

T.C.  
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**HORASAN HARCININ ÖZELLİKLERİNİN DOĞAL LİFLER VE PUZOLONİK  
MALZEMELER İLE GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NİDA KÖSA

TEZ DANIŞMANI  
DR.ÖĞR.ÜYESİ AYLİN ÖZODABAŞ

BİLECİK, 2022

10476641

T.C.  
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**HORASAN HARCININ ÖZELLİKLERİNİN DOĞAL LİFLER VE PUZOLONİK  
MALZEMELER İLE GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NİDA KÖSA

TEZ DANIŞMANI  
DR.ÖĞR.ÜYESİ AYLİN ÖZODABAŞ

BİLECİK, 2022

10476641

## BEYAN

Horasan Harcının Özelliklerinin Doğal Lifler ve Puzolonik Malzemeler ile Geliştirilmesi adlı yüksek lisans tezi hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir.	
<b>DESTEK ALINMIŞTIR</b>	<b>DESTEK ALINMAMIŞTIR</b>
<b>Destek alındı ise;</b>	
<b>Destekleyen kurum;</b>	
<b>Desteğin Türü</b>	<b>Proje Numarası</b>
<b>1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)</b>	
<b>2- TÜBİTAK</b>	
<b>Diğer;.....</b> .....	
<b>ETİK</b>	
<b>KURUL onayı var ise;</b>	
<b>ETİK KURUL karar tarih/sayı:</b>	...../..... .....

**Nida KÖSA**

**Tarih**

**İmza**

## ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca, bilgi ve tecrübesiyle her zaman yanımda olan, desteğini esirgemeyip sabırla ilgilenen sayın danışmanım Dr.Öğr.Üyesi Aylin ÖZODABAŞ'a ilgi, emek ve katkıları için saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmaların boyunca her türlü soruma özverili şekilde cevap veren, bilgi ve deneyimlerini esirgemeyen, yanımda olup kendi çalışmaları gibi yakından ilgilenen Sayın Öğr.Gör. Ahmet Ferdi ŞENOL ve Arş.Gör. Nazım Çağatay DEMİRAL'a teşekkürü borç bilirim.

Eğitim hayatım boyunca desteklerini her zaman hissettiren, yanımda olan, bugünlere gelmemi sağlayan babam Ünsal KÖSA, annem Sema KÖSA ve kardeşim Nisa KÖSA'ya, çalışmalarımda yardımcı olan tüm hocalarıma ve okulumuz lisans öğrencilerine sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

**Nida KÖSA**

**2022**

## ÖZET

### HORASAN HARCININ ÖZELLİKLERİNİN DOĞAL LİFLER VE PUZOLONİK MALZEMELER İLE GELİŞTİRİLMESİ

Kireç içeren harçlar, kirecin bulunduğu antik dönemlerden, çimentonun bulunmasına kadar geçen sürede yapıların inşasında sıklıkla kullanılmış olup zamanla yerini çimento içeren harçlara bırakmıştır. Çimentonun temininin ve uygulanabilirliğinin kolay olması, özelliklerinin puzolan ve kimyasal katkı malzemeleriyle istenilen düzeyde geliştirilebilmesi, yüksek mukavemete sahip olması, çabuk priz alması gibi avantajları sayesinde kullanımı yaygınlaşmıştır. Çimentonun bu avantajlarının yanı sıra, üretiminin çevreye verdiği zararlar bulunmaktadır. Çimento üretimi yüksek oranda sera gazı salınımına neden olmaktadır. Dünyadaki toplam karbon salınımının %7-8'i çimento üretiminden kaynaklanmaktadır. Dünyada en çok tüketilen yapı malzemesi olduğu düşünüldüğünde, çevreye verdiği zarar göz ardı edilemeyecek büyüklüktedir. Ayrıca, çimentoda bulunan tuzlar zamanla suyun etkileri ile hacim genişmesine sebep olarak hasara sebebiyet verir. Çimento içeren harçlar; yoğunluğu ve ısı iletkenlik katsayısı yüksek olduğu için yoğunlaşmaya ve böylelikle de yapının nemlenmesine sebebiyet verebilmektedir. Çimento içeren harçlar, küçük gözeneklere sahip olduğu için, herhangi bir yolla yapıya gelen suyun buharlaşarak uzaklaşması zordur. Ayrıca çimentolu harçların servis ömrü çevresel koşullara ve hava şartlarına bağlı olarak 30-100 yıl arasında dolmaktadır. Bu çalışmada kireç harcının özellikleri bitkisel katkılar ve geopolimer katkı malzemeleriyle iyileştirilerek çimentolu harçlara alternatif harç üretilmeye çalışılmıştır. Üretim iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada kireç, tuğla kırığı ve bitkisel katkı malzemeleri kullanılmıştır. Kullanılan bitkisel katkılar; meşe ağacı yaprağı suyu, meşe ağacı kabuğu suyu, meşe odunu külüdür. İkinci aşamada geopolimer içerikli katkı malzemeleri kullanılmıştır. Üretimde puzolan olarak değişen miktarlarda uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ve bunları aktive etmek için sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır. Üretilen taze beton numunelerine yayılma tablası ve vicat deneyleri yapılmış, 28 gün oda koşullarında bekletildikten sonra sertleşmiş haldeki numunelere birim hacim ağırlık, su emme, porozite, eğilme ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda, katkı malzemelerinin, numunelerin özelliklerinde olumlu etkileri olduğu gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Horasan Harcı, Bitkisel Katkı, Odun Külü, Geopolimer, Puzolan.

## ABSTRACT

### IMPROVING THE PROPERTIES OF KHORASAN MORTAR WITH NATURAL FIBERS AND POZZOLANIC MATERIALS

Mortars containing lime were frequently used in the construction of structures from the ancient times when lime was found to the discovery of cement. The use of cement has become widespread thanks to its advantages such as being easy to supply and applicable, improving its properties at the desired level with pozzolan and chemical additives, having high strength, and setting quickly. In addition to these advantages of cement, there are damages caused by its production to the environment. Cement production causes high greenhouse gas emissions. 7-8% of the total carbon emission in the world is due to cement production. Considering that it is the most consumed building material in the world, the damage it causes to the environment cannot be ignored. Salts in cement cause damage by causing volume expansion with the effects of water over time. Mortars containing cement; since its density and thermal conductivity coefficient are high, it can cause condensation and thus humidification of the building. Since cement-containing mortars have small pores, it is difficult for any water coming into the structure to be drained by evaporation. In this study, it has been tried to produce alternative mortars to cement mortars by improving the properties of lime mortar with plant additives and geopolymer additives. Production was carried out in two stages. In the first stage, lime, broken brick and plant additives were used. Plant additives used; oak leaf juice, oak bark juice, oak wood ash. In the second stage, additives containing geopolymer were used. Varying amounts of fly ash and blast furnace slag were used as pozzolans and sodium hydroxide and sodium silicate were used to activate them. Flow table and vicat tests were carried out on the fresh concrete samples produced, and unit volume weight, water absorption, porosity, bending and compressive strength tests were carried out on the hardened samples after they were kept at room conditions for 28 days. As a result of the experiments, it was observed that the additives had positive effects on the properties of the samples.

**Keywords:** Khorasan Mortar, Plant Additive, Wood Ash, Geopolymer, Pozzolan.

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
ÖZET .....	ii
ABSTRACT .....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI .....	3
3. KURAMSAL TEMELLER.....	26
3.1. Kireç Harçları.....	26
3.2. Kireç.....	26
3.3. Puzolanlar.....	28
3.3.1. Tuğla Tozu.....	31
3.3.2. Uçucu Kül .....	31
3.3.3. Yüksek Fırın Cürufu .....	33
3.3.4. Kireç-Puzolan Tepkimesi .....	34
3.3.5. Kireç-Tuğla Tozu .....	36
3.4. Katkı Maddeleri.....	37
3.4.1. Priz Hızlandırıcı Katkı Maddeleri .....	39
3.5. Alkalin Aktivatörler .....	39
3.5.1. Sodyum Hidroksit .....	40
3.5.2. Sodyum Silikat .....	40
3.5.3. Geopolimerizasyon.....	41

3.6. Agrega.....	42
<b>4. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>43</b>
4.1. Materyaller.....	43
4.1.1. Kireç.....	43
4.1.2. Tuğla Kırığı.....	43
4.1.3. Odun Külü.....	43
4.1.4. Su.....	43
4.1.5. Priz Hızlandırıcı.....	45
4.1.6. Sodyum Hidroksit.....	45
4.1.7. Sodyum Silikat.....	45
4.1.8. Uçucu Kül.....	46
4.1.9. Yüksek Fırın Cürufu.....	46
4.2. Yöntem.....	47
4.2.1. Birinci Aşama.....	48
4.2.2. İkinci Aşama.....	50
4.2.3. Yayılma Tablası Deneyi.....	53
4.2.4. Vicat Deneyi.....	54
4.2.5. Birim Hacim Ağırlık Deneyi.....	55
4.2.6. Su Emme Deneyi.....	55
4.2.7. Porozite Deneyi.....	56
4.2.8. Eğilme Dayanımı Testi.....	56
4.2.9. Basınç Dayanımı Testi.....	57
<b>5.DENEY SONUÇLARI.....</b>	<b>58</b>
5.1. Birinci Aşamada Gerçekleştirilen Deney Sonuçları.....	58

5.1.1. Yayılma Deneyi Sonuçları.....	58
5.1.2. Priz Başlama Süreleri .....	59
5.1.3. Birim Hacim Ağırlık Değerleri .....	60
5.1.4. Su Emme Oranı.....	60
5.1.5. Porozite Değerleri .....	61
5.1.6. Eğilme Dayanımı Değerleri.....	62
5.1.7. Basınç Dayanımı Değerleri.....	62
5.2. İkinci Aşamada Gerçekleştirilen DeneY Sonuçları.....	63
5.2.1. Yayılma Deneyi Sonuçları.....	64
5.2.2. Priz Başlama Süreleri .....	65
5.2.3. Birim Hacim Ağırlık Değerleri .....	67
5.2.4. Su Emme Oranları.....	68
5.2.5. Porozite Değerleri .....	69
5.2.6. Eğilme Dayanımı Değerleri.....	70
5.2.7. Basınç Dayanımı Değerleri.....	70
6. SONUÇLAR .....	72
KAYNAKÇA .....	77
EKLER.....	85

## TABLolar LİSTESİ

<b>Tablo 2.1.</b> Mavi tarafından üretilen harçların karışım oranları .....	4
<b>Tablo 2.2.</b> Penelis'in tarafından belirlenen Bizans yapılarındaki malzemelerin karışım oranları ..	5
<b>Tablo 2.3.</b> Karaveziroğlu'nun yapmış olduğu çalışmaya göre malzeme karışım oranları .....	5
<b>Tablo 2.4.</b> Pusat'ın ürettiği Horasan harçlarındaki malzemelerin karışım oranları.....	6
<b>Tablo 2.5.</b> Akbulut'un ürettiği Horasan harçlarının karışım oranları .....	7
<b>Tablo 2.6.</b> Işıkdağ ve Topçu tarafından üretilen harçlarda kullanılan karışım oranları.....	10
<b>Tablo 3.1.</b> Uçucu küllerin katkı maddesi olarak kullanılabilmesi için kimyasal değerler.....	33
<b>Tablo 3.2.</b> Yüksek fırın cürufu kompozisyonları, % .....	34
<b>Tablo 3.3.</b> Horasan harçlarında kullanılmış olan katkı malzemeleri .....	38
<b>Tablo 4.1.</b> Tuğla Kırığı Elek Analizi .....	43
<b>Tablo 4.2.</b> Kullanılan priz hızlandırıcının teknik özellikleri .....	45
<b>Tablo 4.3.</b> Kullanılan Sodyum Silikatın fiziksel ve kimyasal özellikleri .....	46
<b>Tablo 4.4.</b> Çalışmada kullanılan uçucu külün kimyasal özellikleri .....	46
<b>Tablo 4.5.</b> Kullanılan yüksek fırın cürufunun kimyasal kompozisyonu .....	47
<b>Tablo 4.6.</b> 1. Aşamada üretilen numuneler ve açıklamaları .....	48
<b>Tablo 4.7.</b> 1. Aşamada kullanılan malzeme miktarları(gr).....	49
<b>Tablo 4.8.</b> 1. Aşamada kullanılan malzeme miktarları oranları .....	49
<b>Tablo 4.9.</b> 2. Aşamada üretilen numunelerin isimleri ve açıklamaları .....	51
<b>Tablo 4.10.</b> 2. Aşamada kullanılan malzeme miktarları(gr).....	52
<b>Tablo 4.11.</b> 2. Aşamada kullanılan malzeme miktarları oranları .....	53
<b>Tablo 5.1.</b> 1. Aşamada gerçekleştirilen deneylerin sonuçları.....	58
<b>Tablo 5.2.</b> 2. Aşamada gerçekleştirilen deneylerin sonuçları.....	64
<b>Tablo 6.1.</b> Kullanılan katkı malzemelerinin numunelere etkileri.....	76

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Kireç döngüsü .....	27
Şekil 3.2. Doğal ve Yapay Puzolanlar .....	30
Şekil 3.3. Geopolimerizasyon süreci.....	42
Şekil 4.1. 30 gr, 60 gr, 90 gr olarak tartılmış yapraklar .....	44
Şekil 4.2. 30 gr, 60 gr, 90 gr olarak tartılmış ağaç kabukları.....	44
Şekil 4.3. Yaprakların ve kabukların kaynatılması .....	44
Şekil 4.4. a) Kullanılan yüksek fırın cürufunun genel görünüşü b)SEM analizinde görünüşü .....	47
Şekil 4.5. Kullanılan yüksek fırın cürufunun XRD analizi (S: Sillimanite, K: Katoite, Gr: Periclase).....	47
Şekil 4.6. Yayılma tablası deneyi.....	54
Şekil 4.7. Vicat deneyi .....	55
Şekil 4.8. Su emme oranı ve porozite tayini .....	56
Şekil 4.9. Eğilme dayanımı testi .....	57
Şekil 4.10. Basınç dayanımı testi .....	57
Şekil 5.1. 1. Aşama yayılma deneyi sonuçları .....	58
Şekil 5.2. 1. Aşama priz başlama süreleri .....	59
Şekil 5.3. 1. Aşama birim hacim ağırlık değerleri .....	60
Şekil 5.4. 1. Aşama su emme oranları.....	60
Şekil 5.5. 1. Aşama porozite değerleri .....	61
Şekil 5.6. 1. Aşama eğilme dayanımı değerleri .....	62
Şekil 5.7. 1. Aşama basınç dayanımı değerleri .....	62
Şekil 5.8. 2. Aşama yayılma deneyi sonuçları .....	64
Şekil 5.9. 2. Aşama priz başlama süreleri .....	65
Şekil 5.10. Yayılma değeri ve priz başlama süresi ilişkisi.....	66

<b>Şekil 5.11.</b> 2. Aşama birim hacim ağırlık değerleri .....	67
<b>Şekil 5.12.</b> 2. Aşama su emme oranları.....	68
<b>Şekil 5.13.</b> 2. Aşama porozite değerleri .....	69
<b>Şekil 5.14.</b> Su emme oranı ve porozite ilişkisi.....	69
<b>Şekil 5.15.</b> 2. Aşama eğilme dayanımı değerleri .....	70
<b>Şekil 5.16.</b> 2. Aşama basınç dayanımı değerleri .....	70
<b>Şekil 5.17.</b> Eğilme dayanımı ve basınç dayanımı ilişkisi .....	71

## KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

**%:** yüzde

**°C:** Santigrad

**µm:** Mikron

**A:** Yüklemenin yapıldığı kesitin alanı(milimetrekare)

**Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:** Alüminyum Oksit

**ASTM:** American Society for Testing and Materials

**b:** Kiriş genişliği(milimetre)

**C<sub>2</sub>S:** Dikalsiyum Silikat

**C<sub>3</sub>S:** Trikalsiyum Silikat

**Ca (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>:** Kalsiyum Nitrat

**Ca(OH)<sub>2</sub>:** Kalsiyum Hidroksit

**CaCl<sub>2</sub>:** Kalsiyum Klorür

**CaCO<sub>3</sub>:** Kalsiyum karbonat

**C-A-H:** kalsiyum alüminat hidrat

**CaO:** Kalsiyum Oksit

**Cm:** Santimetre

**CO<sub>2</sub>:** Karbon dioksit

**C-S-H:** kalsiyum silikat hidrat

**d:** Kiriş yüksekliği(milimetre)

**dak:** dakika

**f:** dayanım(Newton/milimetrekare)

**Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:** Demir Oksit

**g/cm<sup>3</sup>:** gram/santimetreküp

**Gr:** gram

**GYFC:** granüle yüksek fırın cürufu

**K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>:** Potasyum Karbonat

**K<sub>2</sub>O:** Potasyum Oksit

**kg/m<sup>3</sup>:** kilogram/metreküp

**KK:** Kalsiyum Kireci

**Köa:** kuru özgül ağırlık

**L:** İki destek arası mesafe (milimetre)  
**M:** Metre  
**M:** mol  
**MgO:** Magnezyum Oksit  
**Mm:** Milimetre  
**MÖ:** Milattan Önce  
**MPa:** Megapascal  
**N/mm<sup>2</sup>:** Newton/milimetrekaare  
**Na<sub>2</sub>O. nSiO<sub>2</sub>:** Sodyum Silikat  
**Na<sub>2</sub>O:** Sodyum Oksit  
**NaOH:** Sodyum Hidroksit  
**P:** Deneş presinden kırılma anında okunan yük değeri (Newton)  
**P<sub>k</sub>:** Kırılma yükü(Newton)  
**SiO<sub>2</sub>:** Silisyum Oksit  
**SO<sub>3</sub>:** Kükürt Trioksit  
**TiO<sub>2</sub>:** Titanyum Dioksit  
**UK:** uçucu kül  
**W<sub>0</sub>:** numunelerin kuru ağırlığı  
**W<sub>1</sub>:** numunelerin kuru yüzey doşgun ağırlığı  
**W<sub>2</sub>:** numunelerin sudaki ağırlığı

## 1. GİRİŞ

Tarihi yapıların asırlarca varlıklarını sürdürebilmesi ve günümüze ulaşabilmesini sağlayan en önemli öge, yapı taşlarını bir arada tutan harçlardır. Tarihi yapılar incelendiğinde horasan adı verilen harçların sıklıkla kullanıldığı görülmektedir (Yılmaz, 2010: 2). Türkiye’de ve çömlekçilikle ilgilenmiş diğer uygarlıklarda kullanımı yaygındır. Roma, Bizans, Selçuklu, Osmanlı dönemlerinde sıklıkla kullanıldığı bilinmektedir (Yılmaz, 2010: 3). Horasan; kırılmış ve öğütülmüş tuğla ve kiremit gibi pişmiş killere verilen addır. Horasan harcı ise tuğla kırığı veya tuğla tozu, kireç, bazen kum, su ve çeşitli katkı maddeleri içeren bir kireç harcıdır (Kertiş, 2021: 11). Kireç harçları, kirecin bulunmasından itibaren çimento bulununcaya kadar uzun yıllar boyunca kullanılmıştır. Kireç harçları hazırlanırken, kireç, agrega ve harcın özelliklerinin geliştirilmesi için çeşitli organik katkıları kullanılmıştır. Bu katkıları, yapının yapıldığı döneme ve bölgeye göre çeşitlilikler göstermiştir (Gür, 2019: 8-11).

Horasan harç ve sıvaları estetik görüntü, yüksek mukavemet, suya karşı yüksek direnç gibi avantajlara sahip olduğu için, Osmanlı döneminde de sıklıkla kullanılmıştır. Kemer, sarnıç, su kuyusu, çatı kaplama gibi uygulamalarda sıklıkla yararlanılmıştır. Bu yapıların asırlarca varlıklarını sürdürmesi, kullanılan harçların üstün özelliklere sahip olduğunun bir göstergesidir (Mavioğlu, 2011: 22). Bu harçlarda kullanılan malzemeler, bu malzemelerin harçta kullandığı miktarlar tecrübe ve deneyimlerle geliştirilmiştir. Horasan harçlarında kullanılan hammaddeler bilirse de içerdiği malzemelerin oranları ve harca kazandırdığı özellikleri, günümüze kadar ulaşarak yüksek mukavemete sahip olmaları hala araştırılmaktadır (Gökçen, 2021: 12).

Portland çimentosunun bulunuşuna kadar, kireç harçları yaygın olarak kullanılsa da çimentonun bulunmasıyla yerini çimento içeren harçlara bırakmıştır. Çimentonun temininin ve uygulanabilirliğinin kolay olması, özelliklerinin puzolan ve kimyasal katkı malzemeleriyle istenilen düzeyde geliştirilebilmesi, yüksek mukavemet vermesi, çabuk priz alması gibi avantajları sayesinde kullanımı yaygınlaşmıştır (Bulut, 2007: 5-6). Çimentonun bu avantajlarının yanında, üretiminin çevreye verdiği zararlar bulunmaktadır. Çimento üretimi yüksek oranda karbon salınımına neden olmaktadır. Dünyadaki toplam karbon % 7-8’i çimento üretiminden kaynaklanmaktadır. Dünyada en çok tüketilen yapı malzemesi olduğu düşünüldüğünde, çevreye verdiği zarar göz ardı edilemeyecek büyüklüktedir (Kara vd., 2018: 87). Ayrıca çimento içeren harçların, gözeneklerinin küçük olması ve geleneksel harçlara göre çok daha az olması,

yoğunluğunun fazlalığı, içeriğinde bazı bazik tuzlar ve alçı bulunması istenmeyen özelliklerdir. Çimento içeren harçlar; yoğunluğu ve ısı iletkenlik katsayısı yüksek olduğu için yoğuşmaya ve böylelikle de yapının nemlenmesine sebebiyet verebilmektedir. Çimento içeren harçlar, küçük gözeneklere sahip olduğu için, herhangi bir yolla yapıya gelen suyun buharlaşarak uzaklaşması zordur. Ayrıca çimentolu harçlarda; prizlenme reaksiyonu tamamlandıktan sonra, dekarbonizasyon adı verilen ayrışma reaksiyonları meydana gelmektedir. Bu ayrışma reaksiyonu çevresel koşullara ve hava şartlarına bağlı olarak 30-100 yıl arasında tamamlanmakta ve binanın ömrü dolmaktadır. Ömrü dolan yapılar güvenlik nedeniyle yıkılmaktadır. Oysa kireç harçları, karbondioksit varlığında tepkimeye girerek uzun sürede kalker oluşturmakta ve dayanımı gittikçe artmaktadır. Bu sayede yapı asırlarca varlığını sürdürebilmektedir (Uğur; Güleç, 2016: 89).

Çimentolu harçların dezavantajları düşünüldüğünde, kireç harçlarının özelliklerinin iyileştirilerek, uzun yıllar varlığını sürdürecektir harçların kullanılması yaygınlaştırılmalıdır. Bu sayede insanlığın çevreye verdiği zarar, ömrü dolan yapıların yıkılıp tekrar yapılması sırasındaki maddi zarar en aza indirilmeye çalışılmalıdır. Literatürde kireç içeren harçların özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmada, kireç harçlarına bitkisel katkı ve geopolimer içerikli katkı malzemeleri ilave edilerek, elde edilen harcın fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI

Kireç harcının içerisindeki malzemelerin karışım miktarları, bağlayıcı agrega oranları kullanıldığı bölgeye ve zamana göre farklılık göstermektedir. Bu bölümde, kireç içeren harçlar ve çalışmada harç üretimi için kullanılan malzemeler ile ilgili geçmişten günümüze kadar yapılmış olan deneysel çalışmalar incelenmiştir.

Böke ve arkadaşlarının 2004 yılında yaptığı çalışmada; bazı Bizans ve geç dönem yapıları ayrıca Ayasofya'da kullanılmış olan Horasan harçları incelenmiştir. Çalışma sonucunda harçlardaki kireç / tuğla tozu oranlarının 1/4 ile 1/2 aralığında olduğu saptanmıştır. Bursa'daki Ördekli Hamamı'nda yapılan incelemeler sonucunda ise; Horasan harçlarında kireç / tuğla kırıkları oranının 1/1 ile 1/2 aralığında olduğu anlaşılmıştır.

Eriç ise Horasan harçlarını üç sınıfa ayırmıştır. Bu sınıflar:

### 1. Geleneksel Horasan harcı

- a) Dinlendirilmiş kireç + Yumurta akı + Horasan pirinci + Su
- b) 1 Kireç kaymağı + 1 Yıkanmış kavrulmuş kum + ½ Alçı + Su
- c) 2 Kireç + 1 Kil + Bir miktar dişli kum + Bir miktar meşe külü + Su

### 2. Kum Horasan harcı

- a) Dövülmüş kireç + Yumurta akı + Kum + Horasan pirinci + Su

### 3. Lökün

- a) Dövme kireç + Üç ay suda çürütülmüş pamuk + Su
- b) Dövme kireç + Zeytinyağı + Keten elyafı + Su
- c) Dövme kireç + Kızgın zeytinyağı + Koyun yünü elyafı + Su

Mavi'nin 2000 yılında gerçekleştirdiği çalışmada; farklı malzeme ve karışım oranlarına sahip dokuz farklı türde numune üretilmiştir. Numuneler Tablo 2.1'de verilen karışım oranlarına göre üretilmiştir. Karışımlarda puzolan olarak öğütülmüş ponza taşı kullanılmıştır. Numunelerin 14, 28, 90, 180 ve 270 günlük mekanik ve fiziksel deneyleri gerçekleştirilmiştir.

**Tablo 2.1.** Mavi tarafından üretilen harçların karışım oranları

Kod	Kum (Cc)	Kireç (Cc)	Puzolan (Cc)	Akrilik (G)	Su İtici (G)	Çimento(Cc)	Kireç Suyu (MI)
KH	2,4	1	0	0	0	0	0
KPH1	2,4	1	15	0	0	0	0
KPH2	2,4	1	30	0	0	0	50
KAH1	2,4	1	0	2,7	2,7	0	400
KAH2	2,4	1	0	5,4	0	0	0
KAH3	2,4	1	0	10,8	0	0	0
KÇH	2,4	1	0	0	0	30	0
KAPH	2,4	1	30	10,8	0	0	50
KASH	2,4	1	0	10,8	0	0	0

**Kaynak:** (Mavi, 2000)

En yüksek eğilme dayanımları; 0.43, 0.5, 0.75, 0.88, 0.81 MPa olmak üzere sırasıyla 14, 28, 90, 180, 270. günlerde kaydedilmiştir. En yüksek basınç dayanımları ise; 0.72, 0.82, 1.38, 1.95, 1.69 MPa olmak üzere sırasıyla 14, 28, 90, 180 ve 270. günlerde gözlemlenmiştir. Yüksek dayanım değerlerine sahip olan numuneler sadece kireç ve kum içeren KH numunesi, kireç, kum ve akrilik içeren KAH3 numunesi ve kireç, kum, akrilik ve puzolan içeren KAPH numunesi olarak saptanmıştır.

Penelis, Selanik'teki Bizans yapılarında kullanılan harçları incelemiştir. Bu harçların üretiminde kullanılan malzemelerin karışım oranları ile bazı özelliklerini belirlemiştir. Harçlarda kullanılmış olan malzeme oranları Tablo 2.2'de verilmiştir. Gerçekleştirilen deneylerin sonucu incelendiğinde, en fazla eğilme dayanımı K4, basınç dayanımı K3 ve elastisite modülü değeri K8 numunelerine aitken, en az eğilme dayanımı K19, basınç dayanımı K18 ve elastisite modülü değeri K1 numunelerine ait olarak belirlenmiştir (Pusat, 2002).

**Tablo 2.2.** Penelis'in tarafından belirlenen Bizans yapılarındaki malzemelerin karışım oranları

Puzolan Katkısı	Harç Tipi	Ağırlığa Göre Karışım Oranları						Yoğunluk kg/dm <sup>3</sup>	
		Kireç	Puzolan	Kum		Tuğla Kırıntısı			Su (kg)
				Mak Boyut (mm)	Mak Boyut (mm)	Mak Boyut (mm)	Mak Boyut (mm)		
				2	6	2	6		
Santorin	K1	1	1	6	0	0	0	2,24	1,86
	K2	1	1	3	0	3	0	2,7	1,88
	K3	1	1	3	0	0	3	2,42	1,87
	K4	1	1	0	6	0	0	1,92	1,94
	K5	1	1	0	6	0	0	1,86	1,93
	K6	1	1	3	0	0	3	2,2	1,84
	K7	1	1	0	5	0	1	1,97	1,9
	K8	1	1	0	3	0	3	2,24	1,86
Skydra	K18	1	1	6	0	0	0	2,17	1,94
	K19	1	1	0	6	0	0	1,67	2,02

**Kaynak:** (Pusat, 2002)

Yine Penelis tarafından yapılan çalışma kapsamında; Osmanlı dönemine ait 400 yıllık tarihi yapı incelenmiştir. Yapı üzerinde tahribatlı ve tahribatsız deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneylerin sonucunda; harcın eğilme dayanımı 0.36 MPa, basınç dayanımı 1.28 MPa, dinamik elastisite modülü değerleri 1150 MPa olarak saptanmıştır (Pusat,2002).

Karaveziroğlu tarafında gerçekleştirilen deneylerle, Horasan harçlarında kullanılan malzemelerin uygun karışım oranları saptanmıştır. Bu oranlar Tablo 2.3'te yer almaktadır. Deneylerin sonucunda 28 günlük eğilme dayanımı 0.31 MPa, basınç dayanımı 1.10 MPa, elastisite modülü değeri ise 1849 MPa olarak belirlenmiştir.

**Tablo 2.3.** Karaveziroğlu'nun yapmış olduğu çalışmaya göre malzeme karışım oranları

Kireç	Puzolan	Tuğla Kırıntısı	Kum	Su
1	1	3	3	1,87

**Kaynak:** (Pusat, 2002)

Baronio, Binda ve diğerleri, horasan harcının özelliklerini etkileyen en önemli faktörün kil sıcaklığı olduğunu belirtmiştir. Kil, kuvars ve feldspat minerallerinin 600°C ile 900°C sıcaklıkta pişirilmesiyle tuğla gibi malzemeler elde edilmektedir. Killer sıcaklık derecesine ve mineralojik yapılarına göre değişik puzolanik özellikler kazanmaktadır.

Lee vd. 600°C ile 900°C'de kalsinasyon işlemi gerçekleştirildiğinde, kil minerallerinin yapısının bozularak amorf alümina silikatların oluştuğunu belirtmiştir. Bu sayede pişmiş killer

puzolanik özellikler kazanmaktadır. Kalsinasyon sıcaklığı 900°C'yi aştığı takdirde mullit, kristobalit gibi kararlı minerallerin ortaya çıkmasıyla puzolanik özellik yok olmaktadır.

Pusat farklı malzeme ve karışım oranlarıyla on farklı horasan harcı üretmiştir. Bu karışımda kullanılan malzemelerin oranları Tablo 2.4'te verilmiştir. Tablo 2.4'teki numunelerin 90 gün sonunda eğilme ve basınç dayanımları tespit edilmiştir. Numunelerin en yüksek eğilme dayanımları 0,5 MPa olarak saptanırken, en yüksek basınç dayanımları 3,1 MPa olarak saptanmıştır (Pusat, 2002).

**Tablo 2.4.** Pusat'ın ürettiği Horasan harçlarındaki malzemelerin karışım oranları

Harç Tipi	Su	Kireç	Standart Kum	Pişmiş Toprak Kırıntısı	Yüksek Fırın Cürufu	Pişmiş Toprak Tozu
A	0,46	1	3	0	0	0
B	1,4	1	0	3	0	0
C10	0,76	0,9	3	0	0,1	0
C20	0,76	0,8	3	0	0,2	0
C30	0,76	0,7	3	0	0,3	0
C40	0,76	0,6	3	0	0,4	0
D10	0,76	0,9	3	0	0	0,1
D20	0,76	0,8	3	0	0	0,2
D30	0,76	0,7	3	0	0	0,3
D40	0,76	0,6	0	0	0	0,4

**Kaynak:** (Pusat, 2002)

Akbulut'un yapmış olduğu çalışmada; on adet horasan harcı üretilmiştir. Bu harçlarda agrega olarak silis esaslı kum kullanılmıştır. Harçların beşi lifli, beşi ise lifsiz olarak üretilmiştir. Tuğla pirincinin agrega olarak kullanılmasıyla karışımlar da üretilmiştir. Bu karışımların oranı Tablo 2.5'te verilmiştir. Çalışmanın sonucunda, puzolan ihtivasının harcın dayanımlarında olumlu etkileri olduğu gözlemlenmiştir. Lif ihtivasının, mekanik özellikleri iyileştirdiği, rötreyi azalttığı, tuğla pirincinin horasan harçlarının mekanik özelliklerini azalttığı tespit edilmiştir (Akbulut, 2006).

**Tablo 2.5.** Akbulut'un ürettiği horasan harçlarının karışım oranları

Harç	Kodu	Ağırlıkça Malzeme Oranları					
		Agrega	Kireç	Yüksek Fırın Cürufu	Su	Lif	
Silis Esaslı Kum	Lifsiz	SC	3	1	0	0,75	0
		SSF	3	0,7	0,3	0,65	0
		SFA	3	0,7	0,3	0,625	0
		SBF	3	0,7	0,3	0,6	0
		SBP	3	0,7	0,3	0,625	0
	Lifli	SCF	3	1	0	0,75	0,01
		SSFF	3	0,7	0,3	0,66	0,01
		SFAF	3	0,7	0,3	0,635	0,01
		SBFF	3	0,7	0,3	0,61	0,01
		SBPF	3	0,7	0,3	0,635	0,01
Tuğla Kırığı Agregası	Lifsiz	BC	3	1	0	0,97	0
		BSF	3	0,7	0,3	0,79	0
		BFA	3	0,7	0,3	0,71	0
		BBF	3	0,7	0,3	0,719	0
		BBP	3	0,7	0,3	0,709	0
	Lifli	BCF	3	1	0	0,753	0,01
		BSFF	3	0,7	0,3	0,825	0,01
		BFAF	3	0,7	0,3	0,74	0,01
		BBFF	3	0,7	0,3	0,748	0,01
		BBPF	3	0,7	0,3	0,717	0,01

**Kaynak:** (Akbulut, 2006)

Böke vd. tarafından gerçekleştirilen araştırmada; Osmanlı dönemi hamamlarından bazılarında kullanılan harçlar irdelenmiştir. İncelenen harçların üretiminde; tuğla tozu, tuğla parçaları ve kireç kullanıldığı belirlenmiştir. Tuğla tozunun yüksek puzolanik özelliklere sahip olduğu anlaşılmış ve harçlardaki kireç / tuğla oranının 1/3 olduğu sonucuna varılmıştır (Böke ve diğ., 2006).

Özkaya ve Böke tarafından yapılan araştırma kapsamında Roma dönemine ait Serapis tapınağında kullanılmış olan harçların fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Serapis tapınağının yapımında kullanılan harçların üretiminde, iri ve ince agregaların kullanıldığı tespit edilmiştir. İncelenen harçlarda kireç/agrega oranının ağırlıkça 1/4 oranında olduğu belirlenmiştir (Özkaya ve Böke, 2009).

Tarihi yapılarda kullanılmış olan kireç harçları incelenerek basınç dayanımlarının 0,5-2,0 N/mm<sup>2</sup> arasında değiştiği tespit edilirken, hidrolik kireç kullanılan harçlardaki basınç dayanımı değerlerinin ise 2,0-15 N/mm<sup>2</sup> aralığında olduğu belirlenmiştir. (Valek ve Veiga, 2005; Kurugöl ve Güleç, 2010). İncelenen harçların birim hacim ağırlıkları üretimde kullanılan kireç ve puzolanlara

göre 1,5-2,1 g/cm<sup>3</sup> aralığında gözlemlenirken, harçların poroziteleri %18-45 olarak değişmektedir (Kurugöl ve Güleç, 2010).

Aruntaş ve Yılmaz'ın gerçekleştirdiği deneysel çalışmada; Portland çimento kullanımının horasan harcının özelliklerine etkisi saptanmıştır. Bu doğrultuda karışımlar kireç, tuğla tozu, tuğla pirinci, Portland çimento ve odun külü kullanılarak üretilmiştir. Üretilen numunelerin özellikleri üç aşamada belirlenmiştir. İlk aşamada, harç üretiminde kullanılacak bağlayıcı oranları belirlenmiştir. İkinci aşamada standart kum ve tuğla pirincinin agrega olarak kullanılmasıyla harç üretimi gerçekleştirilmiştir. Üçüncü aşamada ise; gerçekleştirilen deneyler sonucunda en iyi verilere sahip olan karışımlara odun külü ihtiva edilerek harç üretilmiş ve bu harca fiziksel ve mekanik deneyler uygulanmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde, en yüksek dayanımlara sahip numunelerin tuğla tozu, çimento, kireç ve standart kum kullanılarak üretilen numuneler olduğu tespit edilmiştir. En iyi değerlere sahip harcın üretiminde %65 tuğla tozu, %10 kireç ve %25 çimento kullanılmıştır. (Aruntaş ve Yılmaz, 2010).

Özgünler ve diğerleri tarafından Yedikule Kara Surları T4 kulesinde kullanılmış olan harçlar deneylere tabi tutulmuştur. Gerçekleştirilen araştırmada, harç üretiminde sönmüş kireç, tuğla kırığı parçaları, tuğla tozu, kireçtaşı parçacıkları ve dere kumu kullanıldığı saptanmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda harçların porozite değerlerinin %22-38 arasında olduğu ve çoğunluğunun makro boyutlarda olduğu belirlenmiştir. Bağlayıcı/agrega oranları 1/2 ve 1/3 arasındayken, basınç dayanımı değerlerinin 4-6 MPa aralığında olduğu tespit edilmiştir (Özgünler ve diğ., 2010).

Gürdal ve diğerlerinin yürüttüğü araştırma doğrultusunda İstanbul'daki Erken Bizans Dönemine ait yapılarda kullanılmış olan horasan harçlarının özellikleri incelenmiştir. Asit kaybı analizi gerçekleştirilerek bağlayıcı/agrega oranı belirlenmeye çalışılmıştır. Sonuçta bağlayıcı/agrega değerlerinin 1/2 ile 1/4 aralığında bulunduğu gözlenmiştir (Gürdal ve diğ., 2011).

Mavioğlu'nun gerçekleştirmiş olduğu çalışma kapsamında horasan harcı üretiminde kireç, tuğla kırığı ve dere kumu kullanmıştır. Horasan harcı üretimi için ince öğütülerek elde edilmiş iki farklı puzolanik katkı malzemesi kullanılmıştır. Üretilen harçlar fiziksel ve mekanik deneylere tabi tutulmuştur. Gerçekleştirilen deneylerin sonucunda; Numunelerin birim hacim ağırlık değerleri 1,40-1,55 g/cm<sup>3</sup> aralığında tespit edilmiştir. Harcın gözeneklilik değerlerinin arttıkça ultrases geçiş hızında azalma gözlemlenmiştir. Ultrases hızlarının zamana bağlı olarak arttığı belirlenmiştir. Harç

numunelerinin 28,60 ve 90. günlerinde eğilme ve basınç dayanımları belirlenmiş ve sonuçta dayanımların gittikçe arttığı saptanmıştır. İnce öğütülerek elde edilen puzolanik katkı malzemeleri kullanılarak üretilen horasan harçlarının dayanımları, katkı malzemesi kullanılmadan üretilen numunelerin dayanımlarına göre daha yüksek olarak belirlenmiştir. Ponza taşı tozu kullanılarak üretilen numunelere ve tuğla tozu kullanılarak üretilen numunelere 90 günün sonunda yapılan basınç dayanımı deneyleri sonucunda, Ponza taşı kullanılan numunelerin basınç dayanımlarında katkısız numunelerin basınç dayanımına göre %164 artış gözlemlenirken, tuğla tozu kullanılan numunelerin basınç dayanımlarında katkısız numunelerin basınç dayanımlarına göre %102 artış saptanmıştır. Bunun sebebinin malzemenin inceliğinin artmasına bağlı olduğu öne sürülmüştür. Numunelerin eğilme dayanımları artış gösterse de artış basınç dayanımlarındaki artışa göre daha düşük olarak belirlenmiştir (Mavioğlu, 2011).

Güney tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Kahta Kalesi'nin yığma duvarlarının yapımında kullanılan kireç harçları üzerinde araştırma yapılmıştır. Yapılan basınç dayanımı deneyleri sonucunda ortalama olarak 7,4 MPa dayanım saptanmıştır. Gerçekleştirilen deney kapsamında harç üretimi için, puzolanik malzeme olarak metakaolin, uçucu kül ve tuğla tozu kullanılmıştır. Kontrol numunelerine göre mekanik dayanımın arttığı belirlenmiştir (Güney, 2012).

Işık ve Kapur tarafından gerçekleştirilen çalışmada Konya Şerafettin Cami'nden, Ankara Tacettin Dergahı'ndan ve Ankara Leblebicioğlu Cami'nden alınmış olan harç örnekleri incelenmiştir. Bu örnekler üzerinde deneyler gerçekleştirilerek fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlenmiştir. Araştırma sonucunda bu harçların yüksek oranda fosfor içerdiği (kemik, saç, yumurta kabuğu gibi katkıların kullanılmış olması sebebiyle) saptanmıştır (Işık ve Kapur, 2012).

Özgen tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmalar kapsamında tarihi yapılarda sıklıkla kullanılmış olan 12 adet kireç harçları numuneleri üretilmiş ve basınç dayanımlarının araştırılması amaçlanmıştır. Bu numunelerin üretiminde arpa suyu, dişbudak ağacı yaprağı suyu ve yumurta akı olmak üzere 3 farklı türde organik katkı malzemesi kullanılmıştır. Numunelerin kapalı bir ortamda 28 gün bekletilmesinin ardından basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerin sonucunda, dişbudak ağacı yaprağı suyu katılarak üretilen harcın basınç dayanımının diğer numunelerin basınç dayanımlarından daha yüksek olduğu saptanmıştır (Özgen, 2012).

Işıkdag ve Topçu tarafından gerçekleştirilen çalışmada, uçucu kül ihtiva eden horasan harcı üretilmiş ve harcın özelliklerine etkisi incelenmiştir. Tablo 2.6'da görüldüğü gibi karışımların

üretiminde kireç ve su oranı sabit kalırken, %10, %20, %30 ve %40 olacak şekilde uçucu kül, kiremit kırığı ve tozunun yerine karışıma eklenmiştir (Işıkdag ve Topçu, 2013). Yapılan basınç dayanımı değerleri sonucunda karışımda kullanılan uçucu kül miktarının artmasıyla numunelerin basınç dayanımlarının arttığı gözlemlenmiştir. Deneyler sonucunda gözlemlenen basınç dayanımlarından en yükseği 8 MPa olmak üzere belirlenmiştir (Işıkdag ve Topçu, 2013).

**Tablo 2.6.** Işıkdag ve Topçu tarafından üretilen harçlarda kullanılan karışım oranları

puzolan	karışım kodu	uçucu kül	kiremit kırığı	kiremit tozu	kireç	su
0-4 mm kiremit kırığı	CTFA0	0	0	0	1	2
	CTFA10	0,2	1,8	0	1	2
	CTFA20	0,4	1,6	0	1	2
	CTFA30	0,6	1,4	0	1	2
	CTFA40	0,8	1,2	0	1	2
0-4 mm kiremit tozu	TPFA0	0	0	2	1	2
	TPFA10	0,2	0	1,8	1	2
	TPFA20	0,4	0	1,6	1	2
	TPFA30	0,6	0	1,4	1	2
	TPFA40	0,8	0	1,2	1	2

**Kaynak:** (Işıkdag ve Topçu, 2013)

Yine Işıkdag ve Topçu tarafından gerçekleştirilen bir diğer çalışmada horasan harcı üretiminde yüksek fırın cürufu kullanımının harcın özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Gerçekleştirilen basınç dayanımı deneyleri sonucunda, karışımda kullanılan yüksek fırın cürufu miktarının artmasıyla numunelerin basınç dayanımlarının arttığı anlaşılmıştır. Deneyler sonucunda en yüksek basınç dayanımına sahip olan numunenin, kiremit tozu ve %40 yüksek fırın cürufu içeren numune olduğu tespit edilmiştir (Işıkdag ve Topçu, 2013).

Topçu vd. tarafından gerçekleştirilen araştırma kapsamında geliştirilmiş perlit katkılı horasan harçları üretilmiştir. Karışımların üretiminde 0-2 mm aralığındaki dane boyutuna sahip kiremit tozu yerine hacimce %0-10-20-30-40 oranında geliştirilmiş perlit kullanılmıştır. Yapılan dayanım deneyleri sonucunda, karışımdaki perlit miktarının artmasıyla numunelerin eğilme ve basınç dayanımlarının azaldığı gözlemlenmiştir (Topçu ve diğ., 2015).

Dayı ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışma kapsamında Osmanlı dönemine ait hamamdan alınan harç numuneleri incelenmiştir. Bu harçların fiziksel, kimyasal, mekanik ve mineralojik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla deneyler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen testler sonucunda bağlayıcı/agrega oranları 1/1 ile 1/3 aralığındayken, basınç dayanımı ortalamasının 2,5 MPa olarak saptanmıştır. Deneyler sonucunda numunelerin birim ağırlıklarının

ve basınç dayanımı değerlerinin düşük olduğu tespit edilmiştir. Numunelerin boşluklu bir matrise sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca yüksek elastikiyete sahip oldukları saptanmıştır (Dayı ve diğ., 2015).

Oğuz vd. tarafından yapılan çalışma doğrultusunda, Roma, Bizans ve Selçuklu Dönemlerine ait olan yapılardan harç örnekleri alınarak incelenmiştir. Numunelere fiziksel, kimyasal, mekanik ve mineralojik testler yapılarak özellikleri belirlenmiştir. Protein ve yağ analizleri sonucunda numunelerin bazılarında % 61 oranında protein, bazılarında % 66 yağ, bazılarında % 44 oranında hem protein hem de yağ tespit edilmiştir. Gerçekleştirilen mikro yapı analizleri sonucunda mekanik özellikleri iyileştirmek amacıyla organik katkıları (bitkisel, hayvansal) kullanıldığı belirlenmiştir (Oğuz ve diğ., 2015).

Stefanidou ve diğerlerinin yaptığı bir çalışma kapsamında çeşitli elyaf katkılarıyla kireç harçları üretilmiştir. Bağlayıcı/agrega oranı ağırlıkça 1/3 olarak seçilmiş, dane boyutu 0-4 mm olan doğal kum ve beş farklı lif çeşidi kullanılarak numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Lifler ağırlıkça %1 oranında kullanılmış ve 40x40x160 mm boyutlarda numuneler elde edilmiştir. Harçta kenevir lifi kullanımının numunelerin dayanımlarını arttırdığı tespit edilmiştir (Stefanidou ve diğ., 2016).

Gürhan vd. tarafından gerçekleştirilen araştırma doğrultusunda, Aydın Eski Hamamı'ndan harç örnekleri alınarak incelenmiştir. Alınan Horasan harcı örneklerinin birim ağırlıklarının 1,2-1,4 g/cm<sup>3</sup> aralığında ve porozite oranının %47-53 aralığında olduğu belirlenmiştir (Gürhan ve diğ., 2017)

Canbaz ve Güler tarafından yağlı kireç ve hidrate kireç kullanarak iki farklı türde horasan harcı üretilmiştir. Üretilen numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla deneyler gerçekleştirilmiştir. Birim ağırlık sonuçları incelendiğinde, yağlı kireç kullanılarak üretilen numunelerin hidrate kireçle üretilen numunelere göre % 2,5 daha fazla değere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ultrases geçiş hızları sonuçlarına göre yağlı kireçli harçların geçiş hızı değerlerinin yaklaşık % 80 daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Hidrate kireç kullanımıyla numunelerin eğilme dayanımı azalırken, basınç dayanımları artmıştır (Canbaz ve Güler, 2017).

Aktürk ve arkadaşlarının yürüttüğü çalışma doğrultusunda, farklı türde aktivatörler ile aktive edilen yüksek fırın cürufu katkılı harçlar üretilmiş ve numunelerin dayanımları, hidrolik kireç esaslı harçların dayanımlarıyla karşılaştırılmıştır. Numunelerin üretiminde yüksek fırın cürufu ve aktivatör olarak da sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır. Üretilen

numunelerin dayanımları hidrolik kireç esaslı harçların dayanımlarıyla karşılaştırılmıştır. Hidrolik kireçle üretilen numunelerin 28 günlük eğilme dayanımı ortalama 1,0 MPa, basınç dayanımı ise ortalama 2,3 MPa olarak tespit edilmiştir (Aktürk ve diğ., 2017).

Kalkan ve Gündüz tarafından gerçekleştirilen araştırmada, numune üretiminde farklı boyutlara sahip agregalar, sönmüş kireç ve doğal kalsiyum sülfat anhidrit bağlayıcı malzeme, kullanılmıştır. Üretilen numunelerde çinko stearat, lif ve kül katkı malzemesi olarak kullanılmış ve böylelikle kompozit harçlar üretilmiştir. Numuneler üzerinde uygulanmış olan deneyler sonucunda olumlu sonuçlar elde edilmiştir (Kalkan ve Gündüz, 2017).

Diker ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen araştırma kapsamında bitkisel katkı malzemeleri kullanılarak harç numuneleri üretilmiştir. Numunelerin mekanik özellikleri incelenerek katkıların etkisi tespit edilmiştir. Numunelerin üretiminde katkı malzemesi olarak dışbudak ağacının yaprağı ile karaağaç kabuğu kullanılmıştır. Yapılan mekanik deneyler sonucunda, bu organik katkı maddelerinin numunelerin mekanik özelliklerini geliştirdiği gözlemlenmiştir (Diker ve diğ., 2020).

Kılıç ve Şimşek'in yaptıkları çalışma doğrultusunda, farklı türde lifler içeren horasan harçları üretilmiş ve özellikleri karşılaştırılmıştır. Harç numunelerinin üretiminde; kenevir lifi, keçi kılı ve polipropilen elyaf, hidrolik kireç, tuğla kırığı, standart kum ve su kullanılmıştır. Eklenen lifler %0,2- 0,4-0,6-0,8-1 oranlarında değişen oranlarda kullanılmıştır. Ayrıca iki farklı boyutta tuğla kırığı kullanılarak boyut değişikliğinin lifli harcın özelliklerine etkileri de incelenmiştir. Kullanılan tuğla kırıkları 0-4 mm ve 0-2 mm olarak seçilmiş ve harç üretiminde aynı miktarlarda kullanılmıştır. Harç numunelerine yapılan fiziksel ve mekanik deneyler sonucunda, harç üretimlerinde kullanılan tüm liflerin, harcın özelliklerini iyileştirdiği gözlenmiştir (Kılıç ve Şimşek 2021).

Kılıç ve Gökçen'in gerçekleştirdikleri çalışma kapsamında; farklı tür ve farklı oranlarda agrega kullanarak horasan harcı üretmişler ve bu agregaların harcın mekanik ve fiziksel özelliklerine olan etkilerini incelemişlerdir. Harç üretiminde; tuğla kırığı, kum, hidrolik kireç ve su kullanılmıştır. Üretilen harçlara taze halde iken kıvam tayini deneyi yapılırken sertleşmiş örnekler üzerinde birim hacim ağırlık, ultrases geçiş süresi, eğilme ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sertleşmiş hal deneyleri numunelerin 28, 240 ve 365. günlerinde gerçekleştirilmiştir. Yapılan taze hal deneyleri sonucunda yayılma için en iyi değer %75 oranında

tuğla kırığı kullanılan numuneye ait olarak belirlenmiştir. Tuğla kırığı miktarının artmasıyla harcın kıvamında ve ultrases geçiş sürelerinde azalmalar gözlemlenmiştir. Tuğla oranındaki artışlar eğilme ve basınç dayanımlarını arttırsa da ileriki yaş dayanımlarında azalmalar saptanmıştır (Kılıç ve Gökçen 2021).

Kılıç tarafından yapılan çalışmada; harç üretiminde yumurta akı kullanılmış ve bu katkının harcın özelliklerine olan etkileri belirlenmiştir. Karışıma eklenen yumurta akı, kireç ağırlığının %5, %10, %15, %20 ve %25'i olacak şekilde tercih edilmiştir. Taze haldeki numunelere kıvam tayini deneyi, sertleşmiş haldeki numunelere ise birim hacim ağırlık, ultrases geçiş hızı, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı testleri gerçekleştirilmiştir. Sertleşmiş hal deneyleri numunelerin 28. Gününde gerçekleştirilmiştir. Yapılan kıvam tayini deneyleri sonucunda, üretimlerinde %5 ve %10 oranlarında yumurta akı kullanılan numunelerin yayılma miktarının daha fazla olduğu belirlenmiştir. Kullanılan yumurta akı arttıkça harcın hacmi artmış ve birim hacim ağırlık değerleri düşmüştür. Karışımındaki yumurta akı ağırlığı arttıkça 28 günlük eğilme ve basınç dayanımlarında azalmalar gözlemlenmiştir. Özellikle basınç mukavemetlerinde kayda değer azalmalar gözlemlenmiştir. Yapılan deneylerin sonuçlarına göre horasan harcına eklenen yumurta akının, kireç ağırlığının %5'ini geçmemesi önerilmiştir (Kılıç 2021).

Lea (1940) ve Boynton (1966) tarafından kireç harçlarıyla ilgili yapılan çalışmaların sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

Tarihi yapılarda kullanılmış olan kireç harçlarının üretiminde; kireç ve agrega kullanılmıştır. Kireç harçları iki sınıfa ayrılabilir. Bunlar; hidrolik ve hidrolik olmayan harçlardır (Lea 1940). Hidrolik olmayan harçlar saf kireç ve puzolanik olmayan agregaların karıştırılmasıyla üretilir. Kireç havadaki karbondioksit ile birleşerek kalsiyum karbonata ( $\text{CaCO}_3$ ) dönüşüp sertleşmektedir (Boynton 1966). Hidrolik harçlar ise hidrolik kireç kullanılarak veya saf kirece puzolanik agregalar eklenerek üretilmektedir (Lea 1940; Boynton 1966). Hidrolik harçlar, içerdikleri kalsiyum silikatların ve kalsiyum alüminatların suyla reaksiyonu sonucunda, kalsiyum silikat-hidrat (C-S-H) ve kalsiyum-alüminathidratların (C-A-H) açığa çıkmasıyla sertleşmektedir (Lea 1940). Hidrolik harç üretiminde puzolanik agrega kullanılmışsa kireç puzolanlar ile tepkimeye girerek kalsiyum-silikat-hidrat ve kalsiyum-alüminat-hidratlar açığa çıkmaktadır (Lea 1940). Bu ürünlerin meydana gelmesi hidrolik harçların daha yüksek dayanım ve dayanıklılığa sahip olmasını sağlamaktadır (Lea 1940).

Cachim vd.'nin gerçekleştirdikleri çalışma kapsamında; harç üretiminde hidrolik kireç ve farklı oranlarda metakaolin kullanılmıştır. Sertleşmiş halde numunelerin 7, 28, 90 ve 360. günlerinde mekanik ve fiziksel özellikleri belirleyebilmek için deneylere tabi tutulmuştur. Deney sonuçları incelendiğinde %20 ve %30 oranlarında metakaolin eklenmesi, numunelerin basınç dayanımlarında artış sağlamıştır. En yüksek basınç dayanımı değeri %20 oranında metakaolin eklenerek üretilen numunelerde tespit edilmiştir. Numunelerin 28 günlük basınç dayanımı sonuçları 12.8-17.5 MPa aralığındayken, 90 günlük sonuçlar 14.5-20.0 MPa aralığında gözlenmiştir. Numunelerde farklı zamanlarda oluşan karbonizasyon, hidratasyon ve puzolanik reaksiyonlar numunelerin dayanımlarını doğrudan etkilemiştir (Cachim ve diğ. 2010).

Grist vd.'nin gerçekleştirdiği çalışma kapsamında; hidrolik kireç kullanılarak hidrolik harçlar üretilmiştir. Bu harçların dayanımlarını yükseltmek amacıyla katkı malzemesi olarak; silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve metakaolin eklenmiştir. Sertleşmiş numuneler 28. ve 56. günlerinde fiziksel ve mekanik deneylere tabi tutulmuştur. Deneylerin sonucunda 28 gün suda bekletilen silis dumanı kullanılarak üretilen numunenin basınç dayanımı 35.7 MPa olarak belirlenmiştir. Aynı numunenin 56 günlük basınç dayanımının 37.5 MPa'a ulaştığı gözlenmiştir. Birkaç farklı puzolanın birlikte kullanılmasıyla üretilen numunelerin 28. günlerindeki basınç mukavemetleri 30 MPa'ı aşmıştır. Ayrıca farklı su/bağlayıcı oranları kullanılarak da numuneler üretilmiştir. Bu numuneler üzerinde yapılmış olan testlerin sonucunda su/bağlayıcı oranı arttıkça karbonizasyonun arttığı gözlemlenmiştir (Grist ve diğ. 2015).

Şimşek'in yaptığı araştırma kapsamında tarihi yapıların duvarlarının güçlendirilmesi amacıyla tamir harcı üretilmiştir. Üretimde hidrolik kireç, volkanik kül, farklı oranlarda tuğla kırığı ve kum kullanılmıştır. Bu sayede yüksek dayanıma sahip tamir harcı üretimi amaçlanmıştır. Sertleşmiş haldeki numunelerin 7 ve 28. günlerindeki basınç dayanımları belirlenmiştir. Numunelerin 7. günlerindeki en fazla basınç mukavemeti, 9.39 MPa olarak etüvde bekletilen, bağlayıcı/agrega oranı 1.5/1 olan numunelerde saptanmıştır. 28. Günlerindeki basınç dayanımlarının en yükseği 4.52 MPa olarak oda koşullarında bekletilen bağlayıcı/agrega oranı 1.5/1 olan numunelerde saptanmıştır. Karışımda kullanılan agregaların dane boyutlarının numunelerin basınç dayanımlarını önemli ölçüde etkilediği sonucuna varılmıştır. Yüksek sıcaklığın ve bağıl nemin numunelerin mekanik özelliklerini iyileştirdiği gözlemlenmiştir (Şimşek 2018).

Vavricuk ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği araştırmada; harç numuneleri üretiminde hidrolik kireç ve metakaolin kullanılmıştır. Kullanılan metakaolin %10-30 aralığında değişen oranlarda eklenmiştir. Sertleşmiş haldeki numuneler 28, 56, 90 ve 900 günlük fiziksel, kimyasal ve mekanik deneylere tabi tutulmuştur. Harç üretimleri sırasında metakaolin katkısı arttıkça su oranının artırılması gerektiği gözlemlenmiştir. Diğer taze harç özelliklerinde değişim gözlenmemiştir. Yapılan deneylerin sonucunda metakaolin katkısının numunelerin basınç dayanımını arttırdığı saptanmıştır. Metakaolin miktarının artmasıyla numunelerin porozitesi artmış, ortalama gözenek büyüklüğü azalmıştır. Katkisiz numunelere göre metakaolin katkısının numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirdiği belirlenmiştir (Vavricuk ve diğ. 2018).

Ruslan vd. tarihi yapıların onarımında kullanılmak üzere tamir harcı üretimi amacıyla; hava kirecinin özelliklerini iyileştirmek amacıyla katkı malzemesi olarak kaolin ve metakaolin kullanmıştır. Numuneler üzerinde kıvam, vicat, fiziksel ve mekanik deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarında karışıma eklenen katkıların, harcın priz süresini kısalttığı, poroziteyi azalttığı, su emme oranını azalttığı, dayanımı arttırdığı belirlenmiştir (Ruslan ve arkadaşları; 2018).

Özdemir tarafından yapılmış olan araştırma kapsamında, uçucu kül, kil ve kireç içeren numuneler üretilmiş ve numuneler sertleştikten sonra eğilme ve basınç mukavemetleri belirlenmiştir. Deneyler sonucunda kaydedilen basınç mukavemetlerinin en yükseği 10,01 MPa iken, en yüksek eğilme dayanımı 2,39 MPa olarak belirlenmiştir. Çalışmanın sonucunda elde edilen sonuçlara göre, karışıma uçucu kül eklenmesinin numunelerin özelliklerini iyileştirdiği ve harç üretiminde kullanılabileceği anlaşılmıştır (Özdemir, 2007)

Beydemir'in yürüttüğü çalışma kapsamında; silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu katkılı kireç harçları üretilmiştir. Katkı malzemeleri kireç ağırlığının %30'u olacak şekilde eklenmiştir ve dört farklı türde numune elde edilmiştir. Agregata olarak standart kum kullanılmıştır. Sertleşmiş haldeki numunelerin 7, 28 ve 365. günleri sonundaki eğilme ve basınç mukavemetlerinin belirlenmesi amacıyla numuneler deneylere tabi tutulmuştur. Katkı malzemelerinin harcın özelliklerine olan etkileri araştırılmıştır. Yapılan deneylerin sonucunda harca eklenen puzolanların, taze ve sertleşmiş haldeki harçların özelliklerini iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Belirli oranlarda harca eklenmesi ise numunelerin eğilme ve basınç dayanımlarını arttırmıştır (Beydemir, 2007).

Gündeşli'nin gerçekleştirdiği araştırmada; doğal ve yapay puzolanların ne olduğu, nasıl elde edileceği, yapı sektöründe kullanımının etkileri irdelenmiştir. Bu puzolanların çimentoya veya doğrudan betona eklenmesinin, üretilen betonun özelliklerine nasıl etkileri olduğu, ne oranlarda kullanılması gerektiği araştırılmıştır. Bu kapsamda, puzolanlarla ilgili yapılmış olan çalışmalar irdelenmiştir. Yapılan kaynak taramaları sonucunda, bu katkı malzemelerinin özelliklerinin araştırılarak, yapı sektöründe kullanımlarının incelenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır (Gündeşli, 2008).

Mavioğlu'nun yürüttüğü çalışma kapsamında; farklı katkı malzemeleri eklenerek tamir harcı olarak kullanılmak amacıyla horasan harcı üretilmiş ve malzemelerin harcın özelliklerine etkileri incelenmiştir. Üretimde kullanılan malzeme ve oranlarıyla elde edilen harçlarla 3 çeşit seri elde edilmiştir. İlk seri üretiminde; saf kireç, tuğla kırığı ve dere kumu kullanılırken ikinci ve üçüncü seride ise aynı malzemeler kullanılsa da bağlayıcının bir kısmıyla iki farklı tipte ince öğütülmüş puzolanik katkı malzemesinin yer değiştirmesi suretiyle üretim gerçekleştirilmiştir. Sertleşmiş numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneyler sonucunda, üretiminde saf kireç, tuğla kırığı, dere kumu kullanılan harçların, tuğla kırığının puzolanik özelliklere sahip olmasından dolayı, yüksek dayanımlı ve düşük yoğunluklu olduğu belirlenmiştir. Ayrıca puzolanik özellikler sayesinde harca hidrolik özellik sağladığı ileri sürülmüştür. Ayrıca ince öğütülmüş puzolanik katkı malzemesi kullanılarak üretilen numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneyler sonucunda, kullanılan katkı malzemelerinin dayanımlarının daha hızlı artmasını sağladığı tespit edilmiştir. Gerçekleştirilen çalışma sonunda tamir harcı amacıyla üretilen horasan harçlarının özelliklerini iyileştirmeye yönelik tespitler yapılmış fikirler belirtilmiştir (Mavioğlu, 2011).

Uğurlu ve Sağın tarafından gerçekleştirilen araştırma doğrultusunda; Aigai ve Nysa antik kentlerindeki Roma dönemi tarihi yapılarına ait harç örnekleri alınmıştır. Doğal ve yapay puzolanlar kullanılarak üretilmiş olan harçların özelliklerinin tespit edilmesi amacıyla, numuneler deneylere tabi tutulmuştur. Bağlayıcı kısımdaki kireç ve silika oranlarının öğrenilebilmesi amacıyla FTIR, SEM-EDS, LIBS ve XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerin sonucunda, Roma dönemi yapısına ait harçların, düşük yoğunluğu, yüksek poroziteye, makro boyutlu gözeneklere sahip olduğu anlaşılmıştır. Harçların üretiminde hidrolik olmayan kireç ve puzolanik özellik gösteren agrega kullanıldığı tespit edilmiştir. Üretiminde doğal puzolan kullanılan numunelerin kireç/agrega oranı 0,30 olarak belirlenirken, üretiminde yapay puzolan kullanılan numunelerin kireç/agrega oranı 0.55 olarak tespit edilmiştir. Yapılan FTIR, SEM-EDS

ve LIBS analizlerinin, kireç ve silika oranlarının tespiti için uygun yöntemler olduğu gözlemlenmiştir (Uğurlu ve Sağın, 2012).

Çekilmez (2018) tarafından yürütülen araştırma doğrultusunda; kendiliğinden yerleşen harç üretimi için, portland çimento, silis dumanı ve uçucu kül kullanılmıştır. İkili ve üçlü olarak üretilen numunelerin basınçlı su geçirgenliği araştırılmıştır. İkili olarak üretilen karışımlardan %10 silis dumanı içeren karışımda ve üçlü olarak üretilen karışımlarda %10 silis dumanı ile %35 uçucu kül içeren karışımlarında basınçlı su işleme derinliğinde azalma tespit edilmiştir.

Tombulca tarafından yapılan çalışmada tamir harcı üretimi amacıyla, uçucu kül ve zeolit katkılı harç üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu harçlara mekanik ve fiziksel deneyler yapılarak özellikleri belirlenmiştir. Harç üretiminde sönmüş kireç, zeolit ve uçucu kül, agrega olarak; tuğla kırığı ve dere kumu kullanılmıştır. Kullanılan puzolanlar, harca kireç ağırlığının %0, %20, %40, %60, %80 ve %100'ü olacak şekilde kireçle yer değiştirmek suretiyle kullanılmıştır. Üretimde bağlayıcı/agrega oranı 1/2 olarak seçilmiştir. Numunelere hem taze halde hem de sertleşmiş halde deneyler yapılmıştır. Deneyler numunelerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin anlaşılması amacıyla gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda numunelerin eğilme ve basınç dayanımlarının uygun sınırlar aralığında bulunduğu tespit edilmiştir. Ayrıca numune üretiminde uçucu kül kullanılmasının harcın kapileritesini iyileştirdiği görülmüştür (Tombulca, 2019).

Niş ve Altundal'ın yürüttüğü çalışma kapsamında, Geopolimer beton üretimi yapılmış ve bu betonların %5 sülfürik asit etkisindeki tepkileri belirlenmiştir. Üretimde yüksek fırın cürufu ve uçucu kül kullanılmıştır. Yüksek fırın cürufu ilavesi %100 ve %50 olacak şekilde, uçucu kül katkısı da %100 ve %50 olacak şekilde harca eklenmiştir. Geopolimer betonların karışımında, aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat tercih edilmiştir. Karşılaştırma yapabilmek amacıyla portland çimento ile katkısız beton üretimi yapılmıştır. Numunelerin sülfürik asite karşı dayanımını belirlemek amacıyla görsel inceleme, ağırlık değişiminin belirlenmesi ve basınç dayanımlarında oluşacak farklılıklar irdelenmiştir. Deneylerin sonucunda uçucu kül eklenerek üretilen geopolimer betonların etüvde bekletilmesine ihtiyaç duyduğu, yüksek fırın cürufu kullanılan betonların gerek duymadığı sonucuna varılmıştır. Sülfürik asite karşı en yüksek direnç %50 uçucu kül ve %50 yüksek fırın cürufu kullanımıyla üretilen geopolimer betonlara aitken, en düşük direnç %100 uçucu kül içeren geopolimer betona ait olarak tespit edilmiştir (Niş ve Altundal 2019).

Niş ve Karadağ'ın yürüttüğü araştırmada; geopolimer beton üretilerek sülfürik asite karşı gösterdiği tepki incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda üretilen harca öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu katkısı ilave edilmiştir. Üretilen numuneler %5 sülfürik asite maruz bırakılmış ve mekanik özellikleri ve kimyasal durabilitesi araştırılmıştır. Üretim için seçilen bağlayıcı miktarı değişen oranlarda kullanılmış ve 3 farklı türde numune elde edilmiştir. Bağlayıcı 400 kg/m<sup>3</sup>, 500 kg/m<sup>3</sup> ve 600 kg/m<sup>3</sup> olacak şekilde değişen miktarlarda kullanılmıştır. Alkali aktivatör/bağlayıcı oranı 0.45 ve 0,55 olarak tercih edilmiştir. Karışımda kullanılan yüksek fırın cürufunu aktive etmek amacıyla sodyum hidroksit ve sodyum silikat tercih edilmiştir. Üretimde kullanılan sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 2,5 olarak ve sodyum hidroksitin molaritesi 14 M olarak seçilmiştir. Bu şekilde 6 farklı türde geopolimer beton üretilmiş ve bu betonların dayanımları ve sülfürik aside karşı davranışları irdelenmiştir. Üretilen betonlar hem oda koşullarında hem de %5 sülfürik asit ortamında 28, 120 ve 150 gün bekletilmiştir. Numunelerin yüzeylerinde oluşacak değişim, ağırlıklarında oluşacak farklılık ve basınç dayanımlarındaki değişiklikler araştırılmıştır. Basınç dayanımlarının incelenmesiyle, en yüksek değere sahip numunenin, bağlayıcının 600 kg/m<sup>3</sup> olarak kullanıldığı betona ait olduğu gözlemlenirken, dayanımlardaki en az artma ise 400 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı ile üretilen betonlarda gözlemlenmiştir. 150 günlük basınç dayanımları incelendiğinde yüksek fırın cürufu miktarındaki artışın betonun basınç dayanımını arttırdığı tespit edilmiştir. Çalışmanın sonucunda yüksek fırın cürufu ve alkalın aktivatör içeren geopolimer betonların yapı elemanlarında kullanılabileceği sonucuna varılmıştır (Niş ve Karadağ 2021).

Niş ve Akyıldırım'ın gerçekleştirdiği çalışmada; geopolimer beton üretilmiş ve bu betonlarda gecikmiş ısı kürü incelenmiştir. Ayrıca yüksek fırın cürufu katılan geopolimer betonların dayanım ve durabilite özellikleri incelenmiştir. Harç üretiminde 400 kg/m<sup>3</sup>, 500 kg/m<sup>3</sup>, 600 kg/m<sup>3</sup> olarak değişen miktarlarda bağlayıcı kullanılmış ve 3 farklı türde beton üretilmiştir. Numunelerin üretiminde uçucu kül ile aktive etmek için sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır. Aktivatör/bağlayıcı değerleri 0.45 ile 0.55 olarak kullanılmıştır. Kullanılan bağlayıcı miktarının değişiminin ve solüsyon/bağlayıcı oranı değişiminin betonun dayanım ve durabilite özelliklerine etkileri incelenmiştir. Sodyum hidroksit/sodyum silikat oranı 1/2,5 olarak belirlenmiştir. Üretilen betonlar hem oda koşullarında hem de %5 sülfürik asit ortamında bekletilerek dayanım ve durabiliteleri belirlenip karşılaştırılmıştır. Ayrıca deney kapsamında numunelerin bir kısmı etüvde bekletilip ısı uygulamasının betonun özelliklerine etkisi incelenmiştir. Numunelerin asit etkisindeki davranışlarını belirlemek amacıyla numunelerin

yüzeylerinin değişimi, ağırlıklarının değişimi ve basınç dayanımlarında oluşan farklar incelenmiştir. Dene sonuçları incelendiğinde betonda kullanılan bağlayıcı miktarının, solüsyon/bağlayıcı oranının ve gecikmiş ısı kürünün numunelerin mukavemetlerini ve dayanıklılıklarını etkilediği saptanmıştır (Niş ve Akyıldırım 2021).

Görhan ve Danışyar'ın gerçekleştirdiği çalışmada; geopolimer beton üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretimde uçucu kül ve öğütölmüş granüle yüksek fırın cürufu ile aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır. Ayrıca betonda lif kullanılmış ve lif olarak polipropilen lif tercih edilmiştir. Numunelere mekanik ve fiziksel deneyler yapılarak özellikleri belirlenmiştir. Polipropilen lif ilaveli bağlayıcı ağırlığının %0,5, %1,0 ve %1,5 olacak şekilde karışıma eklenmiştir. Üretimde kullanılan sodyum hidroksit 10 M olarak ve kullanılan sodyum silikat farklı silikat modülü (2 ve 3 modül) değerlerine sahip olacak şekilde ilave edilmiştir. Numuneler ilk olarak 5 saat boyunca 90 °C de etüvde bekletilmiş daha sonra 7 gün boyunca oda koşullarında bekletilmiştir. Numuneler 7. günlerinde 24 saat süreyle suda bekletilmiştir. Numunelere su emme, porozite, birim hacim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Kuru haldeki numunelerin ise eğilme ve basınç mukavemetlerinin belirlenmesi amacıyla testler gerçekleştirilmiştir. Testlerin sonuçları incelendiğinde en iyi sonucu veren geopolimer beton %50 uçucu kül ve %50 yüksek fırın cürufu ile 3 modül sodyum silikat solüsyonunu ve 10 M NaOH kullanılarak üretilen numune olarak belirlenmiştir (Görhan ve Danışyar 2021).

Karakoç ve Özcan'ın gerçekleştirdiği çalışmada; geopolimer beton üretimi için ferrokrom cürufu ve yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Üretilen numunelerin asit, tuz ve sülfata karşı tepkileri irdelenmiştir. Beton üretiminde ferrokrom cürufu ağırlığının %0, %25, %50, %75 ve %100'ü olacak şekilde yüksek fırın cürufu ihtiva edilmiş ve 5 farklı türde geopolimer beton elde edilmiştir. Numuneler 28 gün kür süreleri bittikten sonra %5 konsantrasyonlu fosforik asit, hidroklorik asit, hidroflorik asit, sülfürik asit, sodyum klorür, magnezyum klorür, magnezyum sülfat ve sodyum sülfat ortamında 12 hafta bekletilmiştir. Aside maruz kalan numunelerin yüzeylerindeki değişimler, ağırlık ve boyutlarındaki değişimler, basınç dayanımı farklılıkları, ultrases geçiş süreleri ve içyapıları incelenmiş ve numunelerin sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak belirlenen en yüksek basınç dayanımları sırasıyla sülfürik asit, hidroflorik asit, hidroklorik asit, fosforik asit, sodyum sülfat, magnezyum sülfat, magnezyum klorür ve sodyum klorür çözeltileriyle elde edilmiştir (Karakoç ve Özcan 2018).

Karakoç ve Derinpınar'ın yürüttüğü çalışma doğrultusunda; geopolimer betonda cam tozu kullanımının yangın dayanımına olan etkisini araştırmak amacıyla üretilen geopolimer betonlarda, yüksek fırın cürufu ağırlığının %0, %5, %10, %15 ve %20'si olacak şekilde cam tozu, yüksek fırın cürufu ile yer değiştirmek suretiyle ve aktive etmek için de NaOH kullanılmıştır. Üretilen beton numuneleri 28 gün kürlendikten sonra 150, 300, 450, 600 ve 750°C sıcaklığa maruz bırakılmış, havada ve suda soğutma işlemi yapılmıştır. Daha sonra numunelerin yangın davranışları, basınç mukavemetleri, yarmada çekme dayanımı ve kılcal geçirimsizlik değerleri saptanmıştır. Katkı kullanılmadan üretilen şahit numunelerinin basınç mukavemeti, yarmada çekme dayanımı ve kılcal geçirimsizlik değerleri saptanmıştır. Yapılan deneylerin sonuçlarına göre cam tozu eklenen ve oda sıcaklığında bekletilen numunelerin basınç dayanımlarında azalma gözlemlenmiştir. Yüksek sıcaklıkta bekledikten sonra havada soğutulan numunelerin dayanımları suda soğuyan numunelerin dayanımlarından daha yüksek sonuçlar vermiştir. Numunelerin maruz kaldığı sıcaklık arttıkça kılcal geçirimsizlik ve ağırlık kaybı da artmıştır. Numunelerin yüzeylerinin incelenmesiyle cam tozunun artması ve yüksek sıcaklığa maruz bırakılması ile numunelerin boşluk miktarında artış gözlemlenmiştir (Karakoç ve Derinpınar 2021).

Karakoç ve Uğurlu'un yürüttüğü araştırma doğrultusunda; geopolimer beton üretilerek numunelerin donma-çözülme ve sülfata karşı direnci incelenmiştir. Bu amaçla üretilen betonda yüksek fırın cürufu ve geri dönüştürülmüş agrega tercih edilmiştir. Karışımlarda kullanılan cüruf 300, 400 ve 500 kg/m<sup>3</sup> iken geri dönüştürülmüş agrega cüruf ağırlığının %0, %25, %50, %75 ve %100'ü olarak karışıma eklenmiştir. Bu sayede 15 farklı geopolimer beton türü üretilmiştir. Üretilen numuneler 28 gün kür koşullarında bekletildikten sonra 100 çevrim donma çözülme etkisine maruz bırakılmış ve 12 hafta 2 farklı sülfat çözeltili ortamda bekletilmiştir. Daha sonra numunelerin ağırlıklarında oluşan değişim, kılcal geçirimsizlik değerleri, su emme yüzdeleri, UPV değerleri ve basınç dayanımları belirlenmiş ve bu değerler kontrol numunelerine ait değerlerle karşılaştırılmıştır. Elde edilen değerler incelendiğinde, donma çözülme çevriminin numunelerin basınç mukavemetlerini düşürürken, kılcal geçirimsizlik ve su emme yüzdelerini arttırdığı belirlenmiştir. Cüruf miktarının artmasıyla betonun basınç dayanımı artsa da geri dönüştürülmüş agrega miktarı arttıkça dayanım azalmıştır. Sülfata maruz bırakılan numunelerin basınç mukavemetleri azalmış, kılcal geçirimsizlik katsayısı ile su emme yüzdesi artmıştır (Karakoç ve Uğurlu 2020).

Işıkdag ve Mutlu'nun yürütmüş olduğu çalışmada; ısı kür kullanılmadan üretilen geopolimer betonların dayanım ve dayanıklılık değerleri incelenmiştir. Numunelerin üretiminde metakaolin, yüksek fırın cürufu, aktive etmek için ise sodyum silikat ve potasyum hidroksit kullanılmıştır. Üretilen geopolimer betonların dayanımları, dayanıklılıkları ve içyapıları incelenmiştir. Numuneler 7 ve 28 gün oda şartlarında bekletilmiş ve ardından numunelerin eğilme ve basınç mukavemetleri tespit edilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde geopolimer betonlara ısı kür uygulanmasa da yüksek dayanım elde edilebildiği anlaşılmıştır (Işıkdag ve Mutlu 2021).

Karakoç ve Özdal'ın gerçekleştirdiği araştırma doğrultusunda; geopolimer beton üretilerek numunelerin donma çözülme etkisine karşı davranışı araştırılmıştır. Üretimde ferrokrom cürufu ve bu cürufun ağırlığının 0, %25, %50, %75 ve %100'ü kadar yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Bu şekilde 5 farklı geopolimer beton grubu üretimi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen numuneler 28 gün kür süreleri bittikten sonra 50 çevrimlik periyotlarda 300 çevrime kadar suda donma-çözülme etkisine maruz bırakılmıştır. Bu etkinin numunelerde oluşturduğu değişiklikleri belirlemek için basınç dayanım değerleri, ultra ses geçiş süreleri, ağırlıklarındaki değişimler, yüzeylerinde meydana gelen değişimler ve numunelerin içyapıları irdelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, kontrol numunelerine ait değerlerle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, ferrokrom cürufu miktarının artmasıyla basınç dayanımlarının azaldığı saptanmıştır. Numunelerin yüzeylerinde olan değişimler incelendiğinde, donma çözülmenin ilk olarak betonun köşelerini, daha sonra yüzeylerini etkilediği belirlenmiştir (Karakoç ve Özdal 2019).

Yaltay ve Mohammed'in yaptığı araştırma doğrultusunda; farklı oranlarda cüruf ve pomza tozu kullanılmıştır. Değişen oranların numunelerin özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yüksek sıcaklığa direnç, donma-çözülme ve radyasyon kalkanı değerleri incelenmiştir. Elde edilen basınç dayanımları incelendiğinde, en yüksek değer 100.41 ve 88.62 MPa ile %100 cüruf ve %0 cüruf içeren numuneler için sırasıyla 7 ve 28 günde elde edilmiştir. Ponza ilave edilen numunelerin uzun süre etüvde bekletilmesi ile yüksek basınç dayanımları elde edilebilmektedir (Yaltay ve Mohammed 2021).

Niş ve Karabaş'ın yürüttüğü çalışma kapsamında geopolimer betonlar üretilmiş ve durabilite ve dayanımları araştırılmıştır. Numunelerin üretiminde bağlayıcı olarak F tipi uçucu kül ile öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Aktivatör olarak ise sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır. Karışımda değişen miktarlarda bağlayıcı kullanılmıştır. Kullanılan

uçucu kül ve cüruf  $400 \text{ kg/m}^3$ ,  $500 \text{ kg/m}^3$  ve  $600 \text{ kg/m}^3$  olacak şekilde değişen miktarlarda karışıma eklenmiştir. Bu şekilde 6 farklı geopolimer beton grubu elde edilmiştir. Karışıma eklenen sodyum hidroksit 14 M olarak kullanılmıştır. Üretilen betonlar 28, 120 ve 150 gün boyunca hem oda koşullarında hem de %5 sülfürik asit ortamında bekletildikten sonra yüzeylerinde oluşan değişim incelenmiştir. Görsel olarak yapılan incelemelerden sonra numunelerin ağırlıklarındaki değişim ve basınç dayanımlarında oluşan farklılıklar belirlenmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda geopolimer betonların yapılarda kullanılmasının uygun olduğuna karar verilmiştir (Niş ve Karabaş 2021).

Niş ve Olcay'ın yürüttüğü çalışma için; alkalın aktivatör kullanılmış betonlar üretilmiştir. Bu betonların üretiminde kullanılan bağlayıcı  $400 \text{ kg/m}^3$ ,  $500 \text{ kg/m}^3$  ve  $600 \text{ kg/m}^3$  olacak şekilde değişen miktarlarda kullanılırken, uçucu kül ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu sırasıyla bağlayıcı ağırlığının %25 ve %75'i olacak şekilde karışıma eklenmiştir. Kullanılan alkali aktivatör, molaritesi 14 M olarak seçilen sodyum hidroksit ve sodyum silikattır. Karışımındaki aktivatör/bağlayıcı oranı 0.45 ile 0.55 olacak şekilde belirlenmiştir. Sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı ise 2.5/1 olarak kullanılmıştır. 6 farklı grup olarak üretilen betonlar 28, 120 ve 150 gün boyunca hem oda koşullarında bekletilmiş hem de %5 oranında sülfürik aside maruz bırakılmıştır. Betonların kimyasal etkilere karşı dayanımı incelenmiştir. Sülfürik aside maruz kalan numunelerin yüzeylerinde oluşan şekil değişimi, numunelerin ağırlık değişiklikleri ve basınç dayanımlarında oluşan farklılıklar araştırılmıştır (Niş ve Olcay 2021).

Baradan ve Aydın tarafından gerçekleştirilen doktora tezi çalışmasında; geopolimer beton üretilmesi amacıyla yüksek fırın cürufu ve aktive etmek için de sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır. Öncelikle en uygun alkali aktivatör oranı, standart su, buhar kürü ve otoklav kürü olmak üzere değişik kür koşullarında belirlenmiştir. Bağlayıcı olarak kullanılan yüksek fırın cürufu belirli oranlarda azaltmış ve uçucu kül, silis dumanı, metakaolin, alçı ve hava sürükleyici, köpük önleyici, büzülme karşıtı gibi farklı kimyasal katkıları yer değiştirmek suretiyle ihtiva edilerek farklı gruplarda geopolimer beton numuneleri üretilmiştir. Deney sonucunda bağlayıcı olarak portland çimento kullanılmadan, alkali aktivatörlerle üretilmiş yüksek performanslı lifli betonlar elde edilmiştir. Saptanan en fazla basınç mukavemeti 200 MPa'dan daha yüksek olarak kaydedilmiştir. Numunelerin mekanik, reolojik ve içyapılarının belirlenmesi amacıyla SEM, XRD, termal analiz, cıva porozimetresi gibi deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneylerin sonucunda elde edilen değerler portland çimentosu kullanılarak üretilen betonların değerleri ile

karşılaştırılmıştır. Üretilen numunelerin dış etkilere karşı dirençleri de belirlenmiş ve portland çimento katkılı betonların değerleri ile karşılaştırılmıştır. Deneyler sonucunda iki betonunda dış etkilere karşı direnci iyi olmasına rağmen, geopolimer betonun davranışı daha iyi sonuçlara sahiptir (Baradan ve Aydın 2010).

Altan ve Tok'un gerçekleştirdiği araştırmalar kapsamında; değişen içeriklere sahip geopolimer beton üretilerek, değişen parametrelerin özelliklerine etkisi belirlenmiştir. Bu amaçla üretilen geopolimer betonlarda yüksek fırın cürufu ve bentonit ile aktive etmek için de sodyum hidroksit ile sodyum silikat kullanılmıştır. Ayrıca agrega olarak kullanılan dere kumu ile ağırlığının %25, %50 ve %75'i olacak şekilde kireçtaşı tozu ile yer değiştirilerek üretim gerçekleştirilmiştir. Üretimde bağlayıcı olarak %80 - %20 oranlarında cüruf ve bentonit karışımı kullanılmıştır. Üretilen numuneler 300 °C, 600 °C ve 900 °C kür koşullarında bekletilerek numunelerin özelliklerine etkileri incelenmiştir. Ayrıca 180 çevrim donma çözülme etkisine maruz bırakılmış, ultrases geçiş süresi deneyi gerçekleştirilmiş, basınç ve eğilme dayanımları belirlenmiştir. Yapılan deneylerin sonucunda, dere kumu yerine ihtiva edilen kireçtaşı tozunun, numunelerin mekanik özelliklerini iyileştirdiği saptanmıştır. Ayrıca %80 -% 20 oranlarında cüruf ve bentonit karışımı kullanılarak üretilen numuneler en iyi sonuçlara sahip numuneler olarak tespit edilmiştir (Altan ve Tok 2021).

Niş ve Özbey'in gerçekleştirdikleri araştırma doğrultusunda; geopolimer beton üretilerek farklı koşullarda kür edilmelerinin numunelerin özelliklerine etkileri incelenmiştir. Geopolimer beton üretimi için; uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve aktivatör olarak sodyum hidroksit ile sodyum silikat kullanılmıştır. Kullanılacak uçucu kül karışıma %100 ve %80 olacak şekilde eklenirken, cüruf %20 olarak uçucu kül yerine ihtiva edilmiştir. Kullanılan aktivatör/bağlayıcı oranı 0.45 iken sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 1/1 olarak tercih edilmiştir. Üretilen numunelerin bir kısmı 90 gün boyunca oda koşullarında bekletilirken, bir kısmı 88 gün oda koşullarında 2 gün 70°C'lik etüvde bekletilmiştir. Kür işlemi tamamlandıktan sonra numunelerin ağırlık ve basınç dayanımı değerleri ölçülmüş, daha sonra numuneler %5 sülfürik ortamında 28 gün bekletilmiştir. Sülfürik asitte bekletilen betonların ağırlıklarında ve basınç mukavemetlerinde değişiklikler belirlenmiştir. Yapılan deneylerin sonucunda numunelerin üretiminde kullanılan bağlayıcı miktarı arttıkça ağırlıklarındaki değişimin azaldığı tespit edilmiştir. Üretiminde %80 uçucu kül ve %20 cüruf kullanılan numunenin ağırlık artışının, %100 uçucu kül kullanılarak üretilen numunenin ağırlık artışından fazla olduğu belirlenmiştir. Karışıma %20 cüruf eklenmesinin numunelerin basınç

dayanımını arttırdığı saptanmıştır. Elde edilen deney sonuçları incelendiğinde, gecikmiş ısı kürü uygulamasının hem normal ortamda hem de sülfürik asit ortamında numunelerin basınç dayanımlarını azalttığı gözlemlenmiştir. Numunelerin üretiminde kullanılan bağlayıcı miktarı arttıkça, dayanım ve durabilite değerlerinde artışlar belirlenmiştir (Niş ve Özbey 2021).

El-Didamony vd. tarafından yapılan çalışmada, farklı türlerdeki priz hızlandırıcıların, çimento ana bileşenlerinden C<sub>2</sub>S hidratasyonuna etkisi incelenmiştir. Araştırma kapsamında CaCl<sub>2</sub>, Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, Ca(CH<sub>3</sub>CO)<sub>2</sub> ve K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> içeren çeşitli katkı malzemeleri eklenmiştir. Karışım katkıların %1 ve %2 oranlarında ilave edilmesiyle elde edilmiştir. Üretilen numunelerin hidratasyonu araştırılmıştır. Gerçekleştirilen deneylerin sonucunda, karışıma eklenen priz hızlandırıcı katkıların kalsiyum hidroksitle tepkimeye girdiği ve bu sayede hidratasyonu hızlandırdığı saptanmıştır (El-Didamony vd. 1996).

Dureje ve Prošek tarafından yürütülen araştırma doğrultusunda; beton üretimi için kullanılacak priz hızlandırıcı katkı malzemelerin seçimi hakkında deneyler gerçekleştirilmiştir. Numunelerin üretiminde çimento ve geri dönüştürülmüş ince öğütülmüş beton atıkları kullanılmıştır. Çimento/atık beton oranı 1/1 olarak seçilmiştir. Numunelerin priz sürelerini azaltmak için 3 farklı priz hızlandırıcı katkı malzemesi karışıma eklenerek priz süreleri gözlenmiştir. Ayrıca numunelerin ultrases geçiş süreleri ve basınç dayanımları ile dinamik E-modülleri tespit edilmiştir. Çalışmanın sonucunda, ilave edilen katkı malzemelerinin en yüksek oranda kullanılmasının bile E modülleri üzerinde olumsuz etki yaratmadığı belirlenmiştir (Dureje ve Prošek 2020).

Narayanan ve Ramamurthy yaptıkları çalışma kapsamında; hafif beton üreterek karışıma priz hızlandırıcı katkı malzemesi eklemiş ve priz süresini gözlemlemişlerdir. Bu doğrultuda priz hızlandırıcı olarak sodyum loril sülfat kullanmışlardır. Kullanılan katkı malzemesi numunenin 2 saat içinde kalıptan çıkarılması amacıyla kullanılsa da gerçekleştirilen deney sonucunda CaCl<sub>2</sub> priz hızlandırıcı katkı kullanılan numunenin 4 saat 30 dakika sonra priz almadığı, Trietanol ve kalsiyum nitrat kullanılan beton numunelerinin ise sırasıyla 4 ve 6 saat geçmesine rağmen priz almadığı gözlemlenmiştir (Narayanan ve Ramamurthy 2012).

Üstüner'in yürüttüğü çalışma kapsamında; farklı çimento tipi kullanılarak beton üretimi gerçekleştirilmiştir. Katkı malzemesi priz hızlandırıcı türü olan olarak kalsiyum format ve trietanolamin kullanılmıştır. Beton üretiminde 4 farklı çimento tipi kullanılarak farklı gruplarda

beton üretilmiştir. Bu grupların priz sürelerine katkı malzemelerinin etkisi incelenmiştir. Kullanılan TEA çimento ağırlığının %0.25, %0.50 ve %1'i olacak şekilde eklenirken, CF çimento ağırlığının %1,0, %2,0 ve %3,0'ü olacak şekilde karışıma eklenmiştir. Basınç dayanımının belirlenmesi için yapılan deneylerin sonucunda az miktarda puzolan eklenen numunelere CF katkısının geç basınç dayanıma etkisinin, TEA katkısının etkisinden fazla olduğu sonucuna varılmıştır (Üstüner 2009).

Ateşin yaptığı çalışmada; priz hızlandırıcı katkı malzemesi dahil beş farklı kimyasal katkı malzemesinin harç karışımına eklenmesinin numunelerin özelliklerine etkisi incelenmiştir. Kullanılan katkı malzemeleri değişik oranlarda harca eklenmiştir. Farklı tür ve oranlarda kimyasal katkıların kullanılmasıyla üretilen numunelerin; yayılma değerleri, birim hacim ağırlıkları, çekme ve basınç mukavemetleri, su emme ve porozite oranları, viskozite ve priz süreleri belirlenmiş, numunelerin içyapısı incelenmiştir (Ateşin 2017).

Kılınç ve Taştan tarafından yürütülen deneysel çalışmada; dişbudak ağacı yaprağı suyunun kaynatılarak beton karışım suyu olarak kullanılmasının betonun dayanımları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Farklı ağırlıkta yapraklar farklı sürelerde suda kaynatılarak, süzülüp soğutulduktan sonra bu su karışım suyu olarak betona eklenmiştir. Üretilen numunelerin eğilme ve basınç mukavemetleri belirlenmiştir. Gerçekleştirilen testlerin sonucunda, yaprak suyu katkısı, numunelerin 7 günlük eğilme dayanımlarını arttırırken, 56 günlük eğilme dayanımı değerlerini düşürmüştür. Basınç dayanımlarını da düşürmüştür. 60 dakika kaynatılan yaprak suyunun karışıma eklenmesi, numunelerin 7 günlük eğilme dayanımlarını arttırırken, 56 günlük eğilme ve basınç dayanımı değerlerini düşürmüştür. 90 dakika kaynatılan yaprak suyu katkısı, numunelerin 7 günlük eğilme dayanımlarını arttırırken, 56 günlük eğilme ve basınç dayanımı değerlerini düşürmüştür (Kılınç ve Taştan 2021).

Aggoun vd. tarafından yürütülen araştırma doğrultusunda; çimento içeren betonlarda kullanılan katkıların, birbiriyle karıştırılarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla Kalsiyum nitrat, Triethanolamine ve Triisopropanolamine kimyasal bileşikleri ayrı ayrı ve birbirleriyle karıştırılarak karışıma eklenmiştir. Üretilen numunelerin priz alma süreleri incelenmiştir. Gerçekleştirilen deneylerin sonucunda, katkı malzemesinin birbirleriyle karıştırılarak kullanılmasının priz almayı hızlandırdığı, dayanımları arttırdığı gözlemlenmiştir (Aggoun vd., 2008).

### 3. KURAMSAL TEMELLER

#### 3.1. Kireç Harçları

Harçlar; Kum, çakıl gibi agregaların, bağlayıcı malzemeler ve işlenebilmeyi arttırmak, hidratasyonu sağlamak için suyla karıştırılması ile elde edilen ve bazı özelliklerinin iyileşmesinin sağlanması amacıyla doğal veya doğal olmayan katkı maddelerinin de ilave edilmesiyle oluşturulan hamurlardır (Güleç, 1992; Borelli, 1999; Kozlu, 2010; Şimşek, 2021:5). Harçların bulunması, kerpiç ve tuğlanın yapı malzemesi olmasıyla birlikte gerçekleşmiştir. İlk dönemlerde, yapı elemanlarının birbirine bağlanması amacıyla çamur kullanılmıştır. Çamur bağlayıcı niteliğe sahip olmasa da bağlayıcı malzeme üretimine yönelik ilk denemeler bu yönde gerçekleştirilmiştir. Kalsiyum karbonatın ( $\text{CaCO}_3$ ) daha çok bilinen ismiyle kireç taşının yüksek sıcaklıklara ( $\sim 900^\circ\text{C}$ ) maruz kalmasıyla kireç elde edilmiştir. Alçı ise daha düşük sıcaklıklarda ( $\sim 190^\circ\text{C}$ ) üretilebilmektedir. Bu sebeple alçı üretimi ve alçı içeren harçların kullanılması öncelikli hale gelmiştir (Akman, 2003; Mavioğlu, 2011; Gökbel, 2014:4). Romalılar döneminde ise kireç harçlarının kullanımı yaygınlaşmıştır (Kuban, 1998; Gökçen, 2021:3). Kireç harçları, Roma ve Bizans dönemlerinde yapılarda suya maruz kalacak bölgelerde kullanılmış ve bu dönemlerde harç “Roma” harcı olarak isimlendirilmiştir. Daha sonralarda kireç içeren harçlar Selçuklu ve Osmanlı dönemlerinde de hamam, su kuyuları, çatı kaplamaları gibi suyla temas edecek yerlerde, suya karşı direnç göstermesi amacıyla kullanılmış olup rengi ve dokusu, horasan yöresinde bulunan toprağı “Horasan” harcı olarak isimlendirilmiştir. Horasan harçları; estetik görünümü, yüksek mukavemeti ve suya karşı direnç göstermesi gibi sebeplerden ötürü Osmanlı döneminde sıklıkla kullanılmıştır (Çamlıbel, 1983; Gökçen, 2021:4).

#### 3.2. Kireç

Bağlayıcılar; sıva ve harçların içerisindeki,  $63\ \mu\text{m}$ 'den küçük boyutlu taneciklere sahip malzemelerdir. Harç üretiminde kullanılan agregalar, bağlayıcılar ile birbirlerine bağlanarak yapay taş oluşturmaktadır. Böylelikle harcın dayanımı yükselmektedir. (Gürhan, 2017; Şimşek, 2021: 9). Kireç, hidrolik kireç ve hava kireci olarak iki sınıfa ayrılmaktadır. Hidrolik kireç, su ile tepkimeye girmesi sonucunda sertleşirken, hava kireci havadaki  $\text{CO}_2$  ile reaksiyona girerek sertleşmektedir (Güleç, 1992; Mavioğlu, 2011:9).

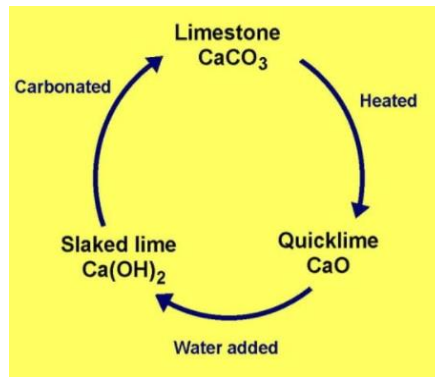
Hidrolik kireç, kalker taşı pişirilerek elde edilmektedir. Pişirme işlemi kalker taşında bulunan kilin yapısını bozulmaya uğratarak reaktif ürün olan silikatları, alüminatları ve bazen de

demir oksitleri açığa çıkarmaktadır. Ortaya çıkan bu malzeme karbonatlaşmadan nemli ortamda priz alabilmesi sebebiyle hidroliktir (Akman, 2003; Young, 2008; Gökçen, 2021:8).

Hava kireçleri, karbonatlaşmanın ilk evrelerinde, düşük mekanik dayanıma sahipken, yüksek suda çözünübilirliğe, geçirgenliğe ve esnekliğe sahiptir. Hidrolik kireçler su ile tepkimeye girerek sertleştikleri için daha fazla mekanik dayanıma sahiptirler. Saf kireçler düşük geçirgenliğe sahip olmalarından dolayı hidrolik kireçlerle karıştırılmaktadır. Bu işlemle hidrolik kireçlerin neme ve tuzlanmaya karşı dirençleri artmaktadır (Pavia ve Treacy, 2006; Mavioğlu, 2011; Gökçen, 2021:8).

Hidrolik kireç ve puzolan kullanılarak elde edilen harçların sertleşmesi sonucu, kireç ile puzolanlar tepkimeye girmekte C-S-H ve C-A-H oluşması ile gerçekleşmektedir. Bu ürünlerin oluşumu için kireç kalsiyum karbonata dönüşmekte ve yapısındaki kalsiyum alüminat silikatlar su ile reaksiyona girmektedir. Hidrolik harçların dayanımlarının, hidrolik olmayan harçlardan daha yüksek olmasının sebebi açığa çıkan bu ürünlerdir. Basınç dayanımlarının artırılması; yüzey alanı büyük puzolan kullanımı, ortam sıcaklığının yüksek olması, karışıma alçı eklenmesi ile mümkün olmaktadır (Uğur ve Güleç, 2016:84-85).

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi, kireçtaşının ( $\text{CaCO}_3$ )  $900^\circ\text{C}$  ‘nin üzerinde pişirilmesiyle sönmemiş kireç ( $\text{CaO}$ ) elde edilmektedir. Sönmüş kireç yani kalsiyum hidroksit ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) elde edilmesi için, sönmemiş kirecin su ile karıştırılarak söndürülmesi gerekmektedir (Böke vd., 2004; Mavioğlu, 211:7). Kirecin sönmesi için havada %15 rölatif nem bulunması yeterli olsa da kirecin havadaki nem ile sönmesi karbonatlaşmaya neden olacağı için tercih edilmemektedir (Böke, 2004; Topçu, 2005; Gökbel, 2014:24).



Şekil 3.1. Kireç döngüsü

Kaynak: (Yılmaz, 2010)

Kireç söndürme işleminde hacimde büyük bir artış gerçekleşmektedir bu sebeple kirecin iyice söndürüldüğünden emin olmak gerekmektedir. Kireç iyice söndürülmeden kullanıldığı takdirde yapıda hacim artışı nedeniyle hasarlar meydana gelebilmektedir. (Akman, 1990; Şimşek, 2021:11). Harç üretiminde kullanılan kirecin, Romalılarda da Osmanlı döneminde de söndürülüp uzun bir zaman bekletildiği bilinmektedir. Kirecin bekleme süresinin uzaması, plastik özelliğini ve su tutma kapasitesini arttırmaktadır (Yılmaz, 2010:8). Kireç kuyularında kireç söndürme işlemi ilkel bir yöntem olmakla birlikte uygulama sırasında çok fazla su kullanılmaktadır. Kaymak kireç olarak adlandırılan bu kireç, dış hava koşullarına maruz kaldığı takdirde CO<sub>2</sub> nedeniyle üst yüzeyi hızla sertleşmekte ve kireç bağlayıcılığını yitirmektedir (Canbaz ve Güler, 2017; Şimşek, 2021:11).

Birçok etken kirecin kalitesinde değişikliklere neden olabilmektedir. Değişikliğe neden olan bazı etkenler; kirecin büyüklüğü, kirecin sahip olduğu gözenekli yapısı ve bu gözeneklerin dağılımıdır. Sönmüş kireç, yüksek sıcaklıklarda kalsine edilmemiş, saf ve gözenekli kireç taşından elde edildiği takdirde, suyla daha hızlı tepkimeye girmektedir. Kirecin özelliklerini etkileyen bir diğer faktör ise söndürme esnasında kullanılan suyun saflığıdır. (Çizer vd., 2004; Gökbel, 2014:25).

### **3.3. Puzolanlar**

Puzolanlar, tekli kullanımında inert özellik gösteren kireç veya çimento ile kullanımında ise bağlayıcılık özelliği kazanan yapı malzemeleridir. Bu malzemelerin içeriğini silisyum dioksit (SiO<sub>2</sub>) ve az miktarda alüminyum oksit (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) içeren maddeler oluşturur (Pusat, 2002; Yılmaz, 2010; Gökbel, 2014; Gökçen, 2021:9).

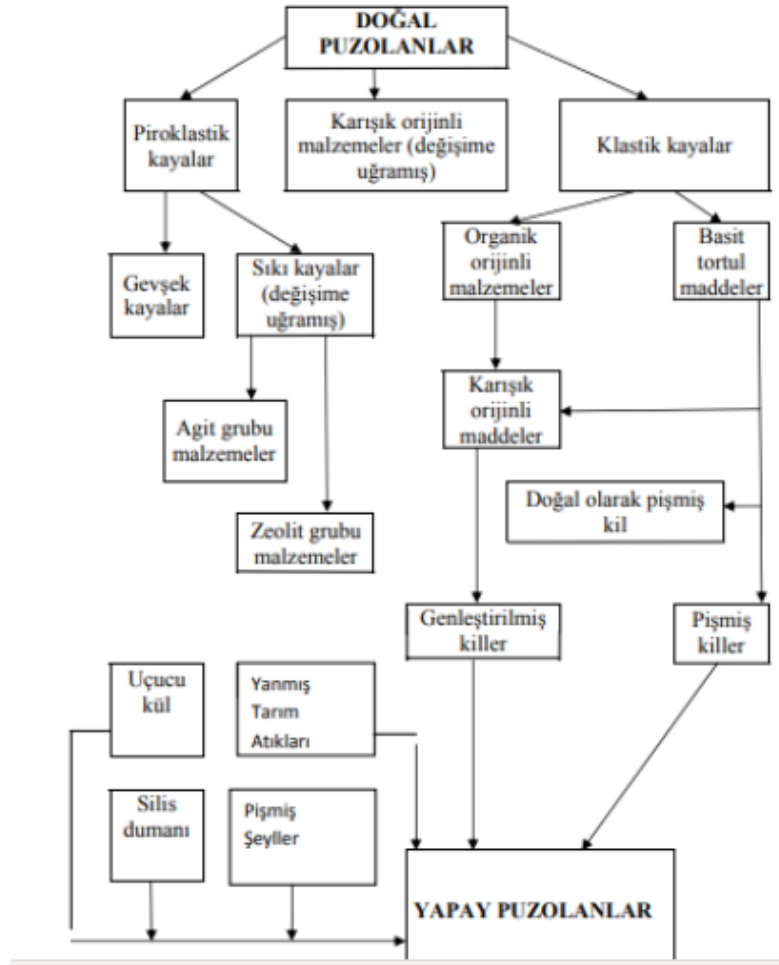
Bilim insanlarının Çatalhöyük'te ve Yunanistan'daki birçok bölgede yaptıkları çalışmalarda, buralarda bulunan yapıların harçlarında volkanik kül içeren killi toprak kullanıldığı saptanmıştır. Öğütülmüş tuğla, kireç ve suyun karıştırılmasıyla elde edilen harcın çok eski zamanlarda yaygın olarak kullanıldığı belirlenmiştir (Erdoğan, 2007:177-178).

Puzolanlar oluşum şekillerine göre doğal puzolanlar ve yapay puzolanlar (Şekil 3.2) olarak iki gruba ayrılmaktadır (Postacıoğlu, 1986; Aköz, 2002; Yılmaz, 2010:13).

Doğal puzolanlar; tras, volkanik küller, killi şist, diyatomit veya diyatomit toprağı ve ponza taşıdır (Lea, 1940; Yılmaz, 2010:14). Diyatomit dışındaki diğer doğal puzolanlar volkanik kökenlidir. (Aruntaş ve Tokyay, 1996; Yılmaz, 2010; Gökbel, 2014: 21). Doğal puzolanlar, tek

başlarındayken bağlayıcılık özelliği göstermeseler de ince öğütüldükleri takdirde, suyun da varlığıyla birleşerek bağlayıcılık özelliği kazanmaktadır (Yetgin ve Çavdar, 2005; Yılmaz, 2010: 14). Sertleşme tepkimesinin gerçekleşmesi doğal puzolanın ince öğütülerek, kalsiyum hidroksit ile belirli oranlarda, sulu bir ortamda ve normal çevre sıcaklığında karıştırılmasına bağlıdır. Harcın dayanım kazanması, bu tepkimeyle açığa çıkan kalsiyum silikat ve kalsiyum alüminat bileşikleri sayesinde gerçekleşmektedir. Doğal puzolanlar yüksek oranda reaktif silisyum dioksit ( $\text{SiO}_2$ ) ve alüminyum oksit ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) içerirken, az miktarlarda demir (III) oksit ve diğer oksitleri de içermektedir (TS 25, 2008; Mavioğlu, 2011:13). Yapay puzolanlar; şist, kil, sünger taşının yakılması, pişmiş killerin toz haline getirilmesi, uçucu kül, silis dumanı gibi endüstri atıklarından ve pirinç kabuğu, buğday sapı gibi tarım atıklarının yakılması sonucunda elde edilmektedir (Pusat, 2002:15; Gökbel, 2014:21).

Kirecin, tuğla veya kiremit tozu ile karıştırılmasıyla elde edilen harç üstün özelliklere sahip bir kireç harcıdır. Bu harcın, suya ve nemli ortamlara karşı direnci oldukça yüksektir (Pusat 2002:15 Gökbel 2014:22). Doğal puzolanların olmadığı zamanlarda, harç üretiminde tuğla ve kiremit tozları kullanılmıştır (Moropoulou ve diğ, 2005; Mavioğlu 2011:14). Tuğla ve kiremit tozunun kaliteleri değişkenlik göstermektedir (Sotangar, 1994; Gökbel, 2014:21).



Şekil 3.2. Doğal ve yapay puzolanlar

**Kaynak:** (Yılmaz 2013:10)

Puzolanik malzemenin bağlayıcılık özelliği gösterebilmesi için sahip olması gereken özellikler şunlardır (Erdoğan, 2007: 179):

- Puzolanın kimyasal bileşiminde bulunan silika ve alümina miktarı yüksek olmalıdır. Beton üretiminde kullanılacak puzolanın içeriğindeki “SiO<sub>2</sub> (silisyum dioksit) + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (alüminyum oksit) + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (demir oksit)” oranı en az %70 olmalıdır.
- Yapısı amorf olmalıdır.
- Doğal hali ince taneli olmalıdır ya da öğütlemeyle ince taneli hale gelebilmelidir. Çünkü ince taneli malzemelerin harçta bulunması durumunda, serbest su bu malzemelere bağlanarak taze harçta meydana gelebilecek terleme en aza indirilmektedir. Ayrıca ince malzemeler, boşlukları doldurarak harcın su geçirimsizliğinin azalmasını sağlamaktadır.

### 3.3.1. Tuğla Tozu

Bazen tek başına bazen de taşların arasına tutturmak için kullanılan tuğla, her dönemde, en çok tercih edilen ve sevilen bir yapı malzemesi olmuştur. Tuğla koyu kırmızı rengi ve geometrik şekli sayesinde uygun bir malzeme olmaktadır. Tuğlanın pişirme işleminin amacı, topraktan üretilmiş malzemelerde bulunan kil mineralinin sinterleşerek, sağlam ve stabil bir yapı oluşturmasını sağlamaktır (Yılmaz, 2010:16).

Tuğlanın puzolanik özellik kazanması, sahip olduğu feldspat, kil ve kuvars minerallerinin pişirilme derecelerine bağlıdır. Bu bileşenlerden oluşan karışım 600-900°C'lerde pişirildiği takdirde, tuğlayı meydana getiren killer amorf hale dönüşmekte ve tuğlaya puzolanik özellik kazandırmaktadır. Kalsinasyon sıcaklığının 900°C'yi aşması durumunda kristobalit, mullit vb. gibi kararlı mineraller oluşarak puzolanik özelliği yok etmektedir (He vd., 1995; Baronia vd., 1997; Mavioğlu, 2011:22). Horasan harcı üretiminde kullanılacak olan tuğlaların iyi pişirilmesi, puzolanik özelliğe sahip olmaları için gereklidir. Bu gereklilik Osmanlı dönemi şartnamelerinde de yer almaktadır. (Akman vd., 1986; Mavioğlu, 2011:24). Roma ve Osmanlı dönemine ait tarihi yapılar üzerinde yapılan araştırmalar sonucunda, Horasan harcı üretiminde kullanılmış olan tuğla parçalarında kristobalit, mullit gibi minerallere rastlanmamıştır. Bu da iki dönemde de tuğlaların pişirilme işleminde 900°C'nin aşılmadığının bir göstergesidir. (Uğurlu ve Böke, 2010; Şimşek, 2018:7).

### 3.3.2. Uçucu Kül

Kömürün yakıt olarak kullanıldığı termik santrallerde, kömürün yanmasıyla %75-80'i çok ince taneli olan küller açığa çıkmaktadır. Gazlarla birlikte bacadan çıkmak üzere hareket eden bu küllere uçucu kül ismi verilmekte ve yüksek miktarlarda SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içermektedirler (Tablo 3.1). Uçucu küller silisli ve alüminli, amorf bir yapıya ve çok ince tanelere sahip olmalarından dolayı tıpkı öğütülerek ince hale getirilmiş doğal puzolanlar gibi puzolanik özellik göstermektedir. Uçucu küller sulu bir ortamda kalsiyum hidroksit ile birleştiği takdirde hidrolik bağlayıcılık özelliği gösterirler. Bu sebeple, çimento üretiminde de katkı malzemesi olarak da kullanılabilirler. Katkı maddesi olarak kullanıldıklarında karışımda yüksek miktarda yer alabilirler. Karışımda kullanılacak olan uçucu kül miktarı, bağlayıcı miktarının %15 – 50'si arasında olabilmektedir (Erdoğan 2007:188).

Uçucu küller, küresel şekilli katı parçacıklardır. Yapısının büyük bir bölümü amorf yapıdadır. Karbon miktarı çok olanlar koyu gri, demir miktarı çok olanlar açık gri renktedir. ASTM'ye göre uçucu küller, F ve C sınıfı olmak üzere iki sınıfa ayrılırlar. Kimyasal bileşiminde bulunan CaO miktarı %10'dan daha az olan uçucu küller düşük kireçli uçucu kül olarak adlandırılırken, CaO miktarı %10'dan fazla olan uçucu küller ise yüksek kireçli uçucu kül olarak adlandırılır (Erdoğan 2007:189).

F sınıfında  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  %70 veya daha fazladır.

C sınıfında ise  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  %50 veya daha fazladır.

Uçucu küllerin puzolanik özelliklerinin yanında bir miktar bağlayıcı özellikleri de vardır. Türk standartlarına göre silissi (V) ve kalkersi (W) olmak üzere 2 sınıfa ayrılır.

V sınıfında silis miktarı %25'ten fazla CaO miktarı %10'dan az olmalıdır.

W sınıfında ise CaO %10'dan fazla, silis miktarı %25'ten fazla olmalıdır.

Uçucu küller az bir miktar olsa da MgO,  $\text{SO}_3$ , alkaliler ve karbon da içermektedir. MgO, hidratasyon sonucunda genişmeye neden olmaktadır.  $\text{SO}_3$  ise sertleşmiş haldeki betonda etrenjit oluşumuna bağlı olarak büyük genişmeler meydana gelmesine sebep olabilmektedir. Alkali miktarının yüksek olması durumunda da, agregalarda bulunan reaktif silis alkalilerle tepkimeye girerek, alkali silika reaksiyonu sonucunda genişmeye sebebiyet verebilmektedir. Bu sebeplerden ötürü, uçucu küllerin içerdikleri miktarlar fazla olmamalıdır. (Erdoğan 2007:189-190).

Uçucu kül çimento inceliğindedir ve en önemli özelliği bu inceliğidir. Taneleri küre şeklindedir ve boyutları 0,5-200  $\mu$  arasında değişmektedir. Uçucu kül hiçbir öğütme işlemi yapılmadan kullanılabilir (Yeğinobalı, 2004; Gökbel 2014:22). Taneciklerinin ince ve küresel şekilde olması, kuma ve segregasyonu azaltır. Küresel şekillerinden dolayı içsel sürtünmeyi azaltır. Uçucu külün; taze betondaki işlenebilirliği artırma, taze betondaki terlemeyi azaltma, hidratasyon ısısını azaltma, sertleşmiş betonun su geçirimsizliğini azaltma, sülfata dayanıklılığını artırma gibi olumlu etkileri de bulunmaktadır (Erdoğan 2007: 192).

**Tablo 3.1.** Uçucu küllerin kimyasal değerleri

Bileşim %	Afşin-Elbistan	Çatalağzı	Tunçbilek	Çayırhan	TS 639 sınırları	ASTM C 618 sınırları	
						F	C
SiO <sub>2</sub>	27,4	56,8	58,59	49,13	0	0	0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,8	24,1	21,89	15,04	0	0	0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,5	6,8	9,31	8,25	0	0	0
S+A+F	45,7	87,7	89,79	72,42	> 70	> 70	> 50
CaO	47	1,4	4,43	13,2	0	0	0
MgO	2,5	2,4	1,41	4,76	< 5	< 5	< 5
Na <sub>2</sub> O	(N+K) 0,3	(N+K) 3	0,24	2,2	0	< 1,5	< 1,5
K <sub>2</sub> O	0	0	1,81	1,76	0	0	0
SO <sub>3</sub>	6,2	2,9	0,41	3,84	< 5	< 5	< 5
KK	2,4	0,6	1,39	0,72	< 10	< 12	< 6

**Kaynak:** (Erdoğan, 2007)

### 3.3.3. Yüksek Fırın Cürufu

Yüksek fırın cürufu; çelik üretiminden elde edilen önemli bir atıktır. Çelik üretiminin ilk aşaması olarak, yüksek fırınlarda ve yüksek sıcaklıklarda demir filizi, kok kömürü ve kalker taşı eritilmektedir. Bu işlemler sırasında fırın altından pik demiri ve onun üzerinde bulunan cüruf akmaktadır. Cüruf pikten kolayca ayrılabilir. Ani soğutulduğu takdirde iri taneli, hafif ve amorf bir malzeme elde edilir ve “yüksek fırın cürufu” veya “letiyeye” olarak adlandırılır (Postacıoğlu 1986; Gökbel 2014:22). Yüksek fırın cürufu alüminyum ve silis içermektedir. Çok az kireç veya çimento ile karıştırılması durumunda bağlayıcılık özelliği göstermektedir. Bu sebeple puzolan olarak kabul edilmektedir (Akman 2003; Özbey 2021:10). Cüruflar soğutma işlemine göre sınıflandırılır. Yavaş soğutulmuş cüruflar, cürufların yüksek fırınlardan çıkışı sonrası yavaş soğumaya bırakılmasıyla elde edilir. Bu cüruflar yol yapımında, hafif beton üretiminde agrega olarak kullanılır. Ani soğutulmuş cüruf ise cürufun yüksek fırından çıkarıldıktan sonra su havuzunda ani bir şekilde soğutulması ve hidrolik özellik kazanmasıyla elde edilir. Bu cüruf, cüruf lu çimento üretiminde, hafif tuğla ve beton üretiminde kullanılmaktadır. Betonda kullanılabilmesi için öğütülerek ince taneli duruma getirilmeleri gerekmektedir (Bulgan ve Emrulloğlu, 2015:2). Çok ince taneli haldeki yüksek fırın cürufları puzolanik özelliklere sahip olduğu için, beton içerisinde yer alan öğütülmüş haldeki yüksek fırın cürufu hem taze hem de sertleşmiş betonun özelliklerini iyileştirmektedir. Cüruf katkısı, betonun çevre koşullarına karşı daha dayanıklı olmasını sağlamaktadır. Sülfata karşı gösterdiği dirençten dolayı tercih edilmektedir. Yapılan çalışmalar doğrultusunda, cüruf katkısının, korozyon dayanıklılığı, durabilite, geçirgenlik, işlenebilirlik ve mukavemet gibi beton özelliklerini

iyileştirdiği anlaşılmaktadır. Ancak, cürufun hidratasyonu yavaş gerçekleştiğinden, cürufun beton içerisine girmesi, dayanım gelişimini geciktirmektedir. Bu geciktirmenin derecesi; cürufun kimyasal kompozisyonuna, karışımda yer alan miktarına, ortamın nem ve sıcaklık koşullarına bağlı olmaktadır (Babu ve Kumar, 2000; Uğurlu 2020:13-14).

Tablo 3.2’de görüldüğü gibi, cürufların en çok içerdiği oksitler; CaO, SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>’dir. İnce öğütülmüş haldeki yüksek fırın cürufları kendiliğinden bir miktar bağlayıcılık özelliği göstermektedir. Bu özelliği, içeriğinde bulunan %30 ve %40 oranlarındaki CaO sağlamaktadır (Bulgan ve Emrulloğlu, 2015:2).

**Tablo 3.2.** Yüksek fırın cürufu kompozisyonları, %

Oksit %	Yüksek fırın cürufları			Diğer cüruflar				
	Fransa	Japonya	Türkiye	Çelik cürufu Türkiye	Pb-Zn Cürufu İngiltere	Nikel Cürufu Kanada	Bakır Cürufu Afrika	Fosfor Cürufu A.B.D
SiO <sub>2</sub>	35	31	40,2	18	18	29	34	41
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12	16	11	3	6	1	6	9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,4	0,7	0,8	22	38	53	44	1
CaO	43	37	34,5	37	20	4	9	44
MgO	8	8	9,4	14	1	2	4	1

**Kaynak:** (Bulgan ve Emrulloğlu, 2015:2)

Cüruf kendiliğinden bağlayıcılık özelliğine sahip olduğu için, karışıma eklendiğinde su ile kimyasal tepkimeye girmektedir. Ancak bu tepkimeler güçlü bir bağlayıcılık sağlamamaktadır. Çok güçlü bağlayıcı özelliğe sahip ürünlerin (C-S-H jelleri gibi) meydana gelmesi için cürufun kalsiyum hidroksit ile tepkimeye girmesi gerekmektedir. Cürufun kalsiyum hidroksitle girdiği reaksiyonlar, güçlü reaksiyonlardır. Bu reaksiyonlar sonucunda çok güçlü bağlayıcı özellikteki ürünler meydana gelmektedir (Erdoğan 2007:208).

Cürufun bağlayıcılık özelliğini etkileyen etmenler: tepkimedeki alkali yoğunluğu, cüruf yapısının amorfluğu, kimyasal kompozisyonu, cürufun inceliği, hidratasyonun ilk safhasındaki sıcaklıktır (Erdoğan 2007:209).

### 3.3.4. Kireç-Puzolan Tepkimesi

Kireç ve puzolan arasında gerçekleşen tepkime için iki varsayım bulunmaktadır.

-İlk varsayım; alkali bakımından zengin olan zeolit bileşimlerinin, doğal puzolanlarda bulunması ile ilişkilendirilmiştir. Bu varsayımda, yumuşatma suyunda bulunan  $Ca^{++}$  iyonları ile zeolitlerdeki alkali yönlerin değişimi puzolanik aktivite olarak değerlendirilmektedir. Fakat ilk varsayımın açıklamada yetersiz kaldığı durumlar bulunmaktadır. Bu durumlardan bazıları; bağlanmış kireç miktarının kaybolan alkali miktarından fazla olması, yanmış killerin ve silişçe zengin kayaçların alkali miktarlarının çok düşük olmasına rağmen puzolanik aktivite göstermesidir (Çavdar 2004).

-İkincisi ise ilkinin aksine, Puzolan, kireç ve su arasında gerçekleşen reaksiyon sonucunda yeni bileşiklerin oluşmasını gerçek kimyasal tepkime olarak kabul etmektedir. Bu varsayım, her şeyden önce, puzolan ve kirecin reaksiyonundan kaynaklanan ürünlerin, çok sayıda deneysel sonuca dayanması koşuluyla, puzolan ve portland çimentosunun hidratasyonu ile aynı olması gerçeğiyle desteklenmektedir (Çavdar 2004).

Tüm doğal puzolanların kireçle reaksiyonu sonucunda aynı ürünler meydana gelmese de puzolan ve kirecin reaksiyonuyla elde edilen ürünler genellikle şöyledir (Erdoğan vd 2017, Şimşek 2021);

1. C-S-H formunda Kalsiyum Silikat Hidrat,
2.  $C_4AH$  formunda Kalsiyum Alüminat Hidrat,
3. Hidratlaşmış Gehlenit,
4. Kalsiyum Karboalüminat,
5. Etrenjit,
6. Kalsiyum Alüminat Monostilfat şeklindedir.

Puzolan—kireç karışımlarının dayanım kazanması, aralarında gerçekleşen reaksiyon ile ilişkilidir. Mukavemet kazanma, karışımın yaşı ve kireç/puzolan oranı ile orantılı olarak gerçekleşmektedir. Bu dayanım kazanma olayı üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar doğrultusunda, hidratasyon sonucunda açığa çıkan ürünlerin özgül yüzeylerinin de etkili olduğu anlaşılmıştır (Massazza 1989).

Kireç ve doğal puzolan arasında gerçekleşen kimyasal olaylar ile portland çimentosu ve doğal puzolan arasında gerçekleşen tepkimelerde eşdeğer olgular görülmektedir.  $Ca(OH)_2$ ,

Portland çimentosunda bulunan  $C_3S$  ve  $C_2S$  minerallerinin hidratasyonu sonucunda açığa çıkmakta ve gözeneklerde birikmektedir. Serbest kalan bu ürün suda eriyip boşluk oluşturarak ortamdan ayrılabilir. Kimyasal tepkimelere istekli bir ürün olan  $Ca(OH)_2$ 'in, puzolan içeren çimentolarda, hidratasyon sonucunda açığa çıkarak, puzolan kısmıyla tepkimeye girmesi sonucunda, dayanım sağlayan C-S-H jelleri oluşturması da betonun dayanıklılığı için önemli bir oluşumdur (Çavdar 2004).

Portland çimentosu ile doğal puzolan arasında gerçekleşen reaksiyonların, kireç ve doğal puzolan arasındaki tepkimelerden farkı, doğal puzolanın reaksiyonu için gerekli olan kireç bileşeninin, karışımın suyla karıştırıldığı ilk anda ortamda hazır bulunamamasıdır. Kirecin ham halde birikmeye başlaması, Portland çimentosundaki  $C_3S$  ve  $C_2S$  minerallerinin hidratasyonundan sonra ancak gerçekleşebilmektedir. Bu aşamanın ardından gerçekleşen puzolanik reaksiyonların sonucunda, puzolan C-S-H jellerine dönüşmektedir (Çavdar 2004).

### **3.3.5. Kireç-Tuğla Tozu**

Kirecin sertleşmesi ile kireç-tuğla tozu karışımının sertleşmesi farklı kimyasal reaksiyonlar sonucunda gerçekleşmektedir. Kuruyan hidrate kireç  $Ca(OH)_2$  kristalleşmekte ve katılaşmaktadır. Ancak bu katılaşma geçicidir. Kurumuş haldeki hidrate kireç su ile temas ettiğinde tekrar yumuşamaktadır. Kireç  $CO_2$  ile birleşerek suda erimeyen katı bir cisim olan kalsiyum karbonat ( $CaCO_3$ ) oluşturmaktadır. Kalsiyum karbonatın çözünmesi, karbonik asitli sularda gerçekleşmektedir. Kireç,  $CO_2$  varlığında kalsiyum karbonata dönüşebilmektedir.  $CO_2$ 'nin iç katmanlara difüzyonu çok uzun yıllar gerektirmektedir. Bunun için hidrate kirecin önce kurumması gerekmektedir. Bu sebeple sertleşme süresi oldukça yavaştır. 1000 yıllık yapıların temellerinde bile hala karbonatlaşmanın tamamlanmadığı gözlemlenebilmiştir. Kireç-horasan karışımının katılaşması, asit-baz reaksiyonu sonucunda suda çözünmeyen bir tuz oluşarak gerçekleşir. Kireç kuvvetli bir baz iken pişmiş kil ve kimyasal aktivite kazanmış silis ( $SiO_2$ ), zayıf bir asittir. Bunların reaksiyonu sonucunda kalsiyum silikat tuzu oluşmaktadır. Bu, yavaş gelişen bir kimyasal reaksiyon olmasına rağmen hava gereksinimi yoktur. Ortamın ıslak olması reaksiyonun daha elverişli biçimde gerçekleşmesini sağlar. Ayrıca elde edilen ürün jel yapılı bir hidrate tuzdur ve asit karbonik içeren sularda dahi erimez. Bu reaksiyon puzolanik etki olarak adlandırılmakta ve reaksiyonun başarılı bir şekilde gerçekleşmesi için ortam nemli, silis aktif ve ince taneli olmalıdır (Akman, 1986; Pusat, 2002:24; Gökbel, 2014:5-6).

Osmanlı dönemindeki şartnamelerde, tuğlaların horasan harcı üretiminde kullanılabilmesi için yeni ve iyi pişirilmiş olması gerekliliğinin bulunduğu bilinmektedir (Saraylı, 1987; Gökbel, 2014:6). Tuğla agregalar, bünyesinde bulunan minerallerin pişirilme derecesine göre puzolanik özellik kazanmaktadır. Örneğin; killer 600-900°C arasında pişirildiğinde puzolanik özellik kazanmaktadır. Daha yüksek sıcaklıklarda ise mullit, kristobalit gibi kararlı mineraller açığa çıkarak puzolanik özellikler yok olmaktadır. Pişirme ile amorf ürünler açığa çıkarak kireç ile reaksiyona girmeleri sonucunda kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) ve kalsiyum alüminat hidrat (C-A-H) jelleri oluşmaktadır. Ortaya çıkan bu jeller, suda çözünmemekte ve tuğla agregaların gözeneklerinde, tuğla-kireç ara yüzünde yer almaktadır (Mavioğlu, 2011:14).

Kireç harçları sınıfında yer alan Horasan harcının sahip olduğu gözenekler makro boyutludur (Borelli, 1999; Gökçen, 2021; Şimşek, 2021:7). Harçta, tuz kristallenme çevirimleri ve suda çözünen tuzların hidratlanma-dehidratlanma olayları sonucunda iç gerilmeler meydana gelmektedir. Malzemenin, bu gerilmelere karşı dayanımının yüksek olması için makro gözeneklerinin yoğunluğu önem arz etmektedir (Özgünler vd., 2010; Şimşek, 2021:7). Horasan harcı diğer harçlardan daha yüksek çekme dayanımına sahiptir. Ayrıca diğer harçlara kıyasla daha hafiftir. Bunun sebebi, Horasan harcının üretiminde agrega olarak kullanılan tuğlaların, kireç taşı, bazalt vb. agregalara göre daha düşük yoğunluğa sahip olmalarıdır (Moropolulou, 2002; Mavioğlu, 2011; Gökçen, 2021:6). Horasan harçlarının dayanımlarını kaybetmeden günümüze kadar ulaşabilmesi, hidrolik özellikleri, üretimlerinde gözenekli ve puzolanik tuğlaların kullanılması ve kalsit kristallerinin tuğlaların gözeneklerinde birikmesi sayesinde gerçekleşmiştir (Uğurlu ve Böke, 2009; Şimşek, 2021:7).

### **3.4. Katkı Maddeleri**

Eski zamanlarda, kullanılan harç ve sıvaların birtakım özelliklerini geliştirmek, yeni özellikler kazandırmak, karbonatlaşmasını hızlandırmak veya geciktirmek gibi nedenlerle bazı organik veya inorganik maddelerden yararlanılmıştır (Tablo 3.3). Harca eklenen bu malzemeler, kullanıldıkları dönemlere ve bölgelere göre farklılık göstermiştir. Bunlar; kan, yumurta akı, şeker, tutkal, arap zamkı, kemik tutkalı, incir sütü, peynir, gübre, bitki suları ve kazein gibi malzemelerdir (Moropoulou ve diğ, 2005; Güleç, 1992; Böke ve diğ, 2004; Mavioğlu 2011:16). Arap zamkı, hayvan tutkalı ve incirin sütlü suyu harca yapışkan olarak eklenirken, çavdar hamuru, kesik süt, kan ve yumurtanın beyazı harcın prizini hızlandırmak amacıyla kullanılmıştır.

Arpa, idrar ve hayvan tüylerinin kullanılması ise dayanıklılığı arttırmaktadır. Şeker, suyun donma-erimesinden kaynaklanan bozulmaları yavaşlatırken, balmumu, harcın büzülmesini engellemektedir. Yumurta akı, hayvan tutkalı, şeker, süt, mineral ve keten tohumu, harca plastiklik özelliği kazandırarak kırılabilirliği azaltmaktadır (Böke 2004; Mavioğlu 2011:16). Pişmiş kil ve maden cevherlerinin kırılıp öğütülerek harca katılması, harç ve sıvaların hidrolik özelliğini arttırmaktadır (Kılıç, 2007; Şimşek 2021:14). Harca saman katılması rötreği engellemektedir (Şişik, 2017; Çelik 2020; Şimşek 2021:14-15). Hayvansal kökenli kılların ve bitkisel kökenli liflerin kullanılması, harç ve sıvaların fiziksel ve mekanik özelliklerini geliştirerek, eğilme, çarpma ve çekme mukavemetini arttırmaktadır (Tekin ve Kurugöl, 2012; Şimşek 2021:15). Tarihi kayıtlara göre, İstanbul'daki Jüstinyen Kiliselerinde duvar sıvası karışımına karaağaç kabuğu ve sıcak arpa suyu katılmış olduğu tespit edilmiştir (Satongar 1994; Pusat 2002:17). Tarihi Kayıtlara göre Ayasofya'nın inşaatı sırasında harca bir ağacın yaprağının ve kabuğunun suyu kullanılmıştır. Bu ağacın dişbudak ağacı olduğu düşünülmektedir. Yine tarihi kayıtlara göre Mimar Sinan da eserlerinde ağaç yaprağı ve kabuklarını suda kaynatıp karışım suyu olarak bu suyu kullanmıştır (Güleç, 2009: 181).

Hidrolik kireç harçlarının özelliklerinin organik katkı malzemeleriyle de iyileştirilebilmesinin mümkün olabileceği düşünülmektedir. Harçlarda bulunan organik katkılar zamanla bozulmalara uğradığı ve harçta düşük bir miktarda kullanıldığı için, karmaşık bir yapıda kullanılmış olan organik katkıların saptanması oldukça zordur (Crhova, 2010) (Centauro ve diğ.,2017).

**Tablo 3.3.** Horasan kullanılmış olan organik katkı malzemeleri

Horasan Harcının İsmi	Horasan harcında kullanılan malzemeler
Geleneksel Horasan Harcı	Dinlendirilmiş kireç+ Yumurta akı+ Horasan pirinci+ Su
	Kireç kaymağı+ Yıkanmış kavrulmuş kum+ Alçı+ su
	Kireç+ Horasan+ Bir miktar dişli kum+ Bir miktar meşe külü+ Su
Kum Horasan Harcı	Dövülmüş kireç+ Yumurta akı+ Kum+ Horasan princi+ Su (karma süresi uzun)
Lökün	Dövme kireç+ Üç ay suda çürütülmüş pamuk+ Su
	Dövme kireç+ Zeytinyağı+ keten elyafı+ Su

**Kaynak:** (Bulgan ve Emrulloğlu, 2015:2)

### 3.4.1. Priz Hızlandırıcı Katkı Maddeleri

Priz hızlandırıcı katkıları, malzemelerin karıştırılarak plastik bir hamur elde edilmesinden, harcın katılaşmaya başladığı ana kadar geçen süreyi kısaltan katkı malzemeleridir (ASTM C 125). Bazı durumlarda, özellikle soğuk hava koşullarında, betonun hidratasyonu istenilenden daha yavaş gerçekleşmekte, priz süresi istenilenden daha uzun olmakta ve ilk günlerdeki dayanımı istenilenden daha düşük olmaktadır. Priz hızlandırıcı katkıları, bu tür sorunların azaltılması amacıyla kullanılmaktadır. Priz süresini kısaltmaktadır. Betonun uzun süreyle katılaşmamış bir durumda kalması önlenerek, kalıplar üzerindeki basıncı azaltmaktadır. İlk zamanlardaki dayanım kazanma hızını artırmaktadır. Bu sayede kalıpların bir an önce sökülebilmesine olanak sağlamaktadır. Kür süresinin daha kısa olmasını sağlamaktadır. Soğuk havanın betonun dayanım kazanma hızı üzerindeki olumsuz etkilerini gidermektedir. Yapı inşaatının veya tamir işinin hızlı bir şekilde devam ettirilmesine yardımcı olmaktadır. Priz süresi kısa olduğu için, betonun taşınması, kalıplara yerleştirilmesi, sıkıştırılması ve yüzeyinin düzeltilmesi iyi planlanmalıdır. İlk zamanlarda betondaki kuruma büzülmesi biraz daha çok olabilmektedir. Ayrıca, betonun uzun vadedeki dayanımı daha az olabilmektedir (Erdoğan T, Erdoğan Y,2007: 155).

Priz hızlandırıcı katkıları soğuk iklimlerde üretilen betonlarda hidratasyon sırasında ısı açığa çıkararak betonun sıcaklığını artırıp, erken yaş dayanımının artmasını sağlamaktadırlar (Ramachandran, 1996; Aydın 2010).

### 3.5. Alkalın Aktivatörler

Çimentolu harçlarda ve beton üretiminde, alkali aktivatör olarak genellikle alkali tuzlar ve kostik alkaliler kullanılmaktadır. Alkalın aktivatörler kimyasal bileşimlerine göre altı sınıfa ayrılmaktadır (Glukhovsky ve ark.,1980; Aydın 2010; Elibol 2012:26).

1. Kostik Alkaliler: MOH
2. Silikatsız zayıf asit tuzları:  $M_2CO_3$ ,  $M_2SO_3$ ,  $M_3PO_4$ , MF
3. Silikatlar:  $M_2O \cdot nSiO_2$
4. Alüminatlar:  $M_2O \cdot nAl_2O_3$
5. Alüminosilikatlar:  $M_2O \cdot Al_2O_3 \cdot (2-6) SiO_2$
6. Silikatsız kuvvetli asit tuzları:  $M_2SO_4$

Bu aktivatörlerden; en kolay bulunan ve ekonomik olan sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ ), sodyum hidroksit ( $\text{NaOH}$ ), sodyum karbonat ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) en çok kullanılan kimyasallardır. Sodyum içerikleri ile potasyum içerikleri benzer olsa da potasyumlu bileşikler zor elde edilir ve daha pahalıdır. Bu bileşikler de laboratuvar çalışmalarında kullanılmıştır (Shi ve ark., 2006; Aydın 2010; Elibol 2012:26).

### **3.5.1. Sodyum Hidroksit**

Sodyum hidroksit, en çok bilinen adıyla kostik soda, kuvvetli bir bazdır. Kimyasal formülü  $\text{NaOH}$  'tır. Sodyum hidroksit kâğıt üretimi, metal işleme, boya üretimi, sabun üretimi, tarımsal ilaçlar, tekstil, temizlik malzemesi gibi alanlarda kullanılmaktadır (Kurt ve Bittner,2005; Tonyalı 2021:18).

Doygun çözeltilerinde;  $\text{NaOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NaOH} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NaOH} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NaOH} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NaOH} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  ve  $\text{NaOH} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  olarak altı farklı hidrat formu vardır. Çözeltide su miktarı azaldıkça sodyum hidroksit yoğunluğu artmaktadır. Sodyum hidroksitin suda çözünmesi sırasında ısı açığa çıkmakta ve ısının artmasıyla sodyum hidroksit yoğunluğu artırırken çözeltinin viskozitesini azaltmaktadır. Sodyum hidroksit çimentolu harçlarda priz hızlandırıcı olarak kullanılırken, 7 ve 14 günlük basınç dayanımlarını düşürmektedir. Sodyum hidroksit genellikle suda tam çözülmüş halde kullanılmaktadır.  $\text{NaOH}$  tanelerinin tamamı çözdürülerek sonradan oluşabilecek ani sıcaklık değişiklikleri engellenmelidir. En uygun çözelti ılık su kullanarak ve yeterince çalkalanarak oluşturulan çözeltilerdir (Shi ve ark., 2006; Özdal 2019; Tonyalı 2021: 18).

### **3.5.2. Sodyum Silikat**

Sodyum silikatın, en çok kullanılan adıyla cam suyunun kimyasal formülü  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 'tır. Sodyum silikatların sınıflandırılması; ortosilikat, metasilikat, disilikat ve tetrasilikat olarak üretildikleri aside göre gerçekleştirilir. Ayrıca kristal yapılarına göre de sınıflandırılabilirler. Sodyum silikatlar; renksiz ve camsı maddelerdir. Suda viskoz bir çözelti olarak bulunurlar. Sodyum silikat çözeltileri kuvvetli alkalilerdir. Sodyum silikatlar; mürekkep üretiminde, seramik sanayinde, temizlik malzemelerinin üretiminde, kâğıt üretiminde, tekstil ve otomotiv sektörlerinde vb. alanlarda kullanılmaktadır. Sodyum silikat sıvı haldeyken saydam, katı haldeyken ise opak ve açık yeşildir. Suda çözüldüğünde viskoz bir çözelti elde edilir. Diğer alkalilere göre sudaki çözünürlüğü düşüktür ve alkol içerisinde çözünmezler. Sodyum silikatın;

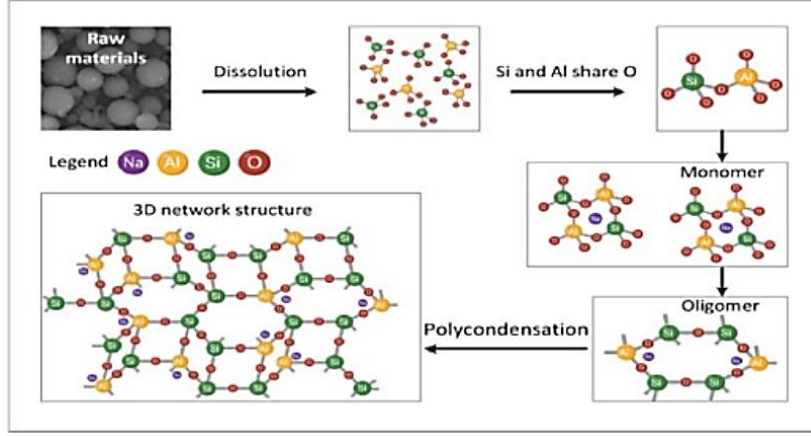
$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  olmak üzere dört farklı hidrat formu vardır (Shi, 2006; Elibol, 2012:30).

Cam suyu beton üretiminde genellikle priz hızlandırıcı olarak kullanılır. Özellikle püskürtme betonlarda kullanımı yaygındır. Çimento esaslı malzemelerde de etkin bir alkalın aktivatördür. Hidratlı silikat tozlarının üretimindeki teknolojik gelişmelerle birlikte yapı sektöründe kullanımları da artmıştır. Bu kullanımların en bilinen örnekleri: Kuru yapıştırıcılar, koruyucu beton üretimi (radyoaktif, zehirli ve asidik atıklar için), petrol kuyusu betonlarının üretimidir (Elibol, 2012; Tonyalı 2021: 19).

### **3.5.3. Geopolimerizasyon**

Geopolimerler, serbest silis ve alümin içeren malzemelerin alkalilerle aktive edilmesi sonucunda meydana gelen bağlayıcı malzemelerdir (Şinik, 2019: 12). Geopolimerler; uçucu kül, yüksek fırın cürufu, kil vb. alümino silikat içeren atık malzemelerin alkali aktivasyonu ile üretilir ve çoğunlukla kalsiyum silikat hidrat olan bir ürün elde edilir (Derinpınar, 2021: 3). Silis ve alümin içeren malzemenin alkalilerle aktive edilmesiyle geopolimer ara bileşeni, geopolimer ara bileşenin alkaliler ile reaksiyonu sonucu geopolimer meydana gelmektedir. Geopolimerler oluşumunda su bulunmamaktadır. Karışım aşamasında kullanılan su işlenebilirliği arttırmak için kullanılır ve kür-kurutma aşamasında geopolimerin yapısından uzaklaşarak süresiz nano boşluklu bir yapı oluşturur. Boşluklu yapı geopolimere hafiflik, yangın dayanımı ve ısı yalıtımı gibi olumlu etkiler kazandırır (Şinik, 2019: 12).

Geopolimerizasyon yüksek alkali ortamda moleküllerin çözünme taşınma ve polikondanzasyon hareketlerini kapsayan egzotermik bir kimyasal süreçtir. Geopolimerizasyon Silis ve Alümin atomlarının Oksijen atomları ile elektronlarını paylaşması ve kovalent bağlı bileşik oluşturması esasına dayanır.  $\text{SiO}_2$  atomları oldukça kararlı bileşikler olmasına karşın alkali ortamda üç boyutlu ağ yapısı zayıflayarak geopolimerlerin ana bileşiği olan kovalent bağlı Si-O-Al ve Si-O-Si oluşturarak geopolimerizasyon ilerler. Şekil 3.3'te geopolimerizasyon süreci gösterilmiştir (Şinik, 2019: 13).



Şekil 3.3. Geopolimerizasyon süreci

Kaynak: (Derinpinar, 2021; 4)

### 3.6. Agregat

ASTM D8'e göre agregat; "Bağlayıcı bir malzeme ile harç veya beton oluşturmak için veya temel katmanlarında, demiryolu balastları gibi uygulamalarda yalnız olarak da kullanılabilen kum, çakıl, cüruf ya da kırma taş gibi mineral bileşimli, taneli malzemelerdir". Agregatlar doğal ve yapay olarak iki gruba ayrılır. Doğal agregatlar, denizlerden ve nehirlerden çıkarılan agregatlar, yapay agregatlar makine ve aletlerle işlenerek veya endüstriyel atık olarak elde edilen agregatlardır.

Agregatlar, etkisiz ve puzolan olarak iki sınıfa ayrılabilir. Etkisiz agregatlar kireç ile reaksiyona girmezken, puzolan agregatlar kireçle tepkimeye girmektedir. Taş ocağı, dere ve denizlerden çıkarılan agregatlar etkisiz agregat olarak nitelenmektedir. Amorf silikatlar ve alüminatlar içeren, kireç ile reaksiyona girerek harcın sertleşmesini sağlayan agregatlar puzolanik agregat olarak isimlendirilmektedir (Lea 1940; Yılmaz 2010:26). Tuğlalar, kireç harçlarında en çok kullanılan agregatlardır. Bu agregatlar harcın hidrolik özellik kazanmasının en önemli etkenidir. Tuğla tozu kil olarak nitelendirilebilmektedir. Bu tozun kireçle birlikte kullanılmasıyla üretilen harç, öncelikle hamam ve su yapıları gibi suyla temas eden yapılarda ve birçok tarihi yapının bakım ve onarımında tamir harcı olarak kullanılmıştır (Uğurlu ve Böke, 2009; Şimşek 2021:13).

## 4. MATERYAL VE YÖNTEM

### 4.1. Materyaller

#### 4.1.1. Kireç

Deneyisel çalışmalarda TS EN 459-1'e uygun, sönmüş kalsiyum kireci kullanılmıştır. Kireç minimum %80 Ca(OH)<sub>2</sub> içermektedir. Özgül ağırlığı 2,68 g/cm<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir. Kireç Paksan sönmüş inşaat kirecidir.

#### 4.1.2. Tuğla Kırığı

Numunelerin üretiminde kullanılan tuğla Bilecik Umutlu İnşaat Malzemeleri A.Ş'den temin edilmiş 13,5'luk delikli tuğladır. Boyutları 13,5x19x19 cm, basınç dayanımı 2,5 N/mm<sup>2</sup>, ağırlığı 2,6 kg'dır. Tuğlalar çeneli kırıcıda, tane çapları 0-4mm aralığında olacak şekilde kırılmıştır. Her deney için elek analizi yapılarak (Tablo 4.1) aynı gronüloometriye sahip 1200 gr tuğla kırığı kullanılmıştır.

**Tablo 4.1.** Tuğla Kırığı Elek Analizi

Elek No(mm)	Elekten Geçen(%)
4	100
2	52
1	34,3
0,5	22,43
0,25	9,17

#### 4.1.3. Odun Külü

Çalışmada meşe ağacı külü kullanılmıştır. Kül, meşe ağacının sobada yakılmasıyla elde edilmiştir. Odun külünün özgül ağırlığı 2,56 g/cm<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir.

#### 4.1.4. Su

Karışım suyu olarak Bilecik şebeke suyu kullanılmıştır. Meşe ağacı yaprağı ve meşe ağacı kabuğu içeren numunelerde, yapraklar ve kabuklar bu suda kaynatılıp soğutulduktan sonra karışım suyu olarak kullanılmıştır. Yapraklar ve kabuklar 30, 60,90 gr olacak şekilde, 4 litre suda, 90 dakika boyunca kaynatılmış ve soğutulmuştur. Şekil 4.1.-4.2. ve 4.3.'te verilmektedir.



Şekil 4.1. 30 gr, 60 gr, 90 gr olarak tartılmış yapraklar



Şekil 4.2. 30 gr, 60 gr, 90 gr olarak tartılmış ağaç kabukları



Şekil 4.3. Yaprakların ve kabukların kaynatılması

#### 4.1.5. Priz Hızlandırıcı

Çalışmada CF (calcium formate) tip priz hızlandırıcı kullanılmıştır. Hızlandırıcı TS EN 934-2 Tablo 6: Priz Hızlandırıcı Beton Katkısı ve ASTM C 494 Tip C: Priz hızlandırıcı beton katkıları standartlarına uygundur. Priz hızlandırıcı katkı maddesinin bağlayıcı ağırlığının %2'sini geçmemesi gerektiği için ve literatürde gerçekleştirilmiş olan araştırmalar doğrultusunda, çalışmada kullanılan priz hızlandırıcı (Tablo 4.2), kireç ağırlığının %1 ve %2'si olacak şekilde seçilmiştir. Bu doğrultuda 4 gr priz hızlandırıcı katkı maddesi içeren numuneler ve 8 gr priz hızlandırıcı katkı maddesi içeren numuneler üretilmiştir.

**Tablo 4.1.** Kullanılan priz hızlandırıcının teknik özellikleri

Renk	Amber
Yoğunluk	1,13-1,14 kg/litre
Klor içeriği % (EN 480-10)	< 0,1
Alkali içeriği % (EN 480-12)	< 10

**Kaynak:** (EPO Yapı Kimyasalları)

#### 4.1.6. Sodyum Hidroksit

Çalışmada kullanılan payet kostik Apeks Kimyadan temin edilmiştir. Kimyasal formülü NaOH, saflık derecesi %98, yoğunluğu 2.13 gr/cm<sup>3</sup>, erime noktası 318.4 °C, molekül ağırlığı 39.99 g/mol'dür. Literatür çalışmaları esas alınarak bu çalışmada 7,5 M sodyum hidroksit kullanılmıştır. 550 gr şebeke suyuna 165 gr sodyum hidroksit eklenmiş ve tamamen çözünene kadar karıştırıldıktan sonra soğumaya bırakılmıştır. Karışım suyu olarak elde edilen bu solüsyon kullanılmıştır.

#### 4.1.7. Sodyum Silikat

Tablo 4.3'te özellikleri verilmiş olan sodyum silikat, çalışmada ilk olarak sodyum hidroksit ile aynı miktarda kullanılmıştır. Ağırlıkça sodyum hidroksit/sodyum silikat oranı 1/1 olarak belirlenmiş ve 165 gr sodyum silikat kullanılmıştır. Kullanılan miktar numunelerde kismaya neden olduğu için değişik miktarlarda eklenerek numuneler yeniden üretilmiştir. 25 gr, 50 gr, 75 gr, 100 gr ve 125 gr sodyum silikat eklenerek numuneler üretilmiştir.

**Tablo 4.3.** Kullanılan Sodyum Silikatın fiziksel ve kimyasal özellikleri

FİZİKSEL VE KİMYASAL ÖZELLİKLER	SONUÇLAR
Görünüş	Filtre edilmiş, renksiz, berrak kıvamlı sıvı
Ağırlıkça Modül: SiO <sub>2</sub> /Na <sub>2</sub> O	3,13
Moleküler Modül: SiO <sub>2</sub> /Na <sub>2</sub> O	3,23
Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	1,371
Na <sub>2</sub> O (%)	8,75
SiO <sub>2</sub> (%)	27,43
Viskozite	91

**Kaynak:** Apeks Kimya

#### 4.1.8. Uçucu Kül

Çalışmada Tablo 4.4'te kimyasal kompozisyonu verilen uçucu kül 50, 100, 150, 200 gr olacak şekilde kireç yerine ikame edilerek kullanılmıştır. Bağlayıcının %12.5, 25, 37.5 ve 50'si olacak şekilde kullanılarak numuneler üretilmiştir.

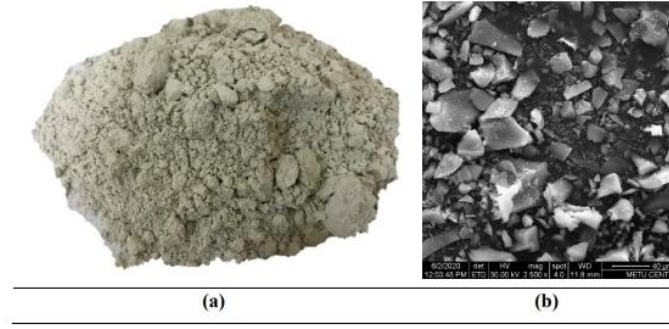
**Tablo 4.4.** Çalışmada kullanılan uçucu külün kimyasal özellikleri

Malzemeler	%
CaO	1,793
SiO <sub>2</sub>	56,15
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26,37
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,444
MgO	2,35
SO <sub>3</sub>	0,056
K <sub>2</sub> O	3,804
Na <sub>2</sub> O	1,095
Cl	0,09

**Kaynak:** (Şahin, 2021)

#### 4.1.9. Yüksek Fırın Cürufu

Çalışmada Tablo 4.5.'te kimyasal kompozisyonu verilen yüksek fırın cürufu 50, 100, 150, 200 gr olacak şekilde kireç yerine ikame edilerek kullanılmıştır. Bağlayıcının %12.5, 25, 37.5 ve 50'si olacak şekilde kullanılarak numuneler üretilmiştir. Kullanılan cürufun SEM ve XRD analizleri Şekil 4.4. ve Şekil 4.5.'de verilmiştir.



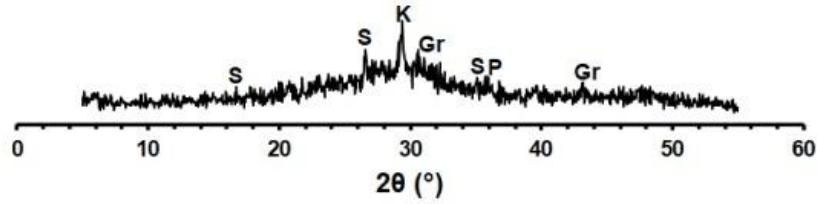
**Şekil 4.4.** a) Kullanılan yüksek fırın cürufunun genel görünüşü b)SEM analizinde görünüşü

**Kaynak:** (Şahin, 2021)

**Tablo 4.5.** Kullanılan yüksek fırın cürufunun kimyasal kompozisyonu

Oksitler	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
%	32,1	11,2	0,62	36,1	0,31	5,64	1,21	0,83	1,07	0	1,48

**Kaynak:** (Şahin, 2021)



**Şekil 4.5.** Kullanılan yüksek fırın cürufunun XRD analizi (S: Sillimanite, K: Katoite, Gr: grossular, P: Periclase)

**Kaynak:** (Şahin, 2021)

## 4.2. Yöntem

Harçlar hazırlanırken Tablo 4.7 ve 4.10'da karışım miktarları verilen malzemeler kullanılmış ve TSE 196-7 Standartlarına uygun olacak şekilde numuneler hazırlanmıştır. Üretilen numuneler 72 saat oda koşullarında beklemeye bırakılmış. 72 saat sonra kalıptan çıkarılan numuneler, 28 gün boyunca birim hacim ağırlık, su emme, porozite, basınç dayanımı ve eğilme dayanımı deneylerinin gerçekleştirilmesi için laboratuvar koşullarında bekletilmiştir.

Çalışmada kireç harçlarının üretimi 2 aşamada gerçekleştirilmiştir.

#### 4.2.1. Birinci Aşama

İlk aşamada tarihi yapılarda kullanılmış olduğu bilinen bitkisel katkı malzemeleri kullanılmıştır. Bu kapsamda katkısız şahit numune, meşe ağacı yaprağı suyu katkılı, meşe ağacı kabuğu suyu katkılı ve meşe ağacı odun külü katkılı numuneler üretilmiştir (Tablo 4.6, Tablo 4.7, Tablo 4.8). Tarihi yapılarda kullanılmış olan bu katkıların, harcın özelliklerine etkileri incelenmiştir. Şahit numune olarak 2 farklı üretim gerçekleştirilmiştir. Şahit numune 1200 gr tuğla kırığı, 400 gr kireç, 500 gr şebeke suyu içermektedir. İlk olarak kıvam analizine göre su miktarını ayarlayabilmek için şahit numune denemesi gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada 2 şahit numune, 3 farklı yaprak sulu karışım, 3 farklı kabuk sulu karışım ve 4 farklı odun külü ikameli karışım olmak üzere toplamda 36 numune üretilmiştir. Bu numunelere taze halde iken yayılma tablası deneyi yapılmış, priz süreleri tespit edilmiştir. 28 gün oda koşullarında bekletilen numunelerin 28 gün sonunda birim hacim ağırlıkları, su emme oranları, poroziteleri, eğilme ve basınç mukavemetleri tespit edilmiştir.

**Tablo 4.6.** Bitkisel katkı malzemeleri ile üretilen numuneler ve açıklamaları

Numune Adı	Açıklama
Şahit	Katkısız Numune
A	30gr Yaprak suyu katkılı
B	60gr Yaprak suyu katkılı
C	90gr Yaprak suyu katkılı
D	30gr Kabuk suyu katkılı
E	60gr Kabuk suyu katkılı
F	90gr Kabuk suyu katkılı
G	10gr Odun külü katkılı
H	20gr Odun külü katkılı
I	30gr Odun külü katkılı
J	40gr Odun külü katkılı

**Tablo 4.7.** Bitkisel katkı malzemeleri ile üretilen numunelerde kullanılan malzeme miktarları (gr)

Numune	Su (gr)	Kireç (gr)	Tuğla Kırığı (gr)	Odun Külü (gr)
Şahit	550	400	1200	0
A	550	400	1200	0
B	550	400	1200	0
C	550	400	1200	0
D	550	400	1200	0
E	550	400	1200	0
F	550	400	1200	0
G	550	390	1200	10
H	550	380	1200	20
I	550	370	1200	30
J	550	360	1200	40

**Tablo 4.8.** Bitkisel katkı malzemeleri ile üretilen numunelerde kullanılan malzeme miktarlarının oranları

Numune Adı	Su/bağlayıcı	Tuğla kırığı/bağlayıcı	Odun külü/bağlayıcı
Şahit	1,375	3	0
A	1,375	3	0
B	1,375	3	0
C	1,375	3	0
D	1,375	3	0
E	1,375	3	0
F	1,375	3	0
G	1,375	3	0,025
H	1,375	3	0,05
I	1,375	3	0,075
J	1,375	3	0,1

#### 4.2.2. İkinci Aşama

Bu aşamada ise kireç harcına günümüzde kullanılan puzolan ve katkı malzemeleri eklenerek (Tablo 4.9, Tablo 4.10, Tablo 4.11) harcın özelliklerine etkisi incelenmiştir. Puzolan kullanarak üretilen numunelerde puzolan olarak yüksek fırın cürufu ve uçucu kül kullanılmıştır. Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül kireç ağırlığının %12.5, 25, 37.5 ve 50'si olacak şekilde kullanılmıştır. Bu oranlarda puzolanlar ve 7,5 M sodyum hidroksit içeren karışım suyu ile numuneler üretilmiş ve yine aynı oranlarda sodyum hidroksit ile sodyum silikat solüsyonu içeren karışım suyu ile puzolan katkılı numuneler üretilmiştir. Sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 1 olarak kullanılan numunelerde kuma gözlemlendiği için, değişen miktarlarda sodyum silikat kullanılarak numuneler üretilmiştir. Bu amaçla yalnızca sodyum hidroksit kullanılarak üretilen numunelerde en iyi sonuç veren yüksek fırın cürufu ve uçucu kül miktarları puzolan olarak kullanılmıştır. En iyi sonuç veren uçucu kül katkılı numunelerde uçucu kül miktarı 100gr, yüksek fırın cürufu katkılı numunelerde, cüruf miktarı 200gr olarak belirlenmiştir. Cüruf ve uçucu kül miktarları seçildikten sonra, numune üretimlerinde sodyum hidroksit miktarı da sabit tutulmuş, sodyum silikat miktarı değiştirilerek numuneler üretilmiştir. Kullanılan sodyum hidroksit 25, 50, 75, 100 ve 125gr olarak farklı miktarlarda kullanılmıştır. Numunelere taze halde yayılma tablası deneyi yapılmış, vicat deneyi ile de priz süreleri tespit edilmiştir. 28 gün oda koşullarında bekletilen numunelerin 28 gün sonunda birim hacim ağırlıkları, su emme oranları, poroziteleri, eğilme ve basınç mukavemetleri tespit edilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen veriler karşılaştırılarak, kullanılan katkıların harcın özelliklerine etkileri belirlenmiştir.

**Tablo 4.9.** Üretilen numunelerin isimleri ve açıklamaları

Numune Adı	Açıklama
PA	4gr priz hızlandırıcı içeren numune
PB	8gr priz hızlandırıcı içeren numune
N	165 gr NaOH içeren şahit numune
UA	165 gr NaOH ve 50gr uçucu kül içeren numune
UB	165 gr NaOH ve 100gr uçucu kül içeren numune
UC	165 gr NaOH ve 150gr uçucu kül içeren numune
UD	165 gr NaOH ve 200gr uçucu kül içeren numune
YA	165 gr NaOH ve 50gr yüksek finn cürufu içeren numune
YB	165 gr NaOH ve 100gr yüksek finn cürufu içeren numune
YC	165 gr NaOH ve 150gr yüksek finn cürufu içeren numune
YD	165 gr NaOH ve 200gr yüksek finn cürufu içeren numune
M	165gr NaOH ve 165gr Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> içeren şahit numune
U1	165gr NaOH, 165gr Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ve 50gr uçucu kül içeren numune
U2	165gr NaOH, 165gr Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ve 100gr uçucu kül içeren numune
U3	165gr NaOH, 165gr Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ve 150gr uçucu kül içeren numune
U4	165gr NaOH, 165gr Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ve 200gr uçucu kül içeren numune
Y1	165gr NaOH, 165gr Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ve 50gr yüksek finn cürufu içeren numune
Y2	165gr NaOH, 165gr Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ve 100gr yüksek finn cürufu içeren numune
Y3	165gr NaOH, 165gr Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ve 150gr yüksek finn cürufu içeren numune
Y4	165gr NaOH, 165gr Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ve 200gr yüksek finn cürufu içeren numune
KN1	165gr NaOH ve 25gr Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> içeren şahit numune
KN2	165gr NaOH ve 50gr Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> içeren şahit numune
KN3	165gr NaOH ve 75gr Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> içeren şahit numune
KN4	165gr NaOH ve 100gr Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> içeren şahit numune
KN5	165gr NaOH ve 125gr Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> içeren şahit numune
SU1	165gr NaOH, 25gr Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ve 100gr uçucu kül içeren numune
SU2	165gr NaOH, 50gr Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ve 100gr uçucu kül içeren numune
SU3	165gr NaOH, 75gr Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ve 100gr uçucu kül içeren numune
SU4	165gr NaOH, 100gr Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ve 100gr uçucu kül içeren numune
SU5	165gr NaOH, 125gr Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ve 100gr uçucu kül içeren numune
SY1	165gr NaOH, 25gr Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ve 200gr yüksek finn cürufu içeren numune
SY2	165gr NaOH, 50gr Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ve 200gr yüksek finn cürufu içeren numune
SY3	165gr NaOH, 75gr Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ve 200gr yüksek finn cürufu içeren numune
SY4	165gr NaOH, 100gr Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ve 200gr yüksek finn cürufu içeren numune
SY5	165gr NaOH, 125gr Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ve 200gr yüksek finn cürufu içeren numune

**Tablo 4.10.** Kullanılan malzeme miktarları

Numune Adı	Su(gr)	Kireç(gr)	Tuğla kırıntı (gr)	NaOH(gr)	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Uçucu kül(gr)	Yüksek fırın cürufu (gr)	Priz hızlandırıcı(gr)
PA	546	400	1200	0	0	0	0	4
PB	548	400	1200	165	0	0	0	8
N	550	400	1200	165	0	0	0	0
UA	550	350	1200	165	0	50	0	0
UB	550	300	1200	165	0	100	0	0
UC	550	250	1200	165	0	150	0	0
UD	550	200	1200	165	0	200	0	0
YA	550	350	1200	165	0	0	50	0
YB	550	300	1200	165	0	0	100	0
YC	550	250	1200	165	0	0	150	0
YD	550	200	1200	165	0	0	200	0
M	550	400	1200	165	165	0	0	0
U1	550	350	1200	165	165	50	0	0
U2	550	300	1200	165	165	100	0	0
U3	550	250	1200	165	165	150	0	0
U4	550	200	1200	165	165	200	0	0
Y1	550	350	1200	165	165	0	50	0
Y2	550	300	1200	165	165	0	100	0
Y3	550	250	1200	165	165	0	150	0
Y4	550	200	1200	165	165	0	200	0
KN1	550	400	1200	165	25	0	0	0
KN2	550	400	1200	165	50	0	0	0
KN3	550	400	1200	165	75	0	0	0
KN4	550	400	1200	165	100	0	0	0
KN5	550	400	1200	165	125	0	0	0
SU1	550	300	1200	165	25	100	0	0
SU2	550	300	1200	165	50	100	0	0
SU3	550	300	1200	165	75	100	0	0
SU4	550	300	1200	165	100	100	0	0
SU5	550	300	1200	165	125	100	0	0
SY1	550	200	1200	165	25	0	200	0
SY2	550	200	1200	165	50	0	200	0
SY3	550	200	1200	165	75	0	200	0
SY4	550	200	1200	165	100	0	200	0
SY5	550	200	1200	165	125	0	200	0

**Tablo 4.11.** Kullanılan malzeme miktarının oranları

Numune Adı	Su bağlayıcı	Tuğla kırıntı bağlayıcı	Uçucu kül bağlayıcı	Cüruf bağlayıcı	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> /NaOH	Priz hızlandırıcı bağlayıcı
PA	1,375	3	0	0	0	0,01
PB	1,375	3	0	0	0	0,02
N	1,375	3	0	0	0	0
UA	1,375	3	0,125	0	0	0
UB	1,375	3	0,25	0	0	0
UC	1,375	3	0,375	0	0	0
UD	1,375	3	0,5	0	0	0
YA	1,375	3	0	0,125	0	0
YB	1,375	3	0	0,25	0	0
YC	1,375	3	0	0,375	0	0
YD	1,375	3	0	0,5	0	0
M	1,375	3	0	0	1	0
U1	1,375	3	0,125	0	1	0
U2	1,375	3	0,25	0	1	0
U3	1,375	3	0,375	0	1	0
U4	1,375	3	0,5	0	1	0
Y1	1,375	3	0	0,125	1	0
Y2	1,375	3	0	0,25	1	0
Y3	1,375	3	0	0,375	1	0
Y4	1,375	3	0	0,5	1	0
KN1	1,375	3	0	0	0,15	0
KN2	1,375	3	0	0	0,3	0
KN3	1,375	3	0	0	0,45	0
KN4	1,375	3	0	0	0,6	0
KN5	1,375	3	0	0	0,75	0
SU1	1,375	3	0,25	0	0,15	0
SU2	1,375	3	0,25	0	0,3	0
SU3	1,375	3	0,25	0	0,45	0
SU4	1,375	3	0,25	0	0,6	0
SU5	1,375	3	0,25	0	0,75	0
SY1	1,375	3	0	0,5	0,15	0
SY2	1,375	3	0	0,5	0,3	0
SY3	1,375	3	0	0,5	0,45	0
SY4	1,375	3	0	0,5	0,6	0
SY5	1,375	3	0	0,5	0,75	0

#### 4.2.3. Yayılma Tablası Deneyi

Yayılma Tablası deneyi gerçekleştirilirken, taze haldeki harç, 300 mm çapındaki yayılma tablasının üzerinde bulunan, 100 mm taban çapına, 70 mm üst çapına ve 60mm yüksekliğe sahip olan kesik koni şeklindeki kalıba önce yarısına kadar doldurulur, tokmakla 10 kez vurulup sıkıştırıldıktan sonra kabın tamamı doldurularak yüzeyi düzeltilir. Taze harçla dolu olan bu kalıp düzgünce kaldırıldıktan sonra taze harç saniyede 1 kez olacak şekilde 25 kez düşürülerek harcın tabla üzerinde yayılması gerçekleştirilir ve 25. düşüş bittikten sonra tabla üzerinde yayılmış haldeki harcın çapı en az 2 doğrultuda olmak üzere cetvelle ölçülerek

ortalaması alınır (Şekil 4.6). Gerçekleştirilen Yayılma Tablası Deneyi TS EN 1015-3 standardına uygun olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.6. Yayılma tablası deneyi

#### 4.2.4. Vicat Deneyi

Taze haldeki harç priz süresi tayini için vicat deneyi yapılmak üzere daha önceden yağlanmış olan vicat kalıbına doldurulur ve yüzeyi düzeltilir. Vicat cihazında bulunan iğne, kalıpta bulunan taze harca yavaşça yaklaştırılarak yüzeyine temas ettirilir. İğne serbest bırakılmadan önce 1-2 sn beklenilir ve daha sonra iğne bırakılarak serbest düşme yapması sağlanır (Şekil 4.7). Harca batması sağlandıktan 30sn sonra göstergenin gösterdiği değer okunur. Okunan değer, iğnenin ucunun bulunduğu nokta ile kalıbın üzerinde bulunduğu plaka yüzeyi arasındaki mesafeyi vermektedir. İğne batırılma işlemi 10 dakika aralıklarla gerçekleştirilmelidir. İğnenin ucuyla taban arasındaki mesafe 3-6 mm olarak okunana kadar batırılma işlemine devam edilir. İğnenin hamura batırıldığı noktaların arasında ve kalıbın kenarından 10 mm olmasına dikkat edilmelidir. Her batırma işleminin ardından iğnenin ucu temizlenmelidir. Taze harcın kalıba yerleştirildiği andan itibaren, gösterge üzerinde 3-6 mm okunana kadar geçen süre priz başlangıç süresi olarak kaydedilir. Priz bitiş süresi tayini için cam plaka üzerinde bulunan taze harçla dolu kalıp ters çevrilerek aynı harç kullanılır. Priz başlama süresinin tayini için gerçekleştirilen batırma işlemleri tekrar edilir. Gerçekleştirilen batırmalar gösterge üzerinde en fazla 0,5 mm değeri okunana kadar 30 dakikada bir devam ettirilmelidir. Gösterge üzerinden değer okunana kadar geçen süre, priz bitiş süresi olarak kaydedilir. Priz süresi tayini deneyi TS EN 196-3'e uygun olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.7. Vicat deneyi

#### 4.2.5. Birim Hacim Ağırlık Deneyi

Birim hacim ağırlık, kuru haldeki numunenin, hacmine oranıyla belirlenen bir değerdir (TS EN 1015-10, 2001). Deney uygulamasına ilk olarak, 40x40x160 mm ebatlarındaki kalıplarda üretilen numunelerin, kuru haldeki ağırlıkları tartılarak başlanır. Ölçülen değerler, numunelerin hacimlerine bölünerek numunelerin birim hacim ağırlıkları elde edilir. 3 numune için de birim hacim ağırlık değerleri belirlendikten sonra ortalamaları alınarak bu değer kaydedilir.

#### 4.2.6. Su Emme Deneyi

Su emme oranı numunenin emdiği su miktarının, numunenin kuru haldeki ağırlığına bölünmesiyle bulunan bir değerdir. Bu değer % olarak ifade edilmektedir (TS EN 13755, 2009). Deney kapsamında ilk olarak 28 günü biten numunelerin kuru ağırlıkları belirlenir ve  $W_0$  olarak kaydedilir. Kuru ağırlıkların belirlenmesinin ardından, numuneler 24 saat boyunca suda bekletilir. 24 saat sonra sudan çıkarılan numunelerin yüzeyleri kurulandıktan sonra tartılır ve kuru yüzey doygun ağırlıkları olan bu değer  $W_1$  olarak kaydedilir (Şekil 4.8).

$$\text{Su emme yüzdesi} = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \times 100 \quad (4.1)$$

$$\text{Kuru özgül ağırlık} = k\ddot{o}a = \frac{W_0}{W_1 - W_2} \quad (4.2)$$

$$\text{Porozite} = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \times k\ddot{o}a \quad (4.3)$$



Şekil 4.8. Su emme oranı ve porozite tayini

#### 4.2.7. Porozite Deneyi

Numuneler Arşimet terazisinin su dolu kovasına yerleştirilerek su içindeki ağırlıkları ölçülür (Şekil 4.9). Ölçümlerden sonra elde edilen değerler Denklem 4.1, Denklem 4.2 ve Denklem 4.3 kullanılarak su emme oranı ve porozite değerleri hesaplanır.

#### 4.2.8. Eğilme Dayanımı Testi

Eğilme dayanımı deneyi TS EN 196-1 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. 40x40x160 mm boyutlarında üretilmiş olan numuneler 28 günlük olduklarında deney cihazına yüzeylerinden biri mesnet silindirlere üzerine gelecek şekilde yerleştirilir ve açıklığın tam ortasından numune kırılıncaya kadar yük uygulanmaya devam eder (Şekil 4.9).

Numunelerin eğilme dayanımları aşağıdaki formüle göre hesaplanmaktadır:

$$f_c = 1,5 \frac{PL}{bd^2} \quad (4.4)$$

P= Deney presinden kırılma anında okunan yük değeri (N)

L= İki destek arası mesafe (mm)

b= Kiriş genişliği(mm)

d= Kiriş yüksekliği(mm)



Şekil 4.9. Eğilme dayanımı testi

#### 4.2.9. Basınç Dayanımı Testi

Basınç dayanımı deneyinde, eğilme dayanımı testinden sonra iki parçaya ayrılan numuneler kullanılır. Her yarım prizma 40x40 mm ( $A=1600 \text{ mm}^2$ ) boyutlarındaki kırma başlıklarının arasına yanal yüzeyleri temas edecek şekilde yerleştirildikten sonra kırılana kadar yükleme yapılır ve numunenin kırıldığı kuvvet not edilir (Şekil 4.10). Basınç dayanım değeri numunenin kırıldığı yükün, kuvvet uygulanan yüzeye oranlanmasıyla bulunur. Deney TS EN 196-1 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Aşağıdaki formüle göre hesaplama yapılarak deneyi yapılan örneğin basınç dayanımı bulunmuştur:

$$f_c = P_k / A \quad (4.5)$$

$P_k$ = Kırılma yükü(N)

$A$ = Yükleme yapıldığı kesitin alanı( $\text{mm}^2$ )



Şekil 4.10. Basınç dayanımı testi

## 5.DENEY SONUÇLARI

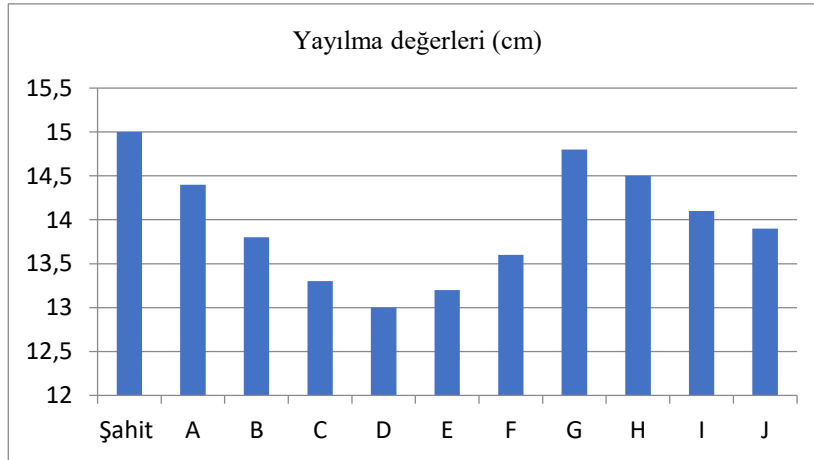
### 5.1. Birinci Aşamada Gerçekleştirilen Deney Sonuçları

1. aşamada gerçekleştirilen tüm deneylerin sonuçları Tablo 5.1’de verilmiştir.

**Tablo 5.1.** Gerçekleştirilen deneylerin sonuçları

Numune Adı	Yayıllma değerleri (cm)	Priz başlama süresi (dk)	Birim hacim ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	Su emme (%)	Porozite	Eğilme dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Basınç dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )
Şahit	15	220	1,49	28,06	0,42	0,69	1,63
A	14,4	180	1,4	27,27	0,39	0,67	1,09
B	13,8	140	1,4	25,52	0,36	0,64	1,11
C	13,3	110	1,41	23,74	0,34	0,59	1,15
D	13	100	1,39	26,23	0,37	0,48	1,22
E	13,2	130	1,4	26,32	0,37	0,47	1,26
F	13,6	150	1,42	27,31	0,38	0,44	1,28
G	14,8	130	1,4	26,24	0,36	0,36	1,24
H	14,5	120	1,4	26,04	0,37	0,41	1,32
I	14,1	100	1,41	26,42	0,39	0,61	1,42
J	13,9	90	1,42	26,65	0,4	0,69	1,45

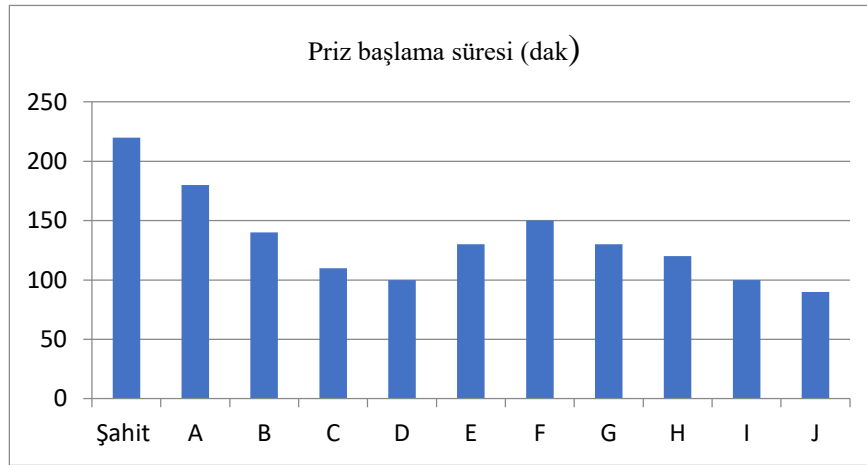
#### 5.1.1. Yayıllma Deneyi Sonuçları



**Şekil 5.1.** Yayıllma deneyi sonuçları

Bitkisel katkı malzemesi kullanılarak üretilmiş olan taze harçların kıvamını belirlemek amacıyla yapılan yayılma tablası deneyleri sonucunda; yayılma değerleri sırasıyla 150, 144, 138, 133, 130, 132, 136, 148, 145, 141, 139 mm olarak bulunmuştur (Şekil 5.1). En fazla yayılma Şahit numunesinde gözlenmiştir. Şahit numunesine göre yaprak suyu içeren A, B ve C numunelerinde sırasıyla; % 4, 8, 11.3 azalırken, kabuk suyu içeren D, E, F numunelerinde sırasıyla; %13.3, 12, 9.33 azalmıştır. Kül katkısıyla üretilen G, H, I, J numunelerinde ise sırasıyla; %1.33, 3.33, 6, 7.33 azalma gözlenmiştir. Sonuç olarak harca bitkisel katkı malzemelerinin eklenmesi, harcın işlenebilirliğini olumsuz yönde etkilemiştir.

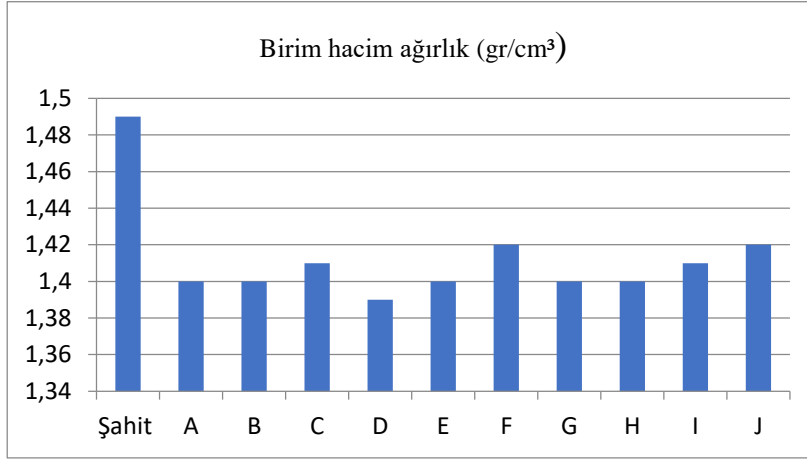
### 5.1.2. Priz Başlama Süreleri



Şekil 5.2. Priz başlama süreleri

Kireç harçları geç priz almasıyla bilinmektedir. Üretilen numunelerde priz süresi tayini sonucunda elde edilen sonuçlar incelendiğinde (Şekil 5.2) priz başlama süreleri sırasıyla; 220, 180, 140, 110, 100, 130, 150, 130, 120, 100, 90 dakika olarak belirlenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde; en fazla priz başlama süresinin 220 dakika olarak Şahit numunesine ait olduğu belirlenirken, en az priz başlama süresinin 90 dakika olarak J numunesine ait olduğu gözlemlenmiştir. Bitkisel katkı malzemeleri kullanılarak üretilen A, B, C, D, E, F, G, H, I ve J numunelerinin priz sürelerinin, katkısız şahit numunenin priz süresine göre daha kısa olduğu saptanmıştır. Yaprak ağırlığı arttıkça priz süreleri azalmıştır. Kabuk ağırlığı arttıkça priz başlama süresi artsa da yine de şahit numunenin priz süresine göre, daha düşük sonuçlar elde edilmiştir. Kireç yerine ikame edilen kül miktarı arttıkça priz başlama süresi azalmıştır. En kısa priz başlama süresine sahip numune 40 gr kül içeren J numunesi olarak belirlenmiştir.

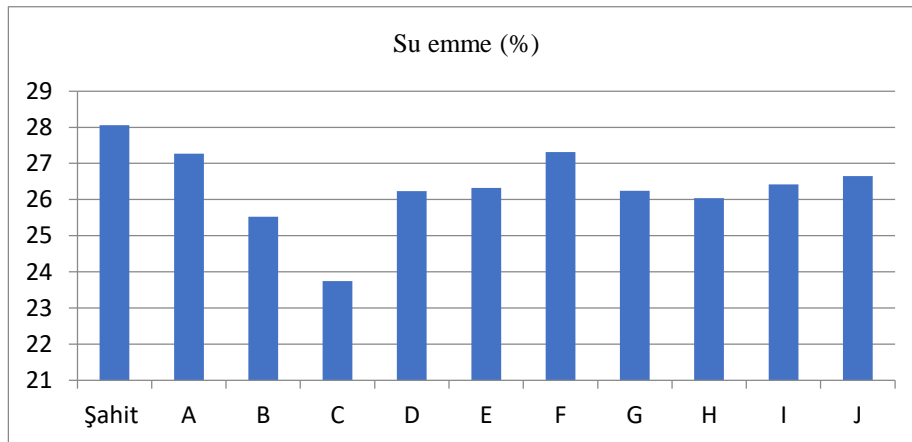
### 5.1.3. Birim Hacim Ağırlık Değerleri



Şekil 5.3. Birim hacim ağırlık değerleri

28 gün oda koşullarında bekletilen numunelerin kuru ağırlıklarının tartılarak hacim değerlerine bölünmesiyle elde edilen birim hacim ağırlık değerleri sırasıyla; 1.49, 1.4, 1.4, 1.41, 1.39, 1.4, 1.42, 1.4, 1.4, 1.42, 1.42g/cm<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir (Şekil 5.3). En büyük birim hacim ağırlık değeri Şahit numunesine aitken, en düşük değer D numunesine aittir. Numunelerin birim hacim ağırlık değerleri incelendiğinde sonuçların birbirine yakın olduğu gözlemlenmiştir. Katkı malzemeleri numunelerde boşluklu yapı oluşturarak numunenin ağırlık değerinin azalmasına neden olmuştur. En büyük birim hacim ağırlık değerine sahip olan Şahit numune katkılı numunelere göre daha az boşluğa sahip olduğu için birim hacim ağırlık değerleri diğer numunelere göre daha yüksek değerlere sahiptir.

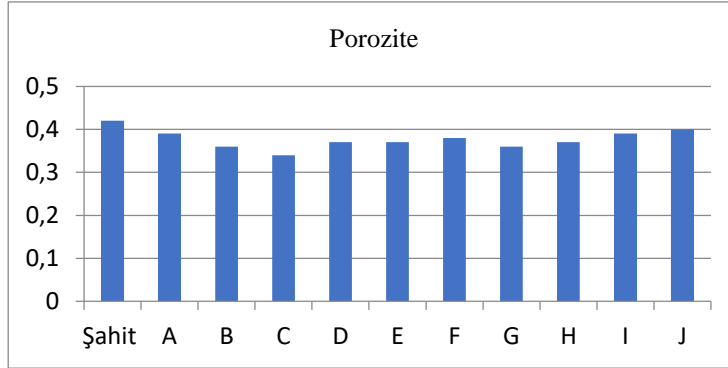
### 5.1.4. Su Emme Oranı



Şekil 5.4. Su emme oranları

Su emme oranları incelendiğinde elde edilen değerler; % 28.06, 27.27, 25.52, 23.74, 26.23, 26.32, 27.31, 26.24, 26.04, 26.42, 26.65 olarak belirlenmiştir (Şekil 5.4). En fazla su emme oranına sahip numunenin % 28.06 ile Şahit numune olduğu, en az su emme oranına sahip olan numunenin ise % 23.74 ile C numunesi olduğu gözlemlenmiştir. Su emme oranı Şahit numuneye göre A, B ve C numunelerinde sırasıyla; % 2.82, 9.05, 15.4 azalırken D, E, F numunelerinde sırasıyla; 6.5, 6.2, 2.67 azalmıştır. G, H, I ve J numunelerinde ise sırasıyla; %6.49, 7.2, 5.84, 5.02 azalma gözlemlenmiştir. Numune üretiminde kullanılan yaprak suları için kaynatılan yaprak ağırlığı arttıkça su emme oranı azalmıştır. Kaynatılan kabuk ağırlığı ve kullanılan kül miktarı arttıkça su emme oranı artsa da şahit numunenin değerlerinden daha düşük sonuçlar elde edilmiştir.

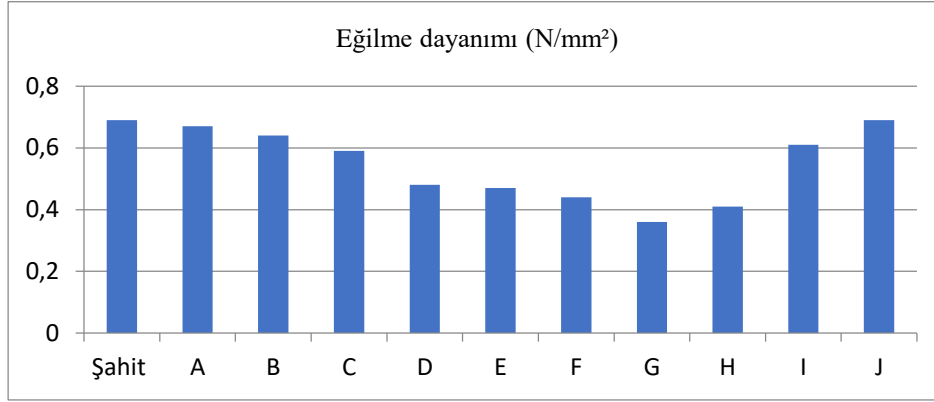
### 5.1.5. Porozite Değerleri



Şekil 5.5. Porozite değerleri

Şekil 5.5'te verilen porozite değerleri incelendiğinde, numunelerin porozite oranlarının birbirine yakın sonuçlara sahip olduğu gözlemlenmiştir. En yüksek porozite oranına sahip numunenin şahit numune olduğu, en düşük değere sahip numunenin ise C numunesi olduğu görülmektedir. Şahit numunesi ile C numunesinin porozite değerleri karşılaştırıldığında, C numunesinin değerinde şahit numuneye göre %17 azalma saptanmıştır. Suda kaynatılan yaprak ağırlığı arttıkça numunelerin boşluk oranında azalma meydana gelmiştir. Kabuk suyu ve kül kullanımı önemli ölçüde fark yaratmasa da numune üretiminde bitkisel katkı malzemesi kullanımı porozite değerlerinde azalma meydana getirmiştir.

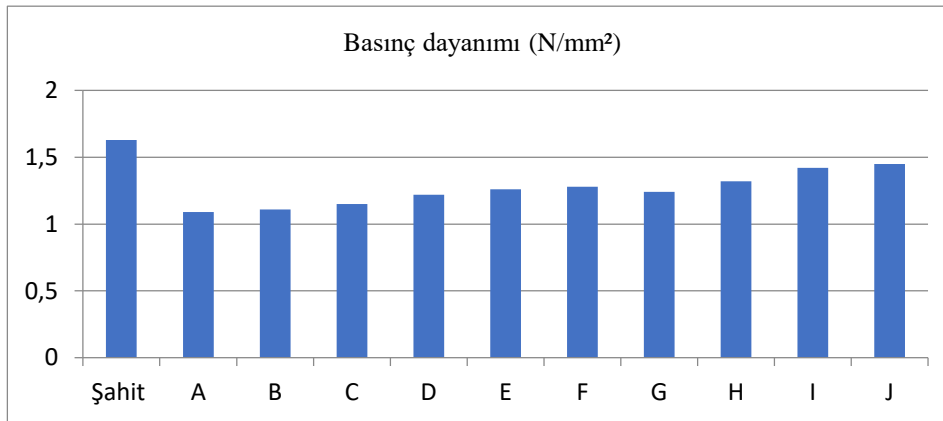
### 5.1.6. Eğilme Dayanımı Değerleri



Şekil 5.6. Eğilme dayanımı değerleri

Şekil 5.6’da verilen eğilme dayanımı testi sonuçları incelendiğinde, en yüksek eğilme dayanımı değeri Şahit numunede ve 40 gr kül içeren J numunesinde gözlemlenmiştir. En düşük değer ise 10 gr kül içeren G numunesine aittir. Şahit numunesine göre eğilme dayanımı değerleri A, B, C ve I numunelerinde yakın sonuçlar verirken D, E ve F numunelerinde ise azalma gözlemlenmiştir. G ve H numunelerinde sırasıyla; %45, %40 ile neredeyse yarı yarıya bir azalma gözlemlenmiştir. Deney sonuçlarına göre kaynatılan yaprak ve ağaç kabuğu miktarı arttıkça eğilme dayanımı değerleri azalmıştır. Kül ikamesi arttıkça numunelerin eğilme dayanımlarında artış gözlemlense de katkısız numunenin değeri aşılamamıştır. Bitkisel katkı malzemesi kullanımının numunelerin eğilme dayanımlarını iyi yönde etkilemediği anlaşılmıştır.

### 5.1.7. Basınç Dayanımı Değerleri



Şekil 5.7. Basınç dayanımı değerleri

Bitkisel katkı malzemeleri ile üretilen numunelerin, basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde en yüksek basınç dayanımı değeri Şekil 5.7’de görüldüğü gibi katkısız şahit numunesine aitken, en düşük dayanım değeri, 30 gr yaprak kaynatılarak üretilen yaprak suyunun kullanıldığı A numunesine ait olarak belirlenmiştir. Şahit numunesine göre A, B, C D, E, F, G, H, I ve J numuneleri sırasıyla; % 33.13, 31.90, 29.44, 25.15, 22.70, 21.47, 23.92, 19.02, 12,88, 11.04 azalma gözlemlenmiştir. Kaynatılan yaprak miktarı, ağaç kabuğu miktarı ve kullanılan kül miktarı arttıkça dayanım değerlerinde artış gözlemlense de şahit numunenin dayanım değerinden daha düşük sonuçlar elde edilmiştir. Deney sonuçlarına göre bitkisel katkı malzemelerinin, numunelerin basınç dayanımlarını olumsuz yönde etkilediği tespit edilmiştir.

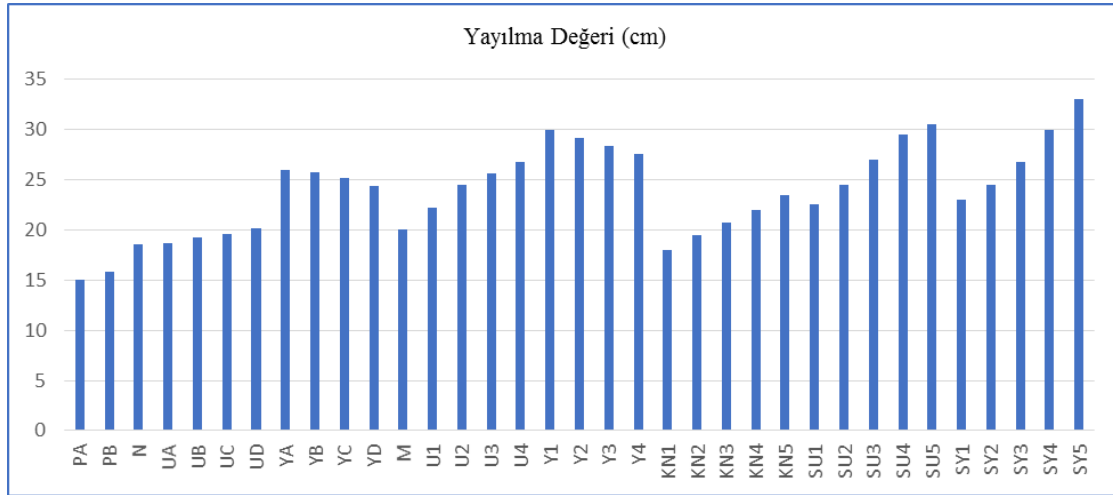
## **5.2. İkinci Aşamada Gerçekleştirilen Deney Sonuçları**

İkinci aşamada priz hızlandırıcı katkı malzemesi içeren numuneler, puzolan ve aktivatör içeren numuneler üzerinde gerçekleştirilmiş olan tüm deneylerin sonuçları Tablo 5.2’de verilmiştir.

**Tablo 5.2.** Gerçekleştirilen deneylerin sonuçları

Numune Adı	Yayılma Değeri (cm)	Priz Başlama Süresi (dak)	Brim Hacim Ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	Su Emme(%)	Porozite	Eğilme Dayanımı(N/mm <sup>2</sup> )	Basınç Dayanımı(N/mm <sup>2</sup> )
PA	15	160	1,39	26,79	0,38	0,53	1,47
PB	15,8	130	1,41	26,34	0,37	0,71	1,56
N	18,5	170	1,85	1,05	0,02	3,52	10,97
UA	18,7	180	1,85	0,92	0,02	3,17	10,47
UB	19,2	200	1,84	1,28	0,02	3,28	12,31
UC	19,6	240	1,84	2,36	0,04	3,07	10,32
UD	20,1	270	1,83	2,71	0,05	2,49	9,65
YA	26	300 üzeri	1,73	1,81	0,03	2,38	6,42
YB	25,7	300 üzeri	1,77	1,66	0,03	3,19	8,75
YC	25,2	300 üzeri	1,81	1,22	0,02	3,09	12,43
YD	24,4	300 üzeri	1,9	3,09	0,06	3,58	22,5
M	20	90	1,79	ölçülemedi	ölçülemedi	2,47	7,7
U1	22,2	40	1,74	ölçülemedi	ölçülemedi	1,87	6,61
U2	24,5	50	1,74	ölçülemedi	ölçülemedi	1,89	6,97
U3	25,6	60	1,79	ölçülemedi	ölçülemedi	2,09	7,3
U4	26,8	80	1,81	ölçülemedi	ölçülemedi	2,56	8,09
Y1	30	70	1,77	ölçülemedi	ölçülemedi	2,87	9,83
Y2	29,2	50	1,8	ölçülemedi	ölçülemedi	3,18	13,91
Y3	28,4	30	1,8	ölçülemedi	ölçülemedi	3,53	15,1
Y4	27,5	20	1,78	ölçülemedi	ölçülemedi	3,57	16,6
KN1	18	110	1,77	2,2	0,04	2,6	5,77
KN2	19,5	90	1,78	1,77	0,03	2,75	6,5
KN3	20,75	80	1,81	1,44	0,02	2,84	6,91
KN4	22	60	1,83	1,83	0,03	2,5	6,9
KN5	23,5	50	1,84	2,75	0,05	2,38	6,2
SU1	22,5	120	1,83	1,35	0,02	1,82	9,23
SU2	24,5	90	1,79	2,61	0,05	2,33	9,01
SU3	27	70	1,86	2,53	0,04	2,34	8,97
SU4	29,5	60	1,8	3,04	0,06	2,08	8,14
SU5	30,5	40	1,82	1,61	0,03	2,36	9,6
SY1	23	140	1,84	2,01	0,04	3,33	13,8
SY2	24,5	100	1,82	2,43	0,04	2,97	12,4
SY3	26,75	80	1,8	1,85	0,03	3,68	17,5
SY4	30	50	1,78	2,86	0,05	3,21	11,6
SY5	33	30	1,76	ölçülemedi	ölçülemedi	3,04	12,1

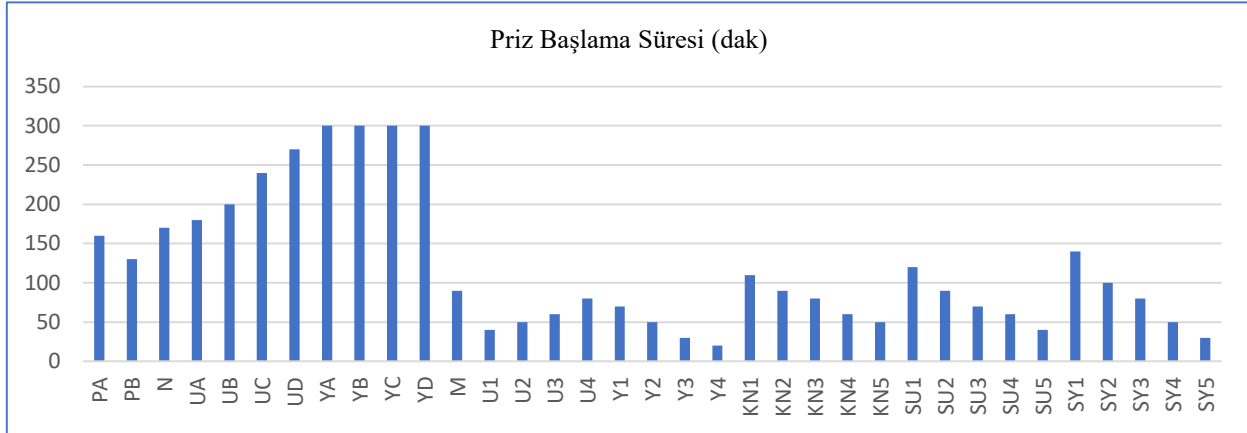
### 5.2.1. Yayılma Deneyi Sonuçları

**Şekil 5.8.** Yayılma deneyi sonuçları

Geopolimer kullanılarak üretilmiş olan taze haldeki numunelerin üzerinde gerçekleştirilmiş olan yayılma deneyi sonuçları incelendiğinde, en fazla yayılma değerinin SY5

numunesine ait olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 5.8). Deneylerin sonucunda, karışıma uçucu kül, yüksek fırın cürufu, sodyum hidroksit ve sodyum silikat eklenmesinin yayılmayı arttırdığı gözlemlenmiştir. En fazla yayılmanın görüldüğü SY5 numunesi 200 gr yüksek fırın cürufu, 165 gr sodyum hidroksit ve 125 gr sodyum hidroksit katkılı numunedir. En az yayılma değeri ise 4 gr priz hızlandırıcı katkı malzemesi içeren PA numunesinde gözlemlenmiştir. Katkı malzemesi kullanılmadan üretilmiş olan şahit numunenin yayılma değeri 15 cm olarak gözlemlenmiştir. Bu numunenin yayılma değeri ile geopolimer içerikli katkı malzemeleri kullanılarak üretilen numunelerin yayılma değerleri karşılaştırıldığında; priz hızlandırıcı katkı malzemesi ilavesinin çok fazla farka sebep olmadığı görülürken, karışıma sodyum hidroksit, sodyum silikat, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu eklenmesinin yayılma değerini önemli ölçüde arttırdığı gözlemlenmiştir. En fazla yayılma değerine sahip olan SY5 numunesinin yayılma değerinin, katkısız numuneye göre %120 arttığı belirlenmiştir.

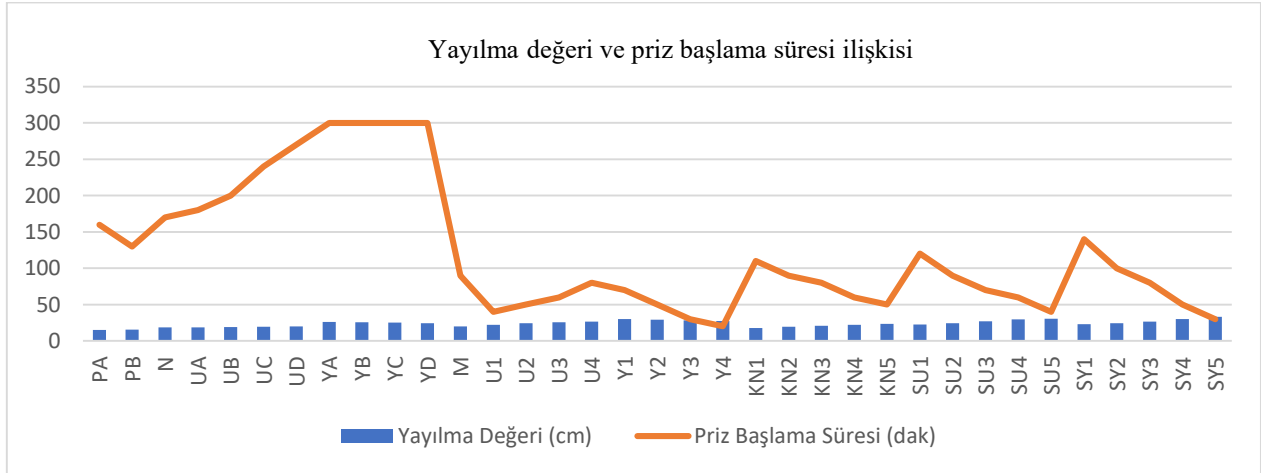
### 5.2.2. Priz Başlama Süreleri



Şekil 5.9. Priz başlama süreleri

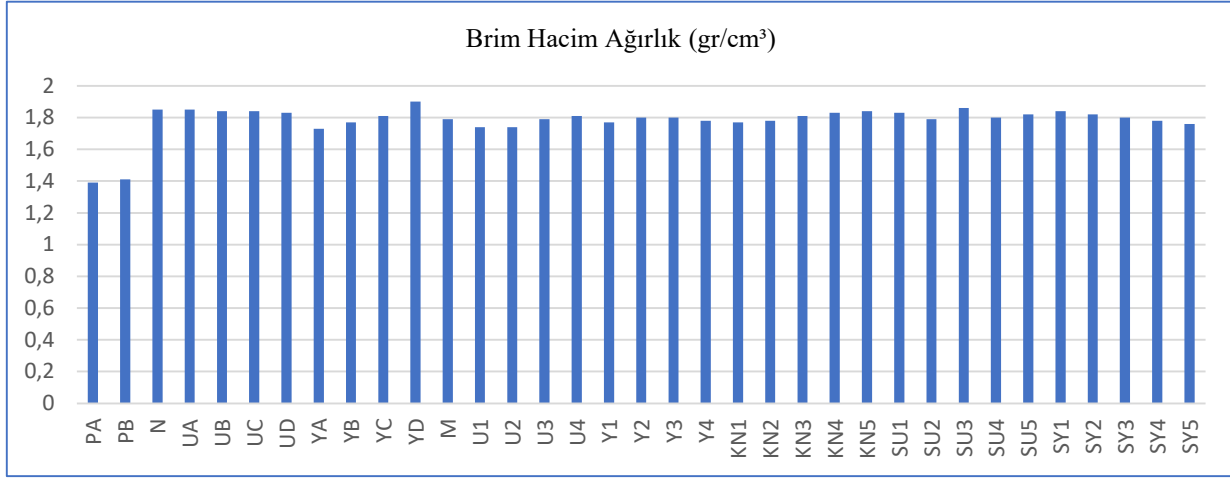
Geopolimer numunelerin priz başlama süreleri incelendiğinde, en düşük priz başlama süresine sahip numune 165 gr sodyum hidroksit, 165 gr sodyum silikat ve 200 gr yüksek fırın cürufu katkısı ile üretilen Y4 numunesi olarak belirlenmiştir. En fazla priz başlama süresine sahip olan numuneler 165 gr sodyum hidroksit ve yüksek fırın cürufu katkısıyla üretilen YA, YB, YC, YD numunelerinde gözlemlenmiştir (Şekil 5.9). Deneyler sonucunda, priz hızlandırıcı katkı malzemeleri ile üretilen PA ve PB numunelerinde, priz hızlandırıcı katkı malzemesinin miktarının artmasıyla priz başlama süresinde azalma gözlemlenmiştir. Aktivatör olarak sodyum hidroksitin tek başına kullanılması ile elde edilen numunelerde priz başlama süresinde önemli

ölçüde artış gözlemlenirken, sodyum hidroksit ve sodyum silikatın birlikte kullanıldığı numunelerde sodyum silikat miktarı arttıkça priz başlama sürelerinde önemli ölçüde azalma saptanmıştır. Katkısız olan şahit numunenin priz başlama süresi ile geopolimer içerikli katkı malzemeleri kullanılarak üretilmiş olan numunelerin priz başlama süreleri karşılaştırıldığında; en fazla priz başlama süresine sahip olan, aktivatör olarak yalnızca sodyum hidroksitin puzolan olarak ise yüksek fırın cürufunun kullanıldığı YA, YB, YC ve YD numunelerinin, şahit numuneye göre %45'ten fazla arttığı gözlemlenmiştir. En düşük priz başlama süresine sahip olan, aktivatör olarak 165gr sodyum hidroksit ile 165gr sodyum silikatın puzolan olarak ise 200 gr yüksek fırın cürufunun kullanıldığı Y4 numunesinin şahit numuneye göre ise %90 azaldığı gözlemlenmiştir. Kireç harçları geç priz almasıyla bilinen harçlar olduğu için, sodyum silikat kullanımı priz başlama süresinde önemli ölçüde bir fark yaratmıştır. Fakat sodyum silikat miktarının artmasıyla priz sürelerindeki kısalmayla ters orantılı olarak numunelerde kuma gözlemlenmiştir. Yayılma değeri ve priz başlama süreleri arasındaki ilişkiyi gösteren Şekil 5.10'da görüldüğü gibi, sodyum silikat içeren numuneler hariç olmak üzere, yayılma değeri arttıkça priz başlama süreleri uzamıştır. Sodyum silikat içeren numunelerde ise yayılma değeri arttıkça priz başlama sürelerinde kısalma gözlemlenmiştir.



Şekil 5.10. Yayılma değeri ve priz başlama süresi ilişkisi

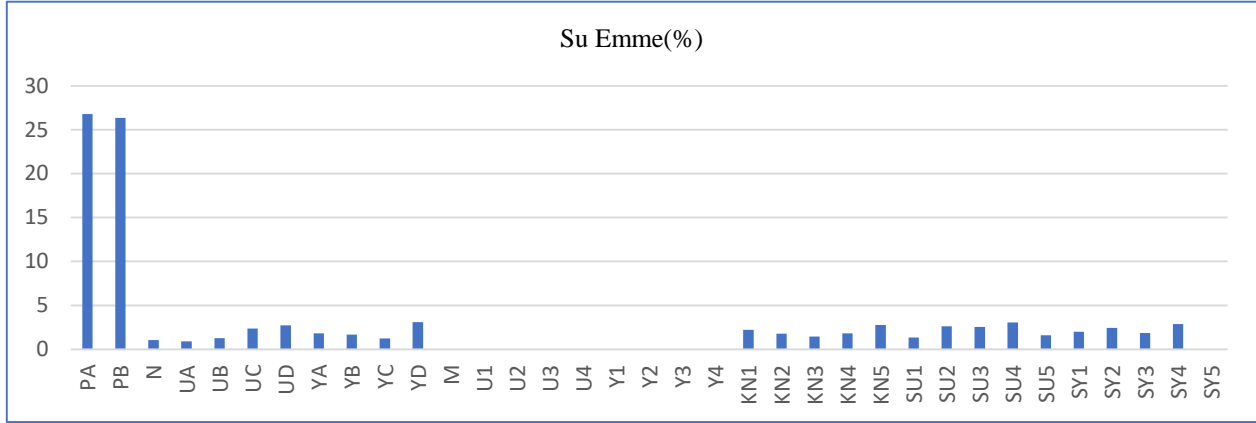
### 5.2.3. Birim Hacim Ağırlık Değerleri



Şekil 5.11. Birim hacim ağırlık değerleri

Geopolimer numunelerin 28 gün sonraki sertleşmiş hallerinin birim hacim ağırlık değerleri incelendiğinde (Şekil 5.11), değerlerin birbirine yakın sonuçlar olduğu gözlemlenmiştir. Priz hızlandırıcı katkı malzemesi içeren PA ve PB numunelerinin birim hacim ağırlık değerleri diğer numunelere göre daha düşük değerlere sahiptir. Priz hızlandırıcı katkı malzemelerinin diğer katkı malzemelerine göre daha boşluklu bir yapı oluşturarak numunelerin ağırlıklarında azalma meydana getirdiği sonucuna ulaşılmıştır. Katkısız şahit numunenin birim hacim ağırlık değeri incelendiğinde, PA numunesinde şahit numuneye göre %10'dan fazla, PB numunesinde ise %5 azalma gözlenmiştir. En fazla birim hacim ağırlık değerine sahip numune katkı malzemesi olarak 165 gr sodyum hidroksit ve 200 gr yüksek fırın cürufu kullanımıyla elde edilen YD numunesidir. YD numunesinin birim hacim ağırlık değeri şahit numuneye göre %25'ten fazla artış göstermiştir. Geopolimer içerikli katkı malzemelerinin numunelerin boşluklarını doldurduğu ve ağırlıklarını arttırdığı sonucuna varılmıştır.

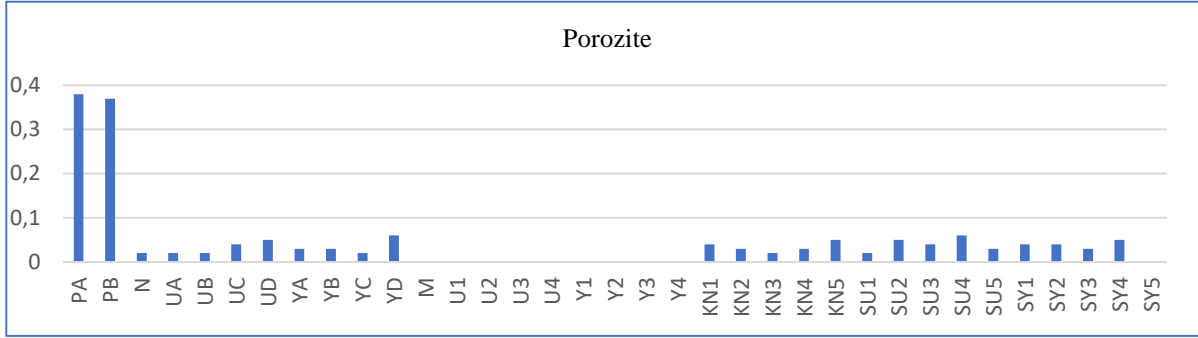
#### 5.2.4. Su Emme Oranları



Şekil 5.12. Su emme oranları

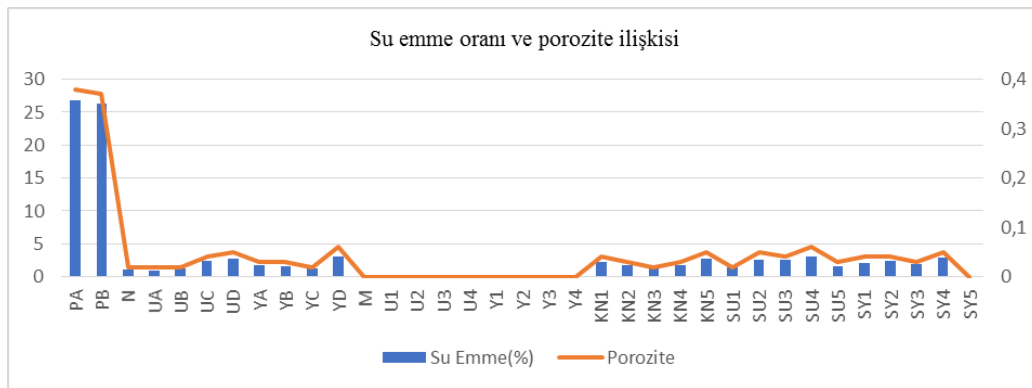
Geopolimer numunelere 28 gün sonra yapılmış olana su emme deneyleri sonucunda elde edilen su emme oranları incelendiğinde (Şekil 5.12); 50 gr uçucu kül ve aktivatör olarak 165 gr sodyum hidroksitin kullanılmasıyla üretilen UA numunesinin en düşük su emme oranına sahip olduğu gözlemlenmiştir. En fazla su emme oranları priz hızlandırıcı katkı malzemesi içeren PA ve PB numunelerinde gözlemlenmiştir. 165 gr sodyum silikat, 165 gr sodyum hidroksit içeren M, U1, U2, U3, U4, Y1, Y2, Y3, Y4 numuneleri ile 200 gr yüksek fırın cürufu ve 125 gr sodyum silikat içeren SY5 numunesi, su emme deneyi için suda bekletilirken parçalanmış ve numuneler üzerinde deney gerçekleştirilememiştir. Katkı malzemesi kullanılmadan üretilen şahit numunenin su emme oranı incelendiğinde, PA ve PB numunelerinin su emme oranları şahit numunenin oranına göre %1 azalırken, en az su emme oranına sahip numune olan ve 165 gr sodyum hidroksit ile 50 gr uçucu kül içeren UA numunesinde ise %96 azalma gözlemlenmiştir. Kullanılan katkı malzemelerinin su emme oranları üzerinde olumlu etkileri olduğu gözlemlenirken, kullanılan sodyum silikat miktarının artması numuneleri olumsuz etkilemektedir.

### 5.2.5. Porozite Değerleri



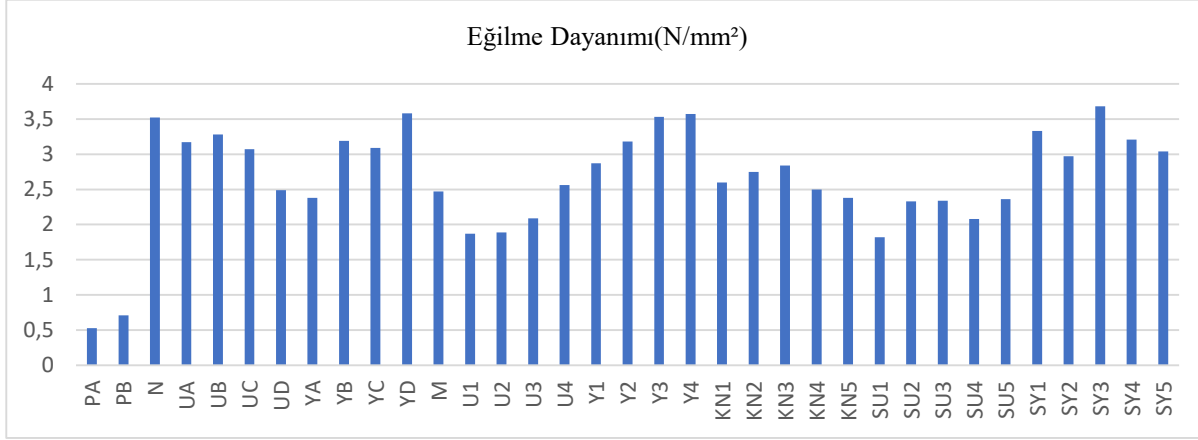
Şekil 5.13. Porozite değerleri

Geopolimer numunelerin porozite değerleri incelendiğinde (Şekil 5.13), priz hızlandırıcı katkı malzemesi kullanımının numunelerin porozite değerleri üzerinde, katkısız şahit numunenin porozite değerleri ile karşılaştırıldığında çok fazla fark yaratmadığı gözlenmiştir. Suda parçalanmış 165 gr sodyum silikat, 165 gr sodyum hidroksit içeren M, U1, U2, U3, U4, Y1, Y2, Y3, Y4 numuneleri ile 200 gr yüksek fırın cürufu ve 125 gr sodyum silikat içeren SY5 numunesi hariç diğer numunelerin porozite değerleri birbirine yakın sonuçlar vermiştir. PA ve PB numuneleri dışında aktivatör ve puzolan kullanılan numunelerde şahit numuneye göre %90'dan fazla azalma gözlemlenmiştir. Üretimde kullanılan puzolan ve aktivatörlerin numunelerin porozite değerleri üzerinden olumlu etkiler meydana getirdiği tespit edilmiştir. Sodyum silikat miktarının artması numunelerin suda zarar görmesine sebep olduğu için 75 gr'dan fazla kullanılması olumsuz sonuçlara neden olmuştur. Su emme oranı ve porozite değerlerinin birbiriyle doğru orantılı olduğu Şekil 5.14'te görülmektedir. Numunenin porozite değeri arttıkça su emme oranı da artış göstermiştir. Porozite azaldıkça numuneye su girişi azalmış ve su emme oranı düşmüştür.



Şekil 5.14. Su emme oranı ve porozite ilişkisi

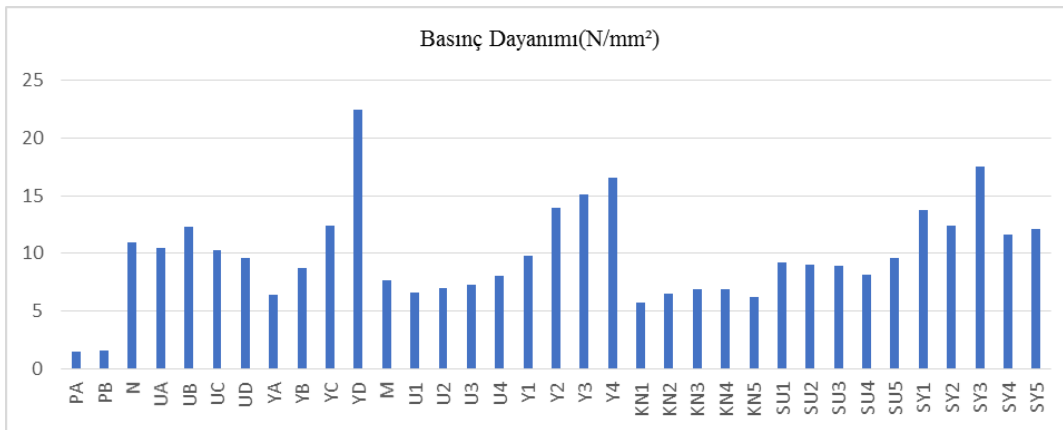
## 5.2.6. Eğilme Dayanımı Değerleri



Şekil 5.15. Eğilme dayanımı değerleri

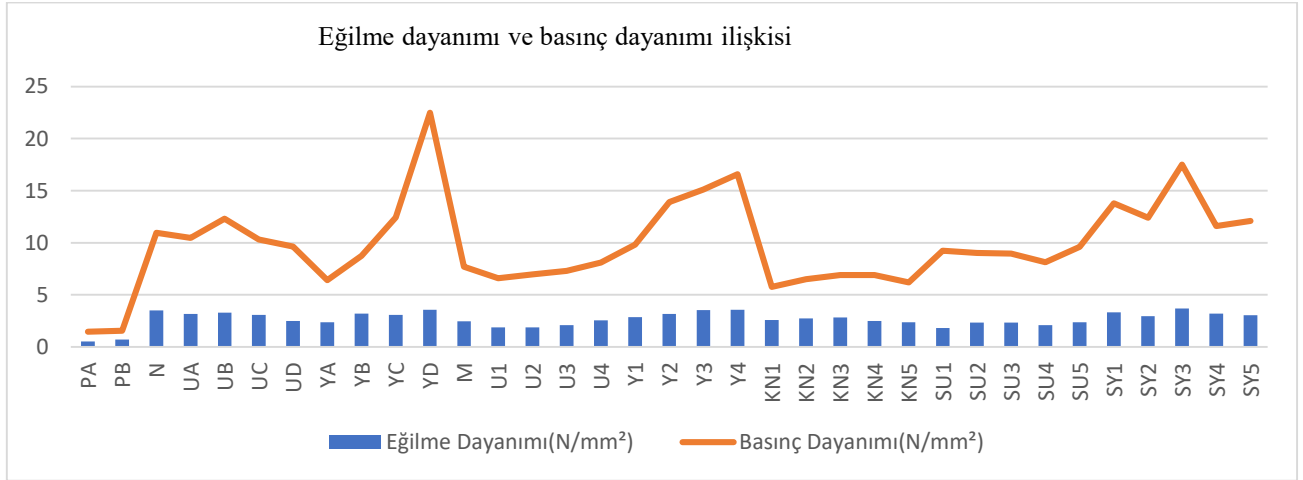
Geopolimer numunelerin 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları incelendiğinde (Şekil 5.15), en yüksek eğilme dayanımı değerinin 165 gr sodyum hidroksit, 75 gr sodyum silikat ve 200 gr yüksek fırın cürufunun kullanıldığı SY3 numunesine ait olduğu tespit edilirken, en düşük eğilme dayanımı 4gr priz hızlandırıcı katkı malzemesi içeren PA numunesinde kaydedilmiştir. Katkısız şahit numunenin eğilme dayanımına göre PA numunesi %17 azalırken, SY3 numunesinde ise %430 artış gözlemlenmiştir. Eğilme dayanımı sonuçları incelendiğinde, sodyum hidroksit ve sodyum silikat katkısının numunelerin eğilme dayanımlarına önemli oranda pozitif katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Puzolan olarak uçucu kül kullanımı dayanım artışı sağlasa da en yüksek değerler, yüksek fırın cürufunun kullanıldığı numunelerde gözlemlenmiştir.

## 5.2.7. Basınç Dayanımı Değerleri



Şekil 5.16. Basınç dayanımı değerleri

Geopolimer numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değerleri incelendiğinde (Şekil 5.16), en yüksek dayanımı aktivatör olarak sodyum hidroksit'in tek başına kullanıldığı, puzolan olarak 200 gr yüksek fırın cürufunun eklendiği YD numunesinde tespit edilmiştir. En düşük değer ise 4 gr priz hızlandırıcı katkı malzemesi ile üretilen PA numunesinde gözlemlenmiştir. Katkısız şahit numuneye göre PA numunesinin basınç dayanımı %10 azalırken, YD numunesinin basınç dayanımı %1290 artmıştır. Elde edilen sonuçlara göre puzolan ve aktivatörlerin numunelerin basınç dayanımlarını önemli ölçüde arttırdığı tespit edilmiştir. Yüksek fırın cürufu miktarı arttıkça genellikle dayanım artmış, uçucu kül miktarı arttıkça azalmıştır. En yüksek sonuçlar yüksek fırın cürufunun kullanıldığı numunelerde gözlemlenmiştir. Sodyum silikat miktarının artması numunelerde kasmaya neden olduğu için, tek başına sodyum hidroksit'in kullanıldığı numunelerin basınç dayanımlarından daha düşük sonuçlar elde edilmesine neden olsa da şahit numuneye göre daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Sodyum hidroksit'in ve sodyum silikatın uygun oranlarda kullanılmasıyla kasma önlenerek daha yüksek basınç dayanımları elde edilebileceği sonucuna varılmıştır. Eğilme dayanımı ve basınç dayanımı değerleri Şekil 5.17'de de görüldüğü gibi birbirleriyle doğru orantılı olarak artmakta ve azalmaktadır.



Şekil 5.17. Eğilme dayanımı ve basınç dayanımı arasındaki ilişki

## 6. SONUÇLAR

Birinci aşamada bitkisel katkı malzemeleri kullanılarak üretilen numunelere ait deney sonuçları incelendiğinde:

- Harçlara katkı malzemesi olarak yaprak suları eklenerek üretilen A, B ve C numunelerinde; yaprak miktarı arttıkça priz süresi azalmıştır. Su emme oranı ve porozite değerleri şahit numuneye göre daha olumlu sonuçlar vermiştir. En az su emme oranı ve poroziteye sahip olan numunenin 90 gr yaprak kaynatılarak elde edilen yaprak suyu katkısıyla üretilen C numunesi olduğu gözlemlenmiştir. Yaprak suyu katkısı basınç ve eğilme dayanımı üzerinde olumsuz etkilere neden olmuştur.
- Harçlara katkı malzemesi olarak ağaç kabuğu suyu eklenerek üretilen D, E ve F numunelerinde; Priz süreleri şahit numunenin priz süresine göre daha düşük olsa da kaynatılan kabuk miktarının artmasıyla numunelerin priz sürelerinde artış gözlemlenmiştir. Kaynatılan kabuk miktarı arttıkça su emme ve porozite değerleri artış gösterse de sonuçlar şahit numunenin sonuçlarına göre daha iyidir. Kabuk miktarının artmasıyla eğilme dayanımı azalmış, basınç dayanımları artış göstermesine rağmen şahit numunenin basınç dayanımı değerine ulaşamamıştır.
- Harçlara katkı malzemesi olarak odun külü eklenmesiyle üretilen G, H, I ve J numunelerinde, kül miktarı arttıkça priz süresi kısalmıştır. En kısa priz süresi 90 dakika olarak J numunesinde gözlemlenmiştir. Su emme oranları H numunesi haricinde artış gösterse de şahit numuneye göre daha düşük sonuçlar elde edilmiştir. Basınç ve eğilme dayanımları artış göstermiş ve şahit numunenin değerlerine yakın sonuçlar elde edilmiştir. 40 gr odun külü kullanılarak üretilen numunenin eğilme dayanım sonucu, şahit numunenin eğilme dayanım sonucu olan 0,69 N/mm<sup>2</sup> değerine ulaşmıştır.

Sonuç olarak kullanılan bitkisel katkı malzemeleri priz süresini azaltmış, en düşük priz süresi katkı malzemesi olarak 40 gr odun külü kullanımıyla elde edilmiştir. Kullanılan katkı malzemeleri harcın içyapısındaki boşlukları doldurarak su emme oranı ve porozite değerlerinin azalmasını sağlamıştır. En düşük su emme oranı 90 gr yaprağın suda kaynatılarak elde edilen karışım suyunun numune üretiminde kullanılmasıyla sağlanmıştır. En düşük porozite değeri yine 90 gr yapraktan elde edilen suyun kullanıldığı C numunesinden elde edilmiştir. Kullanılan

katkı malzemelerinin basınç ve eğilme dayanımlarını olumsuz olarak etkilediği gözlemlenirken, 40 gr odun külü kullanılarak üretilen numunenin basınç dayanımı, şahit numunenin basınç dayanımı değerine yaklaşmıştır. Eğilme dayanımı Şahit numunenin eğilme dayanımı değerine ulaşmıştır.

İkinci aşamaya ait deney sonuçları incelendiğinde;

- Priz hızlandırıcı katkı malzemesi kullanılarak üretilen PA ve PB numunelerinde; priz hızlandırıcı katkı malzemesi miktarı arttıkça, katkısız şahit numuneye göre priz başlama süresi, su emme oranı ve porozite değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Dayanımlarda şahit numuneye göre düşüşler gözlemlenmiştir. Katkı malzemesi olarak priz hızlandırıcı kullanımının numunelerin işlenebilirliğini arttırdığı saptanmıştır.
- Numunelerde puzolan olarak uçucu kül, aktivatör olarak yalnızca sodyum hidroksitin kullanıldığı numunelerde şahit numuneye göre; priz başlama sürelerinde ve dayanımlarda artış gözlemlenirken, su emme oranı ve porozite değerlerinde azalma gözlemlenmiştir. En düşük su emme oranı 50gr uçucu kül içeren UA numunesinde gözlemlenmiştir. Uçucu kül ve sodyum hidroksitin kullanımının numunelerin su emme oranlarını, porozite değerlerini ve dayanımlarını olumlu yönde etkilerken, priz başlama süresini uzattığı gözlemlenmiştir.
- Numunelerde puzolan olarak yüksek fırın cürufu, aktivatör olarak yalnızca sodyum hidroksitin kullanıldığı numunelerde şahit numuneye göre; priz başlama sürelerinde ve dayanımlarında artış gözlemlenirken, su emme oranı ve porozite değerlerinde azalma gözlemlenmiştir. Yüksek fırın cürufu ve sodyum hidroksitin kullanımı numunelerin yayılma değerlerini önemli ölçüde arttırmıştır. En yüksek basınç dayanımı değeri 200 gr yüksek fırın cürufu ve aktivatör olarak yalnızca sodyum hidroksitin kullanıldığı YD numunesinden 22,5 MPa olarak elde edilmiştir. Yüksek fırın cürufu miktarının artması numunelerin su emme oranlarını, porozite değerlerini ve dayanımlarını olumlu yönde etkilese de, priz başlama süresini geciktirdiği gözlemlenmiştir.
- Numunelerde aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikatın 1/1 oranında kullanılması, katkısız olarak üretilen Şahit numuneye göre numunelerin basınç ve

eğilme dayanımını arttırmış, priz başlama sürelerini düşürmüştür. Numuneler su emme deneyi için suda bekletildikleri süre içinde parçalandığı için su emme oranı ve porozite deneyleri gerçekleştirilememiştir. Kireç harcının geç priz alan bir malzeme olduğu düşünüldüğünde, Şahit numuneye göre priz başlama süresini önemli ölçüde azalttığı gözlemlenmiştir. Fakat kullanılan sodyum silikat miktarının fazla olması nedeniyle numunelerde kuma gözlemlenmiştir. Kullanılan puzolan miktarı arttıkça kuma miktarı da artış göstermiştir. Aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikatın birlikte kullanıldığı numunelerin priz başlama süreleri, yalnızca sodyum hidroksitin kullanıldığı numunelerin priz başlama sürelerine kıyasla daha kısadır. En kısa priz süresi 200gr yüksek fırın cürufu içeren numunesinde 20 dakika olarak gözlemlenmiştir. Ayrıca numunelerde kumaya sebep olduğu için numunelerin dayanımı, sadece sodyum hidroksit kullanılan numunelerinden daha düşük olarak belirlenmiştir.

- Numunelerde aktivatör olarak kullanılan sodyum hidroksit/sodyum silikat oranının 1/1 olarak seçilmesiyle üretilen numunelerde kuma gözlemlendiği için farklı oranlarda sodyum silikat kullanılarak farklı gruplarda numune üretilmiştir. Numunelerde puzolan olarak kullanılan uçucu kül 100 gr, yüksek fırın cürufu ise 200 gr olacak şekilde sabit tutulmuştur. Sodyum hidroksit 165gr olarak sabit tutularak, sodyum silikat 25, 50, 75, 100, 125gr olacak şekilde hem uçucu küllü hem de yüksek fırın cürufu numuneler üretilmiştir. Sodyum silikat miktarının artması numunelerin dayanımlarında artış sağlarken aynı zamanda priz başlama sürelerini azaltmıştır. En yüksek eğilme dayanımı; 165gr sodyum hidroksit, 75gr sodyum silikat ve 200gr yüksek fırın cürufu içeren SY3 numunesinde gözlemlenmiştir. Porozite değerleri ise birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Deneylein sonuçları incelendiğinde en iyi sonuçların genellikle 75 gr sodyum silikat kullanılan numunelere ait olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca numunelerde puzolan olarak yüksek fırın cürufu kullanımının basınç ve eğilme dayanımı üzerinde, uçucu kül kullanımına nazaran daha olumlu sonuçlar oluşturduğu belirlenmiştir. Uçucu kül kullanımının ise su emme ve porozite değerlerine daha olumlu etkileri olduğu tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, bitkisel katkı malzemelerinin katkı olarak kullanılması, numunelerin su emme, porozite ve priz başlama süresi özelliklerini geliştirmek amacıyla tercih edilebilirken,

dayanımlarında oluşacak olumsuz etkiler göz önünde bulundurulmalıdır. Bitkisel katkı malzemeleriyle üretilen kireç harçlarının, tarihi yapıların restorasyonunda tamir harcı olarak kullanılması önerilirken, tarihi yapılarda oluşacak bozulmaları önlemek ve onarımını yapmak amacıyla kullanılacak olan harçların, tarihi yapıdaki orijinal malzemeyle benzer özelliklerde ve uyumlu olması gerektiği için, geopolimer içerikli kireç harçlarının, yeni yapılacak olan yapılarda, çimento kullanımını minimize etmek ve bu sayede çevre kirliliğini önleyebilmek amacıyla kullanımı önerilmektedir. Aktivatör olarak sodyum hidroksit'in tek başına kullanılması numunelerin basınç ve eğilme dayanımlarını önemli ölçüde iyileştirirken priz başlama süresini geciktirmiştir. Priz süresinin kısaltılması amacıyla kullanılan sodyum silikatın olumlu sonuçlar yarattığı belirlenmiştir. Fakat kullanılan sodyum silikat/sodyum hidroksit oranının 0,45'i geçmemesi önerilmektedir. Sodyum silikat miktarının artışı numunelerde kismaya, dayanımlarında azalmaya ve suya karşı direncinin düşmesine sebebiyet vermektedir. Puzolan olarak uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanımının numunelerin tüm özelliklerini iyileştirdiği ve şahit numuneye göre daha iyi sonuçlar sağladığı saptanmıştır.

**Tablo 6.1.** Kullanılan katkı malzemelerinin numunelere etkileri

<b>Katkı Malzemesi</b>	<b>Olumlu Etkileri</b>	<b>Olumsuz Etkileri</b>
Meşe ağacı yaprağı suyu	Priz başlama süreleri kısalmış, su emme oranı ve porozite değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir.	Eğilme ve basınç dayanımlarında azalma meydana gelmiştir.
Meşe ağacı kabuğu suyu	Priz başlama süreleri kısalmış, su emme oranı ve porozite değerleri azalmıştır	Eğilme ve basınç dayanımlarında düşüş gözlemlenmiştir.
Meşe ağacı külü	Priz başlama süreleri kısalmış, su emme oranı ve porozite değerleri azalmıştır.	Eğilme ve basınç dayanımlarında artış olsa da şahit numunenin sonuçlarından düşük sonuçlar elde edilmiştir.
Priz hızlandırıcı katkı malzemesi	Priz başlama süreleri, su emme oranları ve porozite değerleri azalmıştır.	Eğilme ve basınç dayanımları azalmıştır.
Sodyum hidroksit+Uçucu kül	Su emme oranları ve porozite değerleri azalmış, eğilme ve basınç dayanımları artmıştır.	Priz başlama süreleri uzamıştır.
Sodyum hidroksit+Yüksek fırın cürufu	Su emme oranları ve porozite değerleri azalmış, eğilme ve basınç dayanımları artmıştır.	Priz başlama süreleri önemli ölçüde artmıştır.
Sodyum hidroksit+Sodyum silikat+Uçucu kül	Sodyum silikat miktarı arttıkça priz başlama süreleri kısalmıştır. Sodyum silikat/ sodyum hidroksit oranı 0,45'ten az olan numunelerin su emme oranları ve porozite değerleri düşmüş, eğilme ve basınç dayanımları artmıştır.	Sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 0,45'in üzerine çıktıkça numunelerde kuma gözlemlenmiştir. Kuma gözlemlenen numuneler suda parçalanmıştır. Kusan numunelerin dayanımlarında düşüş gözlemlenmiştir.
Sodyum hidroksit+Sodyum silikat+Yüksek fırın cürufu	Sodyum silikat miktarı arttıkça priz başlama süreleri kısalmıştır. Sodyum silikat/ sodyum hidroksit oranı 0,45'ten az olan numunelerin su emme oranları ve porozite değerleri düşmüş, eğilme ve basınç dayanımları artmıştır.	Sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 0,45'in üzerine çıktıkça numunelerde kuma gözlemlenmiştir. Kuma gözlemlenen numuneler suda parçalanmıştır. Kusan numunelerin dayanımlarında düşüş gözlemlenmiştir.

## KAYNAKÇA

- Akbulut, E.A.** (2006). Tarihi Yapıların Onarımında Kullanılacak Harçların Seçimine Yönelik Bir Öneri. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 178 S.
- Akman, M. S.** (2003). Yapı Malzemelerinin Tarihsel Gelişimi. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, Sayı 426 (S. 30–36).
- Akman, M. S., & Güner, A., & Aksoy, İ. H.** (1986). Horasan Harcı Ve Betonunun Tarihi Ve Teknik Özellikleri. II. Uluslararası Türk-İslam Bilim Ve Teknoloji Tarihi Kongresi. İ.T.U. İstanbul.
- Akman, S.** (1990). Yapı Malzemeleri. İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- Akman, S.** (2003). Yapı Malzemelerinin Tarihsel Gelişimi. *Türkiye Mühendislik Haberleri* (426), 30-36.7
- Aköz, F.** (2002). Tarihi Yapıların Onarımında Kullanılacak Harç Önerileri. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 2002.
- Aruntaş, Y., & Tokyay, M.** (1996). Katkılı Çimento Üretiminde Diatomitin Puzolanik Malzeme Olarak Kullanılabilirliği. *Çimento Ve Beton Dünyası*, 4: 33-41 (1996).
- ASTM C 125** (1994). Standard Terminology Relating To Concrete And Concrete Aggregates. Annual Book Of ASTM Standards.
- ASTM C 494** Tip C: Priz Hızlandırıcı Beton Katkısı
- ASTM D 8.** (1998). Standard Terminology Relating To Materials For Roads And Pavements. Annual Book Of ASTM Standards, 4-16 (1998).
- Ateşin, Ö.** (2017). Analyzing And Modeling The Effect Of High Dosage Admixture Usage On Micro Concrete Properties. Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 2017.
- Babu, K.D., & Kumar, V.S.R.** (2000). Efficiency Of GGBS In Concrete. *Cement And Concrete Research*, Vol. 30, Pp. 1031-1036, 2000.

**Barış, K.** (2016). Doğal Puzolan Katkılı Kireç Bağlayıcının Otoklavla Kür Koşullarının Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, 2016.

**Baronia, G., & Binda, L.** (1997). Study Of The Puzzolanicity Of Some Bricks And Clays. *Construction And Building Materials* (11/1), 41-46.

**Böke, H., & Akkurt, S., & İpekoğlu, B.** (2004). Tarihi Yapılarda Kullanılan Horasan Harcı Ve Sıvalarının Özellikleri. *Yapı Dergisi* 269 (S. 90-95), Nisan.

**Böke, H., & Akkurt, S., & İpekoğlu, B.** (2004). Tarihi Yapılarda Kullanılan Horasan Harcı Ve Sıvalarının Özellikleri. *Yapı Dergisi*.

**Böke, H., & Özkaya, Ö., & İpekoğlu, B.** (2006). Roma Dönemi Tuğla Ve Harçların Özellikleri: Bergama Serapis Tapınağı Örneği. 3. Ulusal Yapı Malzemesi Kongresi Ve Sergisi (S. 616-627), TMMOB Mimarlar Odası İstanbul Büyükkent Şubesi, İstanbul.

**Borrelli, E.** (1999). Binders. ARC Laboratory Handbooks. ICCROM. S.P.A. Pres. Rome.

**Bulgan, T., & Emrulloğlu, C.B., & Emrulloğlu Ö.F.** (2015). Yüksek Fırın Curufu Katkısının Çimentoya Etkisi. Afyon Kocatepe Üniversitesi, *Afyon Mühendislik Fakültesi Seramik Mühendisliği Bölümü Dergisi*, AFYON.

**Cachim, P., Velosa, A.L., Rocha, F.** (2010). Effect Of Portuguese Metakaolin Onhydraulic Lime Concrete Using Different Curing Conditions. *Consturction And Building Materials*, 24, 71-78.

**Canbaz, M., & Güler, E.** (2017). Kireç Türünün Horasan Harcı Özelliklerine Etkisi. 6.Tarihi Yapıların Korunması Ve Güçlendirilmesi Sempozyumu, 2017.

**Canbaz, M. Ve Güler, E.** (2017). Kireç Türünün Horasan Harcı Özelliklerine Etkisi. Uluslararası Katılımlı 6. Tarihi Yapıların Korunması Ve Güçlendirilmesi Sempozyumu, (S. 543-548). Kasım.

**Crhova, M., & Kuckova, S., & Hynek, R., & Kodicek, M.** (2010). Proteomicıdentification Of Milk Proteins İn Historical Mortars. 2nd Historic Mortars Conference HMC2010 And RILEM TC 203-RHM Finalworkshop , 91-97, Prague, Czech Republic : September 22-24.

**Çamlıbel, N.** (1983). Geleneksel Yapılarda Stabilitenin İyileştirilmesi. Yıldız Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, İstanbul.

**Çavdar, A.** (2004). Trabzon Yöresi Tüflerinin Çimentoda Tras Olarak Kullanılabilirliği, Çimento İnceliği Ve Tras Oranının Traşlı Çimentonun Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

**Çizer, Ö., & Böke, H., & İpekoğlu, B.** (2004). Bazı Osmanlı Dönemi Hamam Yapılarının Kubbe Ve Duvarlarında Kullanılan Kireç Harçlarının Özellikleri. Ulusal Yapı Malzemesi Kongresi Ve Sergisi, 6–8.

**Dayı, M.** (2017). Tarihi Yapılarda Kullanılan Horasan Harçlarının İncelenmesi Ve Alternatif Horasan Harcının Üretilmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, 2017.

**Diker, H., & Özgünler, S.A., & Buzlu, F.** (2020). Bizans Ve Osmanlı Yazmalarındaki Organik Harç Katkıları Üzerine Bir Araştırma. Uluslararası Ayasofya Sempozyumu Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi Yayınları; 41 (S. 835-856). İstanbul.

**Doğa Dergisi.** (2019).Ağaç Türleri, *Mimarlık, Ekoloji Dergisi*, 10 Şubat 2019.

**Elibol, C.** (2012). Alkalilerle Aktive Edilen Çimento Esaslı Malzemelerin Basınç Dayanımlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 2012.

**Elibol,C.** (2012). Alkalilerle Aktive Edilen Çimento Esaslı Malzemelerin Basınç Dayanımlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012.

**Erdoğan, T.Y.** (2007). “Beton”, Odtü Yayıncılık, Ankara, 173-175 (2007).

**Erdoğan, Ş., & Nas, M., & Nayır, S., & Kandil, U.** (2017). Uçucu Kül Ve Polipropilen Lifli Kireç Harçlarının Çimento Takviyesi İle Mekanik Özelliklerinin İyileştirilmesi. Uluslararası Katılımlı 6. Tarihi Yapıların Korunması Ve Güçlendirilmesi Sempozyumu ( 247-256). Trabzon, 2017.

**Ersen, A., & Karagüler, M., & Güleç, A.** (1995). Possible Substitutes For Khrosan Mortar In Byzantine And Ottoman Monuments. Methods Of Evaluating Products Fort He Conservation Of Porous Building Materials In Monuments, S. 15-27. Rome: ICCROM.

**Glukhovsky, V.D., & Rostovkaya, G.S., & Rumyna, G.V.** (1980). High Strength Slag-Alkali Cement. 7th International Congress On The Chemistry Of Cements, Paris, France, III, 164–168.

**Gökbel,S.** (2014). Genleştirilmiş Perlitin Horasan Harçlarında Kullanılması. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

**Gökçen, G.**(2021). Horasan Harcında Farklı Tür Ve Oranlarda Agrega Kullanımının Harcın Fiziksel Ve Mekanik Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Kırklareli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 2021.

**Grist, E.R., & Paine, K.A., & Heath, A., & Norman, J., & Pinder, H.** (2015). Structural Anddurability Properties Of Hydraulic Lime-Pozzolan Concretes. *Cementand Concrete Composites*, 62, 212-223.

**Güleç, A.** (1992). Bazı Tarihi Anıt Harç Ve Sıvalarının İncelenmesi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.

**Gür, D.** (2019). Tarihi Yapıların Onarımında Kullanılmak Üzere Puzolan katkılı Hidrolik Kireç Esaslı Onarım Harcı Üretilme olanaklarının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, 2012.

**Gürhan, F.** (2017). Aydın Eski Hamam Sıva Özellikleri, Uluslararası Katılımlı 6. Tarihi Yapıların Korunması Ve Güçlendirilmesi Sempozyumu: 2-3-4 Kasım, 2017.

**Hatipoğlu, Y.** (2014). Sönmüş Kireç Ve Çimento Harçlarının Mekanik Özelliklerinin Toz Haline Getirilmiş Bayburt Taşları Ve Zeolit İle İyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bayburt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 2014.

**He, C., & Bjarne, O., & Emil, M.** (1995). Puzzolanic Reactions Of Six Principal Clay Minerals: Activation, Reactivity Assesments And Technological Effects. *Cement And Concrete Research* (28/8), 1691-1702, 1995.

- Işık, Ö., & Kapur, S.** (2012). Konya Şerafeddin Camisi Yakınındaki Türbenin Tuğla Duvar Malzemesinin Arkeometrik Yönden Araştırılması. *Çukurova Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi* Cilt: 28 Sayı: 2 (S. 177- 187). Adana, 2012.
- Işıkdag, B., & Topçu, İ.** (2013). Improvement Of Khorasan Mortar With Fly Ash For Restoration Of Historical Buildings. *De Gruyter*, 1-9, 2013.
- Işıkdag, B., & Topçu, İ.** (2013). The Effect Of Ground Granulated Blast-Furnace Slag On Properties Of Horasan Mortar. *Construction And Building Materials* 40 (2013), 448-454.
- Kılıç, İ.** (2007). Horasan Harç Ve Sıvaları. Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi Ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu, (S. 277-283). Ankara, 2007.
- Kozlu, H.H.** (2010). Kayseri Yöresindeki Tarihi Harçların Karakterizasyonu Ve Onarım Harçlarının Özellikleri. Doktora Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.
- Kuban, D.** (1998). Mimarlık Kavramları, Yapı Endüstri Merkezi Yayınları, İstanbul, 1998.
- Kurt, Ç., & Bittner, J.** (2005). "Sodium Hydroxide", Ullmann's Encyclopedia Of Industrial Chemistry, Weinheim: Wiley-VCH, 2005.
- Kurugöl, S.** (2006). Eski Mimarilerde Kullanılmış Olan Kireç Harçlarının Genel Özellikleri. *Yapı Dünyası*, 19-24, 2006.
- Lea F.M.** (1940). "Investigations On Pozzolanas", *Building Research, Technical Paper*, No.27, Pp.1-63.
- Massazza, F.** (1998). Pozzolana And Pozzolanic Cements, Lea's Chemistry Of Cement And Concrete, 4th Ed., John Wiley & Sons Inc., New York, 1998
- Mavioğlu, Ü. A.** (2011). Farklı Puzolanik Katkılar İle Hazırlanan Horasan Harçlarının Değişen Parametrelerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011.
- Oğuz, C., & Türker, F., & Koçkal, N.U.** (2015). Andriake Limanı'nda Roma, Bizans Ve Selçuklu Dönemi Harçların Özellikleri. *İMO Teknik Dergi*, 429, 6993-7013.
- Orman Genel Müdürlüğü.** (2016). Uluslararası Katılımlı Meşe Çalıştayı, Bildiriler Ve Sonuç Bildirgesi, İğneada, 2016.

- Özgünler, A.S., & Ersen, A., & Güleç, A.** (2010). Yedikule Kara Surları' Nda Kullanılan Erken Bizans Dönemi Harçlarının Karakterizasyonu Üzerine Bir Araştırma. *İstanbul Büyükşehir Belediyesi, Restorasyon Ve Konservasyon Çalışmaları Dergisi* (5) (S. 31-39).
- Pavia, S., & Treacy, E.** (2006). A Comparative Study Of The Durability And Behaviour Of Fat Lime And Feebly-Hydraulic Lime Mortars. *Materials And Structures* (39), 391-398.
- Postacıoğlu, B.** (1986). Beton, Cilt 2, Teknik Kitaplar Yayınevi, İstanbul.
- Pusat, S.E.** (2002). Tarihi Yapıların Onarımında Kullanılacak Harç Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 10-74.
- Ramachandran, V.S.** (1996). Concrete Admixtures Handbook. *Properties, Science, And Technology*. Elsevier, P.112-115.
- Saraylı, A.** (1987). Yapı Malzemeleri Bilimi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Bölümü, İstanbul.
- Satongar Laçinyurt, Ş.** (1994). İstanbul Şehir Surları Horasan Harçları Üzerine Bir Araştırma. Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Shi, C., & Krivenko, P. V., & Roy, D.** (2006). Alkali-Activated Cements And Concretes. Taylor & Francis London, 6-22.
- Shi, C., & Krivenko, P.V., & Roy, D.** (2006). Alkali Activated Cements And Concretes, USA And Canada: Taylor And Francis, 2006.
- Şimşek, E.** (2018). Tarihi Yapılarda Tuğla Duvarların Çelik Hasır Ve Tekstil Donatılı Horasan Harcı İle Güçlendirilmesinin Deneysel Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, 2018.
- Şimşek, N.** (2021). Kenevir Lifi, Keçi Kılı Ve Polipropilen Elyaf Katkılı Horasan Harcının Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Kırklareli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 2021.
- Şişik, Ö.** (2017). Edirne'de Bulunan 15.Yy Ve 16.Yy'da İnşaa Edilmiş Tarihi Cami Ve Türbelerin Taşıyıcı Sistem Analizi Ve Çözüm Önerileri. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Konya, 2017.

**Stefanidou, M., & Papayianni, I.** (2005). The Role Of Aggregates On The Structure Andproperties Of Lime Mortars. Cement And Concrete Composites, 27, 914-919.

**Şahin, O.** (2021). Development Of Construction Demolition Waste- Based Geopolymeric Composites Suitable For Three-Dimensional Additive Manufacturing. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 2021.

**Tekin, Ç., & Kurugöl S.** (2012). Çeşitli Organik Katkıların Kirecin Karbonizasyonu Üzerindeki Etkisi. Makale, Dergipark, Cilt 27, Sayı 4, 2012.

**Topçu, İ.B., & Canbaz, M., & Karanfil, H.** (2005). Horasan Harç Ve Betonun Özellikleri. Yapı Mekaniği Semineri, Eskişehir.

**Topçu, İ.B., & Gökbel, S., & Işıklıdağ, B.** (2015). Genleştirilmiş Perlitin Horasan Harçlarında Kullanılması. II. Uluslararası Sürdürülebilir Yapılar Sempozyumu (ISBS 2015), (S. 133-137). 28-30 Mayıs, Türkiye.

**TS 25.** (2008). Doğal Puzolan (TRAS) - Çimento Ve Betonda Kullanılan - Tarifler, Gereklere Ve Uygunluk Kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

**TS EN 1015-10.** (2001). Kagir Harcı-Deney Metodları- Bölüm 10: Sertleşmiş Harcın Boşluklu Kuru Birim Hacim Kütlelerinin Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

**TS EN 1015-3.** (2000). Kagir Harcı- Deney Metodları- Bölüm 3: Taze Harç Kıvamının Tayini (Yayılma Tablası İle). Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

**TS EN 13755.** (2009). Doğal Taşlar-Deney Metodları-Atmosfer Basıncında Su Emme Tayini, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.

**TS EN 196 – 1.** (2002). “Çimento Deney Metodları – Bölüm 1 : Dayanım”, TSE, Ankara (2002).

**TS EN 196 – 3.** (2002). “Çimento - Deney Metodları – Bölüm 3: Priz Süresi Ve Genleşme Tayini”, TSE, Ankara (2002).

**TS EN 459–1.** (2015). Yapı Kireci - Bölüm 1: Tarifler, Özellikler Ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.

**TS EN 934-2** Tablo 6: Priz Hızlandırıcı Beton Katkısı

**Uğur, T., & Güleç, A.** (2016). Harç, Sıva Ve Diğer Kompozit Malzemelerde Kullanılan Bağlayıcılar Ve Özellikleri. *Restorasyon Ve Konservasyon Dergisi*, Sayı 17, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, (S. 77-91) . İstanbul.

**Uğurlu, E., & Böke H.** (2009). “The Use Of Brick–Lime Plasters And Their Relevance To Climatic Conditions Of Historic Bath Buildings”, *Construction And Building Materials* 23: 2442–2450.

**Uğurlu, E., & Böke, H.** (2010). Koruma Amaçlı Üretilen Horasan Harç Ve Sıvalarda Kullanılacak Kirecin Ve Tuğlaların Özellikleri. 5. Ulusal Yapı Malzemesi Kongresi Ve Sergisi (S. 385-396), TBMM Mimarlar Odası İstanbul Büyükkent Şubesi, İstanbul.

**Ün, H.** (2007) “ Bağlayıcı Maddeler”, Pamukkale Üniversitesi Ders Notları, Denizli, 2- 15 (2007).

**Vavricuk, A., & Bokan-Bosiljkov, A., & Kramar, S.** (2018). The Influence Ofmetakaolin On The Properties Of Natural Hydraulic Lime-Based Grouts Forhistoric Masonry Repair. *Construction And Building Materials*, 172, 706-716.

**Vitruvius.** (1990). Mimarlık Üzerine On Kitap, Şevki Vanlı Mimarlık Vakfı, İstanbul.

**Yeğinoğlu, A., & Ertün, T.** (2004). Çimentoda Yeni Standartlar Ve Mineral Katkılar. TÇMB Yayınları, Ankara.

**Yetgin, Ş., & Çavdar, A.** (2005). “Doğal Puzolan Katkı Oranının Çimentonun Dayanım, İşlenebilirlik, Katılaşma Ve Hacim Genleşmesi Özelliklerine Etkisi”, *Fırat Üniversitesi, Fen Ve Mühendislik Dergisi*, 17 (4), 687-692, 2005.

**Yılmaz, C.** (2010). Portland Çimentosu Kullanımının Horasan Harcı Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

**Young, R.** (2008). Lime-Based Plasters, Renders And Washes/ Materials & Skills For Historic Building Conservation, Ed. Forsyth, M., Blackwell, Publishing, Oxford.

## EKLER



Şekil E.1. Şahit 1 numunesinin yayılması



Şekil E.2. Şahit 2 numunesinin yayılması



Şekil E.3. Yaprak suyu kullanılarak üretilen numuneler



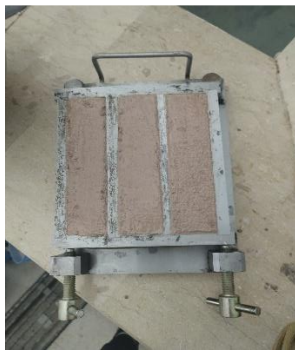
Şekil E.4. Yaprak suyu kullanılarak üretilen numuneler



Şekil E.5. Kabuk suyu kullanılarak üretilen numuneler



Şekil E.6. Kabuk suyu kullanılarak üretilen numuneler



Şekil E.7. Kül kullanılarak üretilmiş numuneler



Şekil E.8. Kül kullanılarak üretilmiş numuneler



**Şekil E.9.** Aktivatör olarak sodyum hidroksit kullanımıyla üretilen numunenin yayılması



**Şekil E.10.** Aktivatör olarak sodyum hidroksit kullanımıyla üretilen numuneler



**Şekil E.11.** Aktivatör olarak sodyum hidroksit kullanımıyla üretilen numuneler



**Şekil E.12.** 50 gr uçucu kül içeren numune



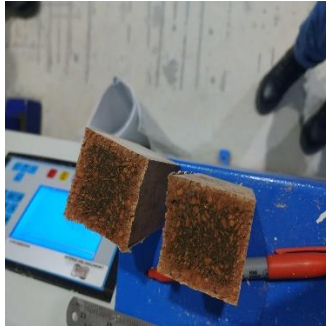
**Şekil E.13.** 50 gr yüksek fırın cürufu içeren numune



**Şekil E.14.** 100gr yüksek fırın cürufu içeren numune



**Şekil E.15.** 150gr yüksek fırın cürufu içeren numune



**Şekil E.16.** 200 gr yüksek fırın cürufu içeren numunelerin farkı



**Şekil E.17.** Aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat içeren numunenin yayılması



**Şekil E.18.** Aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat içeren numunenin vicat deneyi



, Şekil E.19. Aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat içeren numune



Şekil E.20. Sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 1/1 olarak kullanılan, puzolan katkısız M numunesinde kusma



Şekil E.21. Sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 1/1 olarak kullanılan, 50gr yüksek fırın cürufu katkılı YA numunesinde kusma



**Şekil E.22.** Sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 1/1 olarak kullanılan, 100gr yüksek fırın cürufu katkılı YB numunesinde kusma



**Şekil E.23.** Sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 1/1 olarak kullanılan, 150gr yüksek fırın cürufu katkılı YC numunesinde kusma



**Şekil E.24.** Sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 1/1 olarak kullanılan, 200gr yüksek fırın cürufu katkılı YD numunesinde kusma



**Şekil E.25.** Kusma gözlemlenen numunelerde, 24 saat suda bekletildikten sonra oluşan bozulma