	0,80	1,5	12	33,17
L5	2,25	0,90	2	8	29,00
L6	2,25	1	1	10	35,59
L7	2	0,80	2	10	28,93
L8	2	0,90	1	12	35,57
L9	2	1	1,5	8	33,47



Şekil 4.38. Taguchi yöntemi için deneme karışımlarının 28 günlük basınç dayanımı

S/N'yi maksimum yapan parametre seviyeleri optimum seviyeleridir. Sonuçlar incelendiğinde, 28 günlük basınç dayanımları kullanılarak hesaplanan S/N değerleri şunu ifade etmektedir: kum/bağlayıcı oranını 1. seviyesinde, likit/bağlayıcı oranının 3. seviyesinde, sodyum silikat/sodyum hidroksit 2. seviyesinde ve sodyum hidroksit molaritesinin 3. seviyesinde optimum oranların olduğu görülmektedir. 28 günlük basınç için optimum S/N değerleri için ana etki grafiği minitab 17 programı kullanılarak elde edilmiş ve Şekil 4.39. da verilmiştir.



Şekil 4.39. S/N değerlerinin ana etki grafiği (28 günlük basınç dayanımı için)

Çizelge 4.22. Ortalama S/N değerleri (28 günlük basınç dayanımı için)

Seviye	Kum/Bağ. oranı	L/B oranı	SS/SH oranı	SH (M)
Seviye 1	32,66	29,72	32,74	29,84
Seviye 2	32,59	32,70	33,39	32,68
Seviye 3	32,57	35,39	31,68	35,28

28 günlük basınç dayanımı dikkate alındığında bağlayıcı miktarı arttıkça eğilme dayanımı artmıştır. Sonuçlarda görüldüğü gibi, kum/bağlayıcı oranının 1. seviyesi olan 2 kullanıldığı durumda dayanımda artış oluşmuştur. Maksimum eğilme dayanımı likit/bağlayıcı oranının 3. seviyesi olan 1 oranında karışıma kullanılması ile elde edilmiştir. Geopolimerlerin 28 günlük basınç dayanımını alkali aktivasyondan dolayı en çok L/B oranı, en az kum/bağlayıcı oranı etkilemiştir.

Sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 1,5'a yükseldikçe 28 günlük basınç dayanımı maksimum değere ulaşmıştır. Sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 2'ye yükseltildiğinde, 7 günlük basınç dayanımı tekrar azalmıştır. Yani maksimum 28 günlük basınç dayanımı sodyum silikat/sodyum hidroksit oranının 2. seviyesi olan 1,5 oranında

karışıma kullanılması ile elde edilmiştir. Maksimum 28 günlük basınç dayanımı, sodyum hidroksit molaritesinin 3. seviyesi olan 12 M ile elde edilmiştir. 8 M sodyum hidroksit kullanıldığında, 28 günlük basınç dayanımı en düşüktür. Sodyum hidroksit molaritesi açısından dayanım parametresine göre optimum molarite 12 M olmalıdır.

4.3.5. Optimum karışım oranlarının belirlenmesi ve değerlendirme

Tagucci tasarımı kapsamında üretilen geopolimer harç numunelerine uygulanan 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımı sonuçlarına taguchi optimizasyon yöntemi kullanılarak optimum bileşen miktarları belirlenmiştir. Buna göre kum/bağlayıcı oranı 2, likit/bağlayıcı oranı 1, sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 1,5 ve sodyum hidroksit molaritesi 12 M olarak belirlenmiş ve bu değerler Çizelge 4.23. de verilmiştir. Geopolimer harçları üretmek için tüm karışımlar için su/bağlayıcı oranı 0,632 ve kum/bağlayıcı oranı 2 alınmıştır.

Çizelge 4.23. Optimum karışım oranları

Kum/Bağ oranı	L/B oranı	SS/SH Oranı	Likit Miktarı (gr)	Sodyum Silikat (gr)	Sodyum Hidroksit (gr)	Su Miktarı (gr)	Kum (gr)
2	1	1,5	675	405	270	426,6	1350

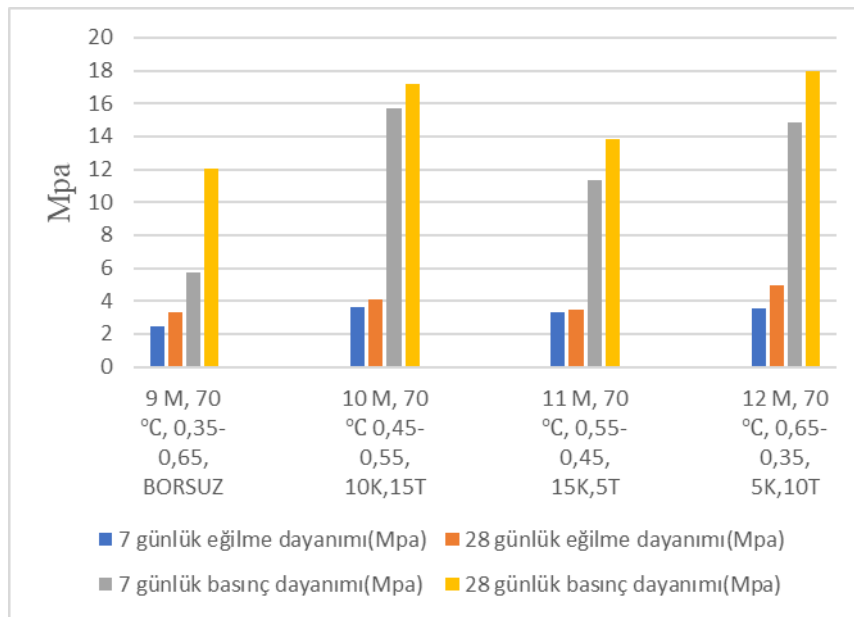
4.4. Ön Deneme Karışımları

Bu kapsamda önceden belirlenen Geopolimer harç dizaynlarının üretilmesi ve fiziksel ve mekanik özelliklerin tespitine yönelik deneylerin yapılabilmesi için esas deneylere ışık tutacak ön deneyler yapılmıştır. Ön deneylerde Geopolimer harç numuneleri üretilirken bağlayıcı olarak farklı kaynaklardan metakaolin ve asfalt fabrikalarından tedarik edilen pişirilmiş taş tozu atığı kullanılmıştır. Ön deneylerden elde edilen sonuçlardan görüldüğü kadarıyla bağlayıcı olarak sadece pişirilmiş taş tozu atığı kullanımının işlenebilmeyi son derece arttırdığı ve yayılma tablasında 20-25 cm arasında değerler elde edildiği gözlemlenmiştir. Aynı numunelerin mekanik özelliklerine bakıldığında ise 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımlarında son derece düşük değerler elde edilmiştir. Ancak bağlayıcı olarak sadece metakaolin kullanıldığında molariteye bağlı olarak basınç dayanımlarının arttığı görülmüştür. Alkali aktifleştirici olarak sodyum hid-

roksit kullanımının artmasıyla beraber işlenebilmenin azaldığı, buna karşın beton basınç dayanımının arttığı görülmüştür. Aynı zamanda alkali aktifleştirici olarak sodyum sili- kat kullanımının artmasıyla beraber işlenebilmenin arttığı, buna karşın beton basınç dayanımının düştüğü görülmüştür. Esas deneylere öncülük edecek ve ışık tutacak ön de- neylerde bağlayıcı olarak metakaolin ve pişirilmiş taş tozu atığı kullanılarak farklı mola- ritelerde, farklı yüzdelerde alkali aktivatör içeren ve farklı oranlarda kolemanit, boraks penta hidrat ve boraks deka hidrat içeren geopolimer harçlar üretilmiş ve 7. ve 28. gün- de eğilme ve basınç dayanım değerlerinin tayini deneylerine tabi tutulmuştur. Deneyler ve sonuçlar Çizelge 4.24.-Çizelge 4.43. ile Şekil 4.40.-Şekil 4.60. arasında verilmiştir.

Çizelge 4.24. Metakaolin bağlayıcılı (9 M-12 M) arasında hazırlanan geopolimer harç karışımlarının 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları (Mpa)

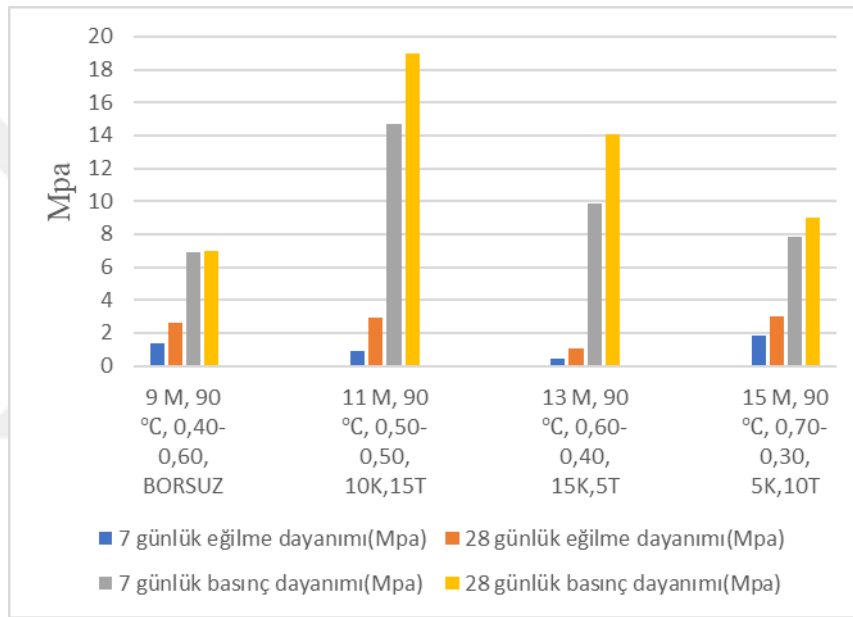
Deney Kodu	7 günlük eğilme dayanımı (Mpa)	28 günlük eğilme dayanımı (Mpa)	7 günlük basınç dayanımı (Mpa)	28 günlük basınç dayanımı (Mpa)
9 M, 70 °C, 0,35-0,65, BORSUZ	2,434	3,304	5,73	12,02
10 M, 70 °C 0,45-0,55, 10K,15T	3,592	4,079	15,71	17,19
11 M, 70 °C, 0,55-0,45, 15K,5T	3,325	3,452	11,33	13,84
12 M, 70 °C, 0,65-0,35, 5K,10T	3,557	4,970	14,83	17,94



Şekil 4.40. Bağlayıcısı metakaolin olan (9 M-12 M) arasında hazırlanan geopolimer harç karışımlarının 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları (Mpa)

Çizelge 4.25. Metakaolin bağlayıcılı (9 M-15 M) arasında hazırlanan geopolimer harç karışımlarının 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları (Mpa)

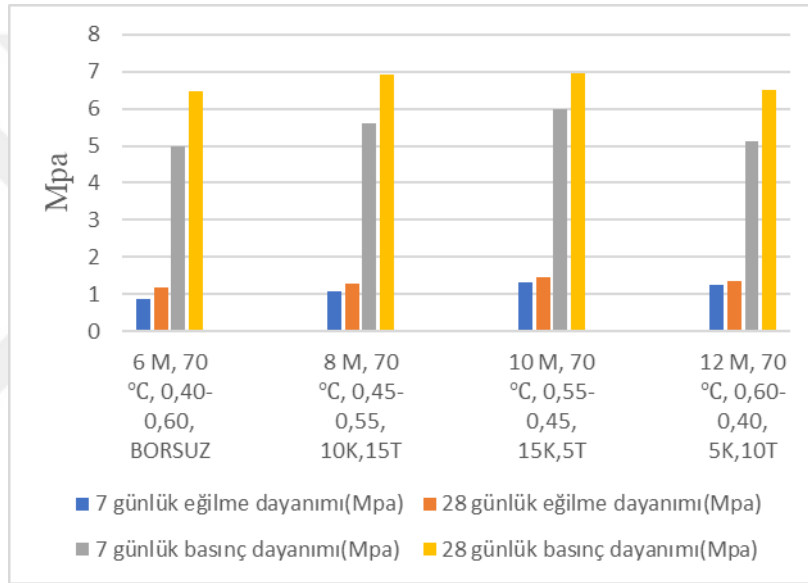
Deney Kodu	7 günlük eğilme dayanımı (Mpa)	28 günlük eğilme dayanımı (Mpa)	7 günlük basınç dayanımı (Mpa)	28 günlük basınç dayanımı (Mpa)
9 M, 90 °C, 0,40-0,60, BORSUZ	1,392	2,594	6,92	7,01
11 M, 90 °C, 0,50-0,50, 10K,15T	0,879	2,919	14,72	18,95
13 M, 90 °C, 0,60-0,40, 15K,5T	0,40	1,033	9,87	14,04
15 M, 90 °C, 0,70-0,30, 5K,10T	1,826	2,998	7,86	8,98



Şekil 4.41. Bağlayıcısı metakaolin olan (9 M-15 M) arasında hazırlanan geopolimer harç karışımlarının 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları (Mpa)

Çizelge 4.26. Pişirilmiş taş tozu atığı bağlayıcılı (6 M-12 M) arasında hazırlanan geopolimer harç karışımlarının 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları (Mpa)

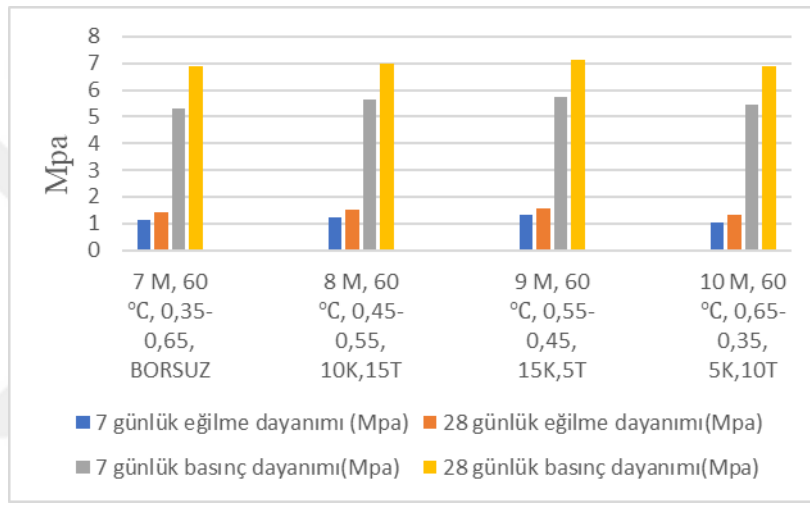
Deney Kodu	7 günlük eğilme dayanımı (Mpa)	28 günlük eğilme dayanımı (Mpa)	7 günlük basınç dayanımı (Mpa)	28 günlük basınç dayanımı (Mpa)
6 M, 70 °C, 0,40-0,60, BORSUZ	0,885	1,180	4,976	6,477
8 M, 70 °C, 0,45-0,55, 10K,15T	1,098	1,287	5,608	6,915
10 M, 70 °C, 0,55-0,45, 15K,5T	1,325	1,460	5,974	6,948
12 M, 70 °C, 0,60-0,40, 5K,10T	1,267	1,344	5,120	6,508



Şekil 4.42. Bağlayıcısı pişirilmiş taş tozu atığı olan (6 M-12 M) arasında hazırlanan geopolimer harç karışımlarının 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları (Mpa)

Çizelge 4.27. Pişirilmiş taş tozu atığı bağlayıcılı (7 M-10 M) arasında hazırlanan geopolimer harç karışımlarının 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları (Mpa)

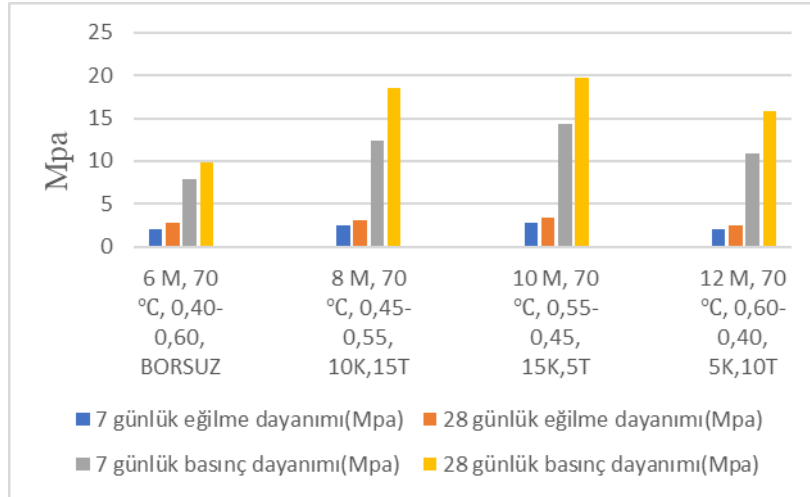
Deney Kodu	7 günlük eğilme dayanımı (Mpa)	28 günlük eğilme dayanımı (Mpa)	7 günlük basınç dayanımı (Mpa)	28 günlük basınç dayanımı (Mpa)
7 M, 60 °C, 0,35-0,65, BORSUZ	1,115	1,418	5,29	6,90
8 M, 60 °C, 0,45-0,55, 10K,15T	1,216	1,494	5,62	6,98
9 M, 60 °C, 0,55-0,45, 15K,5T	1,341	1,554	5,76	7,11
10 M, 60 °C, 0,65-0,35, 5K,10T	1,024	1,309	5,47	6,91



Şekil 4.43. Bağlayıcısı pişirilmiş taş tozu olan (7 M-10 M) arasında hazırlanan geopolimer harç karışımlarının 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları (Mpa)

Çizelge 4.28. Metakaolin bağlayıcılı (6 M-12 M) arasında hazırlanan geopolimer harç karışımlarının 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları (Mpa)

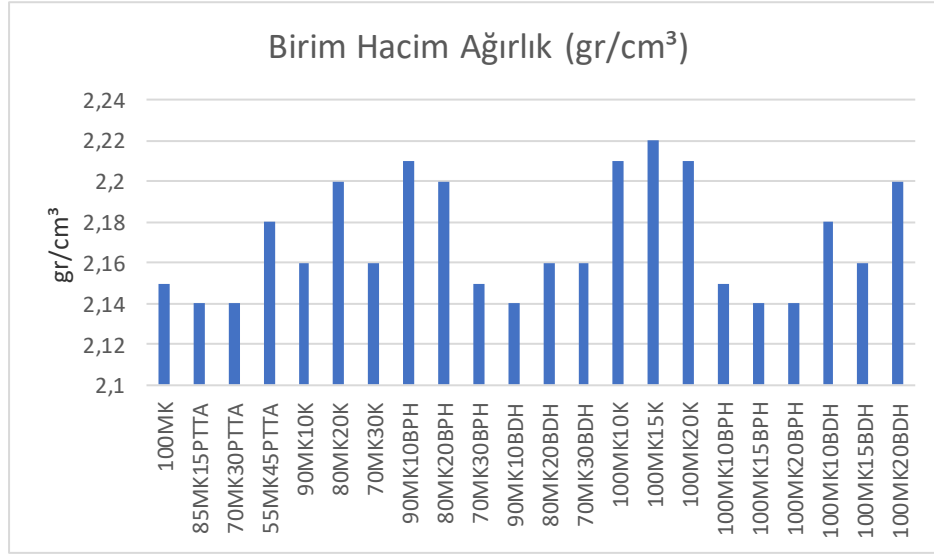
Deney Kodu	7 günlük eğilme dayanımı (Mpa)	28 günlük eğilme dayanımı (Mpa)	7 günlük basınç dayanımı (Mpa)	28 günlük basınç dayanımı (Mpa)
6 M, 70 °C, 0,40-0,60, BORSUZ	2,051	2,762	7,89	9,80
8 M, 70 °C, 0,45-0,55, 10K,15T	2,542	3,050	12,37	18,54
10 M, 70 °C, 0,55-0,45, 15K,5T	2,818	3,407	14,41	19,70
12 M, 70 °C, 0,60-0,40, 5K,10T	2,060	2,532	10,84	15,87



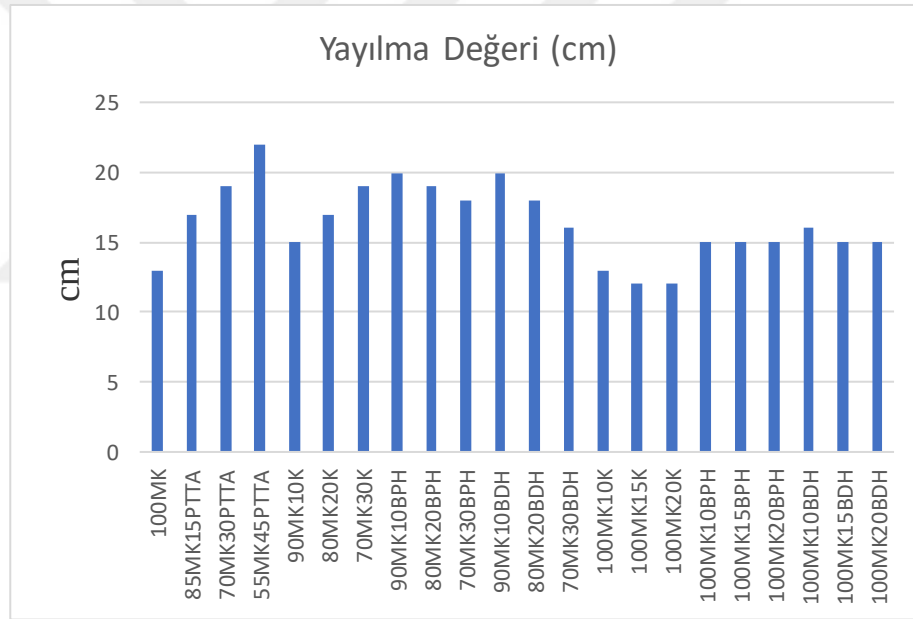
Şekil 4.44. Bağlayıcısı metakaolin olan (6 M-12 M) arasında hazırlanan geopolimer harç karışımlarının 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları (Mpa)

Çizelge 4.29. Oda sıcaklığında ve 60°C’de kür edilen geopolimer harçların birim hacim ağırlık ve yayılma değerleri

Deney kodu	Birim hacim ağırlık (gr/cm ³)	Yayılma değeri (cm)
100MK	2,15	13
85MK15PTTA	2,14	17
70MK30PTTA	2,14	19
55MK45PTTA	2,18	22
90MK10K	2,16	15
80MK20K	2,20	17
70MK30K	2,16	19
90MK10BPH	2,21	20
80MK20BPH	2,20	19
70MK30BPH	2,15	18
90MK10BDH	2,14	20
80MK20BDH	2,16	18
70MK30BDH	2,16	16
100MK10K	2,21	13
100MK15K	2,22	12
100MK20K	2,21	12
100MK10BPH	2,15	15
100MK15BPH	2,14	15
100MK20BPH	2,14	15
100MK10BDH	2,18	16
100MK15BDH	2,16	15
100MK20BDH	2,20	15



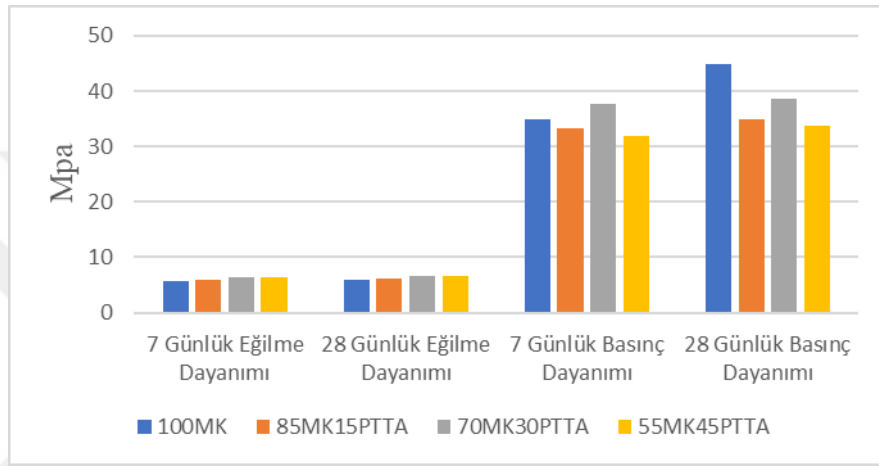
Şekil 4.45. Oda sıcaklığı kürü ve 60°C küründeki geopolimer harçların birim hacim ağırlıkları



Şekil 4.46. Oda sıcaklığında ve 60 °C’de kür edilen geopolimer harçların yayılma değerleri

Çizelge 4.30. 60°C’de kür edilen pişirilmiş taş tozu ikameli geopolimer harçların 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları (Mpa)

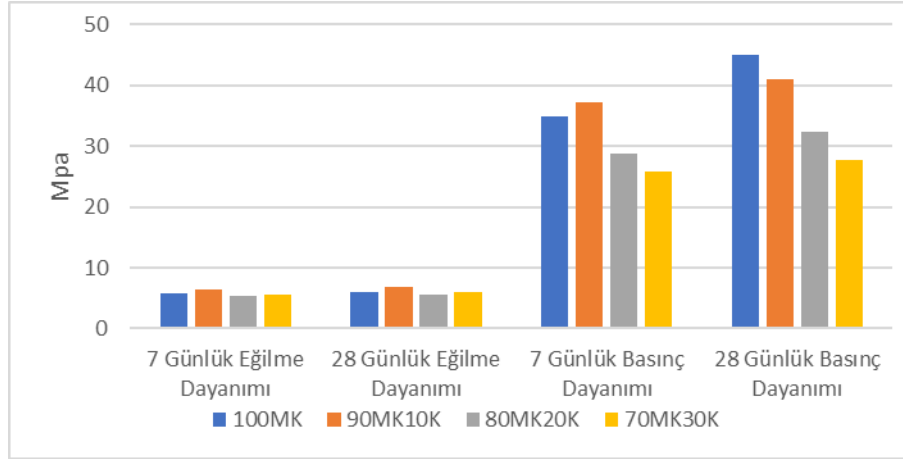
Deney kodu	7 günlük eğilme dayanımı	28 günlük eğilme dayanımı	7 günlük basınç dayanımı	28 günlük basınç dayanımı
100MK	5,78	6,05	34,89	44,95
85MK15PTTA	5,9	6,12	33,26	34,86
70MK30PTTA	6,32	6,59	37,61	38,7
55MK45PTTA	6,38	6,62	31,82	33,79



Şekil 4.47. Pişirilmiş taş tozu ikameli 60 °C kür sıcaklığındaki geopolimer harçların 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları (Mpa)

Çizelge 4.31. 60 °C’de kür edilen kolemanit ikameli geopolimer harçların 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları (Mpa)

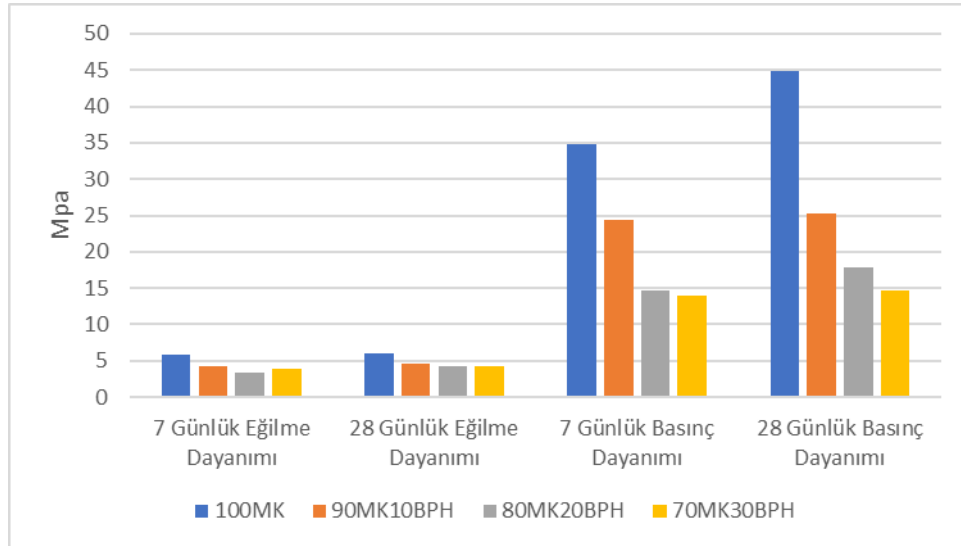
Deney kodu	7 günlük eğilme dayanımı	28 günlük eğilme dayanımı	7 günlük basınç dayanımı	28 günlük basınç dayanımı
100MK	5,78	6,05	34,89	44,95
90MK10K	6,33	6,74	37,31	41,11
80MK20K	5,28	5,47	28,81	32,28
70MK30K	5,58	5,9	25,88	27,63



Şekil 4.48. Kolemanit ikameli 60°C kür sıcaklığında kür edilen geopolimer harçların 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları (Mpa)

Çizelge 4.32. 60°C’de kür edilen boraks penta hidrat ikameli geopolimer harçların 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları (Mpa)

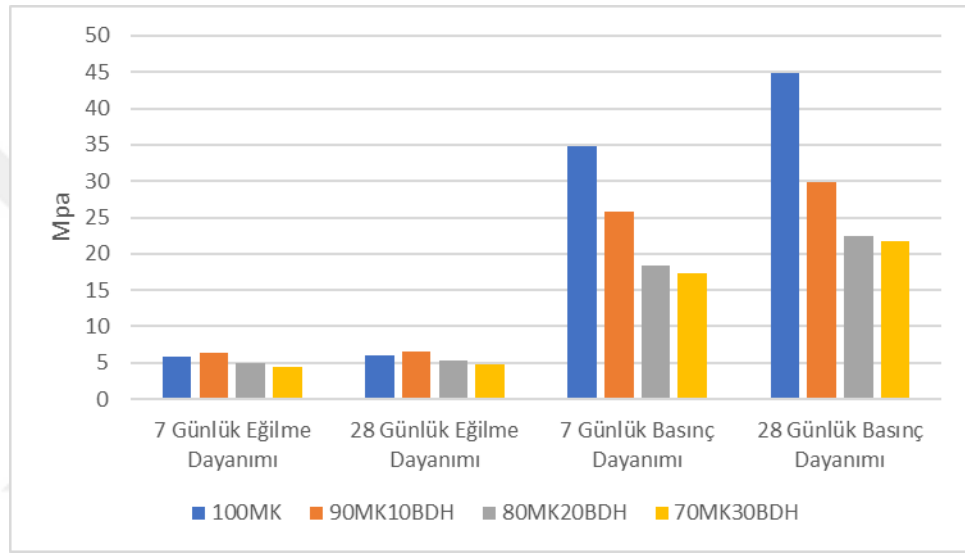
Deney kodu	7 günlük eğilme dayanımı	28 günlük eğilme dayanımı	7 günlük basınç dayanımı	28 günlük basınç dayanımı
100MK	5,78	6,05	34,89	44,95
90MK10BPH	4,27	4,67	24,31	25,24
80MK20BPH	3,35	4,20	14,61	17,84
70MK30BPH	3,95	4,22	14,02	14,75



Şekil 4.49. Boraks penta hidrat ikameli 60°C’de kür edilen geopolimer harçların 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları (Mpa)

Çizelge 4.33. 60°C’de kür edilen boraks deka hidrat ikameli geopolimer harçların 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları (Mpa)

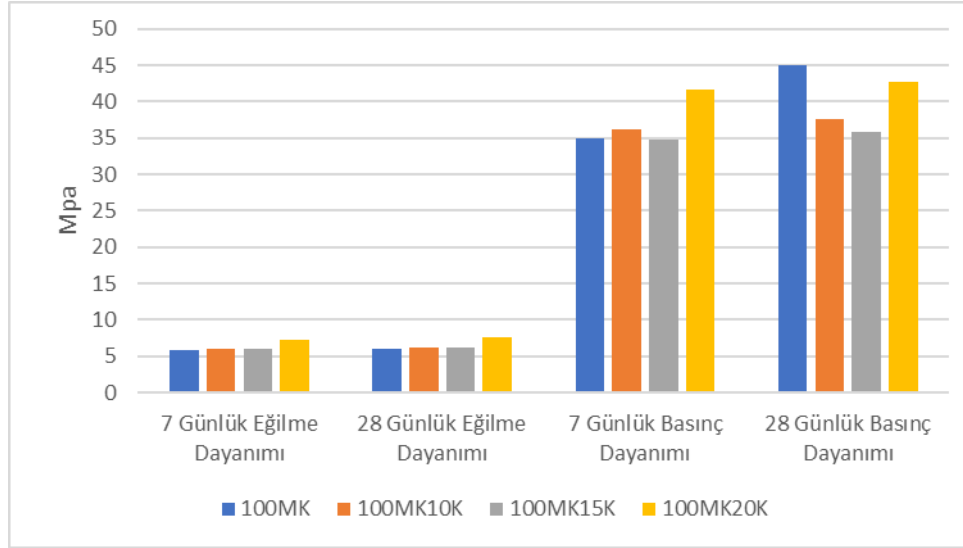
Deney kodu	7 günlük eğilme dayanımı	28 günlük eğilme dayanımı	7 günlük basınç dayanımı	28 günlük basınç dayanımı
100MK	5,78	6,05	34,89	44,95
90MK10BDH	6,31	6,64	25,79	29,85
80MK20BDH	4,99	5,40	18,42	22,45
70MK30BDH	4,38	4,87	17,24	21,68



Şekil 4.50. Boraks deka hidrat ikameli 60°C’de kür edilen geopolimer harçların 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları (Mpa)

Çizelge 4.34. 60°C’de kür edilen kolemanit katkılı geopolimer harçların 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları (Mpa)

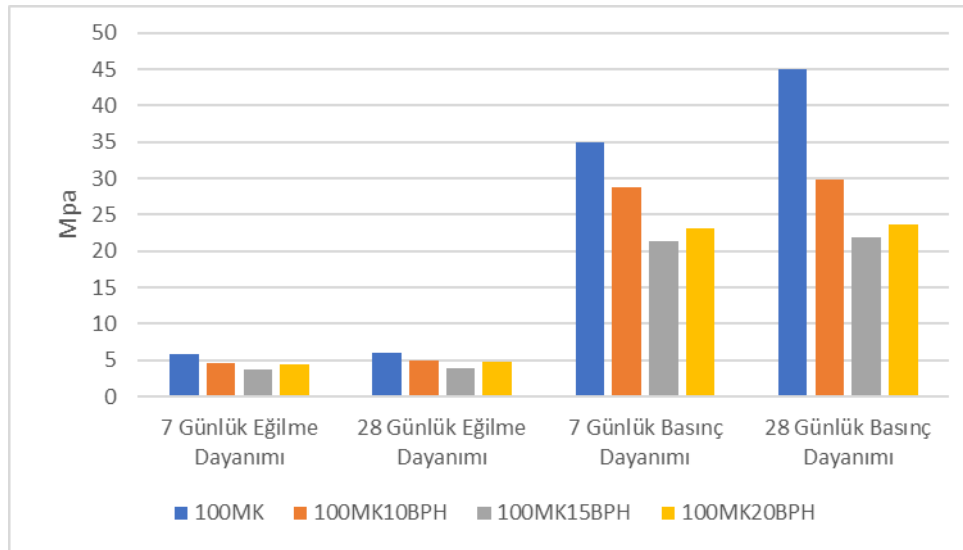
Deney kodu	7 günlük eğilme dayanımı	28 günlük eğilme dayanımı	7 günlük basınç dayanımı	28 günlük basınç dayanımı
100MK	5,78	6,05	34,89	44,95
100MK10K	5,94	6,13	36,15	37,70
100MK15K	5,98	6,15	34,80	35,81
100MK20K	7,24	7,60	41,59	42,70



Şekil 4.51. Kolemanit katkılı 60 °C’de kür edilen geopolimer harçların 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları (Mpa)

Çizelge 4.35. 60°C’de kür edilen boraks penta hidrat katkılı geopolimer harçların 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları (Mpa)

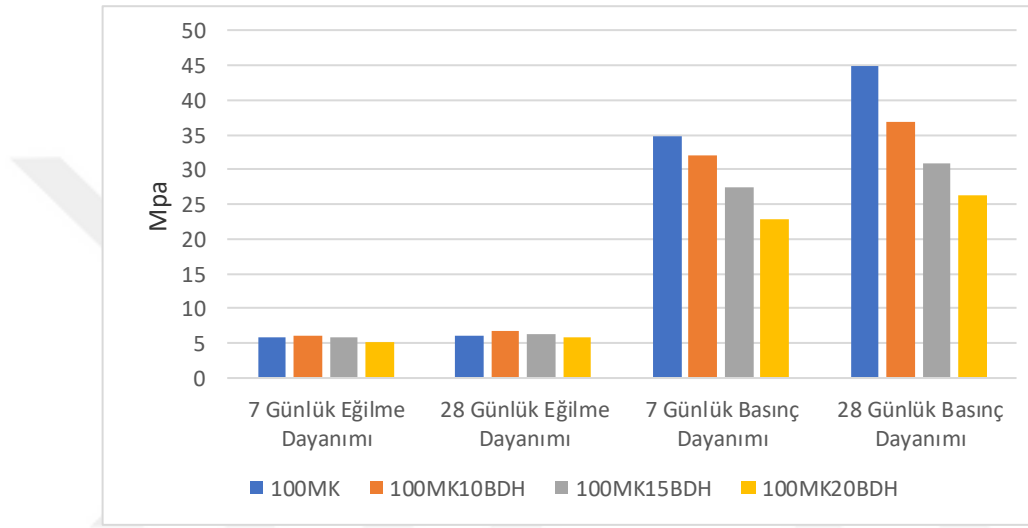
Deney kodu	7 günlük eğilme dayanımı	28 günlük eğilme dayanımı	7 günlük basınç dayanımı	28 günlük basınç dayanımı
100MK	5,78	6,05	34,89	44,95
100MK10BPH	4,54	4,98	28,83	29,84
100MK15BPH	3,70	3,90	21,40	21,87
100MK20BPH	4,43	4,72	23,14	23,59



Şekil 4.52. Boraks penta hidrat katkılı 60°C’de kür edilen geopolimer harçların 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları (Mpa)

Çizelge 4.36. 60°C’de kür edilen boraks deka hidrat katkılı geopolimer harçların 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları (Mpa)

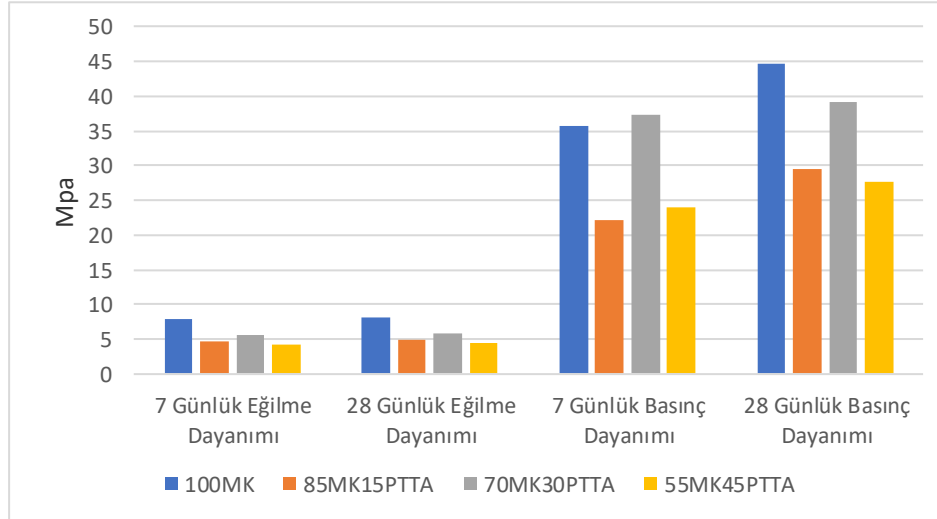
Deney kodu	7 günlük eğilme dayanımı	28 günlük eğilme dayanımı	7 günlük basınç dayanımı	28 günlük basınç dayanımı
100MK	5,78	6,05	34,89	44,95
100MK10BDH	6,15	6,75	32,06	36,95
100MK15BDH	5,85	6,28	27,52	30,85
100MK20BDH	5,20	5,84	22,89	26,28



Şekil 4.53. Boraks deka hidrat katkılı 60°C’de kür edilen geopolimer harçların 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları (Mpa)

Çizelge 4.37. Oda sıcaklığında kür edilen pişirilmiş taş tozu atığı ikameli geopolimer harçların 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları (Mpa)

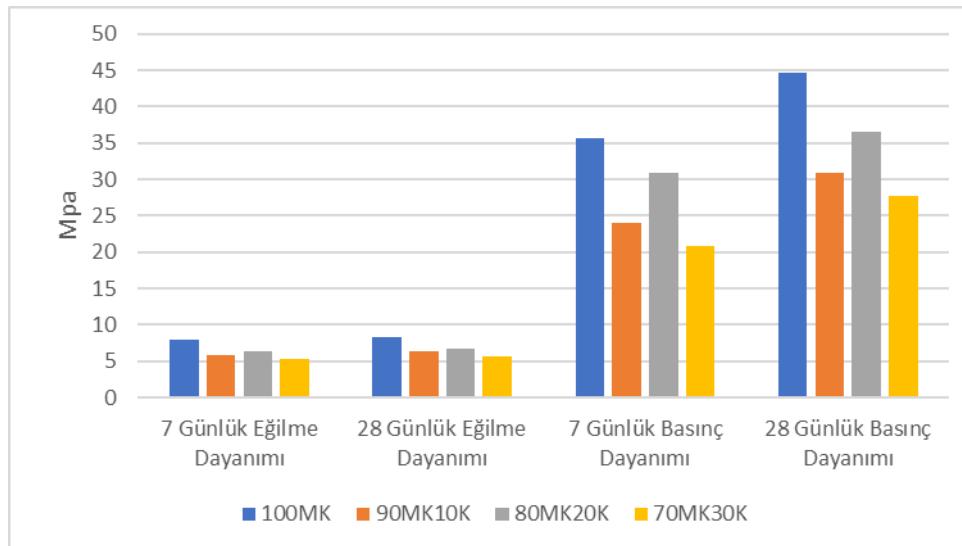
Deney kodu	7 günlük eğilme dayanımı	28 günlük eğilme dayanımı	7 günlük basınç dayanımı	28 günlük basınç dayanımı
100MK	7,94	8,22	35,64	44,74
85MK15PTTA	4,59	4,85	22,04	29,57
70MK30PTTA	5,66	5,82	37,39	39,08
55MK45PTTA	4,12	4,44	23,97	27,68



Şekil 4.54. Pişirilmiş taş tozu atığı ikameli oda sıcaklığında kür edilen geopolimer harçların 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları (Mpa)

Çizelge 4.38. Oda sıcaklığında kür edilen kolemanit ikameli geopolimer harçların 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları (Mpa)

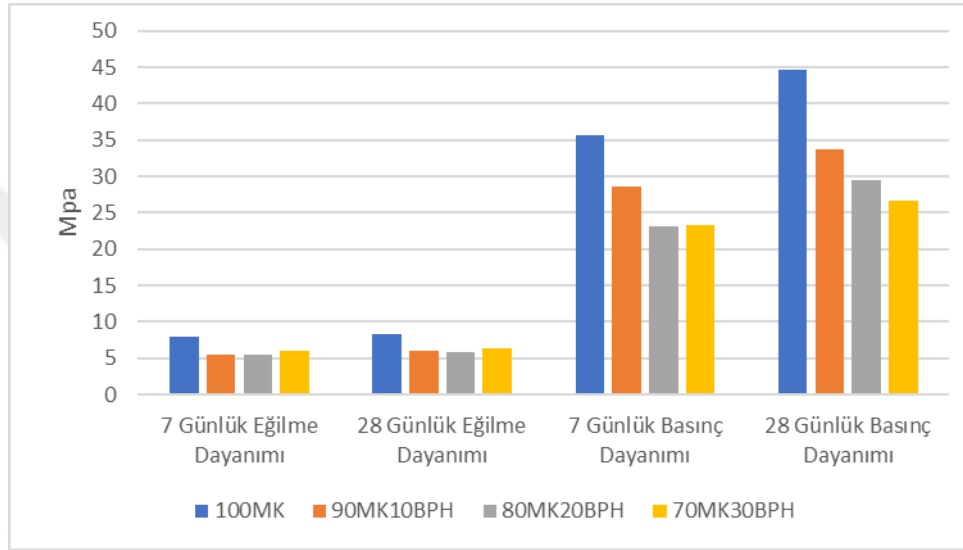
Deney kodu	7 günlük eğilme dayanımı	28 günlük eğilme dayanımı	7 günlük basınç dayanımı	28 günlük basınç dayanımı
100MK	7,94	8,22	35,64	44,74
90MK10K	5,81	6,42	23,95	30,82
80MK20K	6,30	6,77	30,92	36,60
70MK30K	5,36	5,70	20,76	27,67



Şekil 4.55. Kolemanit ikameli oda sıcaklığında kür edilen geopolimer harçların 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları (Mpa)

Çizelge 4.39. Oda sıcaklığında kür edilen boraks penta hidrat ikameli geopolimer harçların 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları (Mpa)

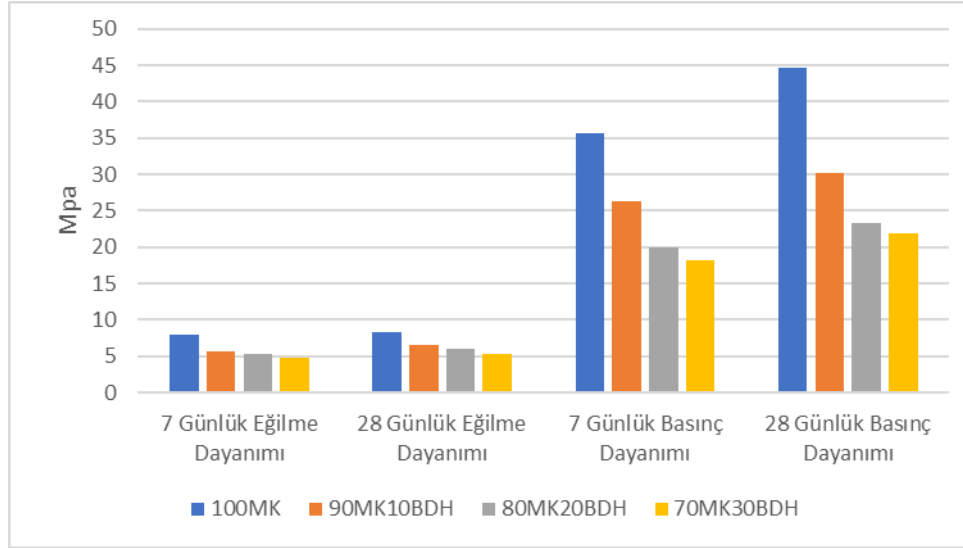
Deney kodu	7 günlük eğilme dayanımı	28 günlük eğilme dayanımı	7 günlük basınç dayanımı	28 günlük basınç dayanımı
100MK	7,94	8,22	35,64	44,74
90MK10BPH	5,47	6,06	28,66	33,76
80MK20BPH	5,46	5,92	23,08	29,41
70MK30BPH	6,07	6,38	23,37	26,59



Şekil 4.56. Boraks penta hidrat ikameli oda sıcaklığında kür edilen geopolimer harçların 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları (Mpa)

Çizelge 4.40. Oda sıcaklığında kür edilen boraks deka hidrat ikameli geopolimer harçların 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları (Mpa)

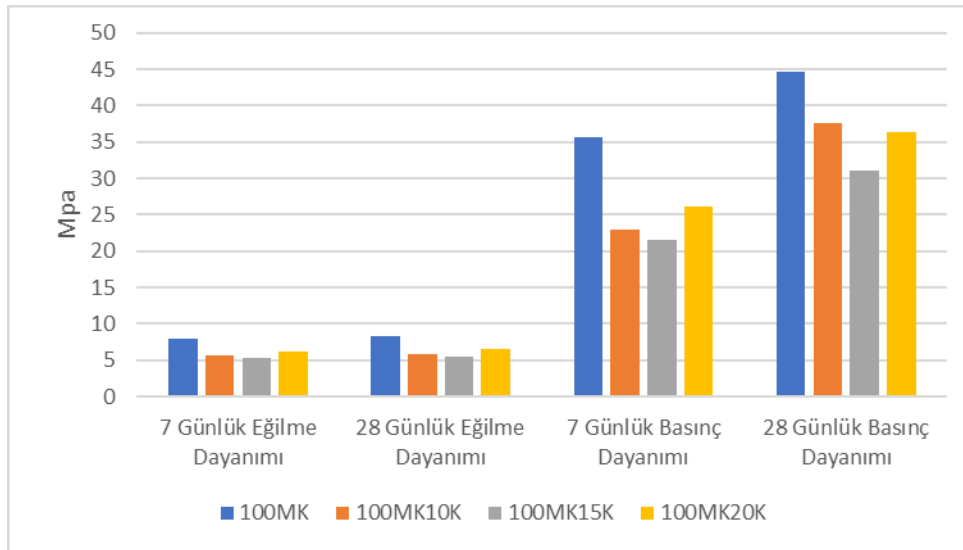
Deney kodu	7 günlük eğilme dayanımı	28 günlük eğilme dayanımı	7 günlük basınç dayanımı	28 günlük basınç dayanımı
100MK	7,94	8,22	35,64	44,74
90MK10BDH	5,72	6,46	26,25	30,21
80MK20BDH	5,26	5,96	19,87	23,25
70MK30BDH	4,82	5,36	18,24	21,98



Şekil 4.57. Boraks deka hidrat ikameli oda sıcaklığında kür edilen geopolimer harçların 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları (Mpa)

Çizelge 4.41. Oda sıcaklığında kür edilen kolemanit katkılı geopolimer harçların 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları (Mpa)

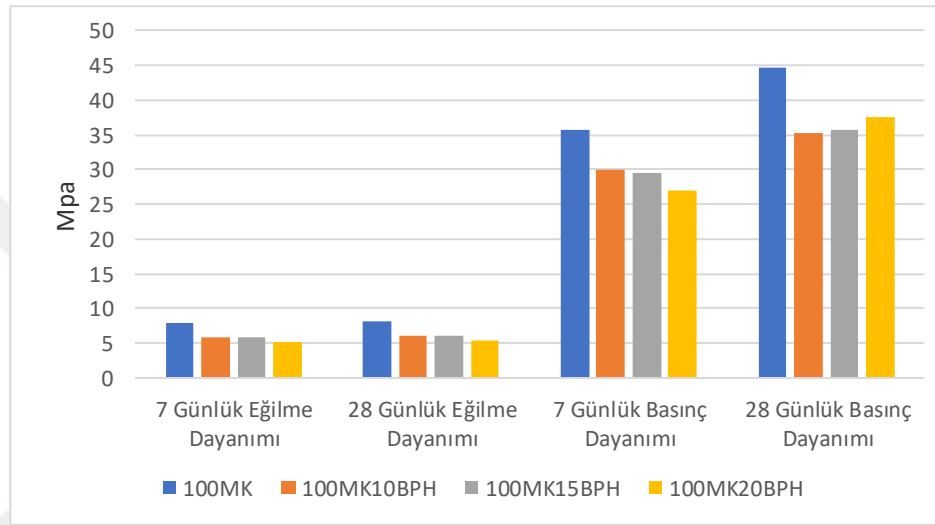
Deney kodu	7 günlük eğilme dayanımı	28 günlük eğilme dayanımı	7 günlük basınç dayanımı	28 günlük basınç dayanımı
100MK	7,94	8,22	35,64	44,74
100MK10K	5,60	5,75	22,88	37,70
100MK15K	5,25	5,48	21,52	31,08
100MK20K	6,27	6,47	26,10	36,33



Şekil 4.58. Kolemanit katkılı oda sıcaklığında kür edilen kolemanit katkılı geopolimer harçların 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları (Mpa)

Çizelge 4.42. Oda sıcaklığında kür edilen boraks penta hidrat katkılı geopolimer harçların 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları (Mpa)

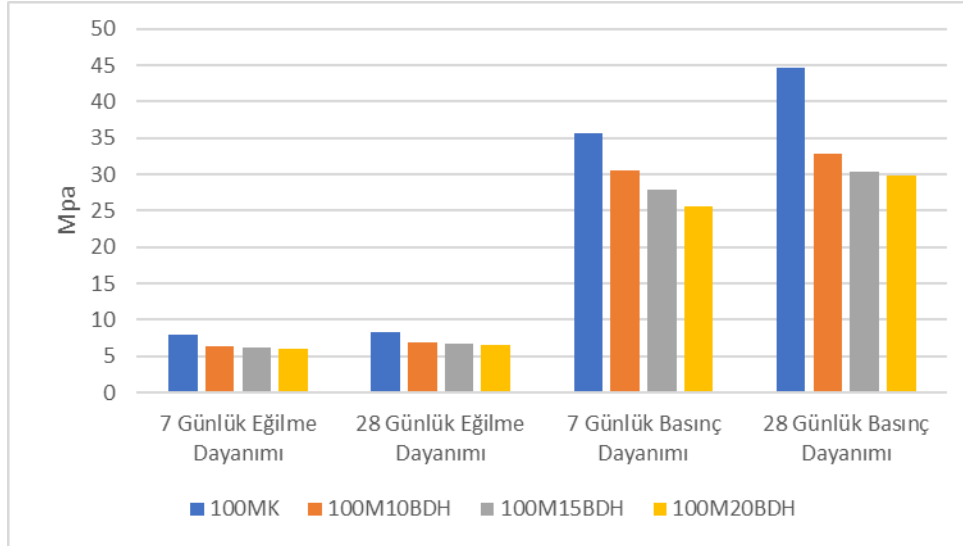
Deney kodu	7 günlük eğilme dayanımı	28 günlük eğilme dayanımı	7 günlük basınç dayanımı	28 günlük basınç dayanımı
100MK	7,94	8,22	35,64	44,74
100MK10BPH	5,88	6,09	30,07	35,22
100MK15BPH	5,86	6,05	29,41	35,83
100MK20BPH	5,19	5,39	26,92	37,56



Şekil 4.59. Boraks penta hidrat katkılı oda sıcaklığında kür edilen geopolimer harçların 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları (Mpa)

Çizelge 4.43. Oda sıcaklığında kür edilen boraks deka hidrat katkılı geopolimer harçların 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları (Mpa)

Deney kodu	7 günlük eğilme dayanımı	28 günlük eğilme dayanımı	7 günlük basınç dayanımı	28 günlük basınç dayanımı
100MK	7,94	8,22	35,64	44,74
100M10BDH	6,37	6,95	30,56	32,85
100M15BDH	6,21	6,63	27,84	30,38
100M20BDH	6,06	6,52	25,58	29,85



Şekil 4.60. Boraks deka hidrat katkılı oda sıcaklığında kür edilen geopolimer harçların 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları (Mpa)

4.5. Geopolimer Harçlarda Hedef Tasarım

Tez çalışması kapsamında üretilecek harçlarda çimento esaslı harç üretimleriyle karşılaştırma yapabilecek şekilde, ana bağlayıcı metakaolin, ikame malzemesi olarak pişirilmiş taş tozu atığı, katkı malzemesi olarak ise kolemanit ve boraks penta hidrat olmak üzere 7, 28 ve 90 günlük maksimum eğilme ve basınç dayanım değerleri için hedef tasarımlar ortaya konmuş ve bu hedefler çerçevesinde geopolimer harçlar üretilmiş ve ana deneylerde üretilen geopolimer harçlarda hedef değerler büyük ölçüde yakalanmıştır. 7 günlük maksimum eğilme ve basınç dayanım değerleri için hedef tasarım değerleri Çizelge 4.44. de, 28 günlük maksimum eğilme ve basınç dayanım değerleri için hedef tasarım değerleri Çizelge 4.45. te verilmektedir. 90 günlük maksimum eğilme ve basınç dayanım değerleri için hedef tasarım değerleri Çizelge 4.46. da verilmektedir.

Çizelge 4.44. Geopolimer harçlarda 7 günlük maksimum eğilme ve basınç dayanımı hedef tasarım değerleri

Deney Kodu	Bağlayıcı miktarı (gr)	İkame miktarı (gr)	Katkı miktarı (gr)	hedef eğilme dayanımı (Mpa)	hedef basınç dayanımı (Mpa)
100MK	675	0	0	14	65
90M10PTTA	607.5	67.5	0	12	60
80M20PTTA	540	135	0	12	60
70M30PTTA	472.5	202.5	0	12	60
100MK5K	675	0	33.75	13	62
100MK10K	675	0	67.5	13	62
100MK15K	675	0	101.25	13	62
100MK5BPH	675	0	33.75	11	58
100MK10BPH	675	0	67.5	11	58
100MK15BPH	675	0	101.25	11	58

Çizelge 4.45. Geopolimer harçlarda 28 günlük maksimum eğilme ve basınç dayanımı hedef tasarım değerleri

Deney Kodu	Bağlayıcı miktarı (gr)	İkame miktarı (gr)	Katkı miktarı (gr)	hedef eğilme dayanımı (Mpa)	hedef basınç dayanımı (Mpa)
100MK	675	0	0	14	70
90M10PTTA	607.5	67.5	0	12	65
80M20PTTA	540	135	0	12	65
70M30PTTA	472.5	202.5	0	12	65
100MK5K	675	0	33.75	13	66
100MK10K	675	0	67.5	13	66
100MK15K	675	0	101.25	13	66
100MK5BPH	675	0	33.75	11	62
100MK10BPH	675	0	67.5	11	62
100MK15BPH	675	0	101.25	11	62

Çizelge 4.46. Geopolimer harçlarda 90 günlük maksimum eğilme ve basınç dayanımı hedef tasarım değerleri

Deney Kodu	Bağlayıcı miktarı (gr)	İkame miktarı (gr)	Katkı miktarı (gr)	hedef eğilme dayanımı (Mpa)	hedef basınç dayanımı (Mpa)
100MK	675	0	0	15	75
90M10PTTA	607.5	67.5	0	13	68
80M20PTTA	540	135	0	13	68
70M30PTTA	472.5	202.5	0	13	68
100MK5K	675	0	33.75	14	70
100MK10K	675	0	67.5	14	70
100MK15K	675	0	101.25	14	70
100MK5BPH	675	0	33.75	12	66
100MK10BPH	675	0	67.5	12	66
100MK15BPH	675	0	101.25	12	66

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Çalışma kapsamında ön deneyler ve tecrübelerden faydalanarak ana bağlayıcı metakaolin olmak üzere farklı oranlarda pişirilmiş taş tozu ikamesi ve yine farklı oranlarda bor minerallerinden kolemanit ve boraks penta hidrat katkılı geopolimer harçlar üretilmiş ve bu harçların taze ve sertleşmiş haldeki fiziksel ve mekanik özellikleri değerlendirilmiştir.

5.1. Taze Haldeki Geopolimer Harçlara Uygulanan Deneylerin Sonuçları

5.1.1. Priz alma süresinin tayini deneyi (vicat aleti) sonuçları

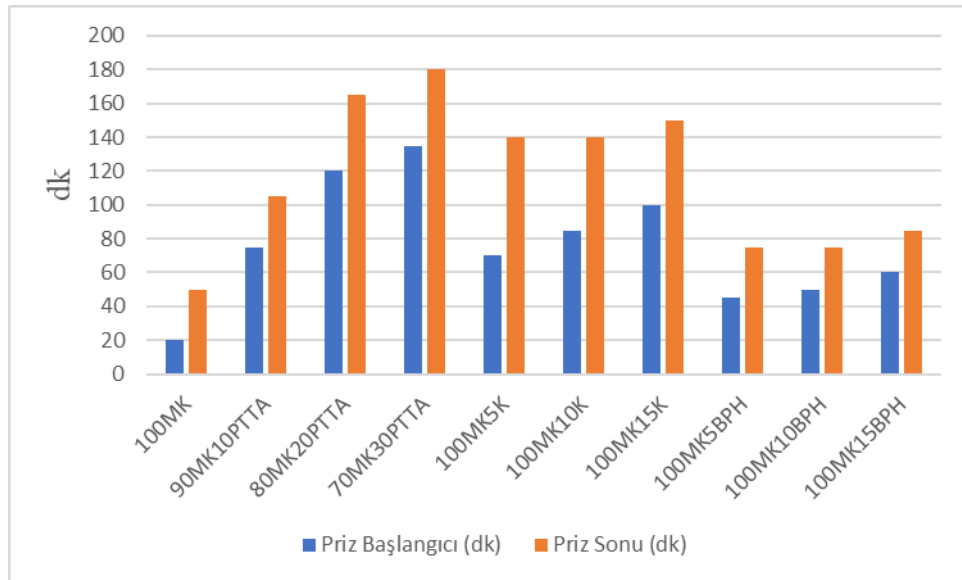
Çalışmada üretilen geopolimer harç numunelerinin priz başlangıç ve bitiş süreleri Çizelge 5.1. ve Şekil 5.1. de verilmektedir. Priz başlangıç ve priz sonu sürelerinin tayini için yapılan deneyde priz başlangıç sürelerinin 20 dk ile 135 dk arasında, priz sonu sürelerinin ise 50 dk ile 180 dk arasında olduğu görülmektedir. Priz başlangıç süresinin en erken olduğu karışım bağlayıcı olarak %100 metakaolin kullanılan geopolimer harç karışımı (100MK) olurken, en geç priz başlangıcının bağlayıcı olarak metakoline %30 pişirilmiş taş tozu atığı ikamesinde (70MK30P) olduğu görülmektedir. (100MK) numuneleri referans olarak alırsak priz başlangıç sürelerinde pişirilmiş taş tozu atığı ikameli numunelerde referans değere göre sürenin sırasıyla %375, %600 ve %675 oranında artma, priz sonlanma sürelerinde ise sırasıyla %210, %330 ve %360 oranında artma görülmektedir. Kolemanit katkısı ile üretilen geopolimer harçlarda ise referans değere göre priz başlangıç sürelerinde sırasıyla %350, %425 ve %500 oranlarında artma, priz sonlanma sürelerinde ise sırasıyla %280 ve %300 oranında artma görülmektedir. Boraks penta hidrat katkısı ile üretilen geopolimer harçlarda referans değere göre priz başlangıç sürelerinde sırasıyla %225, %250 ve %300 oranlarında artma, priz sonlanma sürelerinde ise sırasıyla %150 ve %170 oranlarında artma olmaktadır.

Sonuçta priz başlangıç ve bitiş süresi olarak metakaolinin çok hızlı bir şekilde prize başlaması ve sonlandırması neticesinde harçta ortaya çıkan işlenebilirlik problemini pişirilmiş taş tozu atığı ikamesi ve bor mineralleri katkısının ortadan kaldırdığı ve harcı rahatlatılarak daha işlenebilir harç üretimine imkan sağlandığı görülmektedir.

Metakaolinin priz başlangıç ve priz sonlanma sürelerini kısaltmasında özellikle çok ince taneli yapısı ve yüksek reaktiflik özelliğiyle beraber, yapısında bulunan Ca'un son derece az olmasının da etkili olduğu düşünülmektedir. Buna karşın pişirilmiş taş tozu atığı ve bor minerallerinin priz başlangıç ve priz sonlanma sürelerini uzatmasının nedeni olarak hem pişirilmiş taş tozu atığında hem de bor minerallerinden özellikle de kolemanitin içerisinde bulunan Ca varlığının etkili olduğu ve çimento etkisi yaptığı düşünülmektedir.

Çizelge 5.1. Geopolimer harç numunelerinin priz başlangıç ve bitiş süreleri

Deney kodu	Priz başlangıcı	Priz sonu
100MK	20 dk	50 dk
90MK10PTTA	75 dk	105 dk
80MK20PTTA	120 dk	165 dk
70MK30PTTA	135 dk	180 dk
100MK5K	70 dk	140 dk
100MK10K	85 dk	140 dk
100MK15K	100 dk	150 dk
100MK5BPH	45 dk	75 dk
100MK10BPH	50 dk	75 dk
100MK15BPH	60 dk	85 dk



Şekil 5.1. Geopolimer harç numunelerinin priz başlangıç ve bitiş süreleri

5.1.2. İşlenebilirlik deney (Yayılma tablası) sonuçları

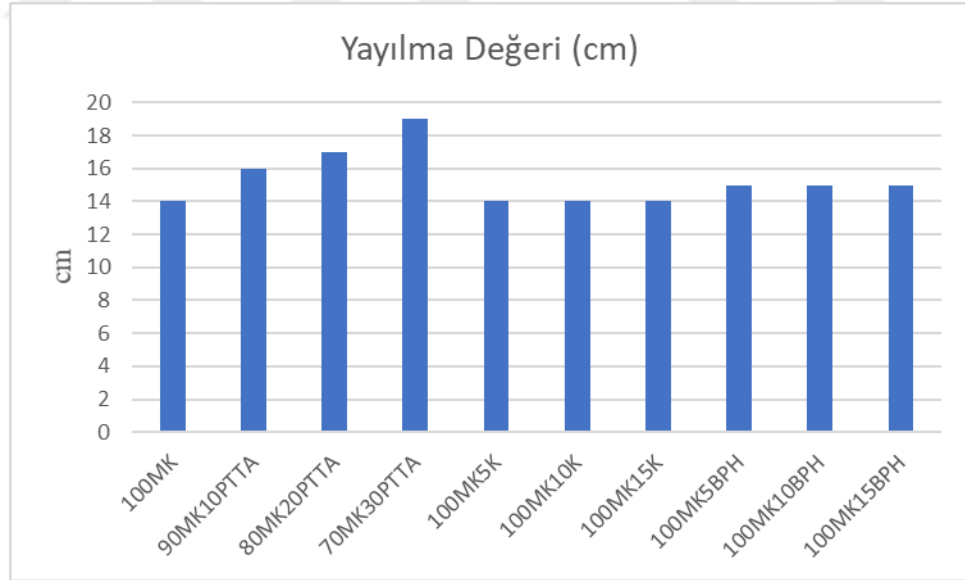
Çalışmada üretilen geopolimer harçların yayılma değerleri Çizelge 5.2 ve Şekil 5.2. de verilmektedir. Üretilen geopolimer harç numunelerinin taze haldeki fiziksel özelliklerden işlenebilirlik (yayılma) deneyine baktığımızda yayılma tablasında elde edilen yayılma değerlerinin 14 cm ile 19 cm arasında olduğu görülmektedir. Karışımlar içinde en yüksek yayılma değerine metakaoline %30 oranında pışırılmış taş tozu atığı ikamesinde (70MK30PTTA) ulaşıldığı ve 19 cm yayılma değeri elde edilmektedir. En düşük yayılma değerinin ise bağlayıcı olarak %100 metakaolin kullanılan numunelerde (100MK) olduğu ve 14 cm yayılma değeri elde edildiği görülmektedir. Yayılma çapı anlamında %100 metakaolin bağlayıcılı (100MK) geopolimer harçları referans aldığı-mızda İşlenebilirlik açısından %5 boraks penta hidrat katkılı (100MK5BPH), %10 boraks penta hidrat katkılı (100MK10BP) ve %15 boraks penta hidrat katkılı (100MK15BPH) geopolimer harçlarda yayılma çapının %7,14 arttığı görülmektedir. %5 kolemanit katkılı (100MK5K), %10 katkılı (100MK10K) ve %15 katkılı (100MK15K) geopolimer harçlarda yayılma çapında herhangi bir değişiklik olmadığı görülmektedir. Bunun dışında %10 pışırılmış taş tozu atığı ikameli (90MK10PTTA) geopolimer harçlarda yayılma çapının %14,28 arttığı, %20 pışırılmış taş tozu atığı ikameli (80MK20PTTA) pışırılmış taş tozu atığı ikameli geopolimer harçlarda yayılma çapının %21,42 arttığı ve son olarak %30 pışırılmış taş tozu atığı ikameli (70MK30PTTA) geopolimer harçlarda yayılma çapını %35,70 arttığı görülmektedir. Bunun dışında katkı malzemeleri incelendiğinde kolemanit katkısının hiçbir şekilde yayılma değerine etki etmediği görülmektedir. Ancak diğer bor minerali boraks penta hidratın yayılma çapını bir miktar da olsa arttırmakta ve daha işlenebilir geopolimer harç üretimine olanak sağladığı görülmektedir. İşlenebilme açısından bor minerallerinde boraks penta hidrat mineralinin daha uygun olduğu görülmektedir. Sonuçta, geopolimer harçlarda işlenebilmenin artırılması anlamında pışırılmış taş tozu atığı ve boraks penta hidrat mineralinin pozitif bir etki yaptığı görülmektedir.

İşlenebilirlik deneyinde yayılma tablasında metakaolin bağlayıcılı numunelerde yayılma değerlerinin düşük çıkmasında metakaolinin özellikle çok ince taneli yapısı ve yüksek su ihtiyacına karşın geopolimerlerde suyun yalnızca üretim aşamasında işlenebilirlik için kullanılması ve geopolimerin kurumasından sonra geopolimeri terk etmesi

nedeniyle fazla miktarda kullanılmaması düşünülmektedir. Aynı şekilde bor minerallerinden kolemanitinde çok ince taneli yapısından dolayı yayılma değerine etki etmediği görülmektedir. Buna karşın pişirilmiş taş tozu atığının ve boraks penta hidratin nispeten daha kalın taneli yapısından dolayı su ihtiyacının az almasından kaynaklı yayılma değerlerinin daha iyi düzeylere ulaştığı düşünülmektedir.

Çizelge 5.2. Geopolimer harç numunelerinin yayılma değerleri

Deney Kodu	Yayılma değeri (cm)
100MK	14
90MK10PTTA	16
80MK20PTTA	17
70MK30PTTA	19
100MK5K	14
100MK10K	14
100MK15K	14
100MK5BPH	15
100MK10BPH	15
100MK15BPH	15



Şekil 5.2. Geopolimer harç numunelerinin yayılma değerleri

5.1.3. Taze haldeki geopolimer harçlarda birim hacim ağırlığı tayini deney sonuçları

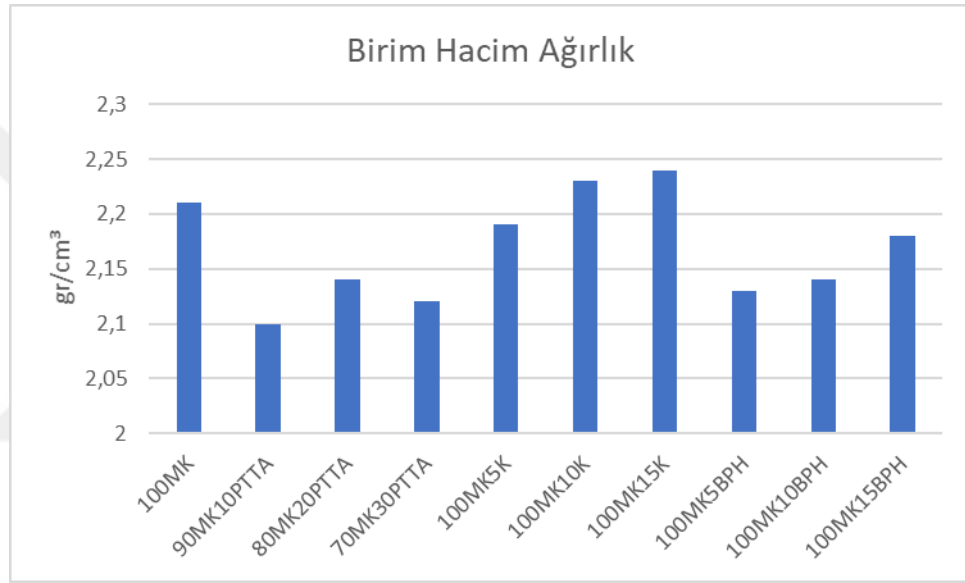
Çalışmada üretilen geopolimer harçların taze haldeki birim hacim ağırlıkları Çizelge 5.3. ve Şekil 5.3. de verilmektedir. Üretilen geopolimer harç numunelerinin taze haldeki fiziksel özelliklerden birim hacim ağırlıklara bakıldığında birim hacim ağırlık değerlerinin $2,24 \text{ g/cm}^3$ ile $2,10 \text{ g/cm}^3$ arasında değiştiği ve en büyük birim hacim ağırlığın metakaoline %15 kolemanit katkısı (100MK15K) ile üretilen geopolimer harçlarda olduğu, en düşük birim hacim ağırlığın ise metakaoline %10 pişirilmiş taş tozu atığı ikamesinde (90MK10PTTA) olduğu görülmektedir. %100 metakolin bağlayıcılı (100MK) geopolimer harçları referans aldığımızda, birim hacim ağırlığın pişirilmiş taş tozu ikamesinde referans değere göre %3 ile %5 oranında azaldığı, katkı malzemesi anlamında kullanılan bor minerallerinde ise birim hacim ağırlığın referans değere göre %5 kolemanit katkısında %1 azaldığı diğerlerinde ise %1 arttığı görülmektedir. Boraks penta hidrat mineralinde ise birim hacim ağırlığın referans değere göre %1,3 ile %3,6 oranında azaldığı görülmektedir. Pişirilmiş taş tozu atığı ile birlikte boraks penta hidrat mineralinin geopolimer harçların birim hacim ağırlığını düşürdüğü, ancak kolemanit minerali katkısının geopolimer harçların birim hacim ağırlığını arttırdığı görülmektedir.

Ana bağlayıcı metakaolin olmak üzere üretilen geopolimer harç numunelerinin taze haldeki fiziksel özelliklerden birim hacim ağırlıklara bakıldığında değerlerin en büyük birim hacim ağırlığın metakaoline %15 kolemanit katkısı ile üretilen (100MK15K) geopolimer harçlarda olduğu, en düşük birim hacim ağırlığın ise metakaoline %10 pişirilmiş taş tozu atığı ikamesinde (90MK10PTTA) olduğu görülmüştür. Pişirilmiş taş tozu atığı ile birlikte boraks penta hidrat mineralinin geopolimer harçların birim hacim ağırlığı düşürdüğü, ancak kolemanit minerali katkısının geopolimer harçların birim hacim ağırlığını arttırdığı görülmektedir.

Birim hacim ağırlık değerlerinde %100 metakaolin bağlayıcılı geopolimer harçlara göre (100MK) pişirilmiş taş tozu atığı ikameli ve boraks penta hidrat katkılı geopolimer harçların birim hacim ağırlıklarının düşük çıkmasının sebebinin malzemelerin birim hacim ağırlıkları ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Yine aynı şekilde kolemanit katkılı katkılı geopolimer harçların birim hacim ağırlıklarının düşük çıkmasının sebebinin malzemelerin birim hacim ağırlıkları ile ilgili olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 5.3. Farklı deney kodlarında üretilen geopolimer harçların taze haldeki birim hacim ağırlıkları

Deney Kodu	Kalıbın ağırlığı (gr)	Kalıp+taze harcın ağırlığı (gr)	Birim hacim ağırlık (g/cm ³)
100MK	11654,8	13345	2,21
90M10PTTA	11654,8	13270	2,10
80M20PTTA	11654,8	13300	2,14
70M30PTTA	11654,8	13280	2,12
100MK5K	11654,8	13335	2,19
100MK10K	11654,8	13368	2,23
100MK15K	11654,8	13375	2,24
100MK5BPH	11654,8	13287	2,13
100MK10BPH	11654,8	13295	2,14
100MK15BPH	11654,8	13327	2,18

**Şekil 5.3.** Üretilen geopolimer harçların taze haldeki birim hacim ağırlıkları

5.2. Sertleşmiş Haldeki Geopolimer Harçlar Üzerinde Yapılan Deneylerin Sonuçları

5.2.1. Eğilme dayanımı deneyi sonuçları

Çalışmada üretilen geopolimer harçların 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları Çizelge 5.4. ve Şekil 5.4. de verilmiştir. Üretilen geopolimer harç numunelerinin 7., 28. ve 90. gündeki eğilme dayanımlarına bakıldığında tüm karışımlar içinde en yüksek dayanım değerlerinin bağlayıcı olarak %100 metakaolin kullanılarak üretilen (100MK) geopolimer harç numunelerinde ortaya çıktığı görülmektedir. 7. günde 14,05 Mpa, 28. günde 14,29 Mpa ve 90. günde 14,90 Mpa değerlerine ulaşılmıştır. %100 metakaolin

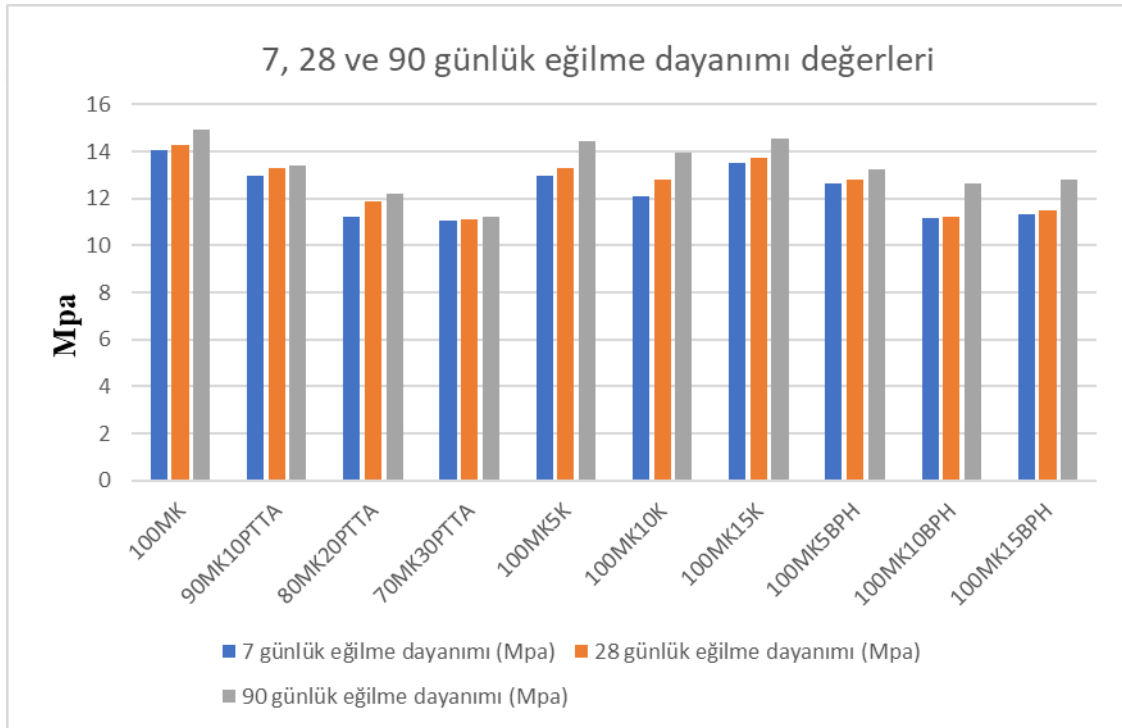
bağlayıcılı (100MK) geopolimer harç numuneleri referans olmak üzere, pişirilmiş taş tozu atığı ikamesi ile üretilen geopolimer harçlarda 7 günlük eğilme dayanımlarında referans değere göre sırasıyla %7,83, %20 ve %21,14 oranlarında azalma görülmektedir. 28 günlük eğilme dayanımlarında referans değere göre sırasıyla %7,07, %16,93 ve %22,32 oranlarında azalma görülmektedir. 90 günlük eğilme dayanımlarında referans değere göre sırasıyla %9,93, %18,12 ve %24,56 oranlarında azalma görülmektedir. Bor minerallerinden kolemanit katkısı ile üretilen geopolimer harçlarda, 7 günlük eğilme dayanımlarında referans değere göre sırasıyla %7,07, %13,81 ve %3,84 oranlarında azalma görülmektedir. 28 günlük eğilme dayanımlarında referans değere göre sırasıyla %7,07, %10,36 ve %4,06 azalma olduğu görülmektedir. 90 günlük eğilme dayanımlarında referans değere göre sırasıyla %3,02, %6,38 ve %2,28 azalma olduğu görülmektedir. Boraks penta hidrat katkısı ile üretilen geopolimer harçlarda, 7 günlük eğilme dayanımlarında referans değere göre sırasıyla %9,96, %19,50 ve %20,50 oranlarında azalma görülmektedir. 28 günlük eğilme dayanımlarında referans değere göre sırasıyla %10,36, %21,34 ve %19,73 oranlarında azalma olduğu görülmektedir. 90 günlük eğilme dayanımlarında referans değere göre sırasıyla %11,01, %15,03 ve %14,09 oranlarında azalma olduğu görülmektedir. Bu sonuçlardan 7., 28. ve 90.gündeki eğilme dayanımlarında referans değere en yakın numunelerin metakaoline %15 oranında katkılı kolemanit minerali içeren (100MK15K) numunelerin olduğu görülmektedir. Referans değere göre en uzak numunelerin ise %30 pişirilmiş taş tozu ikamesinde (70MK30PTTA) olduğu görülmektedir.

Sonuçta metakaolin bağlayıcılı (100MK) geopolimer harçlarda, pişirilmiş taş tozu atığı ikamesi, kolemanit ve boraks penta hidrat katkısının negatif bir etki yaptığı ve dayanım değerlerini düşürdüğü görülmektedir.

Eğilme dayanımının 7, 28 ve 90 günlük değerlerinde, %100 metakaolin bağlayıcılı (100MK) geopolimer harç numunelerine göre gerek ikame malzemesinde, gerekse katkı malzemelerinde dayanım değerlerinin düşük çıkmasının nedeninin, özellikle pişirilmiş taş tozu atığı ve boraks penta hidrat mineralinin tane yapısının kabalı olmasından ve geopolimer harçlarda boşlukları yeteri kadar dolduramamasından kaynaklandığı, kolemanit mineralinde ise tane yapısının son derece ince olması ve geopolimer harçlarda boşlukları yeteri kadar doldurmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çizelge 5.4. Geopolimer harç numunelerinin 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları

Deney kodu	7 günlük eğilme dayanımı (Mpa)	28 günlük eğilme dayanımı (Mpa)	90 günlük eğilme dayanımı (Mpa)
100MK	14,05	14,29	14,90
90MK10PTTA	12,95	13,28	13,42
80MK20PTTA	11,24	11,87	12,20
70MK30PTTA	11,08	11,10	11,24
100MK5K	12,95	13,28	14,45
100MK10K	12,11	12,81	13,95
100MK15K	13,51	13,71	14,56
100MK5BPH	12,65	12,81	13,26
100MK10BPH	11,17	11,24	12,66
100MK15BPH	11,31	11,47	12,80

**Şekil 5.4.** Üretilen geopolimer harç numunelerinin 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları

5.2.2. Basınç dayanımı deneyi sonuçları

Çalışmada elde edilen 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri Çizelge 5.5. ve Şekil 5.5. de verilmiştir. Üretilen geopolimer harç numunelerinin 7., 28., ve 90. gün-deki basınç dayanımlarına bakıldığında tüm karışımlar içinde en yüksek dayanım değerlerinin (100MK) geopolimer harç numunelerinde ortaya çıktığı görülmektedir. 7. günde 66,8 Mpa, 28. günde 67,17 Mpa ve 90. günde 73,36 Mpa değerlerine ulaşıldığı görülmüştür. (100MK) geopolimer harç numuneleri referans olmak üzere, pişirilmiş taş tozu

atığı ikamesi ile üretilen geopolimer harçlarda 7 günlük basınç dayanımlarında referans değere sırasıyla %4,13, %12,26 ve %15,96 oranlarında azalma görülmektedir. 28 basınç dayanımlarında referans değere göre sırasıyla %3,02, %5,78 ve %8,29 oranlarında azalma görülmektedir. 90 günlük basınç dayanımlarında referans değere sırasıyla %9,32, %11,11 ve %15,81 oranlarında azalma olduğu görülmektedir.

Bor minerallerinden kolemanit katkısı ile üretilen geopolimer harçlarda, 7 günlük basınç dayanımlarında referans değere göre sırasıyla %2,81, %5,63 ve %12,50 oranlarında azalma olduğu görülmektedir. 28 günlük basınç dayanımlarında referans değere göre %5 kolemanit katkısında (100MK5K) %3,20 azalma, %10 kolemanit katkısında (100MK10K) %1,86 artma ve %15 kolemanit katkısında (100MK15K) %11,37 azalma olduğu görülmektedir. 90 günlük basınç dayanımlarında referans değere göre sırasıyla %8,83, %3,05 ve %5,97 oranlarında azalma olduğu görülmektedir. Boraks penta hidrat katkısı ile üretilen geopolimer harçlarda, 7 günlük basınç dayanımlarında referans değere göre sırasıyla %8,16, %14,42 ve %21,02 oranlarında azalma olduğu görülmektedir. 28 günlük basınç dayanımlarında referans değere göre sırasıyla %6,40, %7,50 ve %15,66 oranlarında azalma olduğu görülmektedir. 90 günlük basınç dayanımlarında referans değere göre sırasıyla %6,27, %14,41 ve %21,86 oranlarında azalma olduğu görülmektedir. Bu sonuçlardan 7. gündeki basınç dayanımlarında referans değere en yakın numunelerin metakaoline %5 oranında katkılı kolemanit minerali içeren (100MK5K) numuneler olduğu ve referans değerden %2,81 düşük değerler aldığı görülmektedir. Aynı şekilde 28. gündeki basınç dayanımlarına bakıldığında referans değere en yakın numunelerin %10 oranında katkılı kolemanit minerali içeren (100MK10K) numune olduğu ve referans değerden %1,86 yüksek değerler aldığı görülmektedir. 90. gündeki basınç dayanımlarına bakıldığında referans değere en yakın numunelerin %10 oranında katkılı kolemanit minerali içeren (100MK10K) numuneler olduğu ve referans değerden %3,05 düşük değerler aldığı görülmektedir. Referans değere göre en düşük basınç dayanımlarına bakıldığında ise, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarında en düşük değerlerin metakaoline %15 boraks penta hidrat katkısında (100MK15BPH) üretilen numunelerde ortaya çıktığı referans değerden sırasıyla %21,02, %15,66 ve %22,14 düşük değerler aldığı görülmektedir.

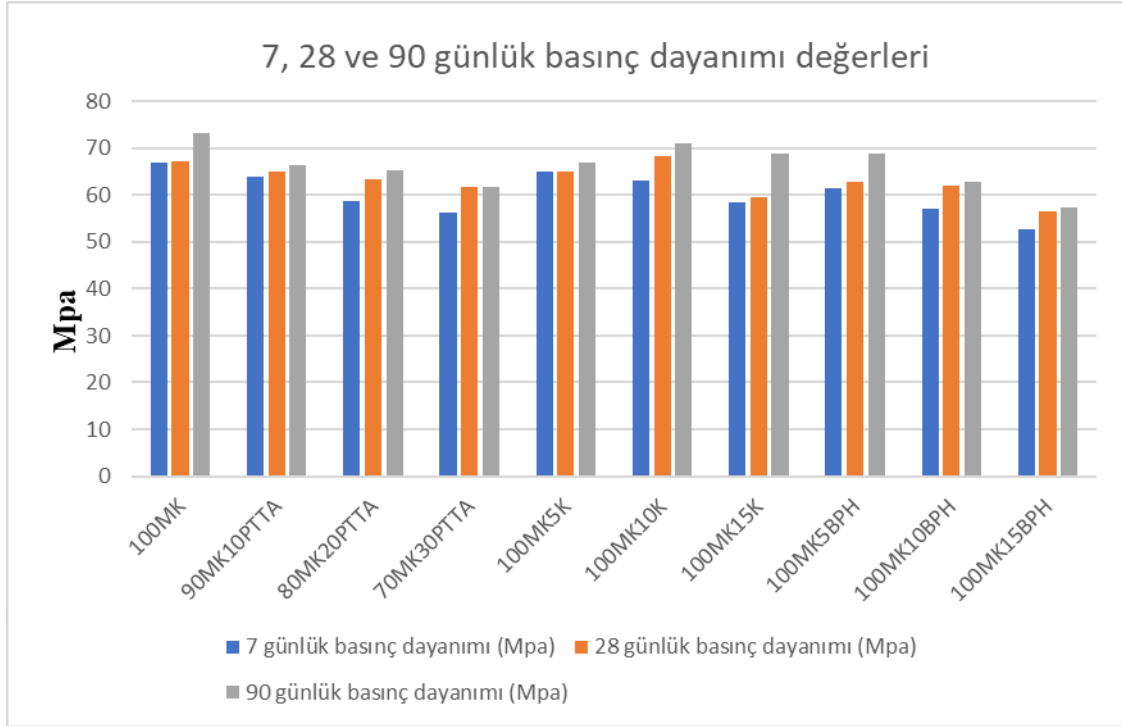
Sonuçta metakaolin bağlayıcılı (100MK) geopolimer harçlarda, referans değere göre gerek pişirilmiş taş tozu atığı ikamesi olsun gerek kolemanit katkısı ve gerekse de boraks penta hidrat katkısı olsun ikame oranları veya katkı oranlarının artmasıyla dayanım değerlerinde negatif bir etkinin olduğu görülmektedir.

Üretilen geopolimer harçların mekanik özelliklerinden 7 , 28 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanımları arasındaki ilişki Çizelge 5.6. ve Şekil 5.6. da verilmektedir. Eğilme ve basınç dayanımları arasındaki ilişkiye baktığımızda 7 günlük dayanımda en düşük katsayının 4,33 ile %15 kolemanit katkısı kullanılarak üretilen (100MK15K) geopolimer harçlarda olduğu, en büyük katsayının ise 5.21 ile %20 pişirilmiş taş tozu ikameli (80MK20PTTA) ve %10 katkılı (100MK10K) geopolimer harçlarda olduğu görülmektedir. 28 günlük dayanımda en düşük katsayının 4,70 ile %100 metakaolin bağlayıcılı (100MK) geopolimer harçlarda olduğu, en büyük katsayının ise 5,55 ile %30 pişirilmiş taş tozu atığı ikameli (70MK30PTTA) geopolimer harçlarda olduğu görülmektedir. 28 günlük dayanımda en düşük katsayının 4,48 ile %15 boraks penta hidrat katkılı (100MK15BPH) geopolimer harçlarda olduğu, en büyük katsayının ise 5,35 ile %20 pişirilmiş taş tozu ikameli (80MK20PTTA) geopolimer harçlarda olduğu görülmektedir. 7 günlük dayanımda eğilme ve basınç dayanımı arasındaki ilişkide basınç dayanımının, eğilme dayanımının 4,92 katı olduğu, 28 günlük dayanımda bu değer 5,05 ve 90 günlük dayanımda 5,08 olduğu görülmektedir. Sonuçta tüm karışımlarda 7 günlük, 28 günlük ve 90 günlük dayanım değerlerinde basınç dayanımının eğilme dayanımının 5 katı olduğu görülmektedir.

Basınç dayanımının 7, 28 ve 90 günlük değerlerinde, %100 metakaolin bağlayıcılı (100MK) geopolimer harç numunelerine göre gerek ikame malzemesinde, gerekse katkı malzemelerinde dayanım değerlerinin düşük çıkmasının nedeninin, özellikle pişirilmiş taş tozu atığı ve boraks penta hidrat mineralinin tane yapısının kabalı olmasından ve geopolimer harçlarda boşlukları yeteri kadar dolduramamasından kaynaklandığı, kolemanit mineralinde ise tane yapısının son derece ince olması ve geopolimer harçlarda boşlukları yeteri kadar doldurmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çizelge 5.5. Geopolimer harç numunelerinin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları

Deney kodu	7 günlük basınç dayanımı (Mpa)	28 günlük basınç dayanımı (Mpa)	90 günlük basınç dayanımı (Mpa)
100MK	66,80	67,17	73,36
90MK10PTTA	64,04	65,14	66,52
80MK20PTTA	58,61	63,29	65,21
70MK30PTTA	56,14	61,60	61,76
100MK5K	64,92	65,02	66,88
100MK10K	63,04	68,42	71,12
100MK15K	58,45	59,53	68,98
100MK5BPH	61,35	62,87	68,76
100MK10BPH	57,17	62,13	62,79
100MK15BPH	52,76	56,65	57,32



Şekil 5.5. Geopolimer harç numunelerinin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları

5.2.3. Eğilme ve basınç dayanımı arasındaki ilişki

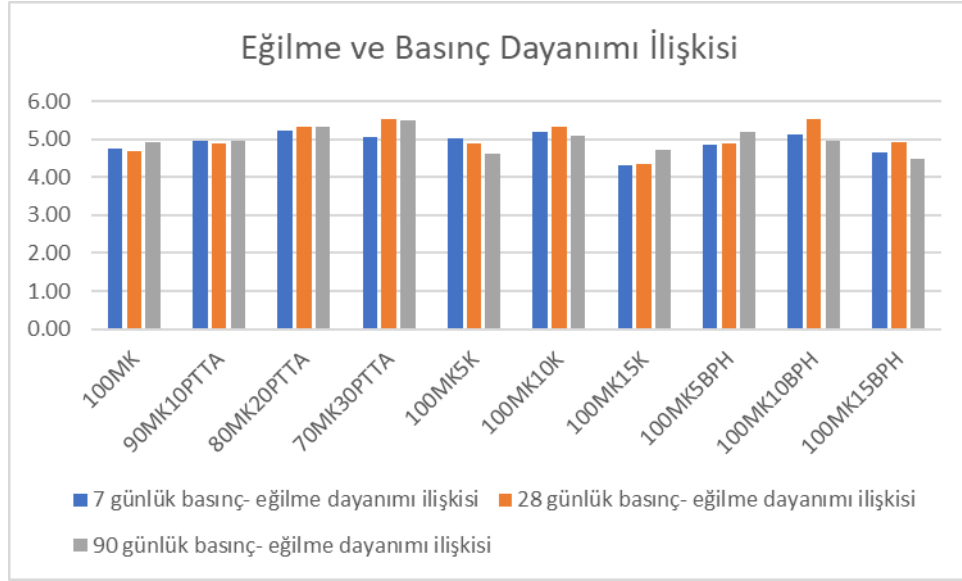
Çalışma kapsamında üretilen geopolimer harçların 7, 28 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanımları arasındaki ilişki incelendiğinde, 7 günlük eğilme dayanımı değerlerinde %100 metakaolin bağlayıcılı (100MK) geopolimer harçlarda eğilme ve basınç dayanımları arasındaki katsayının 4,75, pişirilmiş taş tozu atığı ikamesinde ikame oranlarına göre sırasıyla 4,95, 5,21, 5,07, kolemanit katkısında katkı oranlarına göre sırasıyla 5,01, 5,21, 4,33, boraks penta hidrat katkısında katkı oranına göre sırasıyla, 4,85, 5,12 ve 4,66 olduğu görülmektedir. 28 günlük eğilme dayanımı değerlerinde %100 metakaolin bağlayıcılı (100MK) geopolimer harçlarda eğilme ve basınç dayanımları arasındaki katsayının 4,70, pişirilmiş taş tozu atığı ikamesinde ikame oranlarına göre sırasıyla 4,91, 5,33, 5,55, kolemanit katkısında katkı oranlarına göre sırasıyla 4,90, 5,34, 4,34, boraks penta hidrat katkısında katkı oranına göre sırasıyla, 4,91, 5,53 ve 4,94 olduğu görülmektedir. 90 günlük eğilme dayanımı değerlerinde %100 metakaolin bağlayıcılı (100MK) geopolimer harçlarda eğilme ve basınç dayanımları arasındaki katsayının 4,92, pişirilmiş taş tozu atığı ikamesinde ikame oranlarına göre sırasıyla 4,96, 5,35, 5,49, kolemanit katkısında katkı oranlarına göre sırasıyla 4,63, 5,10, 4,74, boraks penta hidrat katkısında katkı oranına göre sırasıyla, 5,19, 4,96 ve 4,48 olduğu görülmektedir.

Metakaolin tabanlı üretilen geopolimer harçlarda, gerek bağlayıcı olarak sadece metakaolinin kullanıldığı, gerekse de pişirilmiş taş tozu atığı ikameli ve kolemanit ve boraks penta hidrat katkılı geopolimer harçlarda eğilme ve basınç dayanımları arasında çimento esaslı harçların 7 ve 28 günlük dayanımlar arasındaki ilişkiye göre metakaolin ana bağlayıcı olmak üzere pişirilmiş taş tozu atığı ikamesi ile beraber kolemanit ve boraks penta hidrat katkılı geopolimer harçlarda eğilme ve basınç dayanımları arasında hemen hemen aynı katsayının elde edildiği görülmektedir. Sonuçta üretilen geopolimer harç numunelerinde gerek ana bağlayıcılığı, gerek ikame malzemeli, gerekse de katkılı harçlarda çimento esaslı harç numunelerine göre hem eğilme dayanımında, hem de basınç dayanımında geopolimer harçlarda daha yüksek dayanımlar elde edildiği ve eğilme ile basınç dayanımı arasında benzer bir ilişki olduğu görülmektedir.

Geopolimer harçlarda eğilme ve basınç dayanımlarının çimento esaslı harçlara göre yaklaşık %60 fazla olmasının ve eğilme ve basınç dayanımı arasındaki katsayının benzer çıkmasının nedeninin geopolimer harç numunelerin, dayanım kazanma prosedürünün ve kür şartlarının etkili olduğu ve bir nevi prefabrikasyon şartlarının yerine getirilerek mekanik dayanımlarını arttırdığı düşünülmektedir.

Çizelge 5.6. Geopolimer harç numunelerinde 7, 28 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanımları ilişkisi

Deney kodu	7 günlük basınç ve eğilme dayanımı ilişkisi	28 günlük basınç ve eğilme dayanımı ilişkisi	90 günlük basınç ve eğilme dayanımı ilişkisi
100MK	4,75	4,70	4,92
90MK10PTTA	4,95	4,91	4,96
80MK20PTTA	5,21	5,33	5,35
70MK30PTTA	5,07	5,55	5,49
100MK5K	5,01	4,90	4,63
100MK10K	5,21	5,34	5,10
100MK15K	4,33	4,34	4,74
100MK5BPH	4,85	4,91	5,19
100MK10BPH	5,12	5,53	4,96
100MK15BPH	4,66	4,94	4,48



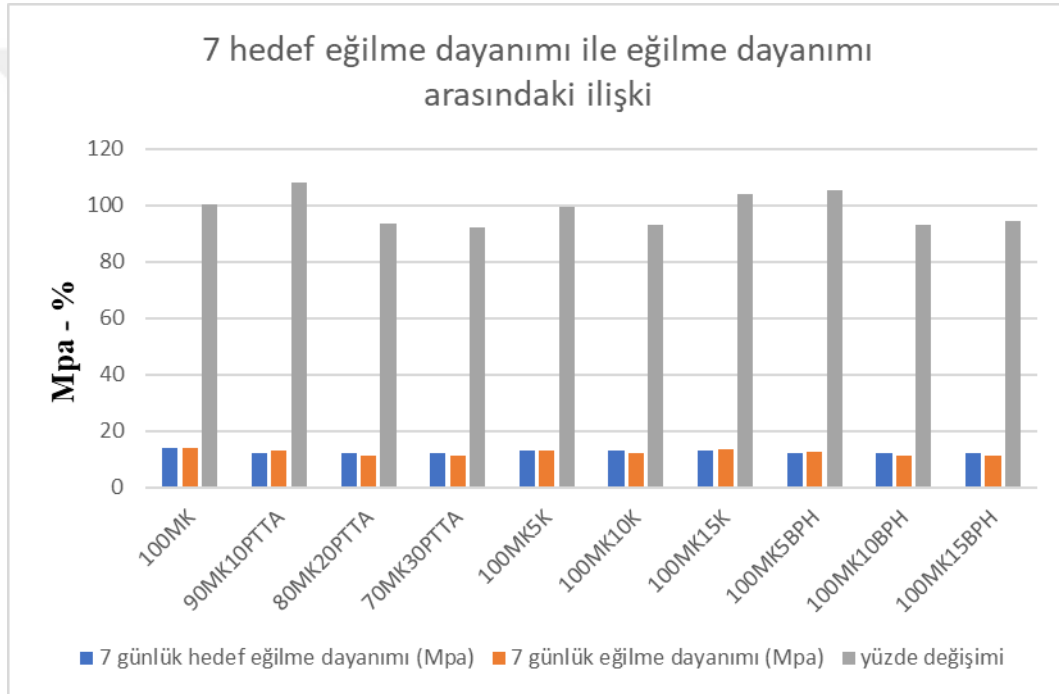
Şekil 5.6. Geopolimer harç numunelerinde 7, 28 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanımları ilişkisi

5.2.4. Hedef tasarım dayanım değerleri ile elde edilen eğilme ve basınç dayanımları arasındaki ilişki

Çalışma kapsamında üretilcek geopolimer harçların 7, 28 ve 90 günlük maksimum hedef tasarım dayanım değerleri ile üretilen geopolimer harçların 7, 28 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanımları arasındaki ilişki incelendiğinde, 7 günlük maksimum hedef tasarım eğilme ve basınç dayanımı ile 7 günlük eğilme ve basınç dayanımı değerlerinde hem %100 metakaolin bağlayıcılı (100MK), hem %10, %20 ve %30 pişirilmiş taş tozu ikameli, hem de %5, %10 ve %15 kolemanit ve boraks penta hidrat katkılı geopolimer harçlarda 7, 28 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanımı değerlerinde hedef tasarım değerleri ile elde edilen değerlerde hedefleri büyük oranda yakalandığı görülmektedir. Geopolimer harçlarda 7, 28 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanımı değerlerinde, hedef tasarım dayanım değerleri ile elde edilen dayanım değerleri arasındaki ilişkiler Çizelge 5.7., Çizelge 5.8., Çizelge 5.9., Çizelge 5.10., Çizelge 5.11., Çizelge 5.12. ile Şekil 5.7., Şekil 5.8. ve Şekil 5.9., Şekil 5.10., Şekil 5.11. ve Şekil 5.12. de verilmektedir.

Çizelge 5.7. Geopolimer harç numunelerinde 7 günlük hedef eğilme dayanımı ve elde edilen eğilme dayanımı arasındaki ilişki

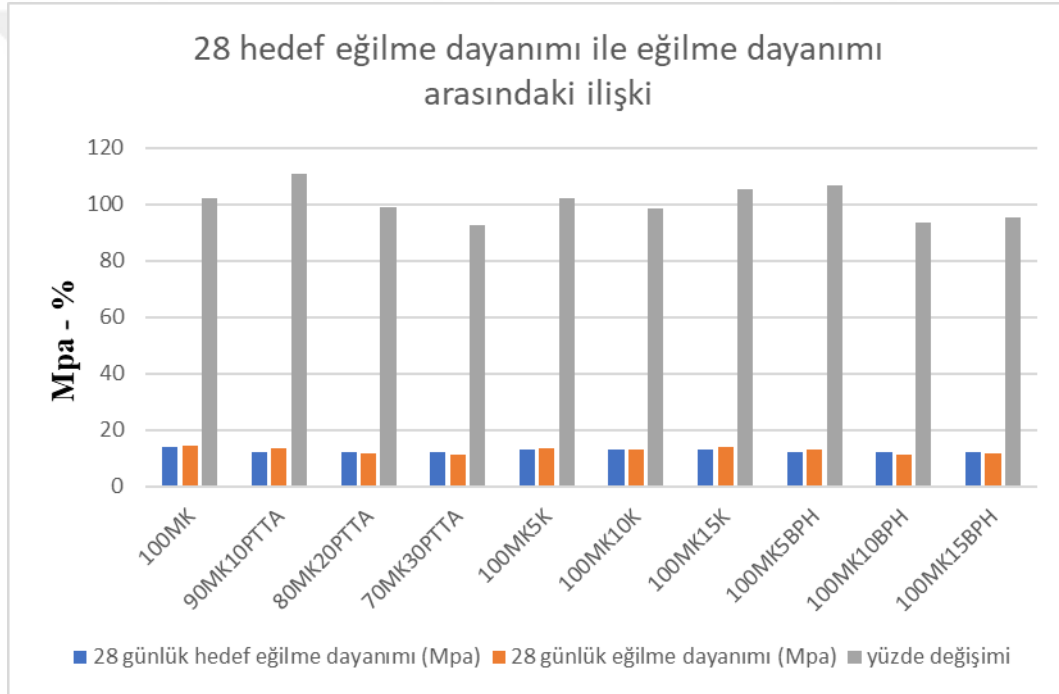
Deney Kodu	7 günlük hedef eğilme dayanımı (Mpa)	7 günlük eğilme dayanımı (Mpa)	Yüzde değişimi (%)
100MK	14	14,05	100,36
90MK10PTTA	12	12,95	107,92
80MK20PTTA	12	11,24	93,67
70MK30PTTA	12	11,08	92,33
100MK5K	13	12,95	99,62
100MK10K	13	12,11	93,15
100MK15K	13	13,51	103,92
100MK5BPH	12	12,65	105,42
100MK10BPH	12	11,17	93,08
100MK15BPH	12	11,31	94,25



Şekil 5.7. 7 günlük hedef eğilme dayanımı ve elde edilen eğilme dayanımı arasındaki ilişki

Çizelge 5.8. Geopolimer harç numunelerinde 28 günlük hedef eğilme dayanımı ve elde edilen eğilme dayanımı arasındaki ilişki

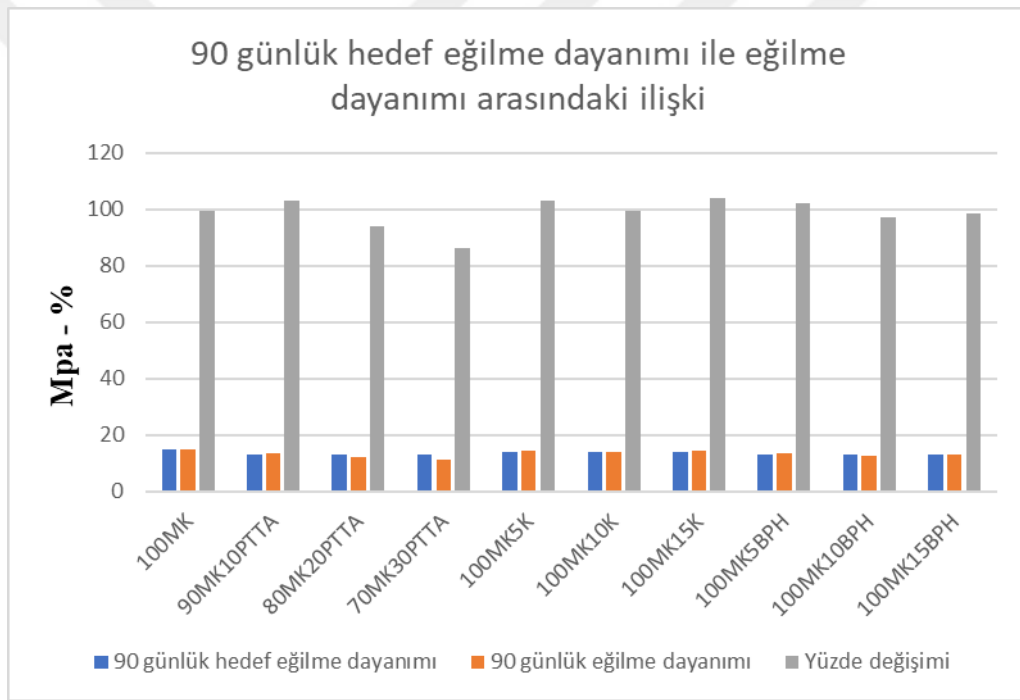
Deney Kodu	28 günlük hedef eğilme dayanımı (Mpa)	28 günlük eğilme dayanımı (Mpa)	Yüzde değişimi (%)
100MK	14	14,29	102,07
90MK10PTTA	12	13,28	110,67
80MK20PTTA	12	11,87	98,92
70MK30PTTA	12	11,10	92,50
100MK5K	13	13,28	102,15
100MK10K	13	12,81	98,54
100MK15K	13	13,71	105,46
100MK5BPH	12	12,81	106,75
100MK10BPH	12	11,24	93,67
100MK15BPH	12	11,47	95,58



Şekil 5.8. 28 günlük hedef eğilme dayanımı ve elde edilen eğilme dayanımı arasındaki ilişki

Çizelge 5.9. Geopolimer harç numunelerinde 90 günlük hedef eğilme dayanımı ve elde edilen eğilme dayanımı arasındaki ilişki

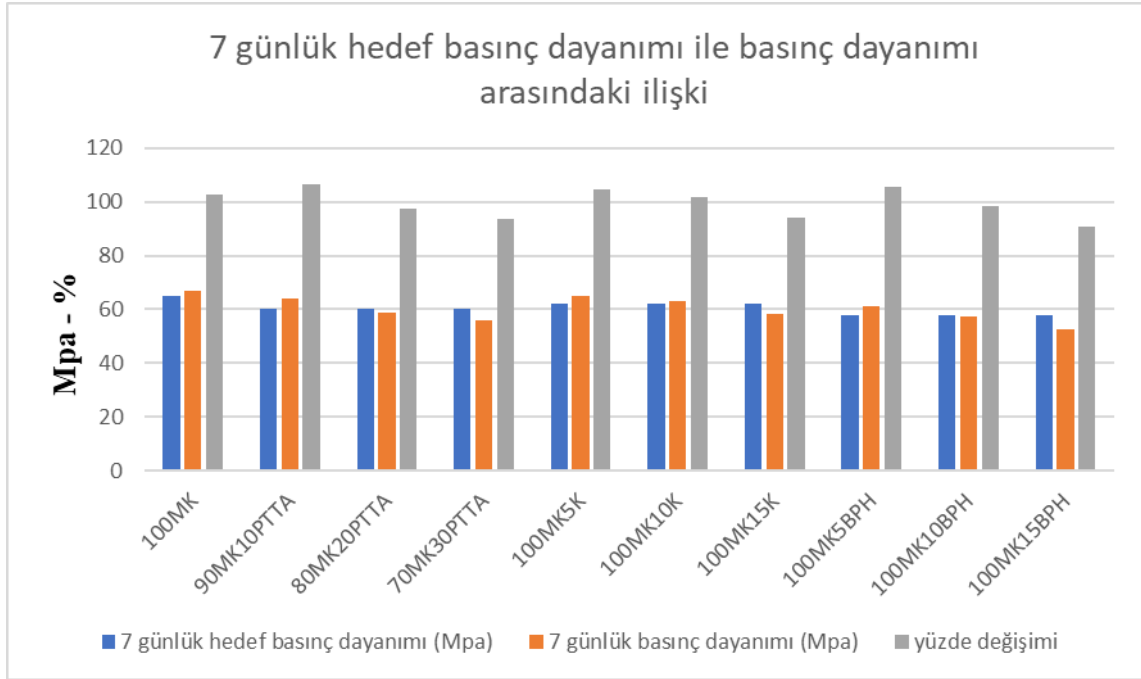
Deney Kodu	90 günlük hedef eğilme dayanımı (Mpa)	90 günlük eğilme dayanımı (Mpa)	Yüzde değişimi (%)
100MK	15	14,90	99.33
90MK10PTTA	13	13,42	103.23
80MK20PTTA	13	12,20	93.85
70MK30PTTA	13	11,24	86.46
100MK5K	14	14,45	103.21
100MK10K	14	13,95	99.64
100MK15K	14	14,56	104.00
100MK5BPH	13	13,26	102.00
100MK10BPH	13	12,66	97.38
100MK15BPH	13	12,80	98.46



Şekil 5.9. 90 günlük hedef eğilme dayanımı ve elde edilen eğilme dayanımı arasındaki ilişki

Çizelge 5.10. Geopolimer harç numunelerinde 7 günlük hedef basınç dayanımı ve elde edilen basınç dayanımı arasındaki ilişki

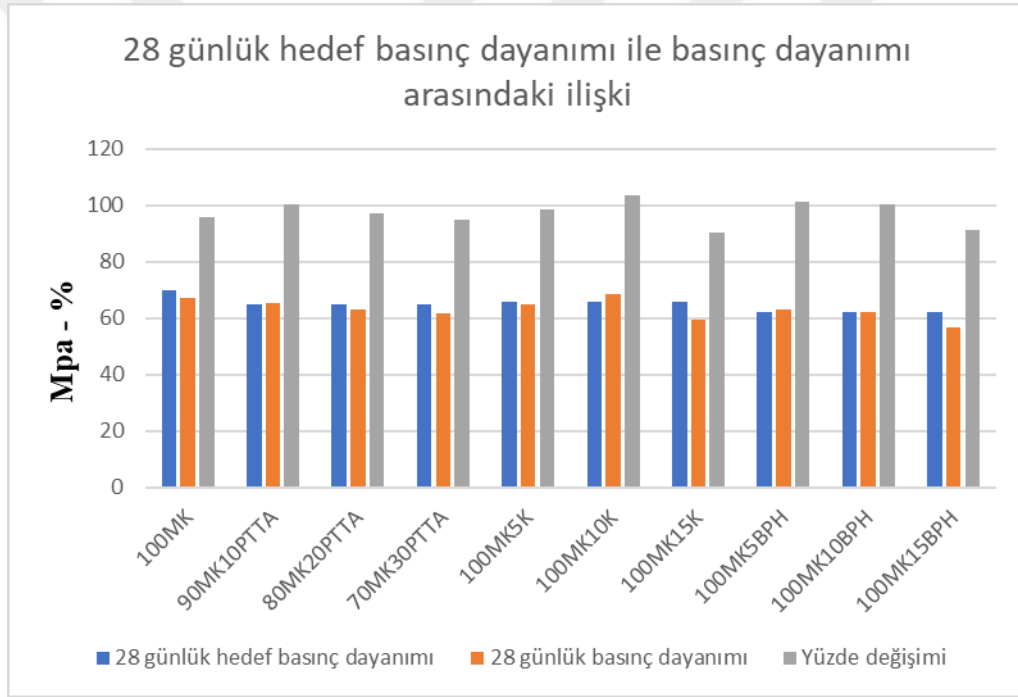
Deney Kodu	7 günlük hedef basınç dayanımı (Mpa)	7 günlük basınç dayanımı (Mpa)	Yüzde değişimi (%)
100MK	65	66,80	102,77
90MK10PTTA	60	64,04	106,73
80MK20PTTA	60	58,61	97,68
70MK30PTTA	60	56,14	93,57
100MK5K	62	64,92	104,71
100MK10K	62	63,04	101,68
100MK15K	62	58,45	94,27
100MK5BPH	58	61,35	105,78
100MK10BPH	58	57,17	98,57
100MK15BPH	58	52,76	90,97



Şekil 5.10. 7 günlük hedef basınç dayanımı ve elde edilen basınç dayanımı arasındaki ilişki

Çizelge 5.11. Geopolimer harç numunelerinde 28 günlük hedef basınç dayanımı ve elde edilen basınç dayanımı arasındaki ilişki

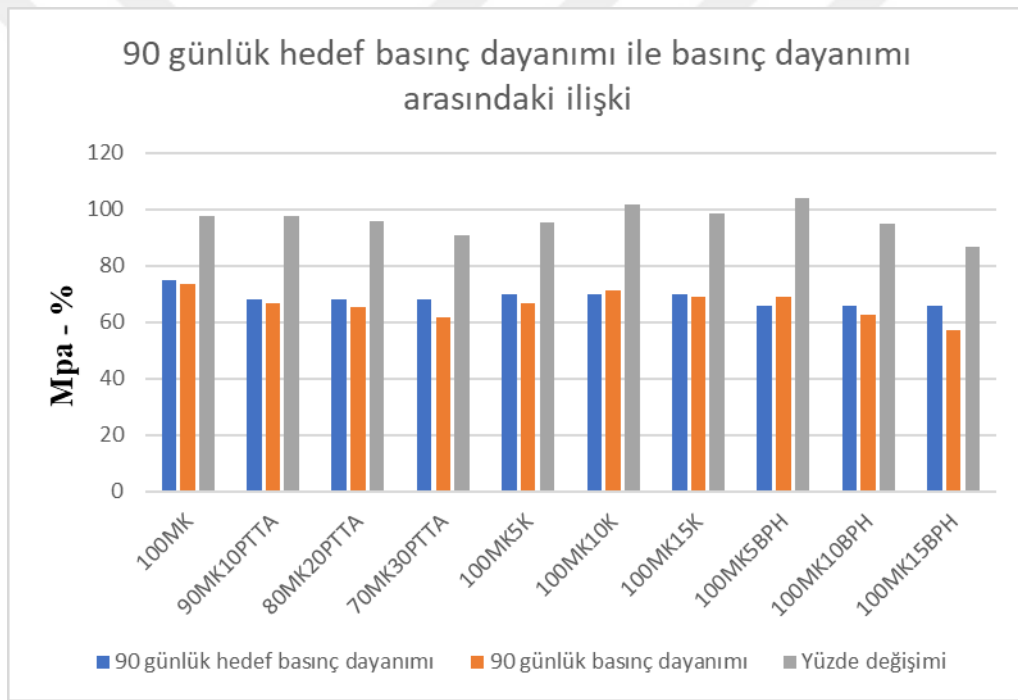
Deney Kodu	28 günlük hedef basınç dayanımı (Mpa)	28 günlük basınç Dayanımı (Mpa)	Yüzde değişimi (%)
100MK	70	67,17	95.96
90MK10PTTA	65	65,14	100.22
80MK20PTTA	65	63,29	97.37
70MK30PTTA	65	61,60	94.77
100MK5K	66	65,02	98.52
100MK10K	66	68,42	103.67
100MK15K	66	59,53	90.20
100MK5BPH	62	62,87	101.40
100MK10BPH	62	62,13	100.21
100MK15BPH	62	56,65	91.37



Şekil 5.11. 28 günlük hedef basınç dayanımı ve elde edilen basınç dayanımı arasındaki ilişki

Çizelge 5.12. Geopolimer harç numunelerinde 90 günlük hedef basınç dayanımı ve elde edilen basınç dayanımı arasındaki ilişki

Deney Kodu	90 günlük hedef basınç dayanımı (Mpa)	90 günlük basınç dayanımı (Mpa)	Yüzde değişimi (%)
100MK	75	73,36	97,81
90MK10PTTA	68	66,52	97,82
80MK20PTTA	68	65,21	95,90
70MK30PTTA	68	61,76	90,82
100MK5K	70	66,88	95,54
100MK10K	70	71,12	101,60
100MK15K	70	68,98	98,54
100MK5BPH	66	68,76	104,18
100MK10BPH	66	62,79	95,14
100MK15BPH	66	57,32	86,85



Şekil 5.12. 90 günlük hedef basınç dayanımı ve elde edilen basınç dayanımı arasındaki ilişki

5.2.5. Üretilen geopolimer harçların görünen özgül ağırlık sonuçları

Çalışmada üretilen geopolimer harçların sertleşmiş haldeki fiziksel özelliklerinde görünen özgül ağırlık Çizelge 5.13. ve Şekil 5.13. de verilmiştir. Üretilen geopolimer harç numunelerinde görünen özgül ağırlık değerlerine baktığımızda 2,276 gr/cm³ ile 2,403 gr/cm³ arasında değiştiği görülmektedir. Görünen özgül ağırlık değerinin en düşük olduğu geopolimer harç karışımlarının %20 pişirilmiş taş tozu atığı ikameli (80MK20PTTA) numuneler olduğu, en yüksek görünen özgül ağırlığa ise %30 pişiril-

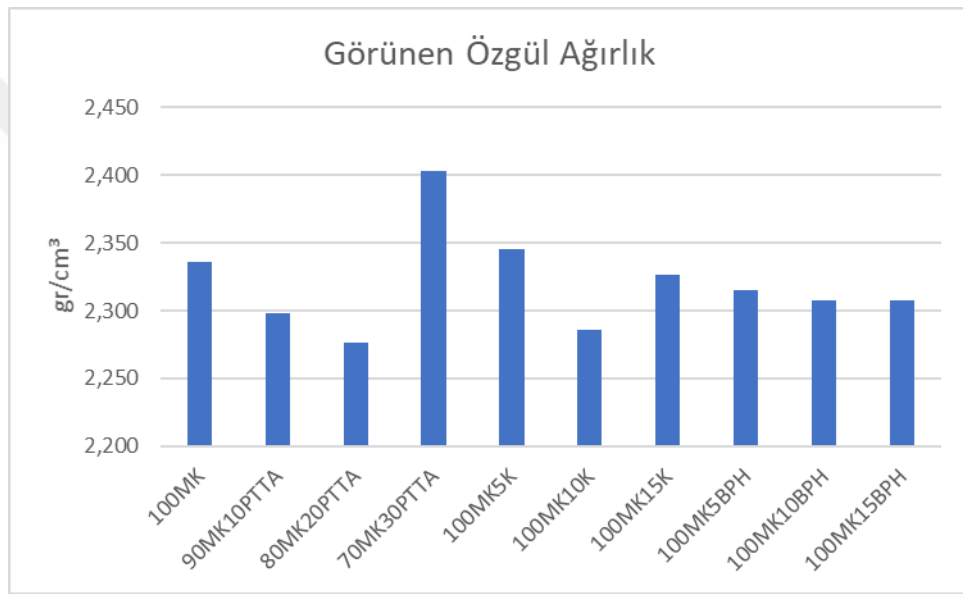
miş taş tozu atığı ikamesinde (70MK30PTTA) görülmektedir. %100 metakaolin bağlayıcılı (100MK) geopolimer harç numunelerini referans olarak aldığımızda, %10 pişirilmiş taş tozu ikameli (90MK10PTTA) numunelerde görünen özgül ağırlık değeri referans değere göre %1,58 azalmaktadır. %20 pişirilmiş taş tozu atığı ikameli (80MK20PTTA) numunelerde görünen özgül ağırlık değeri referans değere göre %2,52 azalmaktadır. %30 pişirilmiş taş tozu ikameli (70MK30PTTA) numunelerde görünen özgül ağırlık değeri referans değere göre %2,91 artmaktadır. %5 kolemanit katkılı (100MK5K) geopolimer harçlarda görünen özgül ağırlık referans değere göre %0,4 artmaktadır. %10 kolemanit katkılı (100MK10K) geopolimer harçlarda görünen özgül ağırlık referans değere göre %2,09 azalmaktadır. %15 kolemanit katkılı (100MK15K) geopolimer harçlarda görünen özgül ağırlık referans değere göre %0,3 azalmaktadır. %5 boraks penta hidrat katkılı (100MK5BPH) geopolimer harçlarda görünen özgül ağırlık referans değere göre %0,8 azalmaktadır. %10 boraks penta hidrat katkılı (100MK10BPH) geopolimer harçlarda ve %15 boraks penta hidrat katkılı (100MK15BPH) geopolimer harçlarda referans değere göre %1,2 azalmaktadır.

Sonuçta referans değere göre geopolimer harçlarda %10 ve %20 pişirilmiş taş tozu atığı ikamesinde görünen özgül ağırlık değerinin referans değerden düşük olduğu ve pozitif bir etki yaptığı , buna karşın %30 pişirilmiş taş tozu ikamesinde görünen özgül ağırlık değerinin referans değerden büyük olduğu görülmektedir. Kolemanit ve boraks penta hidrat katkılarında ise sadece %5 kolemanit katkılı (100MK5K) numunelerde görünen özgül ağırlığın referans değere göre yüksek olduğu bunun dışındaki kolemanit ve boraks penta hidrat katkılarında tüm katkı oranlarında görünen özgül ağırlığı referans değerden düşük olduğu ve bor minerallerinin pozitif bir etki yaptığı görülmektedir.

Üretilen geopolimer harçlarda görünen ağırlık değerlerinde %100 metakaolin bağlayıcılı geopolimer harçlara göre (100MK) pişirilmiş taş tozu atığı ikameli ve boraks penta hidrat katkılı geopolimer harçların görünen özgül ağırlıklarının düşük çıkmasının sebebinin malzemelerin birim hacim ağırlıkları ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Yine aynı şekilde kolemanit katkılı katkılı geopolimer harçların görünen özgül ağırlıklarının düşük çıkmasının sebebinin malzemelerin birim hacim ağırlıkları ile ilgili olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 5.13. Geopolimer harç numunelerinin görünen özgül ağırlık değerleri (gr/cm³)

Deney kodu	A (gr)	B (gr)	C (gr)	Görünen özgül ağırlık (A/A-C)
100MK	504,83	561,17	288,67	2,335
90MK10PTTA	494,83	551,83	279,50	2,298
80MK20PTTA	497,33	555,67	278,83	2,276
70MK30PTTA	490,67	551,00	286,50	2,403
100MK5K	507,00	563,17	290,83	2,345
100MK10K	493,33	547,00	277,50	2,286
100MK15K	488,17	540,83	278,33	2,326
100MK5BPH	493,83	549,00	280,50	2,315
100MK10BPH	498,00	552,17	282,17	2,307
100MK15BPH	491,50	545,67	278,50	2,308

**Şekil 5.13.** Geopolimer harç numunelerinin görünen özgül ağırlık değerleri

5.2.6. Üretilen geopolimer harçların hacimsel özgül ağırlık sonuçları

Çalışmada üretilen geopolimer harçların hacimsel özgül ağırlık değerleri Çizelge 5.14. ve Şekil 5.14. de verilmektedir. Hacimsel özgül ağırlığın 1,796 gr/cm³ ile 1,860 gr/cm³ arasında değerler aldığı görülmektedir. Hacimsel özgül ağırlığı en düşük olduğu geopolimer harç karışımlarının %20 pişirilmiş taş tozu ikameli (80MK20PTTA) numuneler olduğu, en yüksek hacimsel özgül ağırlığa ise %15 kolemanit katkılı (100MK15K) numunelerde ulaşıldığı görülmektedir. %100 metakaolin bağlayıcılı (100MK) geopolimer harç numunelerini referans olarak aldığımızda, %10 pişirilmiş taş tozu ikameli (90MK10PTTA) numunelerde hacimsel özgül ağırlık değeri referans değere göre %1,90

azalmaktadır. %20 pişirilmiş taş tozu atığı ikameli (80MK20PTTA) numunelerde hacimsel özgül ağırlık değeri referans değere göre %3,07 azalmaktadır. %30 pişirilmiş taş tozu ikameli (70MK30PTTA) numunelerde hacimsel özgül ağırlık değeri referans değere göre %0,1 artmaktadır. %5 kolemanit katkılı (100MK5K) geopolimer harçlarda hacimsel özgül ağırlık referans değere göre %0,5 artmaktadır. %10 kolemanit katkılı (100MK10K) geopolimer harçlarda hacimsel özgül ağırlık referans değere göre %1,19 azalmaktadır. %15 kolemanit katkılı (100MK15K) geopolimer harçlarda hacimsel özgül ağırlık referans değere göre %0,4 artmaktadır. %5 boraks penta hidrat katkılı (100MK5BPH) geopolimer harçlarda hacimsel özgül ağırlık referans değere göre %0,8 azalmaktadır. %10 boraks penta hidrat katkılı (100MK10BPH) geopolimer harçlarda hacimsel özgül ağırlık referans değere göre %0,5 azalmaktadır. %15 boraks penta hidrat katkılı (100MK15BPH) geopolimer harçlarda hacimsel özgül ağırlık referans değere göre %0,7 azalmaktadır. Referans değere göre geopolimer harçlarda pişirilmiş taş tozu ikamesinde hacimsel özgül ağırlığın %10 ve %20 ikame oranlarında azaldığı, %30 ikame oranında ise hemen hemen aynı kaldığı görülmektedir. Kolemanit katkısında ise hacimsel özgül ağırlığın %5 katkı oranında arttığı, %10 katkı oranında azaldığı ve %15 katkı oranında tekrar arttığı görülmektedir. Boraks penta hidrat katkısında ise hacimsel özgül ağırlığın tüm katkı oranlarında referans değerden daha düşük olduğu görülmektedir. Sonuçta pişirilmiş taş tozu ikamesi ile kolemanit ve boraks deka hidrat katkılarının geopolimer harçlarda hacimsel özgül ağırlığa pozitif bir etki yapmaktadır.

Üretilen geopolimer harçlarda hacimsel özgül ağırlık değerlerinde %100 meta-kaolin bağlayıcılı geopolimer harçlara göre (100MK) pişirilmiş taş tozu atığı ikameli ve boraks penta hidrat katkılı geopolimer harçların hacimsel özgül ağırlıklarının düşük çıkmasının sebebinin malzemelerin birim hacim ağırlıkları ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Yine aynı şekilde kolemanit katkılı katkılı geopolimer harçların hacimsel ağırlıklarının düşük çıkmasının sebebinin malzemelerin birim hacim ağırlıkları ile ilgili olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 5.14. Geopolimer harç numunelerinin hacimsel özgül ağırlıkları (gr/cm³)

Deney kodu	A (gr)	B (gr)	C (gr)	Hacimsel özgül ağırlık (A/B-C)
100MK	504,83	561,17	288,67	1,853
90MK10PTTA	494,83	551,83	279,50	1,817
80MK20PTTA	497,33	555,67	278,83	1,796
70MK30PTTA	490,67	551,00	286,50	1,855
100MK5K	507,00	563,17	290,83	1,862
100MK10K	493,33	547,00	277,50	1,831
100MK15K	488,17	540,83	278,33	1,860
100MK5BPH	493,83	549,00	280,50	1,839
100MK10BPH	498,00	552,17	282,17	1,844
100MK15BPH	491,50	545,67	278,50	1,840

**Şekil 5.14.** Geopolimer harç numunelerinin hacimsel özgül ağırlıkları

5.2.7. Üretilen geopolimer harçların su muhtevası tayini sonuçları

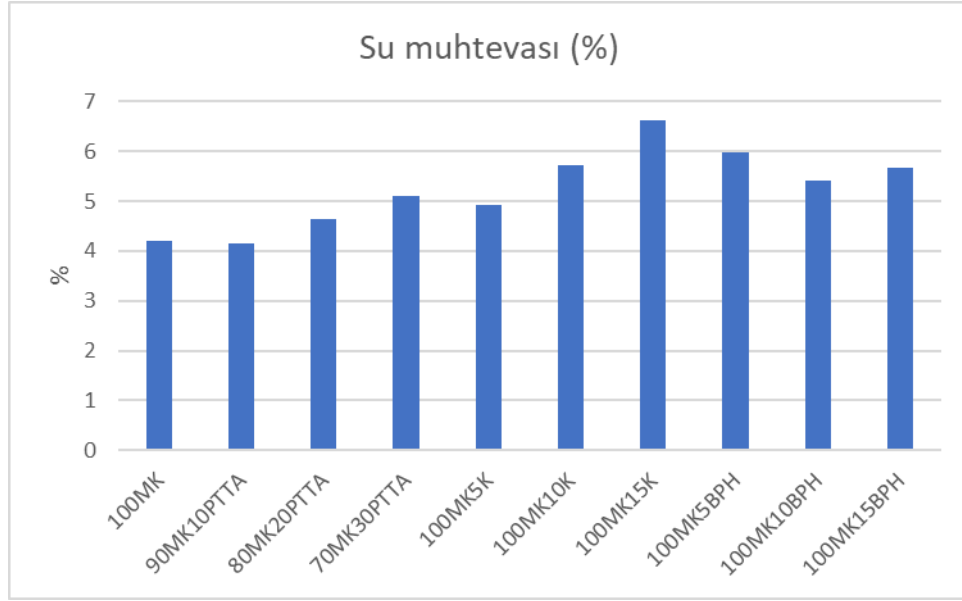
Çalışma kapsamında üretilen geopolimer harçlarda su muhtevası oranı değerleri Çizelge 5.15. ve Şekil 5.15. de verilmektedir. Su muhtevası oranının %4,16 ile %6,63 arasında olduğu görülmektedir. Su muhtevası en düşük geopolimer harç karışımlarının %10 pişirilmiş taş tozu atığı ikameli (90MK10PTTA) numuneler olduğu, en yüksek su muhtevasına sahip geopolimer harç karışımlarının ise %15 kolemanit katkılı (100MK15K) numuneler olduğu görülmektedir. %100 metakaolin bağlayıcılı (100MK) geopolimer harç numunelerini referans olarak aldığımızda, %10 pişirilmiş taş tozu ikameli (90MK10PTTA) numunelerde su muhtevası referans değere göre %1,19 azalmaktadır. %20 pişirilmiş taş tozu atığı ikameli (80MK20PTTA) numunelerde su muhtevası

referans değere göre %9,98 artmaktadır. %30 pişirilmiş taş tozu ikameli (70MK30PTTA) numunelerde su muhtevası referans değere %20,90 artmaktadır. Kolemanit katkılı geopolimer harçlarda su muhtevası değerleri referans değere göre sırasıyla %16,63, %36,10 ve %57,48 artmaktadır. %5 boraks penta hidrat katkılı (100MK5BPH) geopolimer harçlarda su muhtevası referans değere göre sırasıyla %41,80, %28,50 ve %34,44 artmaktadır. Sonuçta referans değere göre ikame ve katkı malzemelerin tamamında tüm oranlarda su muhtevası değerinin referans değerden yüksek olduğu görülmektedir. Sonuçta ikame ve katkı malzemesi olarak kullanılan pişirilmiş taş tozu ve bor minerallerinin su muhtevasında geopolimer harçlara pozitif bir etki yaptığı görülmüştür.

Üretilen geopolimer harçlarda su muhtevası değerlerinde %100 metakaolin bağlayıcılı geopolimer harçlara göre (100MK), özellikle bor minerallerinden kolemanit ve boraks penta hidrat katkılı geopolimer harçların su muhtevası değerlerinin yüksek çıkmasının nedeninin bor minerallerinin geopolimer harçlarda ortaya çıkardığı kompakt ve boşluksuz yapıdan dolayı olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 5.15. Geopolimer harç numunelerinin su muhtevası değerleri (%)

Deney kodu	A (gr)	D (gr)	Su muhtevası (%) (D-A)/Dx100
100MK	504,83	527,00	4,21
90MK10PTTA	494,83	516,33	4,16
80MK20PTTA	497,33	521,50	4,63
70MK30PTTA	490,67	517,00	5,09
100MK5K	507,00	533,17	4,91
100MK10K	493,33	523,33	5,73
100MK15K	488,17	522,83	6,63
100MK5BPH	493,83	525,17	5,97
100MK10BPH	498,00	526,50	5,41
100MK15BPH	491,50	521,00	5,66



Şekil 5.15. Geopolimer harç numunelerinin su muhtevası değerleri

5.2.8. Üretilen geopolimer harçların boşluk oranı tayini sonuçları

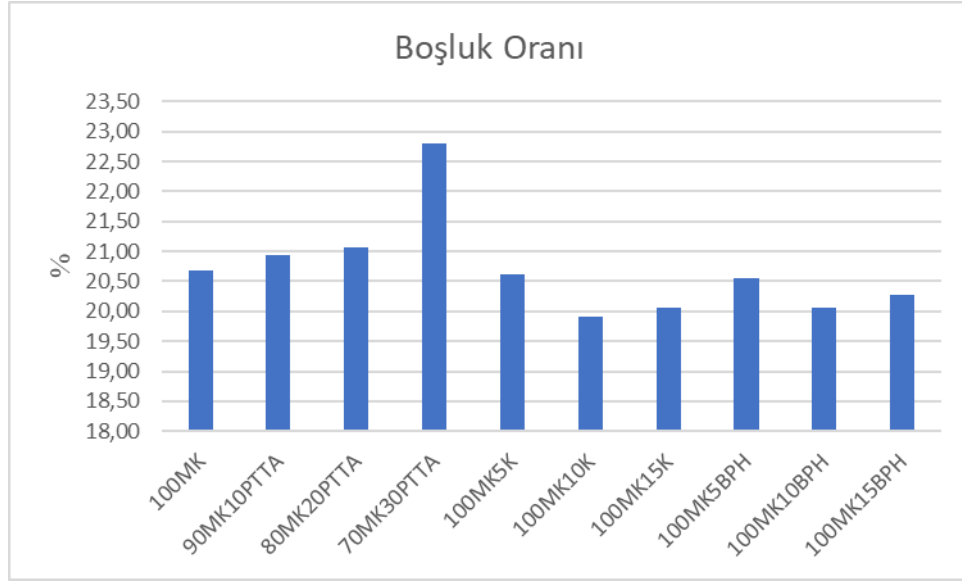
Çalışma kapsamında üretilen geopolimer harçlarda boşluk oranı değerleri Çizelge 5.16. ve Şekil 5.16. da verilmektedir. Boşluk oranının %19,91 ile %22,81 arasında olduğu görülmektedir. Boşluk oranı en düşük geopolimer harç numunelerinin %10 kolemanit katkılı (100MK10K) numuneler olduğu, boşluk oranı en yüksek geopolimer harç numunelerinin ise %30 pişirilmiş taş tozu atığı ikameli (70MK30PTTA) numuneler olduğu görülmektedir. %100 metakaolin bağlayıcılı (100MK) geopolimer harç numunelerini referans olarak aldığımızda, %10 pişirilmiş taş tozu ikameli (90MK10PTTA) geopolimer harçlarda boşluk oranı referans değere göre %1,21 artmaktadır. %20 pişirilmiş taş tozu atığı ikameli (80MK20PTTA) geopolimer harçlarda boşluk oranı referans değere göre %1,89 artmaktadır. %30 pişirilmiş taş tozu ikameli (70MK30P) geopolimer harçlarda boşluk oranı referans değere %10,30 artmaktadır. %5 kolemanit katkılı (100MK5K) geopolimer harçlarda boşluk oranı referans değere göre %0,29 artmaktadır. %10 kolemanit katkılı (100MK10K) geopolimer harçlarda boşluk oranı referans değere göre %3,72 azalmaktadır. %15 kolemanit katkılı (100MK15K) geopolimer harçlarda boşluk oranı referans değere göre %3 azalmaktadır. %5 boraks penta hidrat katkılı (100MK5BPH) geopolimer harçlarda boşluk oranı referans değere göre %0,63 azalmaktadır. %10 boraks penta hidrat katkılı (100MK10BPH) numunelerde boşluk oranı referans değere göre %3 azalmaktadır. %15 boraks penta hidrat katkılı (100MK15BPH) geopolimer harçlarda boşluk oranı referans değere göre %1,93 azal-

maktadır. Referans değere göre geopolimer harçlarda boşluk oranlarının pişirilmiş taş tozu ikamesinde ikame değerleri arttıkça boşluk oranı değerlerinin de arttığı görülmektedir. Buna karşın bor minerallerinde ise gerek kolemanit katkılı geopolimer harç numunelerinde gerekse boraks penta hidrat katkılı geopolimer harç numunelerinde katkı oranı arttıkça boşluk oranının azaldığı görülmektedir. Dolayısıyla metakaolin tabanlı geopolimer harçlarda pişirilmiş taş tozu atığının boşluk oranına negatif bir etki yaptığı görülmektedir. Buna karşın bor minerallerinin (kolemanit, boraks penta hidrat) boşluk oranına pozitif bir etki yaptığı görülmektedir.

Üretilen geopolimer harçlarda su muhtevası değerlerinde %100 metakaolin bağlayıcılı geopolimer harçlara göre (100MK), pişirilmiş taş tozu atığı ikameli geopolimer harçlarda boşluk oranının yüksek olmasının sebebinin, ana bağlayıcı niteliğindeki metakaolinin tane yapısının çok daha ince olması ve buna karşın tanecik yapısı daha büyük olan pişirilmiş taş tozu atığı ikamesi ile uyumlu olmaması ve sonucunda daha boşluklu bir yapının ortaya çıktığı düşünülmektedir. Bor minerallerinin ise tanecik yapısının daha ince olmasından dolayı, metakaolin ile daha uyumlu bir davranış gösterdiği ve boşluk oranının daha düşük olduğu düşünülmektedir. Burada bor minerallerinde kolemanitin boraks penta hidrata göre daha ince bir tane yapısına sahip olmasından dolayı daha uyumlu bir davranış gösterdiği ve daha düşük boşluk oranına sahip olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 5.16. Geopolimer harç numunelerinin boşluk oranları (%)

Deney kodu	A (gr)	B (gr)	C (gr)	Boşluk Oranı [(B-A/B-C)]X100
100MK	504,83	561,17	288,67	20,68
90MK10PTTA	494,83	551,83	279,50	20,93
80MK20PTTA	497,33	555,67	278,83	21,07
70MK30PTTA	490,67	551,00	286,50	22,81
100MK5K	507,00	563,17	290,83	20,62
100MK10K	493,33	547,00	277,50	19,91
100MK15K	488,17	540,83	278,33	20,06
100MK5BPH	493,83	549,00	280,50	20,55
100MK10BPH	498,00	552,17	282,17	20,06
100MK15BPH	491,50	545,67	278,50	20,28



Şekil 5.16. Geopolimer harç numunelerinin boşluk oranları

5.2.9. Üretilen geopolimer harçların ağırlıkça su emme oranlarının tayini sonuçları

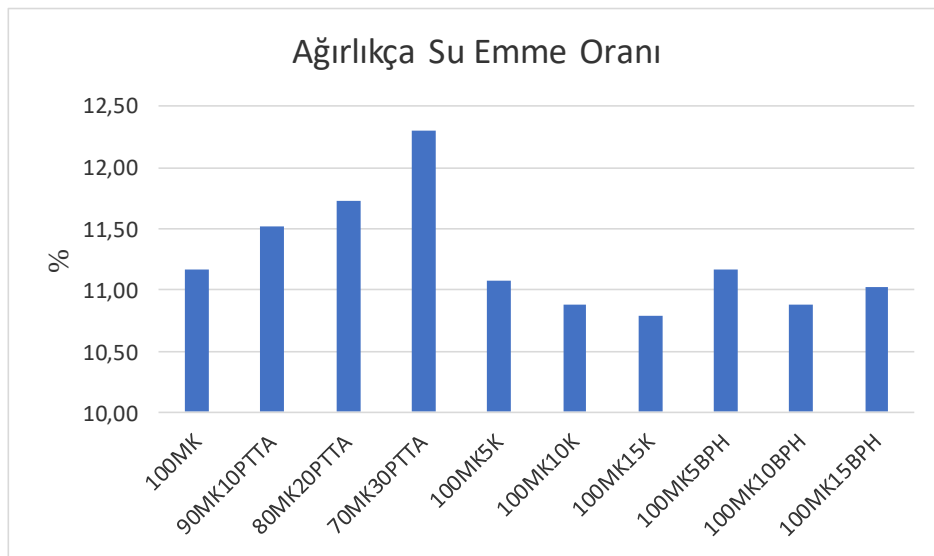
Çalışma kapsamında üretilen geopolimer harçlarda ağırlıkça su emme oranları Çizelge 5.17. ve Şekil 5.17. de verilmektedir. Ağırlıkça su emme oranlarının %10,79 ile %12,30 arasında olduğu görülmektedir. Ağırlıkça su emme oranının en düşük olduğu karışımın %15 kolemanit katkılı (100MK15K) geopolimer harç karışımı olduğu, ağırlıkça su emme oranı en yüksek olan karışımın ise %30 pişirilmiş taş tozu atığı ikameli (70MK30PTTA) geopolimer harç karışımı olduğu görülmektedir. %100 metakaolin bağlayıcılı (100MK) geopolimer harç numunelerini referans olarak aldığımızda, pişirilmiş taş tozu atığı ikameli geopolimer harçlarda ağırlıkça su emme oranı referans değere göre sırasıyla %3,23, %5,11 ve %10,21 artmaktadır. Kolemanit katkılı geopolimer harçlarda ağırlıkça su emme oranı referans değere göre sırasıyla %0,72, %2,51 ve %3,31 azalmaktadır. %5 boraks penta hidrat katkılı (100MK5BPH) geopolimer harçlarda ağırlıkça su emme oranı referans değere göre aynı kalmaktadır. %10 boraks penta hidrat katkılı (100MK10BPH) numunelerde ağırlıkça su emme oranı referans değere göre %2,51 azalmaktadır. %15 boraks penta hidrat katkılı (100MK15BPH) geopolimer harçlarda ağırlıkça su emme oranı referans değere göre %1,25 azalmaktadır. Referans değere göre ağırlıkça su emme oranlarının pişirilmiş taş tozu ikamesinde ikame oranları arttıkça arttığı görülmektedir. Buna karşın bor minerallerinde ise gerek kolemanit katkılı geopolimer harç numunelerinde gerekse boraks penta hidrat katkılı geopolimer harç numunelerinde katkı oranı arttıkça ağırlıkça su emme oranının azaldığı görülmektedir.

Dolayısıyla metakaolin tabanlı geopolimer harçlarda pişirilmiş taş tozu atığının ağırlıkça su emme anlamında negatif bir etki görülmektedir. Buna karşın bor minerallerinin (kolemanit, boraks penta hidrat) ağırlıkça su emme oranına pozitif bir etki yaptığı görülmektedir.

Üretilen geopolimer harçlarda ağırlıkça su emme oranı değerlerinde %100 metakaolin bağlayıcılı geopolimer harçlara göre (100MK), pişirilmiş taş tozu atığı ikamesinde, pişirilmiş taş tozu atığının daha kabalı taneciklere sahip olmasından dolayı, geopolimer harçlarda boşluk oranının fazla olması ve ağırlıkça su emme oranının fazla olması sonucunu getirdiği düşünülmektedir. Bor minerallerinde ise kolemanit ve boraks penta hidrat katkısında tanecik yapısının daha ince olması ve boşlukları daha iyi doldurmasından dolayı ağırlıkça su emme oranının düşük olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 5.17. Geopolimer harç numunelerinin ağırlıkça su emme oranı (%)

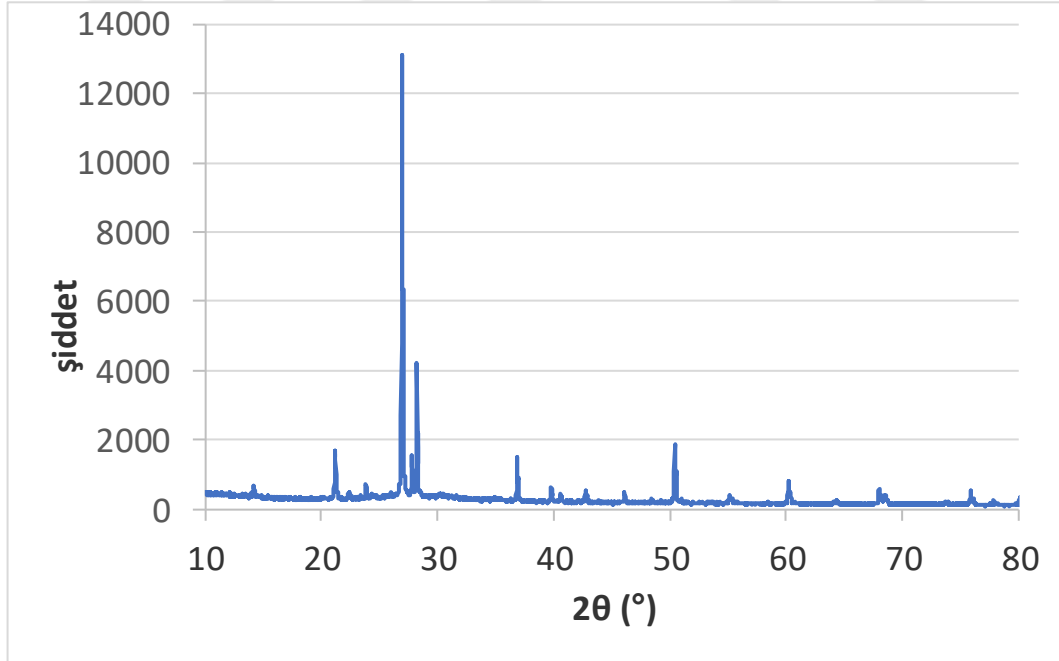
Deney kodu	A (gr)	B (gr)	Ağırlıkça su emme oranı $[(B-A)/(A)] \times 100$
100MK	504,83	561,17	11,16
90MK10PTTA	494,83	551,83	11,52
80MK20PTTA	497,33	555,67	11,73
70MK30PTTA	490,67	551,00	12,30
100MK5K	507,00	563,17	11,08
100MK10K	493,33	547,00	10,88
100MK15K	488,17	540,83	10,79
100MK5BPH	493,83	549,00	11,17
100MK10BPH	498,00	552,17	10,88
100MK15BPH	491,50	545,67	11,02



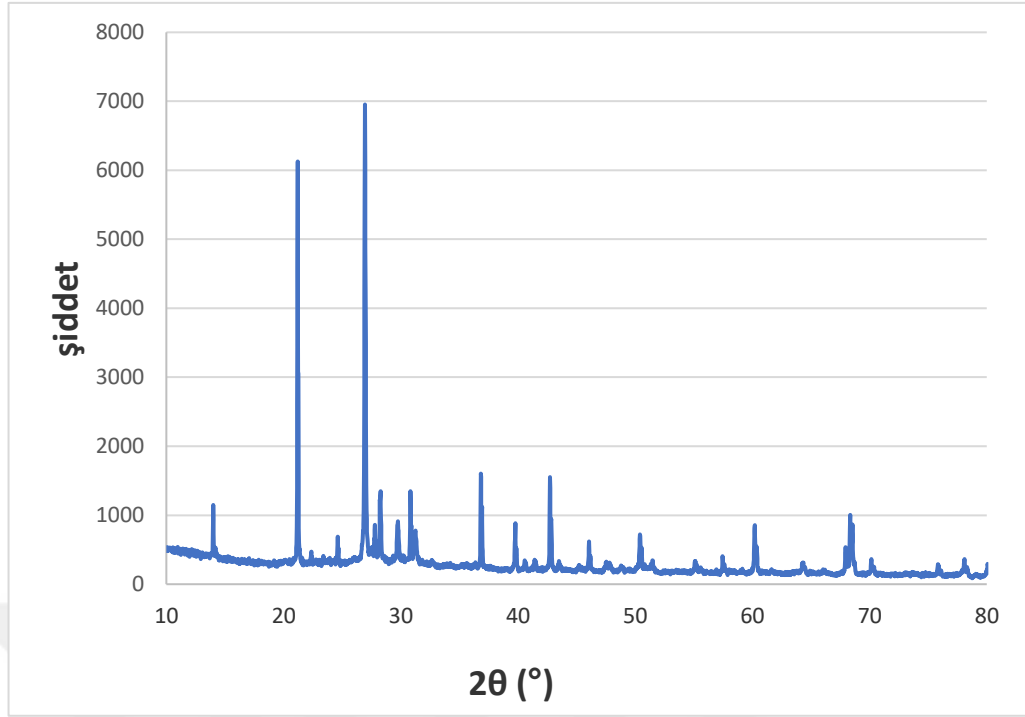
Şekil 5.17. Geopolimer harç numunelerinin ağırlıkça su emme oranı

5.2.10. XRD analiz sonuçları

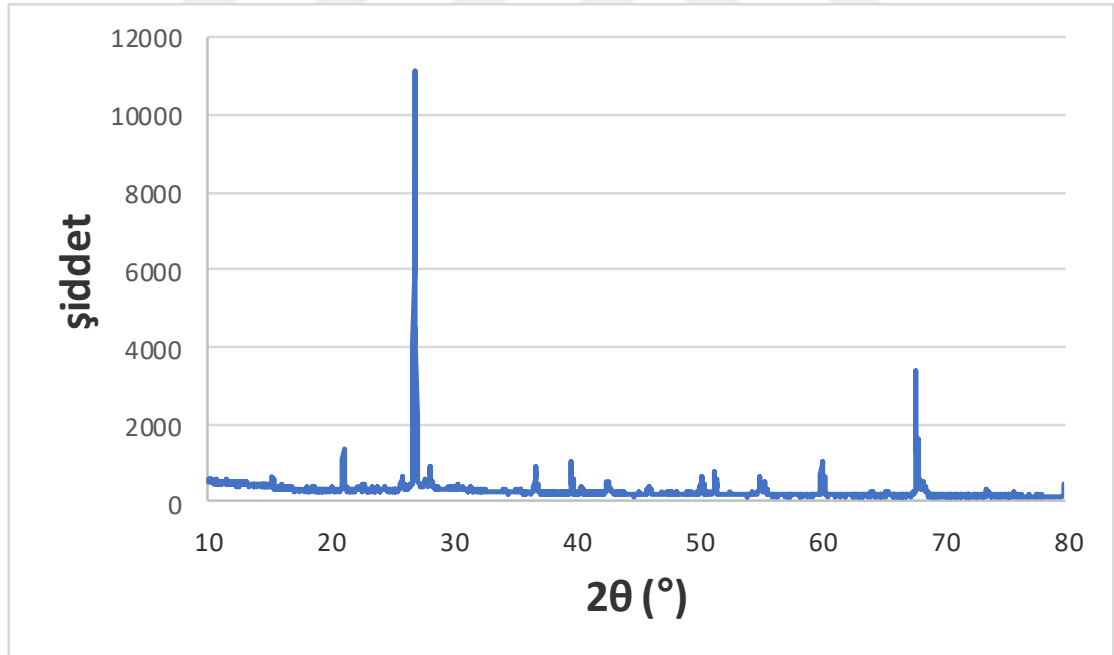
Üretilen geopolimer harç numunelerinden %100 metakaolin bağlayıcılı (100MK) geopolimer harçlardan seçilen numuneler toz haline getirilip çekilen XRD'si Şekil 5.18. de verilmiştir. Aynı şekilde %30 pişirilmiş taş tozu ikameli (70MK30PTTA) geopolimer harçlardan seçilen numuneler toz haline getirilip çekilen XRD'si Şekil 5.19. da verilmiştir. Katkı malzemelerinden ise %15 kolemanit katkısı kullanılarak (100MK15K) üretilen geopolimer harçlardan seçilen numuneler toz haline getirilip çekilen XRD'si Şekil 5.20. de verilmiştir. Son olarak %15 boraks penta hidrat kullanılarak (100MK15BPH) üretilen geopolimer harçlardan seçilen numuneler toz haline getirilip çekilen XRD'si Şekil 5.21. de verilmiştir. Deney kapsamında ana bağlayıcılı, ikame malzemeli ve katkı malzemeli numuneler arasından seçilen ve EDS spektroskopileri çekilen, %100 metakaolin bağlayıcılı (100MK), %30 pişirilmiş taş tozu ikameli (70MK30PTTA), %15 kolemanit katkılı (100MK15K) ve %15 boraks penta hidrat katkılı (100MK15BPH) geopolimer harçlarda yine aynı deney kodlarında çekilen XRD grafiklerine bakıldığında benzer sonuçların çıktığı görülmektedir.



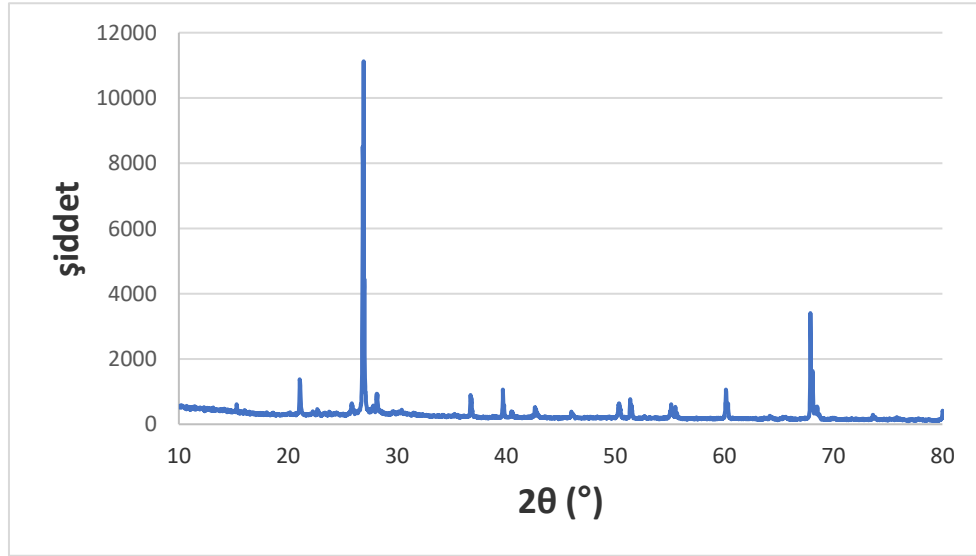
Şekil 5.18. %100 MK bağlayıcılı geopolimer harçların XRD kırınım deseni



Şekil 5.19. %30 PTTA ikameli geopolimer harçların XRD kırınım deseni



Şekil 5.20. %15 K katkılı geopolimer harçların XRD kırınım deseni



Şekil 5.21. %15 BPH katkılı geopolimer harçların XRD kırınım deseni

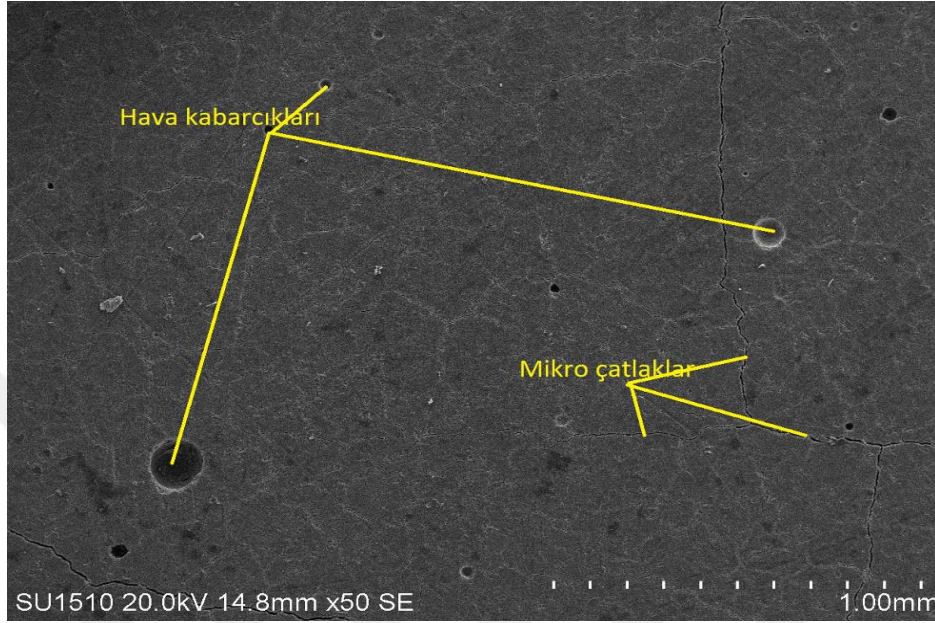
5.2.11. SEM analiz sonuçları

Bu bölümde tez çalışması kapsamında üretilen geopolimer harçların içerisinde seçilenlerin mikroyapısının incelenmesi için yapılanlar anlatılmıştır. Bu kapsamda öncelikle referans karışım niteliğinde %100 metakaolin bağlayıcısı (100MK) ile üretilen geopolimer harç numunelerinin SEM görüntüleri alınmış ve beraberinde EDS grafikleri oluşturulmuştur. Bunun dışında ikame malzemesi %30 oranında pişirilmiş taş tozu kullanılarak üretilen (70MK30PTTA) geopolimer harçların, katkı malzemesi olarak %15 kolemanit (100MK15K) ve %15 boraks penta hidrat (100MK15BPH) kullanılarak üretilen geopolimer harçların referans numunelere göre ortaya çıkarabileceği potansiyel bir karakterizasyonu belirlemek ve geopolimer matris ile ikame ve katkı malzemelerin arasındaki arayüz bağının derecesini gözlemlemek amacıyla taramalı elektron mikroskobu kullanılarak (SEM) analizi gerçekleştirilmiş ve beraberinde EDS grafikleri oluşturulmuştur. Şekil 5.22. (a) ve (b) ve Şekil 5.23. (a) ve (b)'de gösterildiği gibi %100 metakaolin içeren (100MK) kontrol numunesi, Şekil 5.24. (a) ve (b) de %30 pişirilmiş taş tozu atığı ikameli (70MK30PTTA) numune, Şekil 5.25. (a) ve (b) de %15 kolemanit katkılı (100MK15K) numune ve Şekil 5.26. (a) ve (b)'de %15 boraks penta hidrat katkılı (100MK15BPH) numunelerin SEM mikrografları alınmış ve ilgili EDS spektroskopileri Şekil 5.27 ve Şekil 5.28. de gösterilmiştir. Şekil 5.22. (a) da kontrol numunesinin ilk mikrografı incelendiğinde 50 kez büyültülmüş haliyle nispeten az boşluklu bir yapı ve hava kabarcıklarını görmekteyiz, Şekil 5.22. (b) de ikinci mikrograf incelendiğinde ise

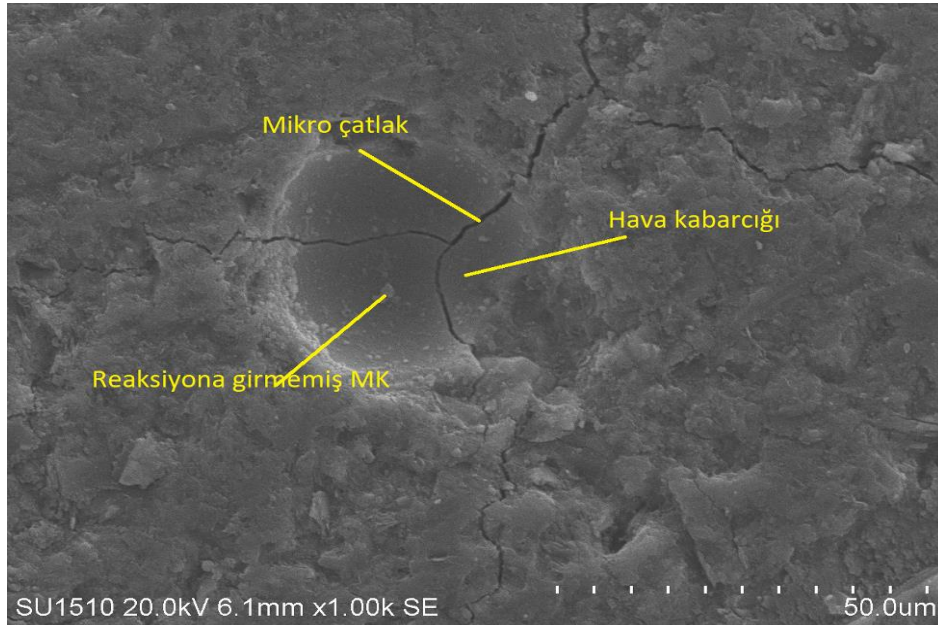
mikro çatlaklar, hava kabarcığı ve reaksiyona girmemiş metakaolin parçacıkları görülmektedir. Şekil 5.23. (a) da üçüncü mikrograf incelendiğinde iyi bir homojenlik derecesine sahip bir yapı ve geopolimer jeli açıkça görülmektedir. Sahip olunan yoğun silis bölgesi, kuartzın varlığına işaret etmektedir. Silis yönünden zengin bölge ile beraber elde edilen bulgu, aynı numune için yapılan XRD grafiği ile birbirini tamamlar niteliktedir. Şekil 5.23. (b) de dördüncü mikrograf incelendiğinde geopolimer matrisi belirgin şekilde görülmektedir. Şekil 5.24. (a) da beşinci mikrografta ilk mikrografa oranla çok daha boşluklu ve gözenekli bir yapı karşımıza çıkmaktadır. Boşluklu yapının fazlalığının karışım içinde %30 oranında ikame malzemesi olarak kullanılan pişirilmiş taş tozundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca buradaki mikro çatlakların ilk mikrografa oranla daha belirgin olduğu görülmektedir. Şekil 5.24. (b) de altıncı mikrografta incelendiğinde, yine hava kabarcıkları ve gözenekler ile bunların içerisindeki mikro çatlaklar ve reaksiyona girmemiş metakaolin ve pişirilmiş taş tozu parçacıkları görülmektedir. Çatlakların yayılma yönlerinin hava kabarcıkları ve gözenekleri takip ettiği görülmektedir (Kouamo ve ark., 2016). Şekil 5.25. (a) da yedinci mikrograf incelendiğinde ilk 6 mikrografa oranla çok daha az bir boşluk yapısı gözümüze çarpmakta olup, bunun sebebinin karışım içerisindeki %15 katkı oranındaki kolemanit minerali olduğu düşünülmektedir. Şekil 5.25. (b) de sekizinci mikrograf incelendiğinde hava kabarcığı ve reaksiyona girmemiş metakaolin ve kolemanit parçacıkları görülmektedir. Şekil 5.26. (a) da 9.mikrograf incelendiğinde ilk sekiz mikrografa göre hava kabarcıklarının ve mikro çatlakların önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. Bu sonucun karışım içerisinde %15 oranında katkı halinde bulunan boraks penta hidrattan kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 5.26. (b) deki 10. mikrografta ise hava kabarcığının içerisinde mikro çatlağın son derece sınırlı olduğu görülmektedir. Ayrıca, yine reaksiyona girmemiş metakaolin ve boraks penta hidrat parçacıkları da görülmektedir.

Ana bağlayıcı malzeme olarak metakaolin kullanılarak üretilen geopolimer harç numunelerinin mikro yapısal düzeyde incelenmesi sonucunda harcın karakterizasyonun genel olarak iyi olduğu ve iyi bir geopolimerizasyon bağı oluşturduğu görülmektedir. Geopolimer matrisin kompaktlığının harca katkı malzemesi niteliğinde ilave edilen bor minerallerinden özellikle de kolemanit mineralinden kaynaklandığı ve kolemanitin geopolimerik sistem içinde uyumlu bir davranış sergilediği görülmektedir. Pişirilmiş taş tozu atığı ile ikame edilen, bunun yanında kolemanit ve boraks penta hidrat minerallerinin katkı malzemesi olarak kullanıldığı geopolimer harç numunelerine ait farklı oranlarda büyütmedeki SEM görüntüleri incelendiğinde numunelerin hemen hemen tama-

mında küresel şekilli homojen dağılımlı gözeneklerin olduğu ve bu gözeneklerle birlikte ağ şeklinde dağılım gösteren mikro çatlakların ortaya çıktığı görülmektedir. Bu boşluk ve çatlakların geopolimerizasyon reaksiyonunun hızlı bir şekilde gerçekleşmesinden kaynaklı ani hava çıkışlarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

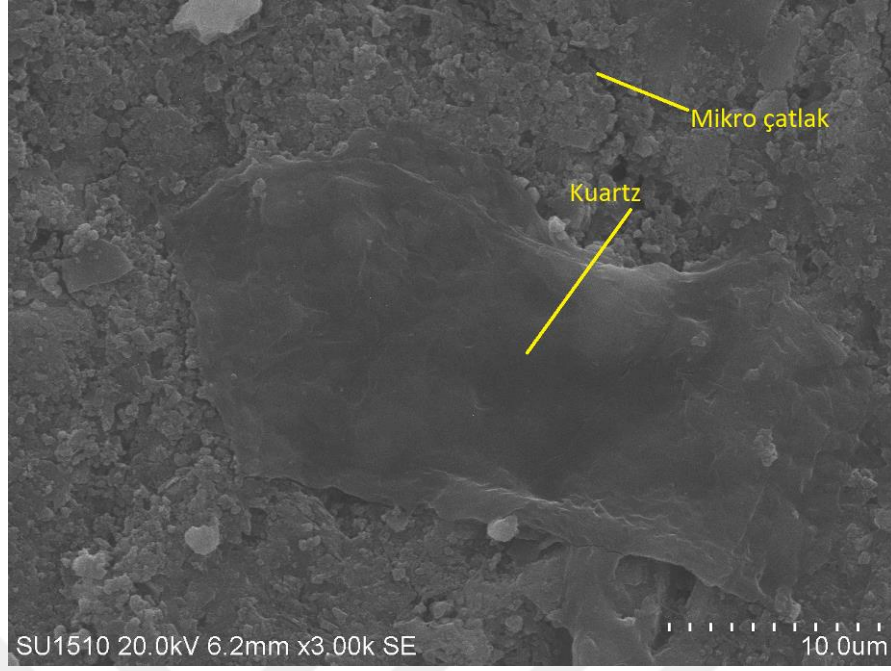


(a) 50 kez büyütülmüş

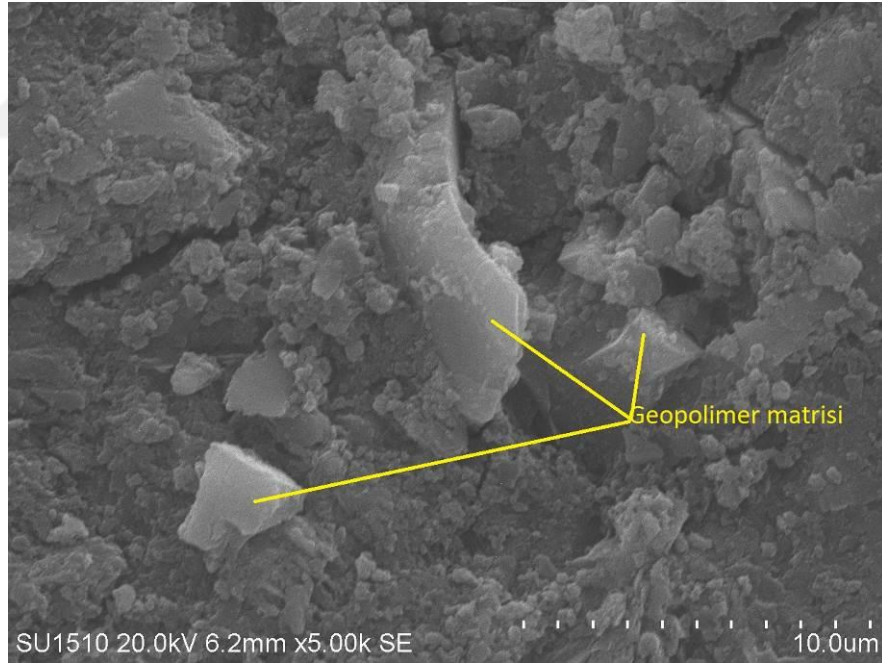


(b) 1000 kez büyütülmüş

Şekil 5.22. 100MK ile üretilen numuneler için SEM görüntüleri kontrol **a)** 50 kez büyütülmüş **b)** 1000 kez büyütülmüş

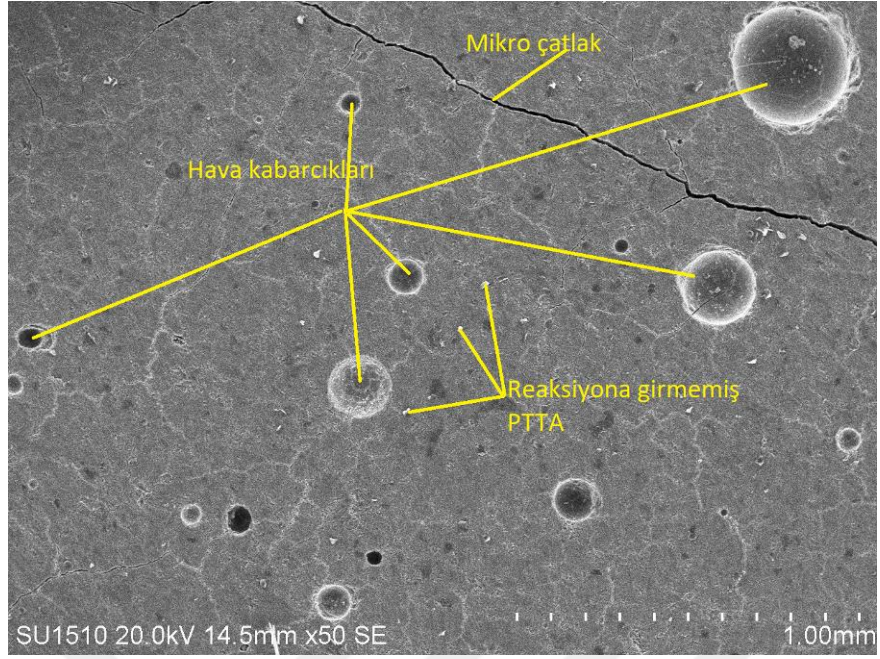


(a) 3000 kez büyütülmüş

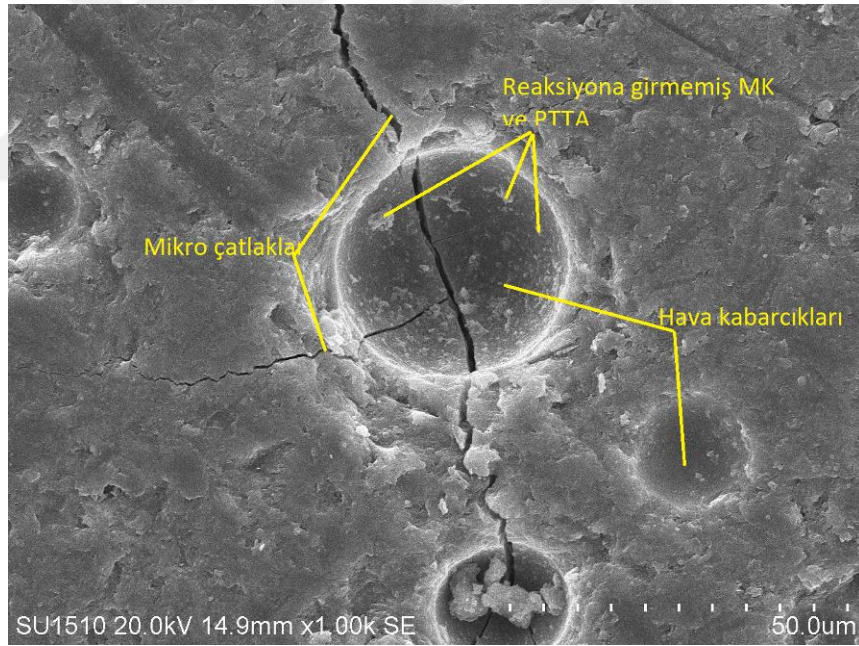


(b) 5000 kez büyütülmüş

Şekil 5.23. 100MK ile üretilen numuneler için SEM görüntüleri kontrol **a)** 3000 kez büyütülmüş **b)** 5000 kez büyütülmüş

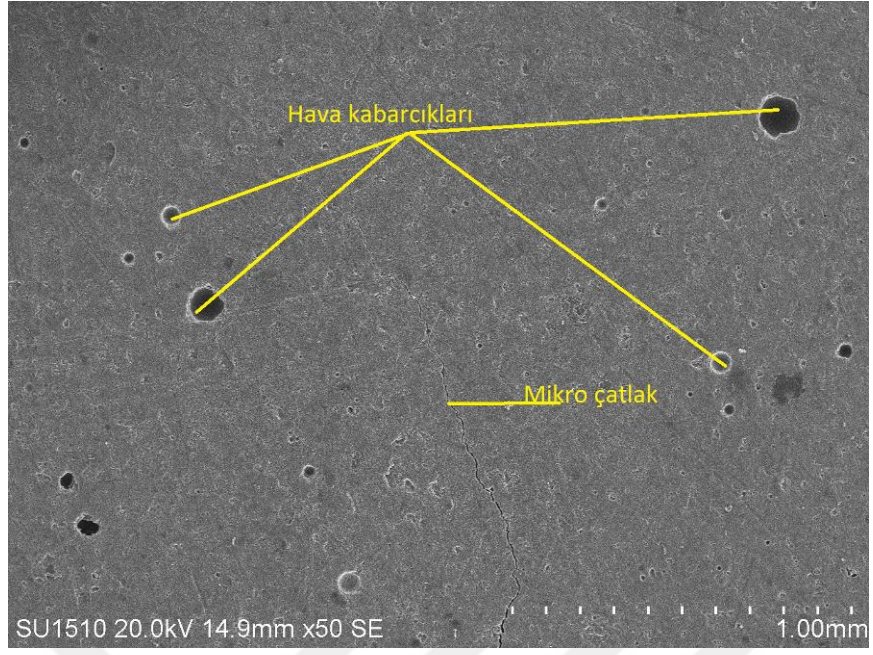


(a) 50 kez büyütülmüş

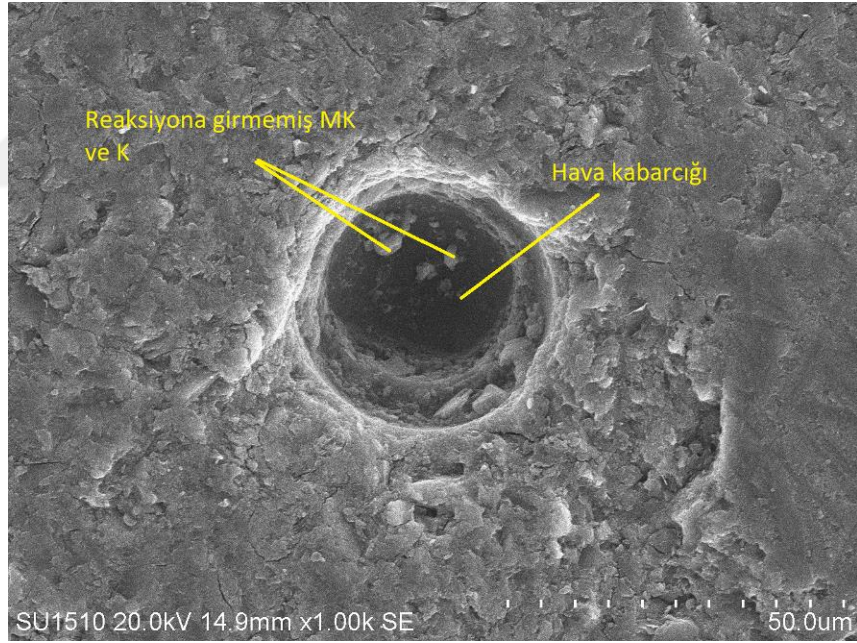


(b) 1000 kez büyütülmüş

Şekil 5.24. 30 PTTA İkame ile üretilen numuneler için SEM görüntüleri **a)** 50 kez büyütülmüş **b)** 1000 kez büyütülmüş

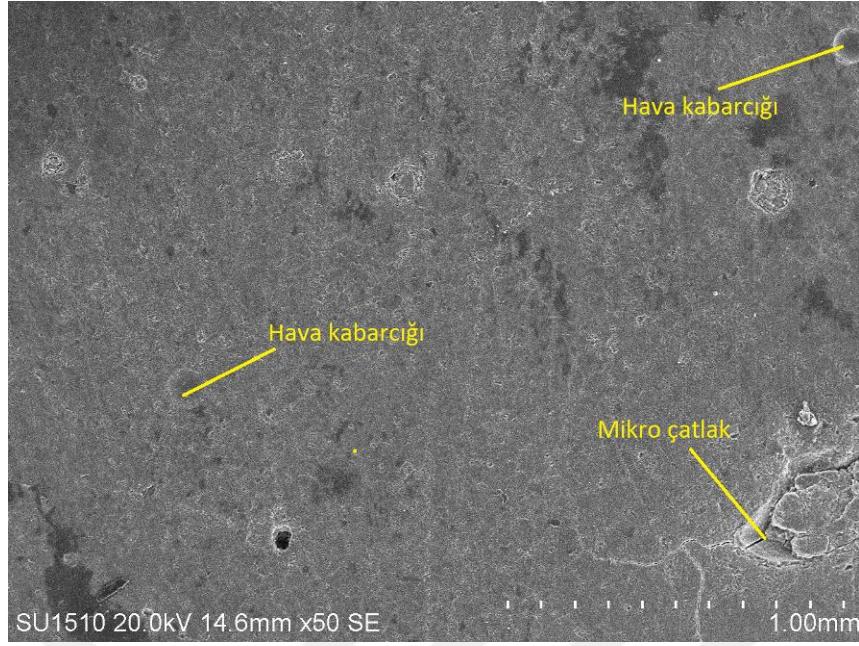


(a) 50 kez büyütülmüş

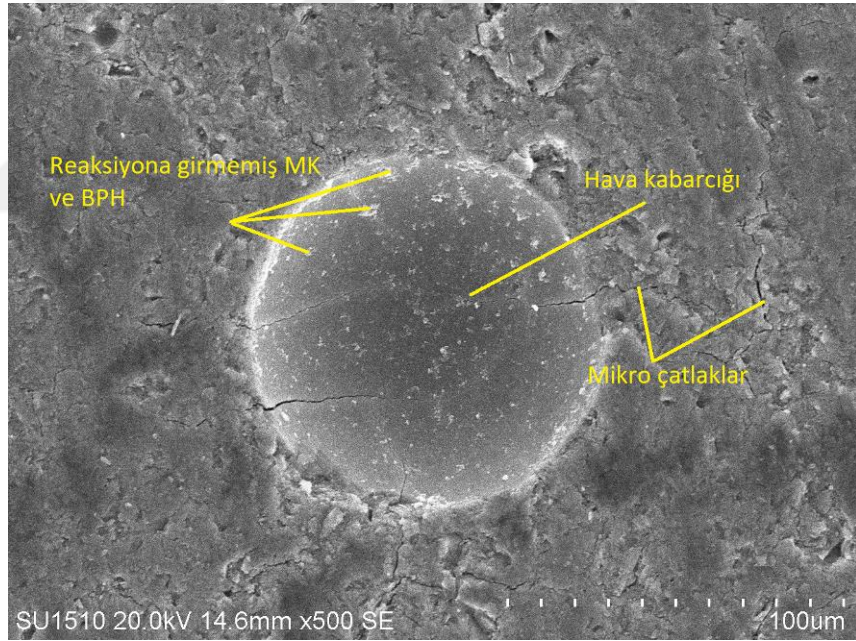


(b) 1000 kez büyütülmüş

Şekil 5.25. 15 K katkısı ile üretilen numuneler için SEM görüntüleri **a)** 50 kez büyütülmüş **b)** 1000 kez büyütülmüş

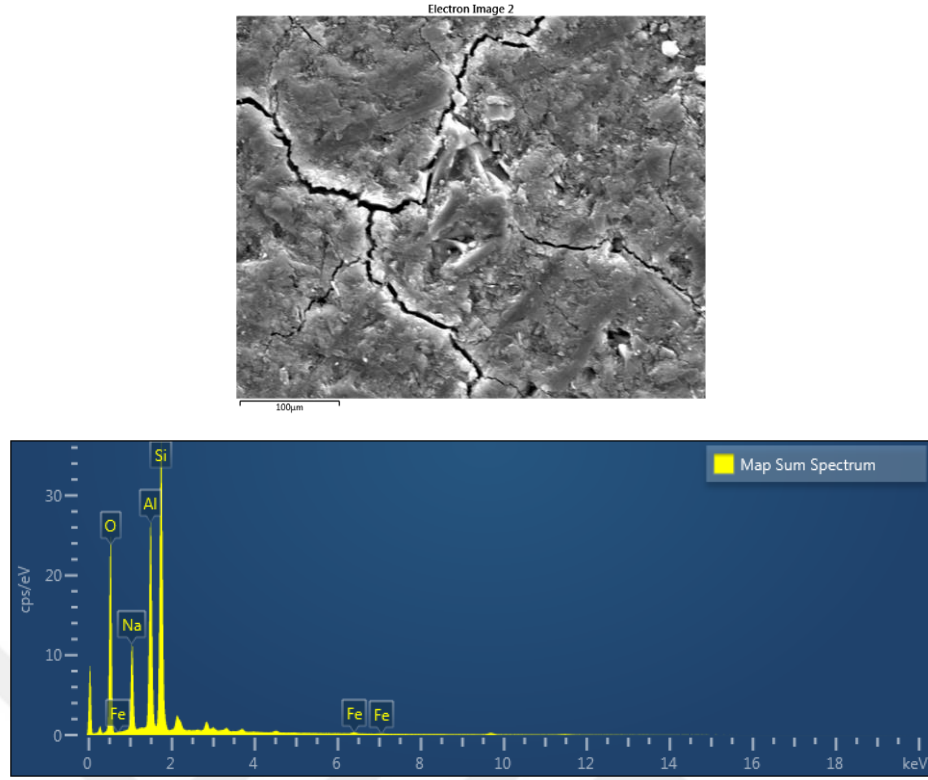


(a) 50 kez büyütülmüş



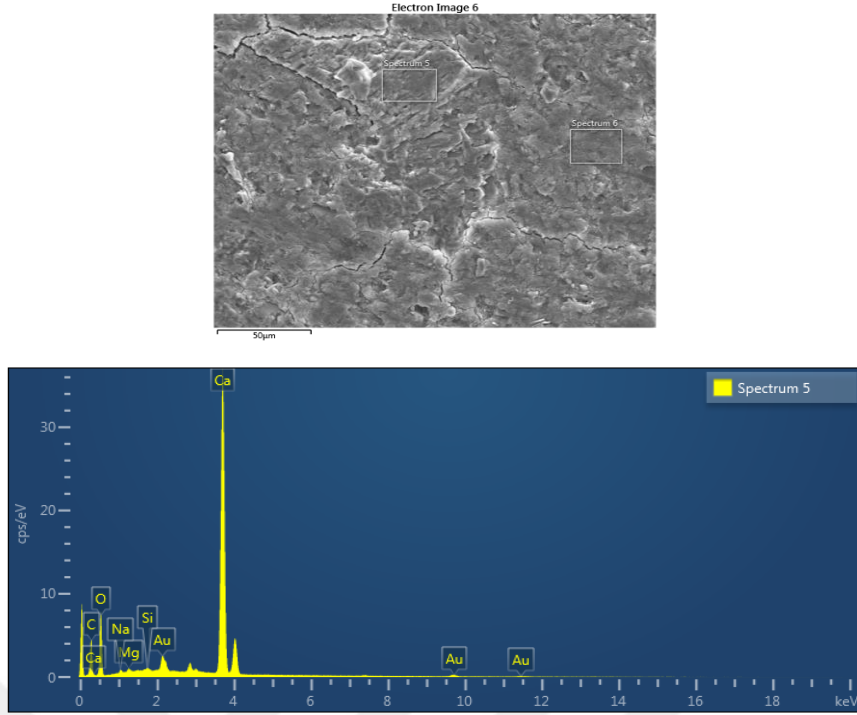
(b) 500 kez büyütülmüş

Şekil 5.26. 15 BPH katkısı ile üretilen numuneler için SEM görüntüleri **a)** 50 kez büyütülmüş **b)** 500 kez büyütülmüş



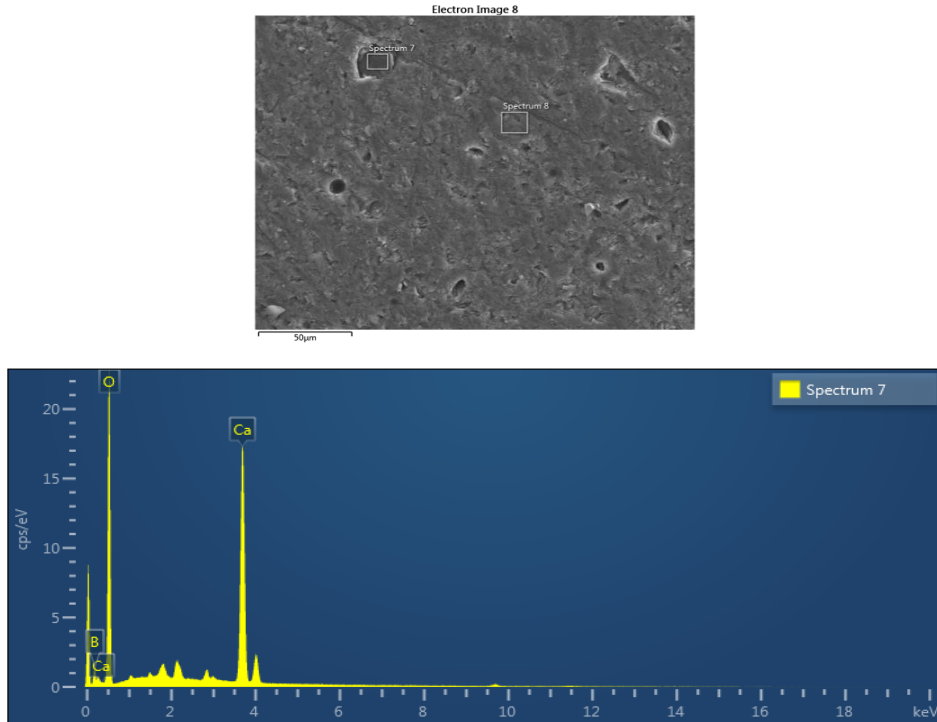
Şekil 5.27. Kontrol numunesinin (100MK) EDS spektroskopisi

Şekil 5.27. de %100 metakaolin bağlayıcılı (100MK) geopolimer harç numunelerinin EDS spektroskopisinde metakaolinin kimyasal bileşimindeki yoğun Si ve Al görülmektedir. Bunun dışında geopolimer harç oluşumundaki alkali aktivatörler sodyum hidroksit ve sodyum silikattan dolayı grafikte Na görünmektedir. Bunların dışında yine Fe ve O varlığı görülmektedir.



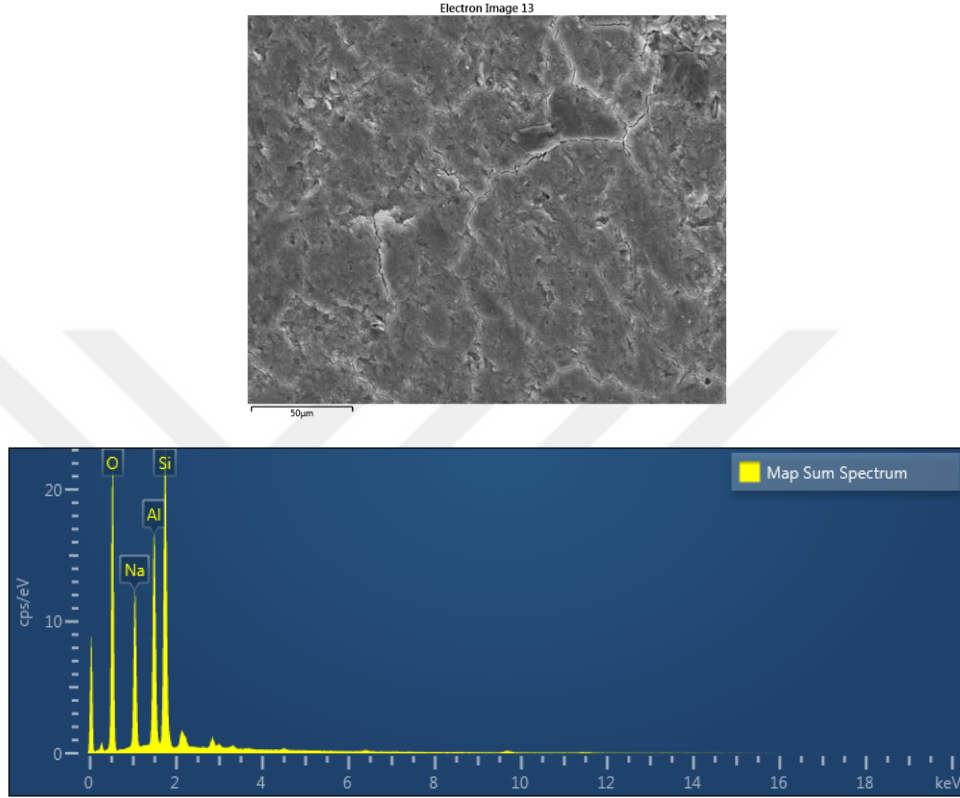
Şekil 5.28. 30 PTTA İkame (70MK30PTTA) EDS spektroskopisi

Şekil 5.28. de %30 pişirilmiş taş tozu ikameli (70MK30PTTA) geopolimer harç numunelerinin EDS spektroskopisinde pişirilmiş taş tozu atığının kimyasal bileşiminde ki Ca'un pik yaptığı görülmekte ve buda bize pişirilmiş taş tozu atığını vermektedir.



Şekil 5.29. 15 K Katkı (100MK15K) EDS spektroskopisi

Şekil 5.29. da %15 kolemanit katkılı (100MK15K) geopolimer harç numunelerinin EDS spektroskopisinde kolemanitin kimyasal bileşimindeki Ca'un ortaya çıktığı görülmektedir. Bunun dışında B (boron)'un grafikteki ortaya çıkması bize kolemanit varlığını göstermektedir.



Şekil 5.30. 15 BPH Katkı (100MK15BPH) EDS spektroskopisi

Şekil 5.30. da %15 boraks penta hidrat katkılı (100MK15BPH) geopolimer harç numunelerinin EDS spektroskopisinde boraks penta hidratın kimyasal bileşiminde olmayan Ca'un EDS spektroskopide çıkmadığı görülmektedir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Genel Bilgi

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında yapılan farklı deneylerin sonuçları çıkarılmakta ve bu sonuçlara göre gelecekte olabilecek çalışmalar için bazı öneriler verilmektedir. Bu çalışmanın temel amacı, dünya çapında çok önemli bir malzeme olan beton ve harçların üretiminde hidrolik bağlayıcı niteliğindeki çimento ile üretilen betonlara alternatif olmak üzere çimentonun yerini alabilecek yüksek puzolanik karakteristikte bağlayıcı malzeme ve bu malzemenin yerine ikame ve katkı malzemeleri kullanarak geleneksel beton ve harçlara güçlü bir alternatif olmak üzere geopolimer kompozit sentezlemektir. Bu çalışmada, geopolimer üretiminde ana bağlayıcı malzeme olarak metakaolin kullanılmıştır. Ayrıca, metakaolin tabanlı geopolimer üretiminde ikame malzemesi konumunda olmak üzere pişirilmiş taş tozu atığı kullanılmıştır. Bununla beraber metakaoline katkı malzemesi anlamında ülkemizin en önemli zenginliklerinden biri olan bor minerallerinden kolemanit ve boraks penta hidrat kullanılmıştır. Tez kapsamında yapılan ön deneysel araştırmalar ile amaçlanan, üretilecek geopolimer harçlarda ikame ve katkı anlamında optimum değerleri bulabilmek ve üretim süreci ile ilgili ortaya çıkabilecek problemleri önleyebilmek adına uygun bir sistematik belirleyebilmektir. Temel olarak deneysel çalışma sırasında teknik problemlerin birçoğu çözülmüş ve doğru sistematik oturtulmuştur.

6.2. Sonuçlar

Bu çalışmada, metakaolin tabanlı geopolimer kompozitlere atık malzeme niteliğindeki pişirilmiş taş tozu atığının farklı oranlarda ikame malzemesi olarak eklenebilme ihtimalini değerlendirmek, ayrıca ülkemiz için son derece önemli bir yere sahip olan bor minerallerinden kolemanit ve boraks penta hidrat minerallerinin metakaoline farklı oranlarda katkı olarak eklenmesinin geopolimer harçların fiziksel ve mekanik özellikleri (7., 28. ve 90. günde eğilme ve basınç dayanımları) üzerindeki etkisini incelemek için bir araştırma yapılmıştır.

1- Araştırma sonuçlarına göre ana bağlayıcı olarak metakolin kullanılarak üretilen geopolimer harçlarda metakaolinin işlenebilme özelliğini kısıtladığı, yayılma değerini düşürdüğü, prize başlama ve bitirme süresini kısalttığı görülmüştür. Buna karşın

metakaolinin mekanik özellikler için çok iyi bir bağlayıcı olduğu ve ana bağlayıcı olarak kullanıldığı geopolimer harçların 7, 28 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanımlarını oldukça yükselttiği ve geopolimer harçlarda en önemli ana bağlayıcı olduğu görülmektedir. Bu çalışmada ana bağlayıcı olarak metakaolinin kullanıldığı geopolimer harç karışımlarında literatür çalışmalarından 7 günlük eğilme dayanımında %35, 28 günlük eğilme dayanımında %37 daha yüksek dayanım değerleri elde edilmiştir (Aygörmez, 2018). Yine 7 günlük basınç dayanımında %16,75, 28 günlük basınç dayanımında ise %11,35 oranında daha yüksek dayanım değerleri elde edilmiştir (Aygörmez, 2018). %100 metakaolin bağlayıcılı (100MK) geopolimer harçlarda, literatür çalışmalarına göre yüksek dayanım değerlerinin elde edilmesinin metakaolinin Si/Al oranından ve alkali aktivatörlerden sodyum silikatın $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ modül oranının 3 olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

2- Metakolinin yerine ikame malzemesi olarak kullanılan pişirilmiş taş tozu atığının ise işlenebilmeyi ve priz süresini önemli oranda arttırarak metakaolinin negatif etkisini ortadan kaldırdığı ve daha işlenebilir harçların üretimine olanak sağladığı görülmektedir. Mekanik özellikler anlamında ise pişirilmiş taş tozu atığının ikame edilerek kullanıldığı harç karışımlarında ana bağlayıcı metakaolinle elde edilen değerlere oldukça yakın dayanım değerleri elde edildiği görülmektedir. Sonuçta hem fiziksel özellikler hem de mekanik özellikler birlikte değerlendirildiğinde metakaolinin yerine %20 oranında pişirilmiş taş tozu atığının kullanılmasının uygun olduğu görülmektedir.

3- Pişirilmiş taş tozu atığı üretiminde önemli rol oynayan asfalt plantlerinde kaplama içerisinde gerekli aderansın sağlanması için doğal proses gereği sıcaklık fırınlarına sokulup kurutulan farklı gradasyonlardaki agregaların üzerlerindeki tozun bertaraf edilerek sahaya deposu düşünüldüğünde, günlük atık miktarı ortalama 30 ton olmaktadır. Karayollarında yol kaplaması için uygun zaman dilimi düşünüldüğünde, asfalt şantiyelerinin 9 ay açık kalmasını düşünerek yıllık üretimin bir asfalt plenti için 8000 ton olduğunu söylemek mümkündür. Ülkemiz genelinde yaklaşık 500 asfalt fabrikası olduğu düşünüldüğünde, pişirilmiş taş tozu atığının yıllık ortalama 4 milyon ton üretim kapasitesine sahip olduğu görülmektedir. Çalışma kapsamında en uygun pişirilmiş taş tozu atığı ikame oranının %20 olduğu görülmektedir. Dolayısıyla pişirilmiş taş tozunun bir atık malzeme olmasından kaynaklı, nakliye bedelleri de düşünülerek pişirilmiş taş tozu atığı ikamesi kullanılarak üretilen geopolimer harçlarda metakaolin bağlayıcılı geopolimer harçlara göre yaklaşık %20 oranında bir ekonomi sağlanacaktır.

4- Matakaolinle beraber kolemanit ve boraks penta hidrat minerallerinin katkı malzemesi olarak kullanılmasıyla beraber yine geopolimer harcın fiziksel özelliklerinde önemli oranda bir iyileşme görülmekte ve priz başlangıç ve bitiş süreleri uzamakta, görünen özgül ağırlık ile hacimsel özgül ağırlık azalmakta, su muhtevası değerleri artmakta, boşluk oranı ve ağırlıkça su emme oranları yine azalmaktadır. Mekanik dayanımlara bakıldığında bor minerallerinde kolemanit mineralinin daha iyi bir performans gösterdiği görülmektedir. Sonuçta fiziksel ve mekanik özellikler bir arada düşünüldüğünde geopolimer harçlarda bor minerallerinde kolemanit mineralinin %10 oranında, boraks penta hidrat mineralinin ise %5 oranında katkı malzemesi olarak kullanılmasının uygun olduğu görülmektedir.

5- Üretilen geopolimer harçların mekanik özelliklerine bakıldığında %100 metakaolin bağlayıcılı geopolimer harçlarda 7 günlük eğilme dayanımlarının literatür çalışmalarındaki çimento esaslı harçlardan yaklaşık %80 daha fazla olduğu (Ün, 2005), 28 günlük eğilme dayanımında ise yaklaşık %62 daha fazla olduğu görülmektedir (Ün, 2005). Pişirilmiş taş tozu ikameli geopolimer harçlarda ise 7 günlük eğilme dayanımlarının literatür çalışmalarındaki çimento esaslı harçlardan yaklaşık %50 daha fazla olduğu, 28 günlük eğilme dayanımında ise yaklaşık %37 daha fazla olduğu görülmektedir (Ün, 2005). Kolemanit katkılı geopolimer harçlarda 7 günlük eğilme dayanımlarının literatür çalışmalarındaki çimento esaslı harçlardan yaklaşık %64 daha fazla olduğu, 28 günlük eğilme dayanımında ise yaklaşık %50 daha fazla olduğu görülmektedir (Ün, 2005). Boraks penta hidrat katkılı geopolimer harçlarda 7 günlük eğilme dayanımlarının literatür çalışmalarındaki çimento esaslı harçlardan yaklaşık %50 daha fazla olduğu, 28 günlük eğilme dayanımında ise yaklaşık %35 daha fazla olduğu görülmektedir (Ün, 2005). Sonuçta metakaolin ana bağlayıcı olmak üzere üretilen geopolimer harçlarda pişirilmiş taş tozu ikamesi ve bor mineralleri katkısında 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları çimento esaslı harçlarda çok daha yüksek çıkmaktadır.

6- Üretilen geopolimer harçların mekanik özelliklerine bakıldığında %100 metakaolin bağlayıcılı geopolimer harçlarda 7 günlük basınç dayanımlarının literatür çalışmalarındaki çimento esaslı harçlardan yaklaşık %117 daha fazla olduğu (Ün, 2005), 28 günlük basınç dayanımında ise yaklaşık %60 daha fazla olduğu görülmektedir (Ün, 2005). Pişirilmiş taş tozu ikameli geopolimer harçlarda ise 7 günlük basınç dayanımlarının literatür çalışmalarındaki çimento esaslı harçlardan yaklaşık %93 daha fazla olduğu, 28 günlük basınç dayanımında ise yaklaşık %50 daha fazla olduğu görülmektedir (Ün, 2005). Kolemanit katkılı geopolimer harçlarda 7 günlük basınç dayanımlarının

literatür çalışmalarındaki çimento esaslı harçlardan yaklaşık %101 daha fazla olduğu, 28 günlük basınç dayanımında ise yaklaşık %52 daha fazla olduğu görülmektedir (Ün, 2005). Boraks penta hidrat katkılı geopolimer harçlarda 7 günlük basınç dayanımlarının literatür çalışmalarındaki çimento esaslı harçlardan yaklaşık %85 daha fazla olduğu, 28 günlük basınç dayanımında ise yaklaşık %44 daha fazla olduğu görülmektedir (Ün, 2005). Sonuçta metakaolin ana bağlayıcı olmak üzere üretilen geopolimer harçlarda pişirilmiş taş tozu ikamesi ve bor mineralleri katkısında 7 ve 28 günlük basınç dayanımları çimento esaslı harçlarda çok daha yüksek çıkmaktadır.

7- Mekanik dayanım değerleri incelendiğinde 7., 28. ve 90. gündeki eğilme ve basınç dayanımlarında tüm karışımlar içerisinde en yüksek değerlere ana bağlayıcı olarak metakaolin kullanılan numunelerde ulaşıldığı görülmektedir. Eğilme ve basınç dayanımları arasında matematiksel bir bağlantı kurmak gerekirse 7 günlük, 28 günlük ve 90 günlük dayanım değerlerinde basınç dayanımı değerlerinin, eğilme dayanımı değerlerinin 5 katı olduğu görülmektedir. Geopolimer harçların eğilme ve basınç dayanımları arasındaki ilişkiyi ortaya koyan katsayı literatür çalışmalarında çimento bağlayıcılı harçların eğilme ve basınç dayanımları arasındaki yaklaşık 5,75 kattan daha iyi bir değer aldığı görülmektedir (Ün, 2005). Sonuçta metakaolin tabanlı geopolimer harçlarda pişirilmiş taş tozu ikamesi, kolemanit ve boraks penta hidrat katkısı da dahil olmak üzere eğilme ve basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi gösteren katsayının çimento esaslı harçlardan daha iyi olduğu görülmektedir. Sonuçta geopolimer harçların eğilme dayanımlarının da basınç dayanımları gibi çimento esaslı harçlardan daha iyi olduğu görülmektedir.

8- Bunun dışında metakaoline katkı malzemesi niteliğinde ilave edilen kolemanit ve boraks penta hidrat ile üretilen numunelerden elde edilen sonuçların, geopolimer kompozitlerin benzer özelliklerle üretilmesini sağlamakta hatta fiziksel anlamda daha işlenebilir ve uygulanabilir geopolimer harçları ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar ışığında, dünya çapında ve özellikle de Türkiye gibi dünya çapında büyük miktarlarda bor rezervine sahip ülkelerde, borlu malzemelerin geopolimer üretimi alanında potansiyel olarak kullanılabilirliği ortaya konulmaktadır.

9- Fiziksel özelliklerden boşluk oranı incelendiğinde gerek metakaolin bağlayıcılı gerekse pişirilmiş taş tozu ikameli ve kolemanit ve boraks penta hidrat katkılı numunelerde boşluk oranının literatür çalışmalarından yaklaşık %20 fazla olduğu görülmüştür (Aygörmez, 2018). Bunun sebebinin alkali aktivatör olarak kullanılan sodyum

hidroksit yüzdesinden (%40) kaynaklandığı düşünülmektedir. Dolayısıyla alkali aktivatör olarak sodyum hidroksitin yüzdesi azaltılıp, sodyum silikatın yüzdesi artırılabilir.

10- Çalışma kapsamında üretilen geopolimer harçlar için hedef dayanımlar ortaya konulduğunda %100 metakaolin bağlayıcılı geopolimer harçların üretiminde 7, 28 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanım değerlerinden yola çıkılarak çalışmanın ana nüvesini oluşturan optimum oranların hedeflerin yakalanmasında son derece etkili olduğu görülmektedir. Bu manada çalışma kapsamında ana bağlayıcı metakaolin olmak üzere taguchi optimizasyon yöntemi kullanılarak elde edilen optimum değerlere göre: kum/bağlayıcı oranı 2 , L/B oranı 1, SS/SH oranı 1,5 ve sodyum hidroksitin molaritesi 12 olmak üzere üretilen geopolimer harçların 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımlarının, en yüksek çimento dayanım sınıfı (PÇ 52,5) esas alınarak üretilen çimento bağlayıcılı harçların 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımlarına göre, çalışma kapsamındaki bütün karışımlarda: %100 metakaolin bağlayıcılı, %10, %20 ve %30 pişirilmiş taş tozu ikameli, %5, %10 ve %15 kolemanit ve boraks penta hidrat katkılı, daha yüksek olduğu görülmektedir. Aynı şekilde L/B oranı 1 alınarak SS/SH oranı 2, kum/bağlayıcı oranı 2,25 ve sodyum hidroksit molaritesi 10 olmak üzere üretilen geopolimer harçların 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımlarının, yine en yüksek çimento dayanım sınıfı (PÇ 52,5) esas alınarak üretilen çimento bağlayıcılı harçlardan, çalışma kapsamındaki bütün karışımlarda: %100 metakaolin bağlayıcılı, %10, %20 ve %30 pişirilmiş taş tozu ikameli, %5, %10 ve %15 kolemanit ve boraks penta hidrat katkılı geopolimer harçlarda 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımı değerlerinin daha yüksek olacağını söylemek mümkündür.

6.3. Öneriler

1. Geopolimer beton ve harç üretimi ile alakalı literatür taramalarında alkali aktivatör olarak genellikle sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmaktadır. Bu bağlamda gelecekte araştırmalarda diğer alkali aktivatörlerden potasyum hidroksit ve potasyum silikatın kullanılabilirliği araştırılmalı ayrıca farklı bağlayıcı, ikame ve katkı malzemelerinin kullanımı denenmelidir. Bu kapsamda örnek anlamında, alkali aktivatörler potasyum hidroksit ve potasyum silikat olmak üzere potasyum hidroksit'in potasyum silikata oranı, likit/bağlayıcı oranı, farklı molariteler, farklı aktivasyon sıcaklıkları, ikame veya katkı malzemelerinin bağlayıcı malzemeye oranı, farklı parametrelerin geopolimer harçlar üzerindeki sonuçları ve etkilerini değerlendirmek için bir optimizasyon yöntemi geliştirmek yararlı olacaktır.

2. Geopolimer üretiminde farklı kimyasal yapıda olan ve ülkemizde de önemli derecede rezervi olan üleksit mineralinin geopolimer harçlarda gerek ikame malzemesi olarak, gerek se katkı malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılabilir.

3. Geopolimer harç karışımlarının davranış şekli ve performansını detaylı bir şekilde ortaya koyabilmek ve mikroyapısal analizler yapmak için FTIR (Fourier Transform Infrared Spektroskopisi) ve Nükleer Manyetik Rezonans (NMR) gibi yöntemler kullanılabilir.

4. Geopolimer harç üretiminde şimdiye kadar genelde agrega anlamında standart rilem kumu kullanılmış ve bu şekilde üretim gerçekleşmiştir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda agrega olarak standart rilem kumu yerine geri dönüşümlü agrega (GDA) kullanılabilir.

5. Geopolimer harç ve beton üretiminde bugüne kadar genellikle birim hacim ağırlığı anlamında normal beton ve harçlar üretilmiş olup, gelecekte yapılacak çalışmalarda harcın veya betonun agrega tipi değiştirilerek hafif veya ağır geopolimer harç ve betonlar üretilir.

6. Bu çalışma kapsamında mekanik dayanım değerleri esas alınarak taguchi optimizasyon yöntemi kullanılmış ve optimum değerler elde edilmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda maliyet parametreleri gözönüne alınarak maliyetin optimizasyonu için taguchi optimizasyon yöntemi kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- Aİtcin, P.C., 2000, Cements of yesterday and today: Concrete of tomorrow. Cem. Concr. Res. 30, 1349–1359.
- Alonso, S. ve Palomo, A., 2001, Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: Influence of temperature, activator concentration and solids ratio, Materials Letters, 47: 55-62.
- Arıöz, Ö., Kılınç, K., Tuncan, M., Tuncan, A., Zeybek, O., Kavas, T., 2008, Isıl işlem tipi ve süresinin yüksek kalsiyum içerikli uçucu kül esaslı geopolimerik tuğlaların fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi, Uluslararası Katılımlı 7. Seramik Kongresi, TE167, 355-363.
- Atabey, I.I., Karahan O., Bilim C., Atış, C.D., The influence of activator type and quantity on the transport properties of class F fly ash geopolymer, Construction and Building Materials, vol. 264, 20 Dec. 2020, p. 120268,
- Aydın S., Yardımcı M.Y. 2015, Alkalilerle aktive edilmiş harçların aşınma dayanıklılığının incelenmesi, Beton, (293-302).
- Aydoğan, U., Bilen, M., Gürü, M., 2011, Anortit seramik malzeme üretiminde çucu kül ve borik asitin kullanılabilirliği, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 26, No 4, 761-769.
- Aygörmez, Y., 2018, Kolemanit atığı ve silis dumanı katkılı metakaolin tabanlı geopolimer harcın mekanik ve durabilite özelliklerinin incelenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Doktora Tezi).
- Bakharev, T., 2005, Resistance of geopolymer materials to acid attack, Cement and Concrete Research, 35: 1233-1246.
- Barbosa, V., Mackenzie, K. ve Thaumaturgo, C., 2000, Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers, International Journal of Inorganic Materials 2, 2: 309-317.
- Batar, T., Kahraman, B., Cirit, E. ve Çelik, M.S., 1998, Dry processing of borax by calcination as an alternative to wet methods Int. J. Miner. Process, 54, 99-110.
- Bauer, S.W., 2007, The history of the ancient world, W.W. Norton and Company Inc., New York, 4-5.
- Binici, H., Eken, M., Aksoğan, O., 2012, Cüruf, uçucu kül, silis kumu ve pomza esaslı geopolimerlerin fiziksel, mekanik ve radyasyon geçirgenlik özellikleri, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, Cilt.8, No.2, (12-25).
- Boncukçuoğlu R., İçelli O., Erzeneoğlu S., Kocakerim M.M., 2005, Comparison of radioactive transmission and mechanical properties of Portland cement and a

- modified cement with trommel sieve waste, *Cement and Concrete Research* 35. 1082- 1087.
- Brew, D.R.M. and Mackenzie, K.J.D. 2007, 'Geopolymer synthesis using silica fume and sodium aluminate, *J.Mater Science*, Doi: 10.1007/s10853-006-0376-1.
- Brooks, R., Bahadory, M., Tovia, F. ve Rostami, H., 2010, Properties of alkali-activated fly ash: high performance to lightweight, *International Journal of Sustainable Engineering*, 3(3): 211–218.
- BS EN 196-1, 2016, BSI Standards Publication Methods of testing cement Part 1: Determination of strength.
- Burciaga-díaz, O., Gómez-zamorano, L.Y. ve Escalante-garcía, J.I., 2016, Influence of the long term curing temperature on the hydration of alkaline binders of blast furnace slag-metakaolin, *Constr. Build. Mater.*, 113: 917–926.
- Canıyılmaz, E., Kalite geliştirmede taguchi metodu ve bir örnek uygulama, Yüksek Lisans Tezi Ankara, 2001.
- Castaldelli N.V., Akasaki J.L., Melges J.L.P., Tashima M.M., Soriano L., Borrachero M.V., Monzó J., Payá J., 2013, Use of slag/sugar cane bagasse ash (SCBA) blends in the production of alkali-activated materials, 6, 3108-3127.
- Chindaprasirt, P., Chareerat, T. ve Sirivivatnanon, V., 2007, Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer, *Cement and Concrete Composites*, 29(3): 224-229.
- Criado M, Fernández-Jiménez A, De la Torre AG, Aranda MAG, Palomo A., 2007, An XRD study of the effect of the $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ratio on the alkali activation of fly ash, *Cem Concr Res* ;37:671–9.
- Davidovits, J., 1989, Geopolymers and geopolymeric materials, *Journal of Thermal Analysis*, 35: 429-441.
- Davidovits, J., 1991, Geopolymers: inorganic polymeric new materials, *J. Therm. Anal.*, 37: 1633–1656.
- Davidovits, F. ve Davidovits, J., 1999, Long lasting roman cements and concretes, *Géopolymère '99 Proceedings*.
- Davidovits, J., 2008a, *Geopolymer chemistry and applications*, 2nd ed. Saint-Quentin, France: Institute Geopolymer.
- Davidovits, J. 2008b, *Geopolymer chemistry and applications*, 3rd edition, Institut Geopolymere, St. Quinten, 398-406.
- Davidovits, J. 2008c, *Geopolymers chemistry and applications*, 3rd edition, Institut Geopolymere, St. Quinten, 392-398.

- Demortier, G., 2004, PIXIE, PIGE and NMR study of the masonry of the pyramid of cheops at gaza, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B226: 98-109.
- 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 $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ molar ratio, curing temperature and age on compressive strength, morphology and microstructure of alkali-activated fly ash-based geopolymers, Cement and Concrete Composites, 33: 653-660.
- Duan, P., Yan, C. Ve Luo, W., 2016, Technical note a novel waterproof, fast setting and high early strength repair material derived from metakaolin geopolymer, Constr. Build. Mater., 124: 69–73.
- Durak, U., İlkentapar, S., Karahan, O., Uzal, B., Atiş, C.D., A new parameter influencing the reaction kinetics and properties of fly ash based geopolymers: A pre-rest period before heat curing, Journal of Building Engineering, vol. 35, 1 Mar. 2021, p. 102023.
- Embong R., Kusbiantoro A., Shafiq, N., Nuruddin M., F., 2016, Strength and microstructural properties of fly ash based geopolymer concrete containing high-calcium and water-absorptive aggregate, Journal of Cleaner Production, 112. 816-822.
- Fakhrian, S., Behbahani, H., and Mashhadi, S., 2020, Predicting post-fire behavior of green geopolymer mortar containing recycled concrete aggregate via GEP approach. Journal of Soft Computing in Civil Engineering, 4(2): 22- 45.
- Fernández-Jiménez A, Palomo JG, Puertas F., 1999, Alkali-activated slag mortars: mechanical strength behavior, Cem Concr Res ;29:1313–21.
- Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A. ve Criado, M., 2005, Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: A descriptive model”, Cement and Concrete Research, 35: 1204-1209.
- Fernandez-Jimenez, A., García-Lodeiro, I., ve Palomo, A., 2007, Durability of alkali activated fly ash cementitious materials, J. Mater. Sci., 42(9): 3055–3065.
- Flatt, R.; Roussel, R.; Cheeseman, C.R., 2012, Concrete: An eco-material that needs to be improved. J. Eur. Ceram. Soc.32, 2787–2798.
- García-Lodeiro, A. Palomo, A. Fernández-Jiménez, D.E. Macphee, 2011, Compatibility studies between N-A-S-H and C-A-S-H gels. Study in the ternary diagram $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$, Cement and Concrete Research 41 923–931
- Gourley, G., Johnson, G.B., 2005, Developments in geopolymer precast concrete, World Congress Geopolymer 2005: Green chemistry and sustainable development solution, France, 139–143.

- Görhan, G., Kürklü, G., 2014, Alkali tuz içeriğinin geopolimer cephe malzemesi özelliklerine etkisi, 7. Ulusal Çatı & Cephe Sempozyumu 3– 4 Nisan 2014 Yıldız Teknik Üniversitesi Beşiktaş – İstanbul.
- Grim, R.E., (1962). Applied clay mineralogy, McGraw-Hill, New York.
- Hao, H., Lin, K., L., Wang, D., Y., Chao, S., J., Shiu, H., S., Cheng, T., W., Hwang, C., L., 2015, Elucidating characteristics of geopolimer with solar panel waste glass, Environmental Engineering and Management Journal 14 1, 79-87.
- Hardjito, D. ve Fung, S., 2010, Fly ash-based geopolimer mortar incorporating bottom ash, Modern Applied Science, 4(1): 44-52.
- Hart, R.D., Lowe, J.L., Southam, D.C., Perera, D.S. ve Wal, P., 2006, Aluminosilicate inorganic polymers from waste materials, Green Processing 198: 93-103.
- Heikal M., Nassar M.Y., El-Sayed G., İbrahim S.M., 2014, Physico-chemical, mechanical, microstructure and durability characteristics of alkali activated Egyptian slag, Construction and Building Materials 69. 60–72
- Helvacı, C., 1977, Geology, mineralogy and geochemistry of the borate deposits and associated rocks of the Emet Valley, Turkey: Ph.D. Thesis, University of Nottingham, England.
- İnti, S., Sharme, M., Tandon, V., 2017, Influence of curing on the properties of geopolimer mortar made with low molarity sodium hydroxide. Transportation in Developing Economies > Issue 2/2017
- Juenger, M.C.G.; Winnerfeld, F.; Provis, J.L.; Ideker, J.H., 2011, Advances in alternative cementitious binders, Cem. Concr. Res. 41, 1232–1243.
- Jumrat, S., Chatveera, B., Rattanadecho, P., 2011, Dielectric properties and temperature profile of fly ash-based geopolimer mortar, International Communications in Heat and Mass Transfer 38,244-248.
- Kackar R. N., Taguchi's quality philosophy: analysis and commentary, quality control, robust design and the taguchi method, edited by K. DEHNAD, Wadsworth & Brooks / Cole, p.3 – 20, California 1989.
- Khale, D. ve Chaudhary, R., 2007, Mechanism of geopolimerization and factors influencing its development: a review, J Mater Sci, 42: 729-746.
- Khater, H., 2012, Effect of cement kiln dust on geopolimer composition and its resistance to sulfate attack, International Journal of Civil and Structural Engineering, 2(3): 740.
- Komnitsas, K. ve Zaharaki, D., 2007a, Geopolimerisation: A review and prospects for the minerals industry, Minerals Engineering, 20(14): 1261-1277.
- Komnitsas, K., Zaharaki, D. ve Perdikatsis, V., 2007b, Geopolimerisation of low calcium ferronickel slags, Journal of Materials Science, 42: 3073-3082.

- Kouamo, H., Henning, C., Kong, S. ve Ranjbar, N., 2016, "Synthesis of sodium waterglass from white rice husk ash as an activator to produce metakaolin-based geopolymer cements, *Journal of Building Engineering*, 6: 252–261.
- Krivenko, P., 2005, Development of alkaline cements supported by theory and Practice, Conference Paper.
- Lahoti, M., Narang, P., Tan, K.H. ve Yang, E., 2017, Mix design factors and strength prediction of metakaolin-based geopolymer, *Ceram. Int.*, 43(14): 11433–11441
- Lecomte, I., Liegeois, M., Rulmont, A., Cloots, R. ve Maseri, F., 2001, Synthesis and characterization of new inorganic polymeric composites based on kaolin or white clay and on ground-granulated blast furnace slag, *Journal of Materials Research*.
- Lochner R. H., Matar J.E., 1990, Designing for quality, an introduction to the best of taguchi and western methods of statistical experimental design, chapman and hall, p. 1 – 240, Newyork.
- Luukkonen T., Sarkkinen, M., Kemppainen, K., Lassi, J., R., U., 2016, Metakaolin geopolymer characterization and application for ammonium removal from model solutions and landfill leachate, *Applied Clay Science* 119. 266–276.
- Mitchell, J.K. ve Soga, K., 2005, Fundamentals of soil behavior, John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Mobili, A., Belli, A., Giosuè, C., Bellezze, T. ve Tittarelli, F., 2016, Metakaolin and fly ash alkali-activated mortars compared with cementitious mortars at the same strength class, *Cem. Con. Res.*, 88: 198–210.
- Nath, P. ve Sarker, P., 2012, Geopolymer concrete for ambient curing condition, Australasian Structural Engineering Conference 2012: The past, present and future of Structural Engineering, 11-13 July 2012. Perth, Western Australia, Engineers Australia.
- Nuruddin, M., Qazi, S., Kusbiantoro, A. ve Shafiq, N., 2011, Utilisation of waste material in geopolymeric concrete, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*, 164(6): 315-327.
- Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J. ve Jalali, S., 2008, Alkali-activated binders: A review: Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products, *Construction and Building Materials*, 22: 1305-1314.
- Pelisser, F., Guerrino, E.L., Menger, M., Michel, M.D. ve Labrincha, J.A., 2013, Micromechanical characterization of metakaolin-based geopolymers, *Constr. Build. Mater.*, 49: 547–553.
- Pignatiello J. J. Jr., An overview of the strategy and tactics of taguchi, *IIE Transactions*, Vol.20, No.3, p. 247-251, 1998.

- Provis, J.L., 2014, Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what?, *Materials and Structures*, 47: 11-25.
- Purdon, A.O., 1940, The action of alkalis on blast furnace slag, *Journal of the Society of the Chemical Industrey*, 59: 191-202.
- Rangan, B., V., Hardjito, D., Wallah, S., E., Sumajouw, M., J., 2005, Studies on fly ash-based geopolymer concrete, *Proceedings of world congress geopolymer*, France.
- Rangan, B.V., 2008, Fly ash-based geopolymer concrete, Research Report GC 4, Engineering Faculty, Curtin University of Technology SF:44, Perth, Australia.
- Rehman, M. U., Rashid, K., Zafar, I., Alqahtani, F. K., and Khan, M. I., 2020, Formulation and characterization of geopolymer and conventional lightweight green concrete by incorporating synthetic lightweight aggregate. *Journal of Building Engineering*, 101363.
- Rostami, M. ve Behfarnia, K., 2017, The effect of silica fume on durability of alkali activated slag concrete, *Constr. Build. Mater.*, 134: 262–268.
- Rovnaník, P., Al, S.O., 2010, Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer, *Constr. Build. Mater.*, 24(7): 1176–1183.
- Scrivener, K., 2011, Straight talk with Karen Scrivener on cements, CO₂ and sustainable development, *American Ceramic Society Bulletin*, 91: 47-50.
- Shahmansouri, A. A., Akbarzadeh Bengar, H., and Ghanbari, S., 2020, Experimental investigation and predictive modeling of compressive strength of pozzolanic geopolymer concrete using gene expression programming. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 5(1): 92-117.
- Shahmansouri, A. A., Nematzadeh, M., and Behnood, A., 2021, Mechanical properties of GGBFS-based geopolymer concrete incorporating natural zeolite and silica fume with an optimum design using response surface method. *Journal of Building Engineering*, 36: 102138.
- Shi C., Roy D., Krivenko P., 2006, Alkali-activated cements and concretes, CRC Press, 392, ISBN 0203390679, 9780203390672.
- Shi, C., Jiménez, A. ve Palomo, A., 2011, New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to portland cement, *Cement and Concrete Research*, 41(7): 750-763.
- Shvarzman, A., Kovler, K., Grader, G.S. ve Shter, G.E., 2003, The effect of dehydroxylation/amorphization degree on pozzolanic activity of kaolinite, *Cement and Concrete Research*, 33: 405–416.
- Stephens, R., 2009, Coal sludge flood and public response, roane county tennessee. disaster response, environmental health, environmental health professionals, 7.

- Sukontasukkul, P., Pongsopha, P., Chindaprasirt, P. ve Songpiriyakij, S., 2018, Flexural performance and toughness of hybrid steel and polypropylene fibre reinforced geopolymer, *Constr. Build. Mater.*, 161: 37–44.
- Sun, Z. ve Vollpracht, A., 2018, Isothermal calorimetry and in-situ XRD study of the NaOH activated fly ash, metakaolin and slag, *Cem. Concr. Res.*, 103: 110–122.
- Swanepoel, J.C. and Strydom, C.A. 2002, Utilisation of fly ash in a geopolymeric material. *Journal of Applied Geochemistry*, 17, 1143-1148.
- Şahin Ö., Bultçu, N., 2002,, Production of high bulk density anhydrous borax in fluidized bed reactor, *Chemical Engineering and Processing*, 41, 135-141.
- Şahin, Ö., Genli, N., Özdemir, M. 2005, A new method for producing anhydrous puffed borax, *Chemical Engineering and Processing*. 44, 1-6.
- Temuujin, J., Van Riessen, A. ve Williams, R., 2009, Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes, *Journal of Hazardous Materials*, 167: 82-88.
- Thokchom, S., Ghosh, P., Ghosh, S., 2010, Performance of fly ash based geopolymer mortars in sulphate solution, *Journal of Engineering Science and Technology Review* 3 (1) (2010) 36-40.
- Topçu, İ., B., Toprak, M., U., 2009, Alkalilerle aktive edilen taban küllü hafif harç üretimi, <http://mmfdergi.ogu.edu.tr/mmfdrg/2009-2/9.pdf>.
- TS EN 771-1. 2005, Kagir birimler, özellikleri Bölüm 1: Kil kâgir birimler (tuğlalar).
- TS EN 772-4., 2000, Kagir birimler, deney metodları Bölüm 4: Tabii taş kâgir birimlerin toplam ve görünen porozitesi ile boşluksuz ve boşluklu birim hacim kütlelerinin tayini.
- TS EN 197-1, 11.03.2002. Çimento- Bölüm 1: Genel çimentolar- bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri.
- TS EN 196-3, 11.03.2002, Çimento deney metodları- Bölüm 3: Priz süresi ve hacim genleşme tayini.
- TS EN 1097-5, 17.04.2001. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler Bölüm 5: Hava dolaşımı etüvde kurutma ile su muhtevasının tayini.
- TS EN 1097-6/A1, 25.04.2006. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler Bölüm 6: Tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini.
- TS EN 12390-5, 08.04.2002, Beton-sertleşmiş beton deneyleri – Bölüm 5: Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini.

- TS EN 12390-3, 18.04.2003, Beton-sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini.
- TS EN 1015-3., 2000, Kagit harcı-deney metodları- Bölüm 3: Taze harç kıvamının tayini (yayılma tablası ile), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1015-11, 2000, Kagit harcı-deney metodları-Bölüm 11: Sertleşmiş harcın basınç ve eğilme dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 197-1 2012, Çimento-Bölüm 1: Genel çimentolar-bilesim, özellikler ve uygunluk kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara 2012.
- TS EN 196-1, 2012, Çimento deney metodları – Bölüm 1: Dayanım tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Ün, H., 2005, Değişik tip çimentolarla hazırlanan harçların eğilme sonrası basınç dayanımı ile doğrudan basınç dayanımlarının karşılaştırılması DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi Cilt:7 Sayı:1 s. 97-109 Ocak 2005.
- Ünlü, M., İ., Bilen, M., Gürü, M., 2011, Kütahya-emet bölgesi yeraltı sularında bor ve arsenik kirliliğinin araştırılması J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ. Vol 26, No 4, 753-760.
- Van Deventer, J.S.J., Provis, J.L., Duxson, P. ve Brice, D.G., 2010, Chemical research and climate change as drivers in the commercial adoption of alkali activated materials, Waste Biomass Valorizat., 1(1): 145–155.
- Van Jaarsveld, J.G.S. ve Van Deventer, J.S.J., 1999, effect of the alkali metal activator on the properties of fly ash-based Geopolymers, Ind. Eng. Chem. Res., 38: 3932-3941.
- Van Oss, H.G., (2012). Cement. US Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, 1-2.
- Wang SD, Scrivener KL, Pratt PL., 1994, Factors affecting the strength of alkaliactivated slag. Cem Concr Res ;24 (6):1033–43.
- Weil M, Dombrowski, K, Buchawald A., 2009, Life-cycle analysis of geopolymers. geopolymers, structure, processing, properties and applications. abington hall: Woodhead Publishing Limited; p. 194– 210.
- Yang, T., Zhu, H. ve Zhang, Z., 2017, Influence of fly ash on the pore structure and shrinkage characteristics of metakaolin-based geopolymer pastes and mortars, Constr. Build. Mater., 153: 284–293
- Yardımcı M.Y., Aydın S., Tüyan., 2015, Alkalilerle aktive edilmiş harçların düşük hızlı darbe yüklemesi altında eğilme performanslarının incelenmesi beton 283-292.