

**T. C.**  
**İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**SİLİS DUMANI KATKILI GEOPOLİMER HARÇLARIN**  
**MEKANİK VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN**  
**İNCELENMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

**Buket OSMANÇELEBİOĞLU**

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Mukhallad Mohammed Mawlood AL-MASHHADANI

Eş Danışman

Arş. Gör. Dr. Yurdakul AYGÖRMEZ

**İstanbul – 2022**



## TEZ TANITIM FORMU

**Yazar Adı Soyadı** : Buket OSMANÇELEBİOĞLU

**Tezin Dili** : Türkçe

**Tezin Adı** : Silis Dumanı Katkılı Geopolimer Harçların Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi

**Enstitü** : İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

**Anabilim Dalı** : İnşaat Mühendisliği

**Tezin Türü** : Yüksek Lisans

**Tezin Tarihi** : 28.06.2022

**Sayfa Sayısı** : 60

**Tez Danışmanları** : 1. Dr. Öğr. Üyesi Mukhallad Mohammed Mawlood AL-MASHHADANI  
2. Arş. Gör. Dr. Yurdakul AYGÖRMEZ

**Dizin Terimleri** : Silis dumanı, Geopolimer, Uçucu kül, Yüksek fırın cürufu

**Türkçe Özet** : Silis dumanı ikameli geopolimer harçların mekanik ve durabilite özellikleri araştırılarak daha az karbondioksit salınımı yapan çimentosuz çevreci ürün için bir adım atılmış olacaktır.

**Dağıtım Listesi** : 1. İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsüne  
2. YÖK Ulusal Tez Merkezine

*İmzası*

*Buket OSMANÇELEBİOĞLU*

**T. C.**  
**İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**SİLİS DUMANI KATKILI GEOPOLİMER**  
**HARÇLARIN MEKANİK VE FİZİKSEL**  
**ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

**Buket OSMANÇELEBİOĞLU**

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Mukhallaad Mohammed Mawlood AL-MASHHADANI

Eş Danışman

Arş. Gör. Dr. Yurdakul AYGÖRMEZ

**İstanbul – 2022**

## BEYAN

Bu tezin hazırlanmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğu, kullanılan verilerde herhangi tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez olarak sunulmadığını beyan ederim.

Buket OSMANÇELEBİOĞLU

.../.../2022



**İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE**

Buket OSMANÇELEBİOĞLU'nun "Silis Dumanı Katkılı Geopolimer Harçların Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi" adlı tez çalışması, jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği anabilim dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan	İmza
	<i>Prof. Dr. Mücteba UYSAL</i>
Üye	İmza
	<i>Doç. Dr. Anıl NİŞ</i>
Üye	İmza
	<i>Dr. Öğr. Üyesi Mukhallad Mohammed Mawlood</i>
	<i>AL-MASHHADANI</i>
	<i>(Danışman)</i>

ONAY

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

... / ... / 2022

*İmzası*

*Prof. Dr. İzzet GÜMÜŞ*

Enstitü Müdürü

## ÖZET

Beton günümüzde inşaat sektöründe en çok kullanılan ve çimento ile birlikte üretilen yapı malzemesidir. Yüksek basınç dayanımına sahip olup ısıya karşı dayanıklı bir yapıya sahiptir. Beton göstermiş olduğu değişikliklerle birlikte yaklaşık olarak tam 5000 yıldan beri kullanılmaktadır. Mısırlar döneminde mimari yapılarda kullanılan harç, içerisinde kireç taşının ( $\text{CaCO}_3$ ) ısıtılması ve karbondioksit gazının ( $\text{CO}_2$ ) çıkarılmasıyla oluşmaktadır. O tarihten günümüze kadar kullanılan beton sisteminde ortaya çıkan ve çevreye yayılan karbondioksit ( $\text{CO}_2$ ) gazının zararına çözüm geliştirmek önemli bir araştırma konusu olmuştur. Çözüm üretmek adına bu konuda birçok akademik çalışmalar yapılarak makaleler yazılmış ve betona alternatif olarak Geopolimer kompozitler üretilmeye başlanılmıştır.

Üretim sırasında açığa çıkan  $\text{CO}_2$ 'nin çevreye çok daha az salındığı, atık malzeme kullanımı ile yaşadığımız çevrenin kirlenmesinin önüne geçtiği gösterilmiştir (Amudhavalli ve Mackenzie, 2003). Bu çalışmada, depo odalarında önemli yer tutan kalıntılardan biri olan silis dumanının (S) daha iyi özelliklere sahip olması sebebiyle çimentoya alternatif bir bileşen olarak kullanılmasının Geopolimer harç imalatındaki etkileri araştırılmıştır.

Bu çalışmada, silis dumanı belirli bir oranlarda modifiye edilmiş ve bu malzemelerden elde edilen Geopolimer kompozitlerin mekanik özellikler ve dayanıklılık açısından etkileri incelenmiştir. Araştırmalar laboratuvar çalışmalarıyla destelenerek %5, %10, %15 oranlarında silis dumanı, 8M ve 16M sodyum hidroksit (SH) ( $\text{NaOH}$ ), sodyum silikat (SS) ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), uçucu kül, cüruf ve kum malzemesi kullanarak oluşturulmuştur. Silis dumanı katkılı uçucu kül-cüruf tabanlı Geopolimer harç numuneleri için basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı, eğilme dayanımı, fiziksel özellikler, yüksek sıcaklık, donma çözülme, yayılma tablası ve priz süresi araştırması yapılmıştır. İlk aşamada, birim ağırlık, su emme ve boşluk oranı değerleri incelenmiş ve daha deneysel bir karşılaştırma yapılmıştır. Genel olarak, sonuçlar, ikamelerin faydalı olduğunu göstermiştir. Karşılaştırma amacıyla silis dumanı ikameli (%5, %10 ve %15) ve ikamesiz harç numuneleri test edilmiştir. Çalışmada basınç ve eğilme davranışı, ve ultrases geçiş hızı testleri ile 56 döngüden oluşan donma-çözülme testi uygulanmıştır. Geopolimer karışımların donma-çözülme etkisinde basınç dayanımı sonuçlarında

azalmanın sınırlı olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuç kompakt bir özelliğe sahip olan Geopolimer matrisin yoğunluğu ile ilişkilidir. Ayrıca donma-çözölme döngüleri sayesinde geopolimerik matrisin ilerlemesi gerçekleşmiştir. Silis dumanı ikameli Geopolimer numunenin yoğun içyapısı nedeniyle kontrol numunelerine göre daha az etki oluşmuştur. Aynı şekilde 300 °C, 600 °C, 900°C'lik yüksek sıcaklık dayanımı testi gerçekleştirilmiştir. Testlerin sonucunda ağırlık kaybı, basınç ve eğilme dayanımı ve ultrases geçiş hızı sonuçlarına bakılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre yüksek sıcaklıklarda silis dumanı ikame edilerek hazırlanan Geopolimer harçlar kontrol numunesine göre daha iyi sonuç vermiştir. 900 °C'de bile silis dumanı tabanlı Geopolimer numuneler daha kararlı bir yapı göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Silis dumanı, Geopolimer, Sodyum silikat, Sodyum hidroksit, Basınç dayanımı, Ultrases geçiş hızı, Fiziksel özellikler, Donma-çözölme, Yüksek sıcaklık



## SUMMARY

Concrete is the most widely used building material in the construction industry and produced together with cement. It has high compressive strength and has a heat-resistant structure. Concrete has been used for approximately 5000 years with the changes it has shown. The mortar used in architectural structures during the Egyptian period is formed by heating the limestone ( $\text{CaCO}_3$ ) and removing carbon dioxide gas ( $\text{CO}_2$ ). It has been an important research subject to develop a solution to the damage of carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ) gas that has emerged in the concrete system used since then and spread to the environment. In order to produce a solution, many academic studies have been made on this subject and articles have been written and Geopolymer composites have been started to be produced as an alternative to concrete.

It has been shown that the  $\text{CO}_2$  released during production is released to the environment much less, and the use of waste materials prevents the pollution of the environment we live in. In this study, the effects of using silica fume (S), which is one of the important residues in storage rooms, as an alternative component to cement due to its better properties, on the production of Geopolymer mortar were investigated.

In this study, silica fume was modified at certain rates and the effects of Geopolymer composites obtained from these materials in terms of mechanical properties and durability were investigated. The researches were supported by laboratory studies and were created by using 5%, 10%, 15% silica fume, 8M and 16M sodium hydroxide (SH) ( $\text{NaOH}$ ), sodium silicate (SS) ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), fly ash, slag and sand materials. Compressive strength, ultrasonic pulse velocity, flexural strength, physical properties, high temperature, freeze-thaw, and flow table and setting time were investigated for silica fume added fly ash-slag based Geopolymer mortar samples. In the first stage, unit weight, water absorption and void ratio values were examined and a more experimental comparison was made. Overall, the results showed that the substitutions were beneficial. Mortar samples with and without silica fume substitute (5%, 10% and 15%) were tested for comparison. In the study, compressive and flexural behavior, and ultrasonic pulse velocity tests and a freeze-thaw test consisting of 56 cycles were applied. It was observed that the decrease in the compressive strength results of the geopolymer mixtures was limited in the freeze-thaw effect. This result is related to the

density of the Geopolymer matrix, which has a compact property. In addition, the progress of the geopolymeric matrix was realized due to the freeze-thaw cycles. Due to the dense microstructure of the silica fume substituted Geopolymer sample, there was less effect than the control samples. Likewise, a high temperature resistance test at 300 °C, 600 °C, 900 °C was carried out. As a result of the tests, weight loss, compressive and flexural strength and ultrasonic pulse velocity results were examined. According to the results obtained, Geopolymer mortars prepared by replacing silica fume at high temperatures gave better results than the control sample. Even at 900 °C, silica fume-based Geopolymer samples showed a more stable structure.

**Keywords:** Silica fume, Geopolymer, Sodium silicate, Sodium hydroxide, Compressive strength, Ultrasonic pulse velocity, Physical properties, Freeze-thaw, High temperature

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
SUMMARY .....	iii
İÇİNDEKİLER .....	v
KISALTMALAR .....	vii
SİMGELER LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	x
ÖNSÖZ.....	xi
GİRİŞ .....	1

### BİRİNCİ BÖLÜM LİTERATÜR ÖZETİ

1.1. Beton.....	2
1.2. Geopolimer Beton.....	5
1.3. Geopolimer Beton Kullanım Alanları .....	7
1.4. Geopolimer Üretiminde Kullanılan Malzemeler .....	10
1.4.1 Agregalar .....	10
1.4.2 Sodyum silikat .....	11
1.4.3 Sodyum hidroksit.....	11
1.4.4 Silis dumanı .....	11
1.4.5 Yüksek fırın cürufu.....	13
1.4.6 Uçucu kül .....	13

### İKİNCİ BÖLÜM MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Malzemeler .....	15
2.1.1 Silis dumanı .....	15
2.1.2 Agregas .....	16
2.1.3 Sodyum silikat ve sodyum hidroksit .....	16
2.1.4 Akışkanlaştırıcı katkıları.....	18
2.1.5 Yüksek fırın cürufu.....	18
2.1.6 Uçucu kül.....	19
2.2. Yöntem .....	20
2.2.1 Karışım malzemelerinin hazırlanması ve oranları.....	20
2.2.2 Numunelerin hazırlanması.....	21
2.3. Deneysel Çalışmalar .....	27
2.3.1 Basınç dayanım testi.....	27
2.3.2 Eğilme dayanım testi .....	27

2.3.3. Ultrases geçiş hızı testi .....	28
2.3.4. Fiziksel özellikler .....	28
2.3.5. Yüksek sıcaklık testi .....	30
2.3.6. Donma-özölme testi .....	30
2.3.7. Yayılma tablası ve priz süresi testleri .....	30

## **ÜÇÜNCÜ BÖLÜM**

### **DENEY SONUÇLARI**

3.1. Basınç Dayanım Test Sonuçları .....	32
3.2. Eğilme Dayanım Test Sonuçları .....	34
3.3. Ultrases Geçiş Hızı Test Sonuçları .....	35
3.4. Birim Hacim Ağırlık, Boşluk Oranı ve Su Emme Sonuçları.....	36
3.5. Yüksek Sıcaklık Testi Sonuçları.....	37
3.5.1. Yüksek sıcaklık etkisi sonrası basınç ve eğilme dayanım sonuçları .....	38
3.5.2. Yüksek sıcaklık testi sonrası ultrases geçiş hızı sonuçları .....	42
3.5.3. Yüksek sıcaklık etkisinde ağırlık kaybı sonuçları .....	44
3.6. Donma özölme Testi Sonuçları.....	45
3.7. Yayılma Tablası ve Priz Süresi Deney Sonuçları.....	49
<b>SONUÇLAR .....</b>	<b>51</b>
<b>KAYNAKÇA .....</b>	<b>53</b>
<b>TEŞEKKÜR .....</b>	<b>58</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>59</b>

## KISALTMALAR

<b>SH</b>	:	Sodyum hidroksit
<b>SS</b>	:	Sodyum silikat
<b>SD</b>	:	Silis Dumanı
<b>YFC</b>	:	Yüksek Fırın Cürufu
<b>UK</b>	:	Uçucu Kül
<b>UGH</b>	:	Ultrases Geçiş Hızı



## SİMGELER LİSTESİ

<b>CO<sub>2</sub></b>	:	Karbon dioksit
<b>CaCO<sub>3</sub></b>	:	Kireçtaşı
<b>PÇ</b>	:	Portland Çimentosu
<b>NaOH</b>	:	Sodyum hidroksit
<b>NaSi<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	:	Sodyum silikat
<b>CaO</b>	:	Kalsiyum Oksit
<b>MgO</b>	:	Magnezyum Oksit
<b>SiO<sub>2</sub></b>	:	Silisyum Dioksit
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	:	Alüminyum Oksit
<b>gr/cm<sup>3</sup></b>	:	Gram/santimetreküp
<b>kg/m<sup>3</sup></b>	:	Kilogram/metreküp
<b>kg</b>	:	Kilogram
<b>mm</b>	:	Milimetre
<b>°C</b>	:	Santigrat
<b>MPa</b>	:	Megapaskal
<b>gr</b>	:	Gram

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Geopolimer Kimyası .....	5
Şekil 1.2. Geopolimer beton/harç kullanım alanları .....	9
Şekil 2.1. Silis dumanı .....	15
Şekil 2.2. Dere kumu.....	16
Şekil 2.3. Sodyum silikat .....	17
Şekil 2.4. Sodyum hidroksit.....	17
Şekil 2.5. Yüksek fırın cürufu.....	18
Şekil 2.6. Uçucu kül numunesi.....	19
Şekil 2.7. Hazırlanan alkali aktivatörler.....	21
Şekil 2.8. Toz malzemelerin alkali aktivatörler ile karışımı .....	22
Şekil 2.9. Kum ilave edilmeden önceki kıvam .....	22
Şekil 2.10 Karışımların mikser aracılığı ile karıştırılması .....	23
Şekil 2.11 Kumun karışıma ilave edilmesi.....	24
Şekil 2.12 Karışımın kalıba dökülmesi.....	24
Şekil 2.13 Karışıma vibratör uygulanması .....	25
Şekil 2.14. Oda sıcaklığında numunelerin bekletilmesi .....	25
Şekil 2.15. Kalıptan çıkarılan prizma numuneler.....	26
Şekil 2.16. Kalıptan çıkarılan küp numuneler .....	26
Şekil 2.17. Deneyde kullanılan küp ve prizma numuneler .....	29
Şekil 2.18 Yayılma tablası deney aleti.....	31
Şekil 2.19. Numunenin yayılma tablasındaki hali .....	31
Şekil 3.1. Basınç dayanımı sonuçları .....	33
Şekil 3.2. Eğilme dayanımı sonuçları .....	35
Şekil 3.3. Ultrases geçiş hızı deney sonuçları.....	36
Şekil 3.4. Yüksek sıcaklık etkisinde kalan basınç dayanımı sonuçları.....	40
Şekil 3.5. Yüksek sıcaklık etkisinde kalan eğilme dayanımı sonuçları .....	42
Şekil 3.6. Yüksek sıcaklık etkisinde ultrases geçiş hızı deney sonuçları.....	43
Şekil 3.7 Yüksek sıcaklıkta oluşan ağırlık kayıpları .....	45
Şekil 3.8. Donma çözülme testi sonrası kalan basınç dayanımı sonuçları .....	47
Şekil 3.9. Donma çözülme testi sonrası kalan eğilme dayanımı sonuçları.....	48
Şekil 3.10. Donma çözülme testi sonrası kalan UGH sonuçları .....	48
Şekil 3.11. Donma çözülme testi sonrası ağırlık kayıpları .....	49

## ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 1.1. Uçucu kül sınıflandırılması.....	14
Çizelge 2.1. Uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı malzemelerinin fiziksel özellikleri ve kimyasal bileşimi.....	20
Çizelge 2.2. Geopolimer harç malzemeleri karışım miktarları .....	20
Çizelge 3.1. Basınç dayanımı değerleri .....	33
Çizelge 3.2. Eğilme dayanımı değerleri.....	34
Çizelge 3.3. Ultrases geçiş hızı değerleri .....	36
Çizelge 3.4. Silis dumanı içeren geopolimer numunelerinin fiziksel özellikleri .....	37
Çizelge 3.5. Yüksek sıcaklık etkisinde kalan basınç dayanımı sonuçları.....	39
Çizelge 3.6. Yüksek sıcaklık etkisi altında kalan eğilme dayanımı sonuçları.....	41
Çizelge 3.7. Yüksek sıcaklık etkisinde ultrases geçiş hızı değerleri .....	43
Çizelge 3.8. Yüksek sıcaklıkta oluşan ağırlık kayıpları .....	44
Çizelge 3.9. Donma çözülme testi sonuçları .....	46
Çizelge 3.10. Yayılma tablası ve priz süresi testleri sonuçları .....	50



## ÖNSÖZ

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde emeği geçen, değerli bilgilerini benimle paylaşan, kendisine ne zaman danışsam bana kıymetli zamanını ayırıp sabırla ve büyük bir ilgiyle faydalı olan her sorun yaşadığımda yanına çekinmeden gidebildiğim, samimiyetini benden esirgemeyen ve ileriki hayatımda da değerli bilgilerinden faydalanacağıma inandığım kıymetli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi MUKHALLAD MOHAMMED MAWLOOD AL-MASHHADANI hocama teşekkürü bir borç biliyor ve şükranlarımı sunuyorum.

Yine çalışmamın her aşamasında emeği geçen çok kıymetli ikinci danışman hocam Arş. Gör. Dr. YURDAKUL AYGÖRMEZ'e de sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak hayatım boyunca yanımda olan, aldığım kararları her zaman destekleyen, tez yazma sürecinde de desteklerini esirgemeyen aileme özellikle babam Metin Osmañcelebiođlu ve annem Ayşen Osmañcelebiođlu'na sonsuz teşekkürlerimi borç bilirim.

## GİRİŞ

Harç ve beton üretiminde çimento kullanılması çok fazla CO<sub>2</sub>'nin doğaya salınımına yol açar. Bu durum insan ve hayvan sağlığı açısından önemli bir sorun oluşturmaktadır. Oluşan etkiler nedeniyle alternatif ürün üretimi ile ilgili arayışlar hızlanmıştır. Aranılan yeni ürünlerin mekanik ve durabilite özellikleri açısından da üstün performans göstermesi önemlidir. Geopolimer ürünler taşıdığı özellikler bakımından büyük avantajlar göstermektedir. Özellikle yüksek sıcaklık ve donma-çözülme gibi durabilite araştırmaları önem taşımaktadır. Bu durumlara karşın geopolimer üretiminde henüz bir standart mevcut değildir. Gerekli standartların elde edilmesine yardımcı olmak için bu çalışma yapılmaktadır.

Yapılan bu çalışmada silis dumanı katkılı geopolimer kompozitlerin mekanik ve dayanıklılık açısından performansı araştırılmak amaçlanmıştır. %5, %10, %15 oranlarında silis dumanı ikame edilirken aynı zamanda 8M ve 16M olmak üzere iki farklı sodyum hidroksit çözeltisi kullanılmasının avantajları ve dezavantajları incelenecektir. Silis dumanı katkılı uçucu kül-cüruf tabanlı geopolimer harç numuneleri için basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı, eğilme dayanımı, fiziksel özellikler, yüksek sıcaklık, donma çözülme, yayılma tablası ve priz süresi araştırması yapılması amaçlanmıştır. Bu tez daha çevreci bir ürün olan Geopolimerin standartlaşarak günlük uygulamalarda kullanılması için önem arz etmektedir.

# BİRİNCİ BÖLÜM

## LİTERATÜR ÖZETİ

### 1.1. Beton

Yapı malzemelerinin başında gelen beton; çimento, su, agrega ve kimyasal veya mineral katkıların homojen olarak karışımından oluşan, ilk ortaya çıktığında plastik kıvamda olan, sertleştikçe şekil değiştirebilen ve zamanla mukavemet (dayanım) kazanan bir yapı malzemesidir (Yalçın ve Gürü, 2006). Betonun mutlak hacmini %75 oranında agrega (kum, çakıl, mıcır), %10 oranında çimento, %15 oranında su oluşturmaktadır. Gerektiği durumda, %2'den fazla olmamak üzere katkı maddeleri eklenebilmektedir. Fiziksel ve kimyasal etkilere karşı direnç, bilgisayar kontrollü santraller, transmikserler, pompalar vb. aşamalar betonu en yaygın olarak kullanılan malzeme yapan faktörlerdir (Çelik, 2004).

Beton, insanlık tarihinin gelişiminde ve günümüze kadar gelen eski uygarlık eserlerinde önemli bir yere sahiptir. M.Ö. 3000 yılından beri kalsiyum bazlı bağlayıcılar insanlar tarafından kullanılmaktadır. İnsanın barınma ve yaşam alanı yaratma ihtiyacı, uygarlık tarihindeki önemli gelişmelerin temellerini atmıştır. Tarih öncesi çağların mağaralarından günümüzün çok katlı devasa yapılarına kadar bu süreci büyük ölçüde ilerleten iki temel icattan bahsedecek olursak; Betonun keşfi ve betonarmenin keşfidir. İnşaat dünyasında çığır açan bir yenilik olan beton ilk olarak 1903 yılında Almanya'da ortaya çıkmış ve birkaç yıl içinde ABD'de kullanılmaya başlanmıştır. 1914 yılında Stephanian isimli bir Türk göçmenin beton taşımak için beton mikseri geliştirmesi ile Amerika Birleşik Devletleri'nde hazır beton endüstrisinin yaygınlaşması artmış ve özellikle savaş yıllarından sonra birçok hazır beton şirketi kurulmuştur. Özellikle 20. yüzyılın ikinci yarısında kentleşme ve altyapı çalışmaları hızlanmış, hazır beton ve beton ürünleri daha fazla üretilip dağıtılmaya başlanmıştır. İlerleyen yıllarda tescillenen teknolojik yeniliklerle özellikle 1960'lı yıllarda kimyasal katkı maddelerinin ve 1970'li yıllarda liflerin kullanılmaya başlamasıyla birlikte, çevresel etkilere daha dayanıklı, çeşitli amaçlara yönelik yüksek performanslı beton üretimi başlamıştır. Dünya yıllık beton tüketiminin ortalama 4,5 milyar ton olduğu

varsayılırsa, kişi başına yıllık ortalama beton tüketimi 0,7 tondur. Son yüzyılda kentleşme ve dünya nüfusunun hızla artması ve ilerleyen zamanla birlikte tekrar artacak olması, insan yaşamının birçok alanında en yaygın olarak kullanılan yapı malzemelerinden biri olan betonun ve bileşimindeki malzemelerin önemini artırmaktadır (Kalaycılık, 2020). Dünya nüfusu 20.yüzyılın başında 1,5 milyar civarındayken, 21. yüzyılın başında bu rakam 7 milyara ulaşmıştır. Dünyanın 10.000 yıl önce var olduğu düşünülürse, gelecekte bu nüfusun daha da artacağı düşünülmektedir.

Betonun dünyada en yaygın kullanılan yapı malzemelerinden biri olduğunu ve bağlayıcısının Portland çimentosu olduğunu bilinmektedir. Portland çimentosu (PÇ), yapı malzemelerinde ve özellikle beton üretiminde en yaygın olarak kullanılan bağlayıcılardan biridir. Türkiye çimento üretimi 2018 verilerine göre yıllık 68,5 milyon ton klinker ve 107,5 milyon ton çimento üretimi ile dünyanın beşinci, Avrupa'nın ise en büyük çimento üreticisidir. Çimentonun ana bileşeni olan klinker, kalsiyum, alüminyum, silikon, demir oksit ve az miktarda çeşitli maddeler içeren hammaddelerin yüksek sıcaklıklarda (1400oC) yakılmasıyla elde edilir. Çimento, yüksek bağlayıcı özelliklere sahip, dünya çapında yaygın bir bileşendir. Son yıllarda dünyada çimento üretimi miktarı artarken, Türkiye'de de %0,5 artış kaydedilmiştir. Türkiye dünyanın en büyük ikinci çimento ihracatçısı iken, aynı zamanda üretimde Avrupa'nın da birincisidir. Türkiye, çimento üretiminden daha fazla gelir elde etmek için yeni fabrikalar kurarak üretim kapasitesini artırırken, ihtiyacından fazla çimento ürettiğinden, kapasite fazlası ve getirisi yüksek bir tablo ortaya çıkmıştır.

Portland çimentosunun avantajları ve dezavantajları vardır. Bu dezavantajlardan biri, Portland çimentosu üretiminde fosil yakıtların kullanılması ve kireçtaşının ayrışmasında yer alan süreçler ve ayrıca küresel ölçekte sera gazlarının bir bölümünü oluşturan CO2 gazı nedeniyle olumsuz çevresel etkilere neden olmasıdır (Özdemir, 2006). Ayrıca çimento sektörü küresel ölçekte incelendiğinde, atmosfere salınan toplam CO2 emisyonun yaklaşık %5-7'sine neden olduğu da bilinmektedir. Bu bağlayıcıların üretiminde önemli bir husus, daha az enerji gerektiren, atmosfere daha az CO2 salan ve mevcut ürünlere benzer özelliklere sahip yeni ürünler geliştirmektir.

Uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, pirinç kabuğu külü vb. atık malzemeler kullanılan çimento miktarını azaltmayı ve betonu daha sürdürülebilir hale

getirmeyi amaçlayan araştırmalarda kullanılmıştır. Mekanik özellikleri ve mukavemeti artırabilecek endüstriyel atıkların yeniden kullanımını araştırılmıştır (Güneşli, 2008).

Nitelikli agrega stoklarının giderek azalması, doğal ortamın tahribi, kirliliğin artması ve kaliteli agrega fiyatlarının yükselmesi yeni alternatif arayışlarına yol açmıştır. Bu bağlamda beton atıklarının geri dönüşüm agregası olarak kullanılması çevre sağlığı açısından büyük önem taşımaktadır. Eski betonun geri dönüşüm katkısı olarak değerlendirilmesi hem ekosistem açısından hem de ekonomik açıdan faydalıdır (Yıldız, 2008). Bu nedenle eski betonun ekonomik değerinin sağlanması günümüzde bir öncelik haline gelmektedir. Birçok araştırmacı inşaat sektöründe kullanılan malzemelerin %50'sinin doğal kaynaklardan elde edildiğini vurgulamaktadır. Beton üretiminde doğal kaynaklar büyük oranda kullanılmaktadır. Doğal kaynaklar tüketildikçe kentsel dönüşüm veya yeniden yapılanmada betonun çevresel etkisi artmaktadır. Sürdürülebilir bir yaşam biçiminde, inşaat atıklarının çevreye verdiği zarar, geri dönüştürülmüş agrega kullanımını gerektirir.

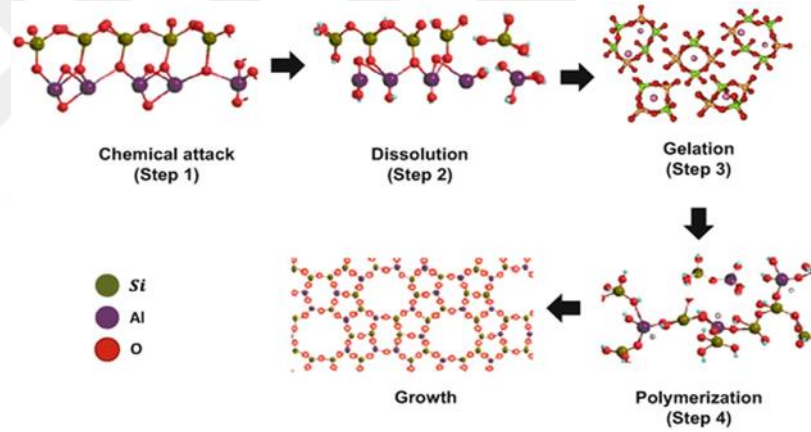
Çevre ve Şehircilik Genel Müdürlüğü'nün yaptığı hesaplamalara göre yılda 45 milyon ton inşaat atığı, kentsel dönüşüm programlarından 10 milyon ton yıkım atığı ve 6 milyon ton inşaat atığı olduğu tahmin edilmekte ve bunların geri dönüştürülebilir nitelikte oldukları belirtilmiştir. Bu nedenle inşaat sektörü için geri dönüşüm uygulamalarının yaygınlaşması çevre sağlığı, ekonomi ve doğal kaynakların korunması açısından oldukça önemlidir.

Katı atık depolama sahaları, özellikle belediye atıkları olmak üzere büyük miktarlarda endüstriyel atık biriktirmeye devam etmektedir, bu nedenle katı atıkların alternatif bir kaynağa dönüştürülmesiyle artan depolama kapasitesinin azaltılması mümkündür. Bu durum, ortaya çıkan sorunların çözülmesine, doğada yenilenemeyen kaynakların tükenmesinin önüne geçilmesine, gerekli enerjinin korunmasına ve depolamadan kaynaklanan çevresel zararın azaltılmasına yardımcı olacaktır. Küresel sera gazı emisyonlarına önemli ölçüde etki eden çimentonun özelliklerini değiştirmek veya bu amaca destek olacak çözümlerden biri olan betonda katı atık malzemeler kullanılarak ikinci bir çözüm önerisi açısından bağlayıcıların araştırılması için birçok çalışma yapılmaktadır.

## 1.2. Geopolimer Beton

Geopolimer beton, üretim sürecinde atık malzeme olarak değerlendirilen bileşenlerden en az birini kullanan veya çevreyi kirletmeyen beton olarak tanımlanmaktadır. Aynı zamanda yüksek performans ve dayanıklılığa sahiptir. Diğer bir deyişle, geopolimer beton sürdürülebilirlik düzeyinde doğa dostu bir malzemedir; doğa yanlısı, maliyet bakımından olumlu ve sosyal etkileri de olan bir malzemedir (Suhendro, 2014).

Geopolimer, düşük emisyon ve düşük enerji kaybı gibi sürdürülebilirlik ölçütleri nedeniyle bazı uygulama faaliyetlerinde geleneksel Portland Çimentosu'na potansiyel bir ikinci çözüm seçeneği bağlayıcı olarak ortaya çıkmıştır. Geopolimerler, alkali çözünen alüminyum silikattan yapılmış Si:O:Al yapısına sahip üç boyutlu inorganik malzemelerdir (Şekil 1.1). Bu durum, geopolimerin yapı malzemesi olarak kullanılmasına izin verir (Davidovits, 2008).



Şekil.1.1 Geopolimer kimyası

Çalışmalar, alkali aktive edilmiş çimento olarak adlandırılan, geopolimerik malzemeler veya çimento yerine kullanılacak alternatif bağlayıcı malzemeler üzerine odaklanmıştır. Geopolimer malzemeler, metakaolin, uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu gibi çeşitli alüminosilikat malzemelerin alkali aktivasyonundan sentezlenen polimerik bağlardan biridir. Geopolimerler, mekanik özellikler, yangın performansı ve asit direnci açısından GPC betonundan daha iyi performans göstermektedir. Ortalama olarak, geopolimer beton, çimentolu betondan daha az CO<sub>2</sub> salmaktadır. Bu durum da sağlık ve çevre bilinci göz önüne alındığında Geopolimer malzemelerin kullanımını cazip kılmaktadır.

Geopolimer betonlarda, aktivator olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit vb. endüstriyel malzemeler kullanılır. Geopolimer beton üretiminde en çok kullanılan malzemelerin uçucu kül ve yüksek fırın cürufu olduğu bilinmektedir. Standart Portland çimentosunun yerini alan yüksek fırın cürufu, betonun fiziksel özelliklerini, kimyasal bileşimini ve mukavemetini iyileştirmek için kullanılır.

Geopolimer beton, beton üretimi sırasında çimento ve agregalardan kaynaklanan karbondioksit emisyonlarını azaltabilen bir malzemedir. Ayrıca yüksek basınç dayanımı, yüksek asit direnci ve düşük büzülme gibi yüksek mekanik özelliklere sahip bir malzeme avantajları sunar. 1940 yılından itibaren alkali çözeltiler (Na, K) betona zarar vermesine rağmen hidrasyon sürecini hızlandırması ve yeni hidrasyon ürünlerinin oluşumunu kolaylaştırdığının keşfedilmesiyle önemli bir araştırma konusu malzeme olmuşlardır (Purdon, 1940). Son yıllarda araştırmaların arttığı ve polimerizasyon işlemi ile elde edilen ve geopolimer olarak adlandırılan bu malzeme, metakaolin, uçucu kül ve vb. bağlayıcıların aktivator çözeltileri ile kimyasal etkileşimleri ile elde edilen yeni nesil bir üründür. Çözeltiler (KOH, NaOH) aktivator olarak bilinir (Tuyan, 2017).

Geopolimerlerin avantajları sıralanacak olursa;

1. İstenen hammadde miktarı: Alkali çözeltide reaksiyona giren silikatlar veya alümina silikatlar yeryüzünde bol miktarda bulunur. Geopolimerler, atıkların değerlendirilmesi ile üretilmektedir.

2. Enerji faydaları ve doğa yanlısı: Geopolimer betonlar fazla enerji tüketmezler. Yani çok fazla kuvvete gerek yoktur. Ayrıca CO<sub>2</sub> emisyonları normal betona göre çok düşük olduğu için çevreye çok faydalıdır

3. Geopolimerlerin oluşumu: Doğal minerallerin kimyasal bileşiminin ve kristal yapısının çeşitli yöntemlerle değiştirilmesiyle ortaya çıkar. İstenilen mukavemette beton çok kısa sürede elde edilir. Bu süreç, Portland çimento betonunun üretimine benzer.

4. Çatlak sınırlaması: Bu betonlarda su buharlaşması nedeniyle normal betonlara göre daha az çatlak oluşur.

5. Erken dayanım: Bu betonlarda ısıtma ve bir tür termal sertleşme yoluyla beklenen basınç dayanımının %70'ini sağlar

6. Ekstra uzun dayanım: Bu betonların en faydalı ve göze çarpan özelliği, normal betona göre dayanımlarını kaybetmeden uzun yıllar olumsuz koşullara dayanabilmeleridir. (Altındal, 2020; Li, 2004)

### 1.3. Geopolimer Beton Kullanım Alanları

Davidovits, geopolimer adını ilk kez 1978 yılında açıklamış ve sınıflandırmış, o zamandan günümüze kadar Geopolimerler konusunda birden fazla çalışma yapılarak veriler elde edilmiştir. Geopolimer ismini ilk kez bulan bilim adamı Davidovits'in geopolimer adını uygun bulmasının temel nedeni, geopolimerin oluşumu sırasında meydana gelen reaksiyonun ısıyla sertleşen polimerlerin yoğunlaşmasına yani polikondenzasyon tepkimesine çok benzemesidir.

Güncel ihtiyaçları karşılamak için geopolimerler üzerine alternatif birden çok uğraşlar denenmiştir. Bu uğraşlar belli zaman içerisinde geopolimeri kıymetli hale getirmekte ve geopolimer kompozit sistemler hızla büyümeye devam etmektedir (Davidovits, 2002).

Genel olarak geopolimerler; inşaat, havacılık, otomotiv, metalürji, plastik, atık yönetimi, yapısal güçlendirme, sanat ve dekorasyon, refrakter ürünler ve yüksek teknolojiye yanmaz uygulamalarda değerlendirilmiştir. Geopolimerin geniş bir kullanım alanı mevcuttur (Zhang, Guo, El Korchi, 2013). Geopolimerlerin uygulama yerleri, ele alınan firma ve kuruluşlar ile ilgili veriler tarihe göre sıralanmış olarak aşağıda verilmiştir.

Eski Mısır'da heykel, çanak ve çömlek üretiminde bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Mısır'da ilk üretimde bol silika içeren buğday, arpa ve şeker kamışından elde edilen kül kullanılmıştır. Ancak 1970'lerden sonra başka eğilimler de gözlenmiştir. 1985'ten bugüne, Fransız ve İngiliz nükleer santrallerinde, 500°C'ye kadar termal güvenlik koruması sunan tozsuz sızdırmaz geopolimer malzeme kullanmıştır (Bakırdöven, 2021). İlerleyen yıllarda, geopolimer malzeme gemilere ve endüstriyel tesislere 1200°C'ye kadar termal koruma sağlamayı başarmıştır. 1986'da Fransız havacılık şirketi Dassault Aviation, Rafale savaş uçağının gelişim aşamasının ilerlemesinde geopolimer kalıplar ve aletler kullanmıştır.

Ayrıca, Northrop Aviation tarafından yeni bir ABD Hava Kuvvetleri bombardıman uçağı için geliştirilmekte olan karbon/APC2 kompozitinin üretiminde



kullanılmak üzere bir prototip geopolimer (kendiliğinden ısınan karbon kompozit) giysisi üretilmiştir. Yüzden fazla alet ve parça üretilmiş ve (Airbus) havacılık uygulamaları ve alüminyum işleme için kullanılmıştır. Uçak kabinleri ve kargo iç mekanları için ilk yangın geciktirici kumaş laminant olan geopolimer kompozit 18 Kasım 1998'de Federal Havacılık İdaresi sponsorluğunda Atlantic City, New Jersey, ABD'deki Uluslararası Uçak Yangın ve Kabin Güvenliği Araştırma Konferansı'nda sunulmuştur.

Pechiney Şirketi, sıvı halde aşındırıcı alüminyum/lityum (Al/Li) alaşımlarının güvenli dökümü için geopolimer refrakter malzemeler geliştirmiştir (Justia patenti, patent numarası: 5851677, patent tarihi: 22 Aralık 1998). Dan Gurney'in ekibi, kalıplanmış bir karbon-geopolimer kompozit gövdeyle çalışan benzersiz ve daha sofistike egzoz sistemi tasarımını geliştirmiştir (Eagle, 1999). Ayrıca Porsche marka araç için bir kompozit egzoz borusu sistemi de geliştirilmiş ve patenti alınmıştır (Porsche PCT patenti, 2004)

Malzemesi kaya içerikli olan geopolimer çimentoların jeosentezi, önemli proje konusu olmuştur. Projenin temel amacı, uranyum madenciliği kalıntıları ile yoğun şekilde kirlenmiş alanların (eski Doğu Almanya'daki WISMUT sahaları) uzun vadeli muhafazası ve restorasyonu için düşük maliyetli geopolimer çimentolar kullanılarak tehlikeli ve zehirli atıkların stabilizasyonudur. Bu teknoloji, atık havuzlarından gelen zehirli, tehlikeli ve radyoaktif çamurların ve su arıtma tesislerinden gelen çamurların kapsüllenmesi ve uzun süreli depolanması için güvenilir ve ispat edilmiş bir yöntem sağlayabilir. Bu teknoloji içinde bulunduğumuz zaman diliminde Almanya'da BPS Engineering tarafından uygulanmaktadır. Bazı uygulama alanları Şekil 1.2'de gösterilmiştir.



**Şekil 1.2** Geopolimer beton/harç kullanım alanları

Bu durumlar, geopolimer malzemenin daha geniş alanlara yayılabileceğini göstermektedir.

Stratejik ve ekonomik değeri büyük olan bu çalışmalar köklü firmalar tarafından yürütülmekte ancak içerik bilgisi paylaşılmamaktadır. Saint Quentin (Fransa) 8-10 Temmuz 2019 tarihleri arasında gerçekleşen “Geopolimer Kampı” adlı konferansa geopolimer üzerine çalışan ve patent almış çok sayıda firma ve bilim insanı katılmıştır. Bunlardan bazıları ve çalışma alanları şu şekildedir: BASF (geopolimer harçlar ve bağlayıcılar), Milliken Infrastructures USA (geopolimer harçlar ve bağlayıcılar), ASK Chemicals (yapıştırıcı sistemler), Wagners Australia (uçucu kül/cüruf tabanlı geopolimer beton altyapıları), Pyromeral Systems France (uçak ve otomotiv endüstrisi için yüksek sıcaklığa dayanıklı geopolimer kompozit), Éire Composites Ireland (geopolimer kompozit ve büyük kompozit yapılar, rüzgar türbini üretimi), Airbus France (uçak kanatları için üretilen ve patenti alınan geopolimer-karbon kompozit malzeme), Schlumberger France (petrol sahası boruları), Rockwool Australia (geopolimer olarak taş yünü kullanılarak yalıtım malzemesi imalatı), NUCore A2FR Çin (geopolimer yangından korunma kompozitleri), INOMAT Almanya (geopolimer yangından korunma boyası), Nova Lignum Hollanda (geopolimer kompozit kaplama).

## 1.4 Geopolimer Harç Üretiminde Kullanılan Malzemeler

### 1.4.1 Agregalar

Beton, agrega, çimento, su ve gerekirse katkı maddelerinin en uygun oranlarda karıştırılması ile elde edilen başlangıçta plastik özellikte olan ve işlenme kolaylığı sağlayan ve dolayısıyla priz aldıkça dayanım kazanan bir üründür. Beton, çimentonun su ile birlikte hidrasyonu sonucu üretilen homojen, izotropik ve kompozit bir yapı malzemesidir. Bileşimindeki malzemeler doğada bol miktarda bulunur ve bu malzemeler kolay ve ucuza elde edilebilir, imalatı basittir ve ileri teknoloji kullanımına gerek yoktur, istenilen şekle kolayca işlenebilir, işlem sonrası mukavemetleri yüksektir (Yılmaz, 2014). Beton, ahşap ve çeliğe göre daha ucuz bir yapı malzemesidir, darbelere karşı daha dayanıklı olduğu için ülkemizde inşaat sektöründe en çok tercih edilen ve kullanılan yapı malzemesidir.

Sertleşmiş beton hacminin yaklaşık %70'ini agrega oluştururken, kalan %30'ı ise çimento hamuru ve hava boşluklarının hacmidir. Agreganın bağlayıcı bir işlevi yoktur. Betonda dolgu olarak kullanılırlar. Agregta tanelerini bir arada tutmak için bağlayıcı malzeme olarak çimento kullanılır. Çimento hamurunun dayanımı betondan daha fazladır(Güner, 1999). Ancak sadece çimento hamuru ile beton yapmak ekonomik değildir. Bu nedenle çimento hamuruna dolgu maddesi olarak agrega ilave edilir.

Agreganın çimentodan daha kolay temin edilebilir ve daha ucuz olması, atmosferik etkilere, çeşitli kimyasal etkilere ve aşınmaya çimentodan çok daha dayanıklı olması, çimento prizi sırasında şişme, büzülme gibi hacim hareketlerinin meydana gelmesi ve betonda görülmemesi gerekliliği agrega kullanımlarını gerektirir. Agregaların çeşitli özellikleri, betonun işlenebilirliği, mukavemeti ve geçirgenliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Sürül, 2015). İstenilen kalitede bir beton elde etmek için beton üretiminde kullanılacak agregaların tane biriminin hacimsel ağırlığı (özgül ağırlık), kompaktlık, boşluk oranı (gözeneklilik), tane dağılımı (partikül boyutu), aşınma direnci vb. özelliklerini çok dikkatli inceleyerek belirlemek gerekir.

Kum, beton karışımında kullanılan ezilmiş kaya ve mineral parçacıklardan oluşan granüler bir malzemedir. Çapı 0,065 mm ile 2 mm arasında olan bir tanecik olarak da tanımlanır. Amerikan standartlarından biri olan ASTM D8, agregayı kum, çakıl, kabuk, cüruf veya kırma taş gibi mineral bileşimli, bir bağlayıcı ile beraber

kullanılan taneli bir malzeme olarak tanımlar. Harç ve beton oluşturmak için kullanılan agregalar betonun %60-%80 arasındaki kısmını oluşturur. Bitümlü kaplamaları ağırlıkça %90-%95 ve hacimce %75-%85 oranlarında agregalar oluşturur (TS 10088 EN9323, 1997).

Nüfus ve kentsel büyüme ve bunun sonucunda ortaya çıkan inşaat faaliyeti nedeniyle kuma yüksek talep vardır ve bu durum doğal kaynakları azaltmaktadır. Kum çıkarmak için birkaç yöntem vardır. Bunlardan en ideali hidrolik tarama yöntemidir. Su birkaç metre yükseklikten pompalanır ve elde edilen kum tekelere doldurulur ve daha sonraki işlemler için kıyıya gönderilir. İnşaat sektöründe beton imalatında, tuğla imalatında kil ve diğer malzemelerin karışımına eklenir. Ayrıca deniz kazalarını, fırtınaları ve kıyı gelgitlerini ortadan kaldırmak için kullanılır (Poyraz, 2016).

#### **1.4.2 Sodyum silikat**

Sodyum silikat, cam su veya suda çözünür olarak adlandırılan kimyasal bir bileşendir. Sodyum silikatın genel kimyasal formülü, kimyasal bileşiklerin ana adı olan  $Na_2O$ 'dur. Genel olarak, sodyum silikatların kendileri bir puzolanik reaksiyon başlatmak için güçlü aktive edici özelliklere sahip değildir. Bu nedenle içerisine eklenen NaOH veya KOH maddeleri alkalinitesini ve mukavemetini artırmak için yardımcı maddelerdir (Oğuz, 2019). Polimer karışımlarında en kullanışlı alkali sıvı, sodyum hidroksit ve sodyum silikat alaşımlarıdır.

#### **1.4.3 Sodyum hidroksit**

Kostik soda olarak da adlandırılan sodyum hidroksitin kimyasal bileşeni, NaOH olarak bilinen inorganik bileşendir. Sodyum hidroksitin pH'ı 13,5 olduğundan baziktir (Maraş,2013). Su ile reaksiyona girdiğinde yaklaşık 5 dakikada sıcaklığı 50 santigrat dereceye ulaşır ve yaklaşık 15 dakika sıcak kalır. Sodyum hidroksit suda çözünür bir yapıya sahiptir. Pürüzsüz, yağlayıcı bir çözüm oluşturur.

#### **1.4.4 Silis dumanı**

Silis dumanı, silikon veya silikon içeren karışımların imalatında bir yan ürün olarak elektrik ark fırınlarında üretilen çok ince, kristal olmayan silikon dioksittir. Bir silis dumanı parçacığının ortalama boyutu, bir Portland çimentosu parçacığının ortalama boyutundan yaklaşık 100 kat daha küçüktür. Malzemenin yoğunluğu 2,2

gr/cm<sup>3</sup> ve birim hacim ağırlığı 200250 kg/cm<sup>3</sup>'tür (Yıldız, 2008). Türkiye'deki Antalya Ferrokrom Fabrikasında yılda yaklaşık 500-1000 milyon ton üretilmektedir.

Silis dumanı betonda mineral dolgu maddesi olarak ve ayrıca puzolan olarak kullanılmaktadır. Çimentonun su ile reaksiyonunun ürünü olan kalsiyum hidroksit (Ca(OH)<sub>2</sub>) ile reaksiyona girerek CSH jeli oluşturur. CSH jel, betona mukavemet veren bir üründür (İlter, 2007). Uçucu kül ve granüle yüksek fırın cürufu gibi diğer puzolanik malzemelerden daha reaktiftir (Dinçer, 2013). Betonun mukavemet ve dayanıklılık göstermesinde silis dumanı etkilidir. Geniş alan kaplaması nedeniyle, macun ve agrega arasındaki geçiş bölgesinde bulunabilir. Silis dumanının betondaki ana fiziksel etkisi, dolgu görevi görmesi ve inceliği nedeniyle çimento taneleri arasındaki boşluğu doldurmasıdır (Demirboğa ve Gül, 2003). Ayrıca kum, iri agrega taneleri veya çimento taneleri arasındaki boşluğu doldurur, bu da yüzey etkisini azaltır ve çimento hamuru ve agrega içinde yoğun olarak depolanır.

Malzemelerin puzolanik doğası göz önüne alındığında, bu malzeme beton üretiminde katkı maddesi olarak başarıyla kullanılmıştır. Betonun mukavemetini ve dayanıklılığını arttırmak ve başarılı bir şekilde betonda uygulamak için çimento yerine silis dumanı kullanılmaya çalışılmıştır. Beton karışımlarında silis dumanının kullanılması teknik potansiyele ve ekonomik faydalara sahiptir (Akçaözoğlu, 2007). Silis dumanı kullanımı betonun ağırlığını etkilemez. Silis dumanı yüksek dayanımlı, daha az geçirimli beton üretmek için kullanılır.

En çok tercih edilen puzolanik malzemelerden birisi olan silis dumanı, betonda olumlu sonuçlar elde etmek için kullanılan silikon füzyon işleminin bir yan ürünü olup, özellikleri iyileştirmektedir. Silis dumanı, sertleşmiş betonun basınç dayanımını, elastik modülünü, eğilme dayanımını ve dayanıklılığını artırır. Genel olarak silis dumanı, toplam çimentolu malzemenin ağırlığı ile %5 ikameli miktarlarda kullanılır.

Sonuçlar, silis dumanının varlığının basınç dayanımını artırabileceğini ve alkali ile aktive edilmiş cüruf betonun geçirgenliğini azaltabileceğini ve su kürünün en uygun kür yöntemi olduğunu göstermiştir.

#### 1.4.5 Yüksek fırın cürufu

Cüruflar, çeşitli metalurji tesislerinden geri kazanılan atık madde gruplarından biri olan suni puzolan olarak sınıflandırılmaktadır. Endüstriyel işletmeler tarafından hangi ana üretim sürecinin geliştirildiğine bağlı olarak kimyasal bileşimleri ve özellikleri birbirinden büyük ölçüde farklılık gösterir. Yüksek Fırın Cürufu (YFC), yüksek sıcaklık fırınında demir üretiminden erimiş halde elde edilen, başlıca silika, kalsiyum-alümina-silika ve bazik bileşiklerden oluşan atık üründür(Siddique, 2011). YFC'nin kimyasal bileşimi esas olarak CaO, SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'tür. Ancak cürufun kristal yapısı kimyasal bileşimi kadar önemlidir. YFC'nin kalsiyum içeriğinin yanı sıra, faaliyetlerini etkileyen ana faktörler, tane boyutu ve özellikleri, camsı maddenin bileşimi ve oranıdır. YFC, fırından çıktıktan sonra hızla soğumalı ve cam fazın en az 2/3'ünü içermelidir. Ayrıca içindeki CaO, MgO ve SiO<sub>2</sub> miktarlarının toplamının en az 2/3 olması ve (CaO+MgO)/SiO<sub>2</sub> oranının 1'den büyük olması gerekmektedir (Görhan, 2020). YFC, çimento ve beton endüstrisinde geniş bir uygulama alanına sahiptir. Ögütülmüş yüksek fırın cürufu betonun işlenebilirliğini artırır, priz süresini kısaltır, terlemeyi, hidrasyon ısısını ve su geçirgenliğini azaltır. Ayrıca çimentoda puzolan olarak kullanıldığında çimentonun mekanik özelliklerine katkı sağlar, asidik ortamlara karşı direnç sağlar ve sülfatlara karşı direnci artırır.

#### 1.4.6 Uçucu kül

Uçucu kül, ince taneli minerallerden biridir. Bu malzemeler beton üretiminde hammaddeler (çimento, agrega, su) ile birlikte kullanılır ve karışıma dahil edilir. Malzemenin türüne ve oranına bağlı olarak, ince taneli uçucu kül ve benzeri katkı maddeleri, taze ve sertleşmiş beton veya harcın birçok özelliğini etkiler. Uçucu kül, en yaygın ince taneli katkı maddesidir. Uçucu kül, amorf silisli-alüminli bir yapıya sahip olduğundan ve çok ince taneler halinde elde edildiğinden puzolanik özellik gösterir (Özturan, 1993). Uçucu kül kullanımı betonda yüksek dayanıklılık, düşük hidrasyon ısısı ve yüksek nihai dayanım değerleri sağlar. Betonun performansını artırırken çevresel faydaları da vardır. Daha az çimento klinker tüketimi sağlar ve böylece daha düşük sera gazı emisyonları ve daha düşük enerji tüketimi sağlar. Bu sayede doğa üzerindeki yükü de azaltır.

Uçucu küldeki "SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>" içeriği %85'in üzerindedir. Uçucu külün yeterli puzolanik özelliklere sahip olması için bu oksitlerin toplam miktarının sırasıyla

F tipi ve C tipi uçucu külde sırasıyla %70 ve %50'den az olmaması gerekir (Çil, İ, 2003). Bu değerler Çizelge 1.1'de detaylandırılmıştır (Özbebek, 1993).

**Çizelge 1.1** Uçucu kül sınıflandırılması

Kimyasal İçerik	F Sınıfı Kül	C Sınıfı Kül
SiO <sub>2</sub>	43,6-64,4	23,1-50,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,6-30,1	13,3-21,3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,8-23,9	3,7-22,5
CaO	0,7-6,7	11,5-29,0
MgO	0,9-1,7	1,5-7,5
Na <sub>2</sub> O	0-2,8	0,4-1,9
Kızdırma Kaybı	0,4-7,2	0,3-1,9

## İKİNCİ BÖLÜM

### MALZEME VE YÖNTEM

2021 Haziran ayında yapılan laboratuvar çalışmalarında kullanılan malzeme ve yöntemlerin detayları bu kısımda sunulmuştur.

#### 2.1. Malzemeler

##### 2.1.1. Silis dumanı

Yaptığımız laboratuvar çalışmalarında hazırlanılan numunelerde puzolanik malzemelerle birlikte ikameli olarak silis dumanı (SD) (Şekil 2.1) kullanılmıştır. Silis dumanının diğer puzolanik malzemelere kıyasla daha reaktif olması, pürüzsüz yüzeyli olması ve çok kısa zamanda mukavemet kazanması çalışma sürecimizi olumlu yönde etkilemiştir. Silis dumanının ince taneli yapısı boşlukları doldurarak geopolimer numuneleri daha yoğun bir yapıya ulaşmasını sağlamıştır (Keklik, 2020). İçeriğindeki SiO<sub>2</sub> (Silisyum dioksit) sayesinde yüksek fırın cürufunda CaO (Kalsiyum oksit) ile reaksiyon sonucunda daha fazla C-S-H (Kalsiyum-Silika-Hidrat) jelinin oluşumunu sağlamıştır. Bu durumlar mikro yapıyı güçlendirirken mekanik özellikleri arttırmıştır. Bu artış durabilite performansına da yansımıştır. Molaritedeki artış ise daha fazla N-A-S-H jelinin oluşmasını sağlayarak mekanik ve durabilite performansını arttırmıştır. Fiziksel özellikleri ve kimyasal bileşimi Çizelge 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Silis dumanı



### 2.1.2. Agrega

İnce agrega olarak kireçtaşı (maksimum 4 mm tane boyutu) ve dere kumu kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan kumun çok fazla iri ya da çok fazla ince olmamasına dikkat edilmiştir. Kullanılan dere kumu Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



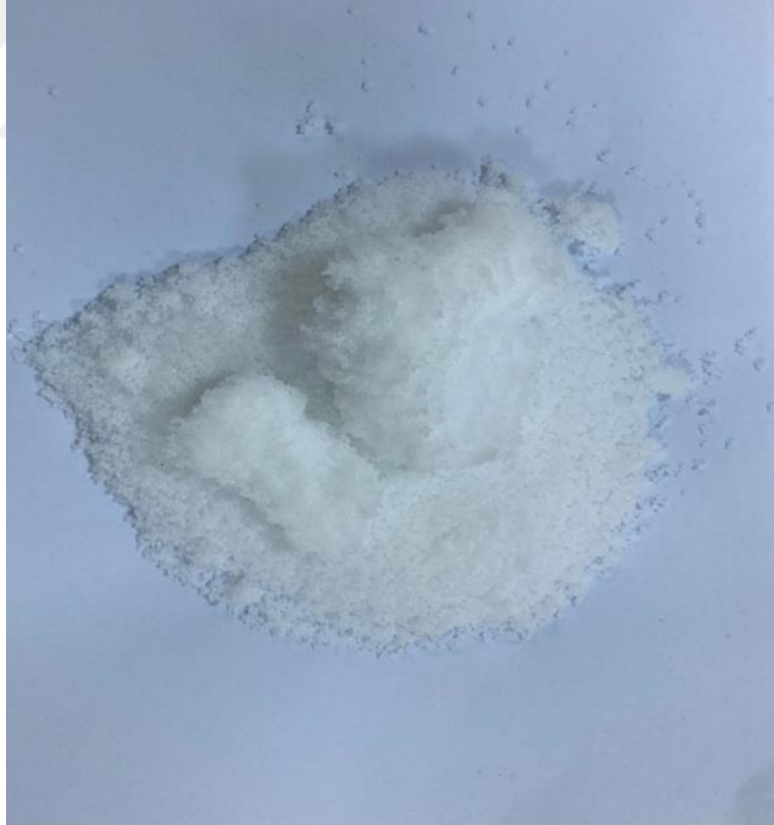
Şekil 2.2. Dere kumu

### 2.1.3. Sodyum silikat ve sodyum hidroksit

Yapılan çalışmada karışımlar hazırlanırken kullanılan alkali aktivatörlerden bir tanesidir. Sodyum silikat 1100oC aşan sıcaklıklarda yüksek basınçlı buhar ile sıvı hale gelerek çözülmesiyle üretilir. Yapılan analizler sonucunda silikat çözeltisinin kimyasal bileşimi kütlece %29,7 silikon dioksit, %14,7 sodyum oksit ve %55,5 su içerir. Sodyum silikat Şekil 2.3’te gösterilmiştir. Yapılan çalışmada kullanılan bir diğer kimyasal sodyum hidroksittir. Sodyum hidroksit katı halde temin edilmiştir. Daha sonra çözelti hazırlanmıştır. Sodyum hidroksit molaritesi 8 M ve 16 M olarak seçilmiştir. Katı haldeki sodyum hidroksit Şekil 2.4’te gösterilmiştir.



**Şekil 2.3** Sodyum Silikat



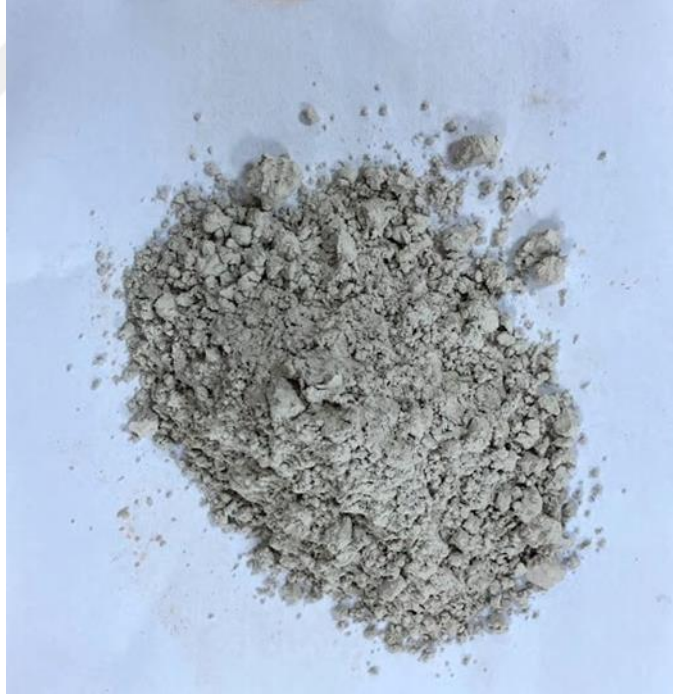
**Şekil 2.4.** Sodyum hidroksit

#### **2.1.4. Akışkanlaştırıcı katkılar**

Akışkanlaştırıcı katkılar kıvamı değiştirmeden su miktarının azalmasını sağlayan veya su miktarı değişmeden çökmeyi/yayılmayı artıran veya her iki etkiyi de birlikte yaratan katkılardır. Bu çalışmamızda sabit oranda 15g karışımlara ilave edilmiştir. Bu çalışmada kullanılma şekli ve amacı, normal akışkanlaştırıcı katkılarla aynı işlenebilirlik için daha az su kullanmayı, dolayısıyla daha yüksek dayanım elde etmeyi kapsar. Karışımlarda, işlenebilirliği iyileştirmek için polikarboksilat eter bazlı bir süper akışkanlaştırıcı (SP) kullanılmıştır.

#### **2.1.5. Yüksek fırın cürufu**

Yapılan çalışmada karışımda kullanılan bir diğer malzemedir. Yüksek fırın cürufu (YFC) yüksek sıcaklık fırınlarında demir üretiminden erimiş halde elde edilen başlıca kalsiyum-alümina-silika ve bazik bileşiklerden oluşan atık bir üründür. YFC Bolu Çimento Şirketi'nden temin edilmiştir. YFC'nin fiziksel özellikleri ve kimyasal bileşimi Çizelge 2.1'de ve numuneye ait görsel Şekil 2.5'tedir.



**Şekil 2.5.** Yüksek fırın cürufu

### 2.1.6. Uçucu kül

Yapılan çalışmada karışımlarda kullanılan atık malzeme olan uçucu kül (UK) Çatalağzı (Zonguldak) termik santralinden temin edilmiştir. Oksit içeriği bakımından %70'inden fazlası üç ana oksitten ( $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$  ve  $SiO_2$ ) oluşmaktadır (Kaya, 2020). Uçucu külün fiziksel özellikleri ve kimyasal bileşimi Çizelge 2.1'de ve numuneye ait görsel Şekil 2.6'dadır (TS EN 450-1, 2005).



Şekil 2.6. Uçucu kül numunesi

**Çizelge 2.1** Uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı malzemelerinin fiziksel özellikleri ve kimyasal bileşimi

Bağlayıcı Blaine Kaybı (m <sup>2</sup> /kg)	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Kızdırma	Özgül
	Ağırlığı	İnceliği								
UK 387	(%) 2.10	54.76	25.26	6.28	2.08	0.20	4.04	0.38	3.30	2.13
YFC 432	(%) 37.25	38.37	11.89	1.05	8.13	0.38	1.28	0.28	-	2.93
SD 25700	(%) 0.03	90.21	-	-	-	0.35	0.85	0.45	2.87	2.26

## 2.2. Yöntem

### 2.2.1 Karışım malzemelerinin hazırlanması ve oranları

Geopolimerizasyon tepkimesinin başlaması için kullanılacak alkali aktivatörler ilk olarak hazırlanmıştır. (Şekil 2.7). Sonrasında geopolimer harç hazırlanmasında kullanılacak olan toz malzemeler tek tek tartılmıştır. Karışıma ait veriler Çizelge 2.2’de verilmiştir.

**Çizelge 2.2** Geopolimer harç malzemeleri karışım miktarları (gr)

Malzemeler	Kontrol-	Kontrol-	SD5-	SD5-	SD10-	SD10-	SD15-	SD15-
	8M	16M	8M	16M	8M	16M	8M	16M
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	145	145	145	145	145	145	145	145
NaOH	55	55	55	55	55	55	55	55
Uçucu kül	200	200	180	180	160	160	140	140
Cüruf	200	200	200	200	200	200	200	200
Silis dumanı	0	0	20	20	40	40	60	60
Kum	900	900	900	900	900	900	900	900
SP	15	15	15	15	15	15	15	15



**Şekil 2.7** Hazırlanan alkali aktivatör

### **2.2.2 Numunelerin hazırlanması**

Geopolimer numunelerinin üretiminde silis dumanı içeren numuneler için uçucu kül, cüruf ve silis dumanı, karıştırıcı matkap kullanılarak karıştırılmıştır. Daha sonra farklı molariteli (8M veya 16M) NaOH ve sodyum silikat ile hazırlanan alkali aktivatör solüsyonu karıştırılarak eklenmiştir. 2 dakikalık karıştırmadan sonra agrega (kum) eklenmiş ve elde edilen karışım 3 dakika daha karıştırılmıştır. Son olarak karışımlar kalıplara dökülerek gerekli vibrasyon işlemi uygulanmıştır. Kalıplara dökülen numunelerde oluşan boşlukları gidermek ve kalıplara yerleşmesini sağlamak için vibratör kullanılmıştır. Kalıplar hazırlanırken numunelerin kalıptan kolayca çıkarılabilmesi için kalıplar yağlanmıştır. Daha sonra, alkali aktivatörlerin buharlaşmasını ortadan kaldırmak için geopolimer numuneleri plastik torbalarda tutulmuştur. Geopolimer numuneler, 24 saat boyunca oda koşullarında tutulmuştur. Bir hava kompresörü kullanılarak kalıptan çıkarılan numuneler daha sonra kürleme sonrası dayanıklılık testi için oda sıcaklığında 7 28 ve 56 gün süreyle tutulmuştur. Kalıp olarak her seri için 50 x 50 mm küp ve 40x40x160 mm'lik prizma kalıplar kullanılmıştır. Karışımla ilgili fotoğraflar Şekil 2.8-2.16'de gösterilmiştir.



**Şekil 2.8** Toz malzemelerin alkali aktivatörler ile karışımı



**Şekil 2.9** Kum ilave edilmeden önceki kıvam



**Şekil 2.10** Karışımların mikser aracılığı ile karıştırılması





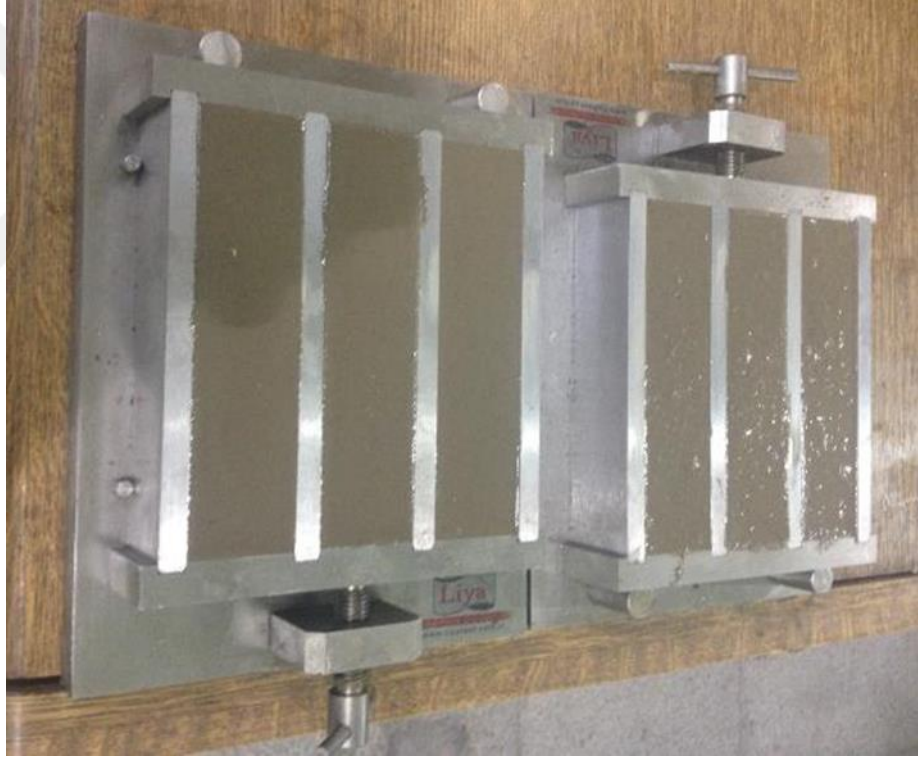
**Şekil 2.11** Kumun karışıma ilave edilmesi



**Şekil 2.12** Karışımın kalıba dökülmesi



Şekil.2.13 Karışma vibratör uygulanması



Şekil 2.14 Oda sıcaklığında numunelerin bekletilmesi



**Şekil 2.15** Kalıptan çıkarılan prizma numuneler



**Şekil 2.16** Kalıptan çıkarılan küp numuneler

## 2.3 Deneysel Çalışmalar

Yapılan çalışmada 50mmx50mmx50mm ölçülerinde küp ve 40mmx40mmx160mm ölçülerinde prizma numuneler üretilmiştir. Mekanik deneyler çerçevesinde üretilen numuneler üzerinde basınç ve eğilme dayanımı ve ultrases geçiş hızı (UGH) testleri yapılmıştır. Ayrıca geopolimer numunelerin birim ağırlık, su emme ve boşluk oranı değerleri hesaplanmıştır. İlk aşamada, birim ağırlık, su emme ve boşluk oranı değerleri incelenmiş ve daha deneysel bir karşılaştırma yapılmıştır. Bununla beraber yayılma tablası testi ve priz süresi araştırması yapılmıştır. Durabilite çalışması kapsamında da yüksek sıcaklık ve donma-çözülme testleri yapılmıştır. Üretilen numuneler Şekil 2.17'de gösterilmiştir.

### 2.3.1 Basınç dayanımı testi

Küp ve prizma numuneler için işlem aynı olsa da yöntemler farklı olmuştur. Küp numuneler direk olarak ASTM C109'a göre otomatik test cihazından metal kırılma ucu ile basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur. Prizma numuneler için ise eğilme dayanım testi sonucu ortadan ikiye bölüldüğünden iki parça olarak yapılmıştır. 7. 28. ve 56. günlerde uygulanmıştır. Her bir seri için 3'er numune kullanılmıştır. Üç numunenin ortalama basınç dayanımı, çalışmada kullanılan harcın basınç dayanımını yansıtacak şekilde hesaplanmıştır.

### 2.3.2 Eğilme dayanımı testi

Bu deneyin amacı, malzemenin mukavemeti hakkında tasarım bilgisi sağlamak ve malzemesinin eğilmeye karşı mekanik özellikleri belirlemek için yapılır. 40\*40\*160 boyutlarındaki prizma geopolimer numuneler maruz bırakıldığı eğilme dayanımı testinde otomatik test makinasında ASTM C 348'e göre üç noktadan yüke tabi tutulmuşlardır. Numunelerin kalıba dökülmesi sırasında üst kısma gelen yüzey uygulanan eğilme testine paralel yerleştirilmiştir. Deney 7. 28. ve 56. günler göz önüne alınarak uygulanmış ve yorumlanmıştır.

Eğilme dayanımı aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır.

Eğilme çekme dayanımı  $\sigma = 3PL/2bd^2$

$\sigma$ : Eğilme dayanımı, (N/mm<sup>2</sup>)

b: Prizma kesitinin eni (mm),

d: Prizma kesitinin yüksekliği (mm),

P: Prizmanın kırıldığı anda ortasına uygulanan kuvvet (N),

L: Mesnet silindirleri arasındaki uzaklık (mm) dir.

### 2.3.3 Ultrases geçiş hızı testi

Test cihazı alıcı ve verici arasında oluşturulan ultrases dalgalarının beton içerisindeki geçiş süresine oranıyla tanımlanmaktadır. Ultrasonik nüfuz eden betonun hızı ile betonun basınç dayanımı arasında doğrudan bir ilişki yoktur. Ancak betonun yoğunluğu ile alakalıdır. Düşük yoğunluklu betonda (daha fazla boşluklu beton), ultrasonun bir beton yüzeyden diğerine geçmesi daha uzun sürer. Yani beton içindeki boşluk arttıkça ultrasonik iletim hızı yavaşlar; beton içindeki boşluk azaldıkça ultrasonik iletim hızı artar. Test, geopolimer numunelerinin ultrasonik iletim hızlarını belirlemek için yapılmıştır. Numunelerin pürüzlü yüzeylerine vazelin sürülür. Transdüserler numunelerin uzunlamasına yönünde vazelin ile uygulanan yüzeylere tutturulmuştur. Her numune için iki okuma alınmış ve bu iki değerinin ortalaması alınmıştır. Ultrasonik iletim hızı m/s olarak belirlenmiştir. Bu çalışma kapsamında, deneyin tüm adımlarında numunelerin ultrasonik iletim hızının sonuçları incelenmiştir.

### 2.3.4 Fiziksel özellikler

Maddenin bir başka maddeye veya maddelere dönüşmeden gözlem yapılabilen, ölçülebilen, hissedilebilen özellikleridir. İy yapısının değişmeden dış yüzeyinde meydana gelen değişimlerdir.

Yapılan bu çalışmalarda kullanılan 50\*50\*50 boyutlarındaki geopolimer küp numunelerinin etüvde 48 saatlik zaman içerisinde tutulmaları ile etüv kuru ağırlığı (D) bulunmuştur. Bununla birlikte aynı süre zarfında oda sıcaklığındaki su içinde de bekletilerek çıkartıldığında doymun kuru yüzey ağırlığı (E) bulunmuştur. Arşimet

Prensibi yani suyun kaldırma kuvveti prensibini kullanarak su içindeki ağırlığı (F) bulunmuştur. Bu hususta ilgili denklemler aşağıda detaylandırılmıştır.

$$\text{Birim Ağırlık (gr/cm}^3\text{)} = D/(D-F)$$

$$\text{Boşluk Oranı (\%)} = [(E-D)/(E-F)] \times 100$$

$$\text{Su emme Oranı (\%)} = [(E-D)/(D)] \times 100$$

D= Kuru haldeki tespit edilen ağırlığı (gr)

E=Doygun kuru yüzey halde tespit edilen ağırlığı (gr)

F= Su içinde tespit edilen ağırlığı (gr)



Şekil 2.17 Deneyde kullanılan küp ve prizma numuneler

### 2.3.5 Yüksek sıcaklık testi

Geopolimer harç numuneleri yapılan çalışmada yüksek sıcaklığa da maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklığın (300°C, 600°C ve 900°C) geopolimer numuneler üzerindeki etkisi 56 gün sonra incelenmiştir. Test öncesinde numuneler 24 saat etüvde kurutulmuştur. Kurutulan numuneler daha sonrasında oda sıcaklığında soğutulularak termik deformasyon oluşmasına engel olunmuştur. Geopolimer numuneler, sıcaklığın hedef sıcaklık seviyesine kadar 1°C/dk hızla arttığı bir fırına konulmuştur. Hedef sıcaklığa ulaştıktan sonra geopolimer numuneler 2 saat bekletilmiştir. Daha sonra geopolimer numuneler normal sıcaklıklara kadar soğumaya bırakılmıştır. Numunelerin yapılan işlemler sonrasında basınç dayanımı, eğilme dayanımı, ultrases geçiş hızı ve ağırlık kaybı incelemeleri de yapılmıştır.

### 2.3.6 Donma-çözülme testi

56 günlük oda koşullarında kütleme periyotlarından sonra geopolimer numuneler donma-çözülme döngülerine (100 döngü) maruz bırakılmıştır. Her döngü için, hem çözülme hem de donma aşamalarının süresi 12 saattir. Donma-çözülme çevrimlerinin sıcaklık seviyeleri -20 °C ile +20 °C aralığında olmuştur. Bu işlemle birlikte basınç dayanımı, eğilme dayanımı, ultrases geçiş hızı ve ağırlık kaybı incelemeleri yapılmıştır.

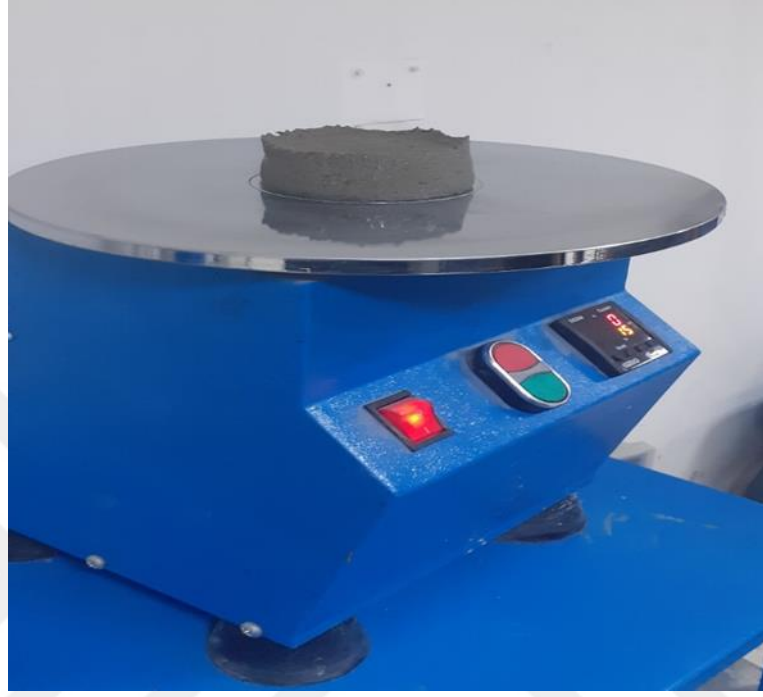
Donma ve çözülme reaksiyonları sonucu oluşan olumsuz etkenler fiziksel kimyasal olarak betonda herhangi bir aşamada muhakkak gözlemlenmelidir (Aygörmez, 2018). Betonda suyun donması numune içerisinde boşluk oluşumu ve donmanın etkisiyle hidrostatik basınç oluşumu gözlenmektedir. Oluşan hidrostatik basınç hacim genişlemesine neden olmakla birlikte sonucunda kırılmalar oluşmaktadır.

### 2.3.7 Yayılma tablası ve priz süresi testleri

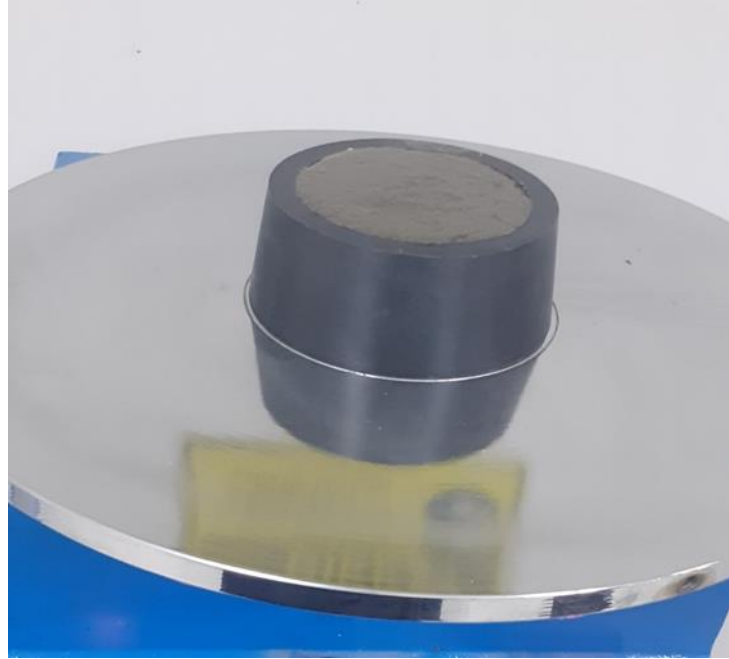
TS EN 12350-5 standardına göre; deney, beton karışımlarının kıvam ölçümünde kullanılır. Taze beton kıvamı, düşme hareketi yaptırılan bir tabla üzerindeki betonun yayılmasının ölçümü yoluyla belirlenir.

Yüzeyi metalle kaplı, bir kenarları birbirine menteşe ile bağlanmış iki tabladan oluşur. Üst tabla 700x700 mm boyutundadır. Korozyona karşı dirençli malzemenen üretilmiştir. Üst tabla metal yüzeyinde, 210 mm çaplı daire şekilli bir çizgi ve 2 adet

de birine dik merkezleme çizgileri bulunmaktadır. Paslanmaz çelik koninin üst çapı 130 mm, taban çapı ve yüksekliği 200 mm, kalınlığı 1,5 mm 'dir. Şekil 2.18 ve 2.19'da yayılma tablası deney aleti gösterilmiştir. Ayrıca numunelerin priz başlama ve bitiş süreleri de tespit edilmiştir.



**Şekil 2.18** Yayılma tablası deney aleti



**Şekil 2.19** Numunenin yayılma tablasındaki hali



# ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

## DENEY SONUÇLARI

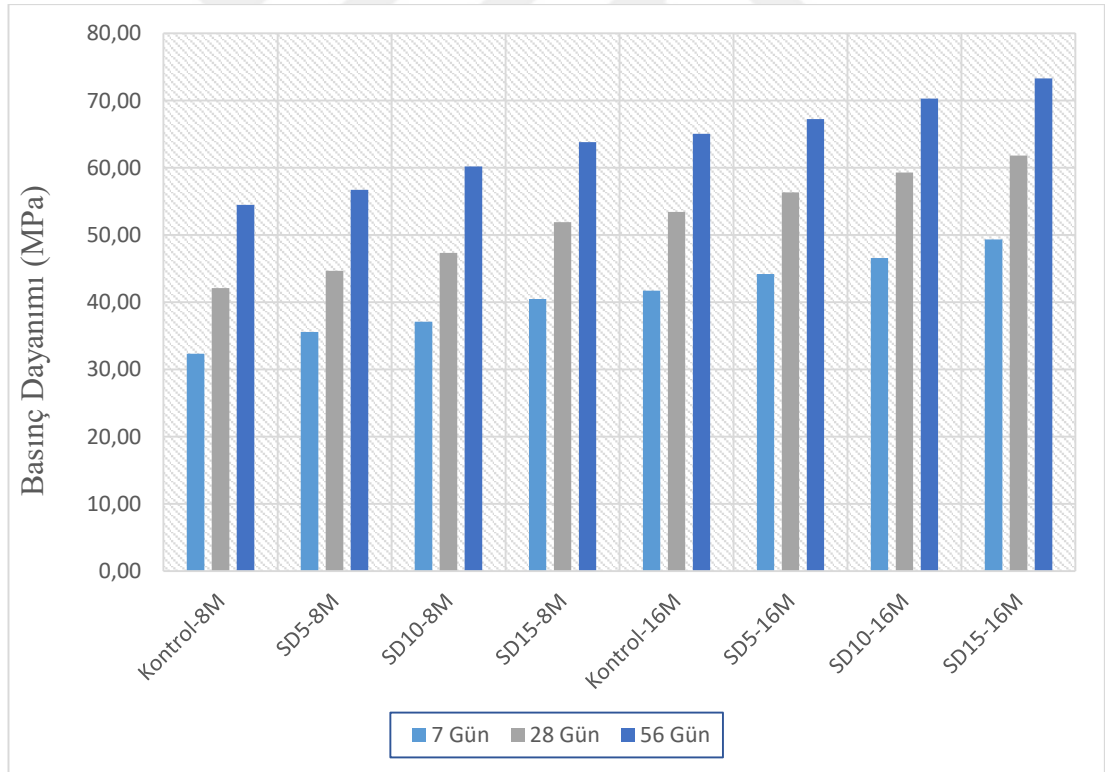
### 3.1. Basınç Dayanımı Test Sonuçları

Üretilen geopolimer numunelerde silis dumanı ikamesi ile birlikte farklı molaritede kullanılan sodyum hidroksitin harç yapımındaki etkileri araştırılmıştır. Sonuçlar, geopolimer numunelerin basınç dayanımlarının silis dumanı ikamesi ile arttığını ve %15 silis dumanı ikame edilmiş numunelerde maksimum basınç dayanımının elde edildiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, NaOH molaritesindeki artışla birlikte basınç dayanımı artışlarının daha fazla olduğu tespit edilmiş, 16M NaOH molaritesine sahip tüm geopolimer numuneleri, 8M NaOH molaritesine sahip geopolimer numunelerine göre daha iyi basınç dayanımı değerleri göstermiştir. Sonuçlar, ilave silika içeriğinin alkali aktivatörlerle reaksiyona giren silis dumanından geldiğini ve C-N-A-S-H tipi jel ürünleri oluşturarak alkali aktivasyon sürecini arttırdığını göstermiştir. Ayrıca, oluşan yoğun mikro yapı, silis dumanı ikamesi ile oluşmuş ve dayanım gelişmesinde rol oynamıştır. İnce silis dumanı partikülleri agregalar arasında dolgu görevi yaptığından ara boşlukların doldurulmasına olanak sağlanmış ve daha kompakt bir mikro yapı elde edilmiştir. Ek olarak, yüksek SiO<sub>2</sub> içeriği nedeniyle silis dumanı, cüruf malzemesinde yaygın olarak bulunan CaO ve sodyum silikat ve hidroksit alkali aktivatörlerinin kombinasyonu ile reaksiyona girerek C-S-H jeli oluşturur. Böylece silis dumanı, mikro yapıyı ve mekanik dayanım performansını iyileştirmiştir (Rashad ve Zeedan, 2012; Siddique, 2011; Muller vd., 2015). Ayrıca, numuneler oda koşullarında bırakıldığından ve numunelere ısı kürü uygulanmadığından sürekli alkali aktivasyon işlemi nedeniyle zamanla geopolimer numunelerin basınç dayanımı artmıştır. Böylece alkali aktivasyon işlemi zamanla devam etmiş ve 28 gün sonra hatırı sayılır bir dayanım artışı elde edilmiştir. Elde edilen sonuç, oda koşullarında kürlenmiş geopolimer numunelerin basınç dayanımlarının 7 günde 30 MPa ila 50 MPa, 28 günde 40 MPa ila 60 MPa ve 56 günde 55 MPa ila 75 MPa aralığında olduğunu göstermiştir. Elde edilen basınç dayanımları, yönetmelik/standartlara göre yapı elemanlarında kullanılan izin verilen basınç

dayanım sınırlarını karşılamıştır. Geopolimer numunelerde Çizelge 3.1 ve Şekil 3.1’te verilen basınç dayanımı sonuçları bulunmuştur.

**Çizelge 3.1** Basınç dayanımı değerleri

	Basınç Dayanımı (MPa)		
	7-gün	28-gün	56-gün
Kontrol-8M	32.35	42.11	54.48
SD5-8M	35.56	44.69	56.73
SD10-8M	37.12	47.34	60.22
SD15-8M	40.51	51.93	63.82
Kontrol-16M	41.74	53.43	65.06
SD5-16M	44.21	56.35	67.23
SD10-16M	46.57	59.31	70.31
SD15-16M	49.35	61.83	73.28



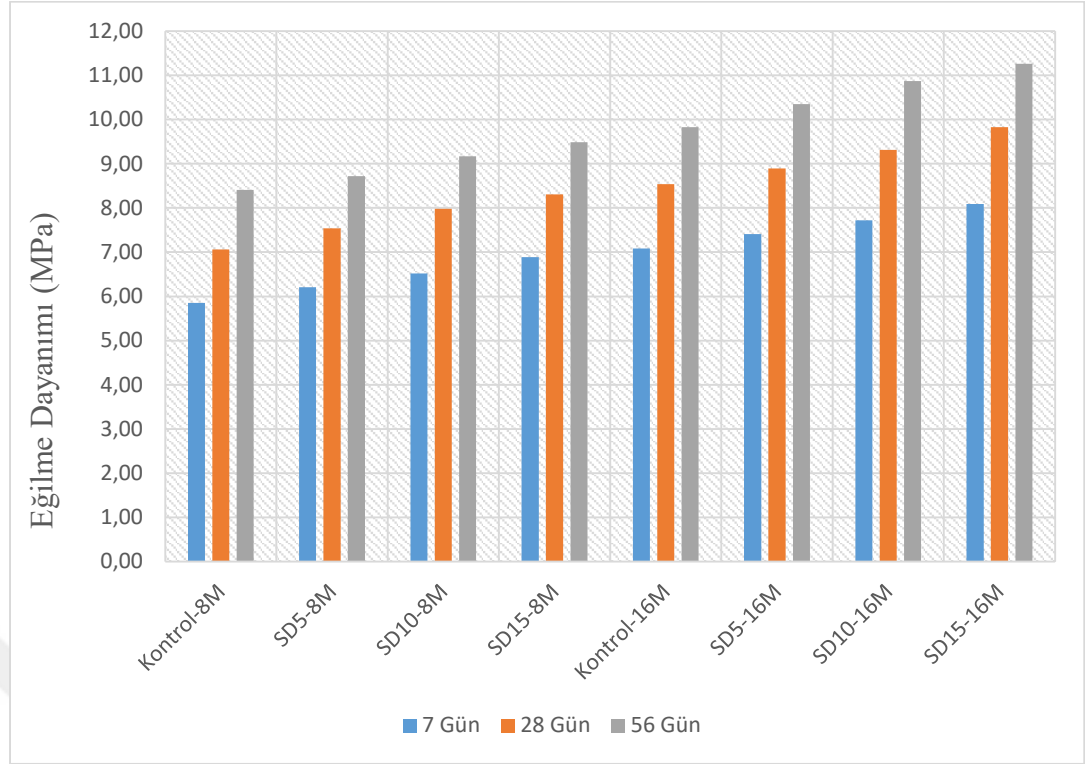
**Şekil 3.1** Basınç dayanımı sonuçları

### 3.2 Eğilme Dayanımı Test Sonuçları

Geopolimer harç üretiminde farklı oranlarda kullanılan silis dumanı ve molaritelerin deneyde üretilen geopolimer numuneleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Eğilme dayanımı davranışlarının basınç dayanımına benzer şekilde olduğu görülmüştür. Basınç dayanımı sonuçlarına benzer şekilde, numunelerin eğilme dayanımları silis dumanı katkıları ve daha yüksek molarite ile arttırılmıştır. 16 M NaOH molaritesine sahip %15 silis dumanı içeren geopolimer numuneler maksimum eğilme dayanımı gösterirken, 8M NaOH molaritesine sahip ve silis dumanı içermeyen geopolimer numuneler minimum eğilme dayanımı performansı sergilemiştir. 7 günde 6 MPa ila 8 MPa, 28 günde 7 MPa ila 10 MPa ve 56 günde 8,5 MPa ila 11,5 MPa aralığında olan geopolimer numunelerinin eğilme dayanımları görüldüğü gibi zamanla artmıştır. Bu durum, zamanla sürekli oluşan alkali aktivasyon reaksiyonlarına atfedilebilir ve başka C-N-A-S-H tipi reaksiyon ürünleri oluşturur. Hazırlanan numunelerde Çizelge 3.2 ve Şekil 3.2’de verilen eğilme dayanımı sonuçları bulunmuştur.

**Çizelge 3.2** Eğilme dayanımı değerleri

	Eğilme Dayanımı (MPa)		
	7-gün	28-gün	56-gün
Kontrol-8M	5.85	7.06	8.41
SD5-8M	6.21	7.54	8.72
SD10-8M	6.52	7.98	9.17
SD15-8M	6.89	8.31	9.49
Kontrol-16M	7.08	8.54	9.83
SD5-16M	7.41	8.89	10.35
SD10-16M	7.72	9.31	10.87
SD15-16M	8.09	9.83	11.26



**Şekil 3.2** Eğilme dayanımı deney sonuçları

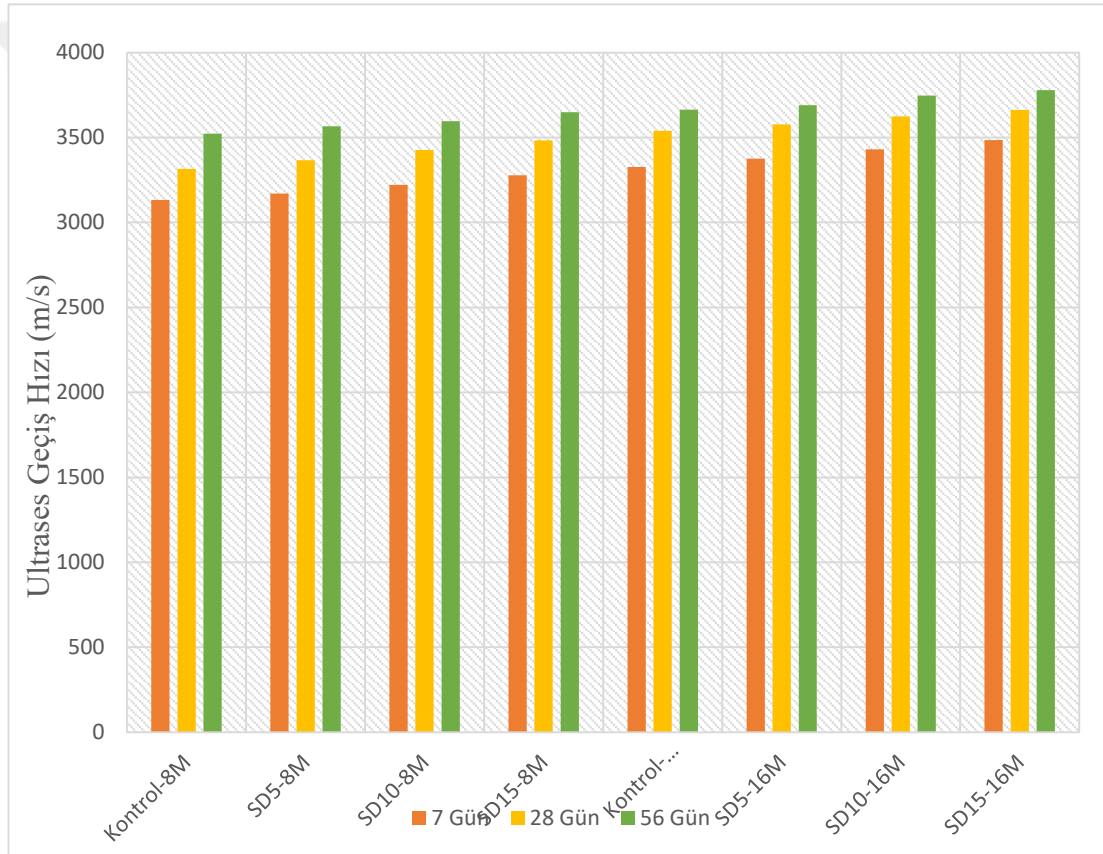
### 3.3 Ultrases Geçiş Hızı Deney Sonuçları

Matrisin homojenliğini incelemek ve içindeki kusurların varlığını tespit etmek için ultrasonik tahribatsız iletim hızı testi yapılmıştır. UGH sonuçları, silis dumanı içeriğinin dahil edilmesiyle geopolimer numunelerinde daha yüksek UGH değerlerinin elde edildiğini göstermiştir. Bu durum, yoğun mikro yapı nedeniyle ultrasonik hız dalgalarının yayılmasındaki hızlanmaya bağlanabilir (Al-Tayyib vd., 1989; Al-Akhras vd., 2008; Maslehuddin vd., 2003). Silis dumanı içeriği arttıkça, ince silis dumanı parçacıkları agregalar arasındaki boşluğu doldurarak, arayüzey geçiş bölgesini güçlendirmiş ve mikro yapıyı iyileştirmiştir. Bu durumla beraber artan molarite de daha fazla N-A-S-H jelinin oluşumunu sağlayarak ultrases geçiş hızı değerlerinin artmasını sağlamış ve daha kompakt bir mikro yapı sağlamıştır. Benzer şekilde, UGH dalgalarında bir gecikmeye neden olan mikro yapıdaki boşluklardaki azalmaya bağlı olarak artan yaşla beraber UGH değerleri iyileşmiştir. Geopolimer numunelerinin ortalama UGH değeri, 3500 m/s olmuştur. Hazırlanan numunelerde Çizelge 3.3 ve Şekil 3.3'te verilen ultrases geçiş hızı sonuçları bulunmuştur.

**Çizelge 3.3** Ultrases geçiş hızı değerleri

	UGH (m/s)		
	7-gün	28-gün	56-gün
Kontrol-8M	3132	3315	3523
SD5-8M	3171	3366	3565
SD10-8M	3222	3427	3596
SD15-8M	3278	3483	3648
Kontrol-16M	3327	3539	3663
SD5-16M	3376	3578	3691
SD10-16M	3431	3625	3746
SD15-16M	3485	3661	3779

1



**Şekil 3.3** Ultrases geçiş hızı deney sonuçları

### 3.4 Birim Hacim Ağırlık, Boşluk Oranı ve Su Emme Sonuçları

Çizelge 3.4'te hazırlanmış silis dumanlı numunelerin fiziksel özellikleri yer almaktadır. Sonuçlar, artan silis dumanı ikame oranı ve molarite ile numunelerin boşluk oranının azaldığını ortaya koymuştur. %15 silis dumanına sahip geopolimer

numuneler en düşük boşluk oranını göstermiş ve daha yüksek molarite ile daha da azaltılmıştır. Bu durum, silis dumanının inceliğine atfedilebilir, bu da matris ve agregalar arasındaki yoğunluğu ve arayüzey geçiş bölgesini artırır. Ayrıca silis dumanı içeren geopolimer numunelerin su emmesi, inceliğinden dolayı artan silis dumanı oranı ile azalmıştır. Ayrıca 16 M'ye sahip geopolimer numuneler, 8M'ye sahip numunelere göre daha düşük su emme özelliği göstermiştir. Fiziksel özellikler göz önüne alındığında, hem 16M NaOH molaritesi hem de %15 silis dumanı ikameleri, geopolimer numunelerinin fiziksel özelliklerini iyileştirmiştir.

**Çizelge 3.4** Silis dumanı içeren geopolimer numunelerinin fiziksel özellikleri

	<b>Boşluk oranı (%)</b>	<b>Birim hacim ağırlık (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Ağırlıkça su emme oranı (%)</b>
Kontrol-8M	21,87	2,31	9,48
SD5-8M	21,24	2,34	8,97
SD10-8M	20,65	2,36	8,63
SD15-8M	20,18	2,39	8,34
Kontrol-16M	19,67	2,43	8,15
SD5-16M	19,03	2,46	7,89
SD10-16M	18,57	2,49	7,54
SD15-16M	17,92	2,51	7,12

### 3.5 Yüksek Sıcaklık Testi Sonuçları

Daha önceden hazırlanmış olan geopolimer harç numuneleri 56. gün sonunda kuru pozisyona getirilmesi için etüve konulmuştur. Etüvün sıcaklığı 105°C olarak ayarlanıp 24 saat süreyle numuneler burada tutulmuştur. Sonrasında 300°C, 600°C ve 900°C'lik yüksek sıcaklıklara maruz bırakılarak gözlemler yapılmıştır. Bu aşama sonrasında numuneler soğumaya bırakılıp ardından ağırlık kaybı, basınç ve eğilme dayanımı ve ultrases geçiş hızı sonuçlarına bakılmıştır. Bu deney çalışmasında basınç dayanımında 50\*50\*50 mm küp numuneler, eğilme dayanımında 40\*40\*160 mm prizma numuneler kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir.

Özet sayfaları, tezin kapsam ve içeriğinin 750 kelimeyi aşmayacak biçimde özetlenerek Türkçe ve İngilizce dilinde yazıldığı sayfalardan oluşur. Her dil için en çok iki sayfa kullanılır. Sıralamada önce Türkçe, sonra İngilizce özet yer alır.

### 3.5.1 Yüksek sıcaklık etkisi sonrası basınç ve eğilme dayanımı sonuçları

Yüksek sıcaklığın geopolimer numuneleri üzerindeki etkileri 300, 600 ve 900 °C'de incelenmiştir. Yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra, basınç dayanımı ve eğilme dayanımı sonuçları 56 günlük sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Daha yüksek silis dumanı içeren numuneler, silis dumanının F-tipi uçucu kül ile kısmen değiştirilmesi nedeniyle 300°C'de daha az basınç dayanımı artışı göstermiştir. F-tipi uçucu kül, polimerizasyon için yüksek sıcaklıkta kütleme gerektirmektedir (Niş ve Altındal, 2021); bu nedenle, kontrol numuneleri (silis dumanı olmadan) daha yüksek basınç dayanımı gelişimi göstermiştir. 300°C'deki bu basınç mukavemeti artışı, sürekli alkali aktivasyon reaksiyonlarına atfedilebilir, ve bu durum gözenekleri CASH ve CSH oluşumu ile doldurarak daha fazla aderans ve basınç dayanımını oluşturur (Kadhim vd., 2022; Selim vd., 2020). Öte yandan, geopolimer numunelerin eğilme dayanımı 300°C'ye maruz bırakıldıktan sonra önemli ölçüde azalmıştır (~%50 azalma). Bunun nedeni, numunelerin eğilme dayanımlarının iç mikroyapısal kusur gelişimine, çatlak oluşumuna ve yayılmasına ve gözenekli mikro yapının büyümesine karşı daha duyarlı olmasıdır (Zhang vd., 2016).

Sonuçlar ayrıca, geopolimer matrisinde dehidrasyon ve serbest su buharlaşması ve termal reaksiyon mekanizmaları nedeniyle 600 ve 900 °C'den sonra hem basınç dayanımlarının hem de eğilme dayanımlarının önemli ölçüde azaldığını göstermiştir (Zhang vd., 2012). 600°C'de basınç dayanımı için yaklaşık %50 ve eğilme dayanımı için yaklaşık %70 azalma olmuştur ve bu azalmalar 900°C'de hem basınç dayanımı hem de eğilme dayanımı için %85-90 civarında olmuştur. 600°C'den sonra bu tür mekanik kayıplar buhar etkisine bağlanabilir. Daha yüksek sıcaklıklarda mikro yapıdaki serbest su buhara dönüşerek matrise gerilim uygular ve buhar basıncının matrisin çekme kapasitesinden daha yüksek olması durumunda çatlama meydana gelir. Yoğunluk ve sertlik kaybı, sayı, boyut ve genişlikte termal çatlakların oluşmasından sonra ortaya çıkmış ve daha yüksek mekanik mukavemet bozulmasına neden olmuştur.

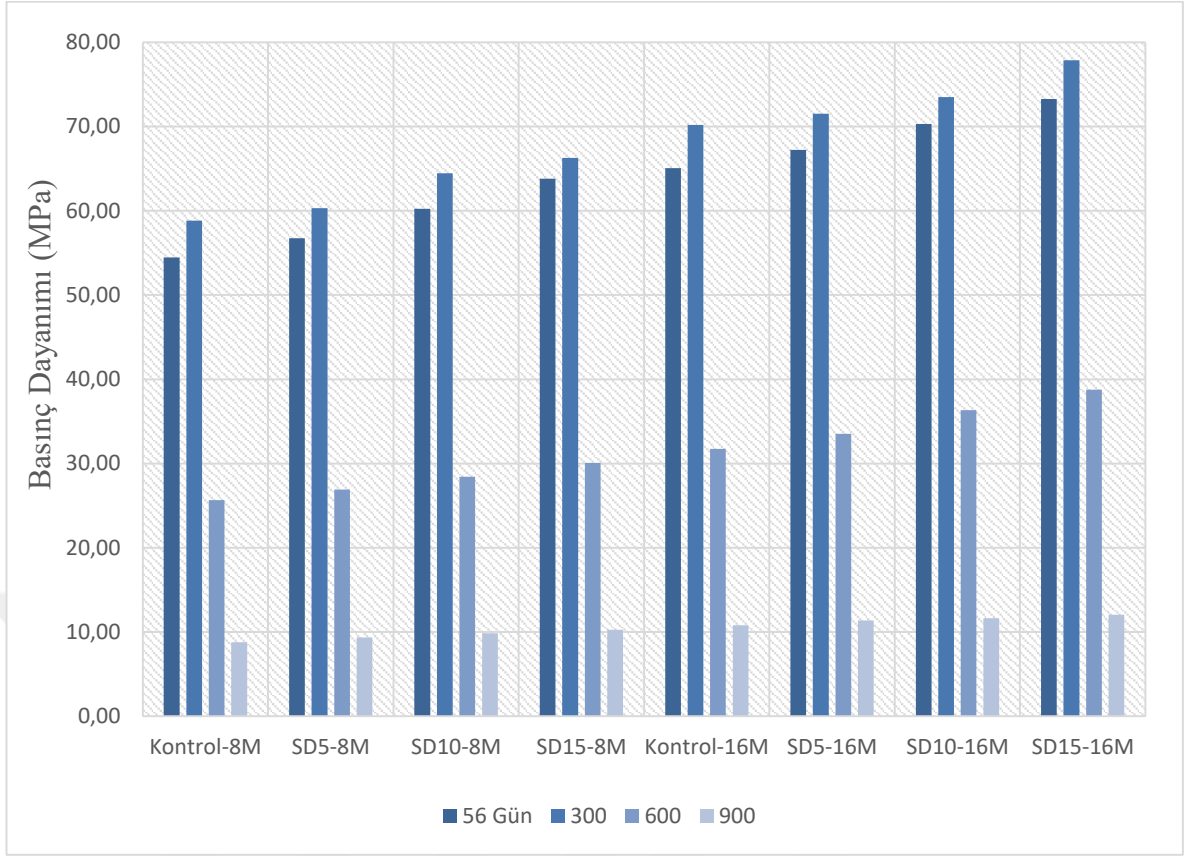
Kalan basınç dayanımı sonuçları ayrıca yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra silis dumanının ve yüksek NaOH molaritesinin belirgin bir etkisinin olmadığını ortaya koymuştur. 300, 600 ve 900 °C'de, değişen silis dumanı ikamesi ve NaOH molaritesi ile benzer basınç dayanımı kayıpları elde edilmiştir. Öte yandan, kalan eğilme dayanımı performansı, tüm yüksek sıcaklıklar için hem silis dumanı

ikamelerinden hem de yüksek NaOH molaritesinden olumlu şekilde etkilenmiştir. 16M NaOH konsantrasyonlu %15 silis dumanı içeren numuneler en yüksek sıcaklık direncini sergilemiştir. Bu durum, silis dumanı ilavesi ve yüksek NaOH molaritesi ile geliştirilmiş arayüzey geçiş bölgesine atfedilebilir, bu da ilk çatlak oluşum direncini arttırır. Öte yandan, ilk çatlak oluşumu silis dumanından ve yüksek molariteden basınç dayanımının %40-50'sine kadar olumlu etkilenebilir. Bundan sonra daha yüksek basınç gerilmeleri ve çatlaklar oluşmuş ve boyutları, genişlikleri ve uzunlukları büyümüştür. Bu nedenle silis dumanının olumlu katkısı ve yüksek molarite, daha yüksek gerilme değerlerinde veya dayanım değerlerinde görülememiştir. Hazırlanan numunelerde kalan dayanım sonuçları Çizelge 3.5 ve Çizelge 3.6'da ve Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te gösterilmiştir.

**Çizelge 3.5** Yüksek sıcaklık etkisinde kalan basınç dayanımı sonuçları

	Basınç Dayanımı (MPa)			
	56 Gün	300	600	900
Kontrol-8M	54,48	58,85	25,67	8,78
SD5-8M	56,73	60,32	26,92	9,36
SD10-8M	60,22	64,46	28,45	9,85
SD15-8M	63,82	66,27	30,08	10,27
Kontrol-16M	65,06	70,18	31,75	10,81
SD5-16M	67,23	71,54	33,52	11,37
SD10-16M	70,31	73,49	36,34	11,66
SD15-16M	73,28	77,85	38,76	12,05

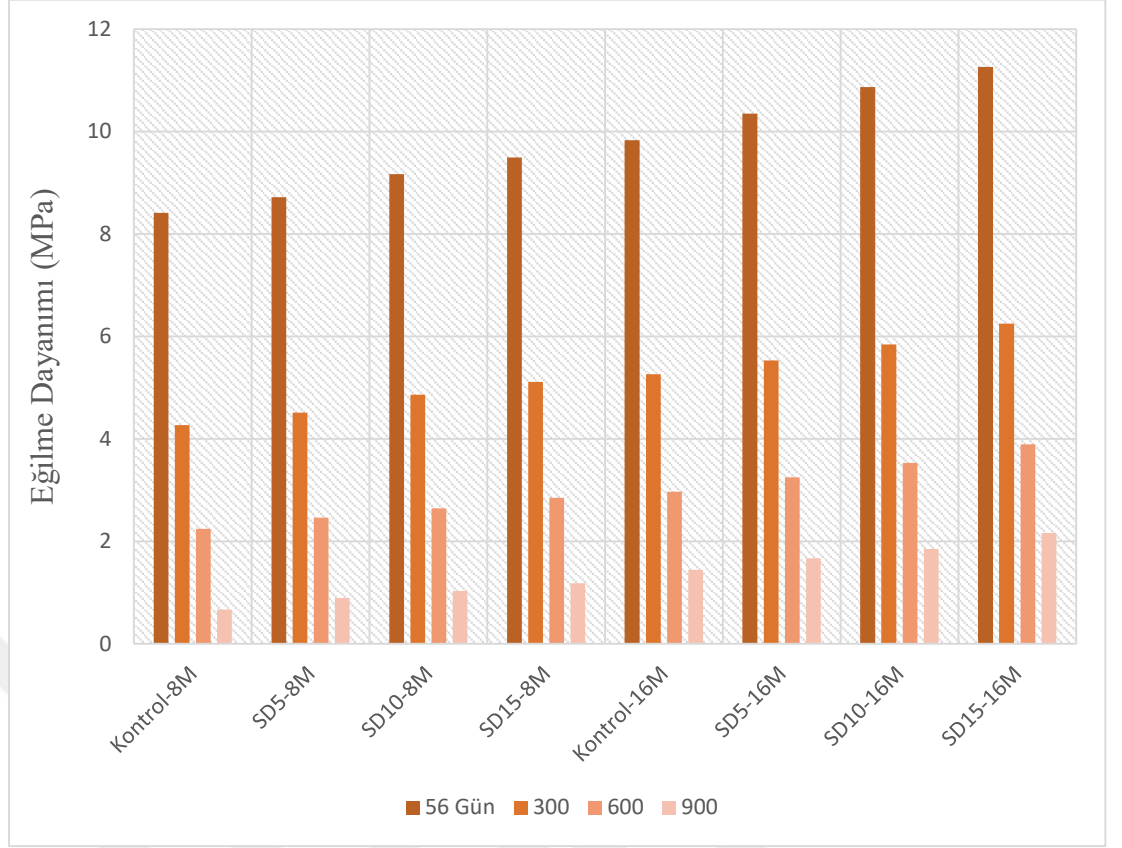




**Şekil 3.4** Yüksek sıcaklık etkisinde kalan basınç dayanımı sonuçları

**Çizelge 3.6** Yüksek sıcaklık etkisinde kalan eğilme dayanımı sonuçları

	Eğilme Dayanımı (MPa)			
	56 Gün	300	600	900
Kontrol-8M	8,41	4,27	2,24	0,67
SD5-8M	8,72	4,51	2,46	0,89
SD10-8M	9,17	4,86	2,64	1,03
SD15-8M	9,49	5,11	2,85	1,18
Kontrol-16M	9,83	5,26	2,97	1,44
SD5-16M	10,35	5,53	3,25	1,67
SD10-16M	10,87	5,84	3,53	1,85
SD15-16M	11,26	6,25	3,89	2,16



Şekil 3.5 Yüksek sıcaklık etkisinde kalan eğilme dayanımı sonuçları

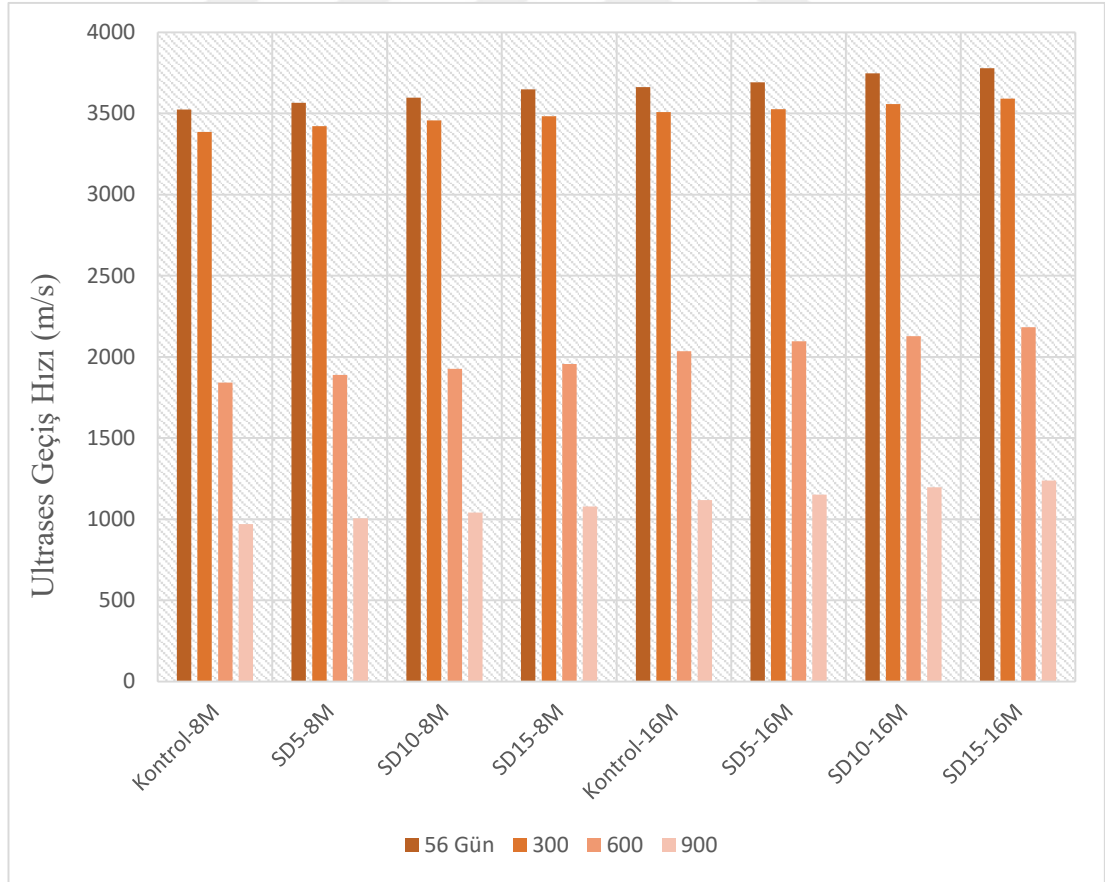
### 3.5.2 Yüksek sıcaklık testi sonrası ultrases geçiş hızı sonuçları

Genel olarak, boşlukların ve kusurların oluşumu numunelerin UGH değerlerini düşürmüştür. Yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra, su buharlaşması meydana gelmiş ve bu da numunelerin gözenek yapısında bir artışa neden olmuştur. Mikro yapıdaki ek boşluklar, kusurlar ve gözenekler, ultrases geçiş hızı (UGH) sonuçlarını azaltmıştır. Sonuçlar, geopolimer numunelerinin tüm UGH değerlerinin 600°C'den sonra önemli ölçüde azaldığını göstermiştir. Basınç dayanımı test sonuçlarına benzer şekilde, yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra UGH değerleri üzerinde silis dumanı ve yüksek NaOH molaritesinin olumlu etkisi ya hiç olmamıştır ya da ihmal edilebilir düzeydedir. Neredeyse benzer UGH kayıpları 300, 600 ve 900 °C'de, değişen silis dumanı birleşmeleri ve NaOH molaritesiyle elde edilmiştir. UGH kayıplarının

300°C'de %5, 600°C'de %45 ve 900°C'de %70 civarında olduğu bulunmuştur. Yüksek sıcaklık etkisinde kalan UGH sonuçları Çizelge 3.7 ve Şekil 3.6'da gösterilmiştir.

**Çizelge 3.7** Yüksek sıcaklık etkisinde ultrases geçiş hızı değerleri

	Ultrases Geçiş Hızı (m/s)			
	56 Gün	300°C	600°C	900°C
Kontrol-8M	3523	3385	1842	969
SD5-8M	3565	3421	1889	1005
SD10-8M	3596	3456	1927	1041
SD15-8M	3648	3482	1956	1078
Kontrol-16M	3663	3509	2034	1117
SD5-16M	3691	3526	2096	1152
SD10-16M	3746	3558	2127	1196
SD15-16M	3779	3592	2182	1238



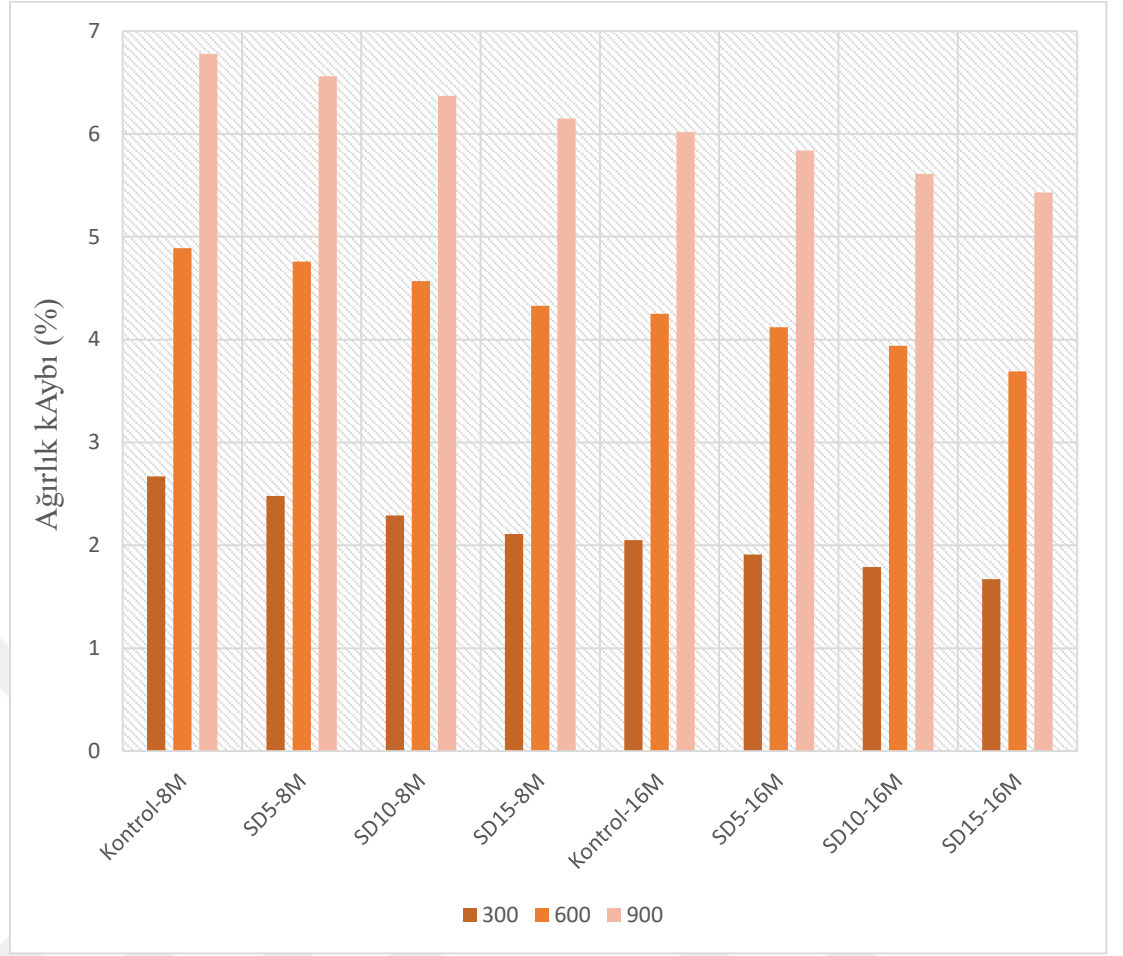
**Şekil 3.6** Yüksek sıcaklık etkisinde ultrases geçiş hızı deney sonuçları

### 3.5.3 Yüksek sıcaklık etkisinde ağırlık kaybı sonuçları

Sonuçlar, artan sıcaklıklarla daha yüksek ağırlık kayıplarının gözlemlendiğini işaret etmiştir. Hem silis dumanı oranı hem de NaOH molaritesindeki artışla birlikte yüksek sıcaklığa bağlı ağırlık kayıpları azalmıştır. En düşük ağırlık kaybı, en yüksek NaOH molaritesine ve %15 silis dumanı içeren geopolimer numunelerinde gözlenmiştir. Sıcaklık arttığında, dehidrasyon reaksiyonları ortaya çıkmış ve iç kısımlardan yüzeylere nem kaçarak iç hasara ve geopolimer numunelerde ağırlık kaybına neden olmuştur (Kong vd., 2007). Sıcaklık artışının ilk aşamasında, alkali aktivasyona bağlı suyun ve serbest suyun buharlaşması sonucu hızlı bir şekilde ağırlık kaybı meydana gelmiştir (Wang vd., 2015). Silis dumanı miktarı arttıkça, ince silis dumanı parçacıkları ara boşlukları doldurarak, ara yüzey geçiş bölgesini ve mikro yapıyı geliştirmiştir. Böylece, yoğun mikro yapı nedeniyle yüksek silis dumanı ve yüksek molarite için serbest su kaçıışı zorlaşmıştır. Yüksek sıcaklık etkisinde ağırlık kayıpları sonuçları Çizelge 3.8 ve Şekil 3.7’de gösterilmiştir.

**Çizelge 3.8** Yüksek sıcaklıkta oluşan ağırlık kayıpları

	Ağırlık Kaybı (%)		
	300°C	600°C	900°C
Kontrol-8M	2,67	4,89	6,78
SD5-8M	2,48	4,76	6,56
SD10-8M	2,29	4,57	6,37
SD15-8M	2,11	4,33	6,15
Kontrol-16M	2,05	4,25	6,02
SD5-16M	1,91	4,12	5,84
SD10-16M	1,79	3,94	5,61
SD15-16M	1,67	3,69	5,43



**Şekil 3.7** Yüksek sıcaklıkta oluşan ağırlık kayıpları

### 3.6 Donma Çözülme Testi Sonuçları

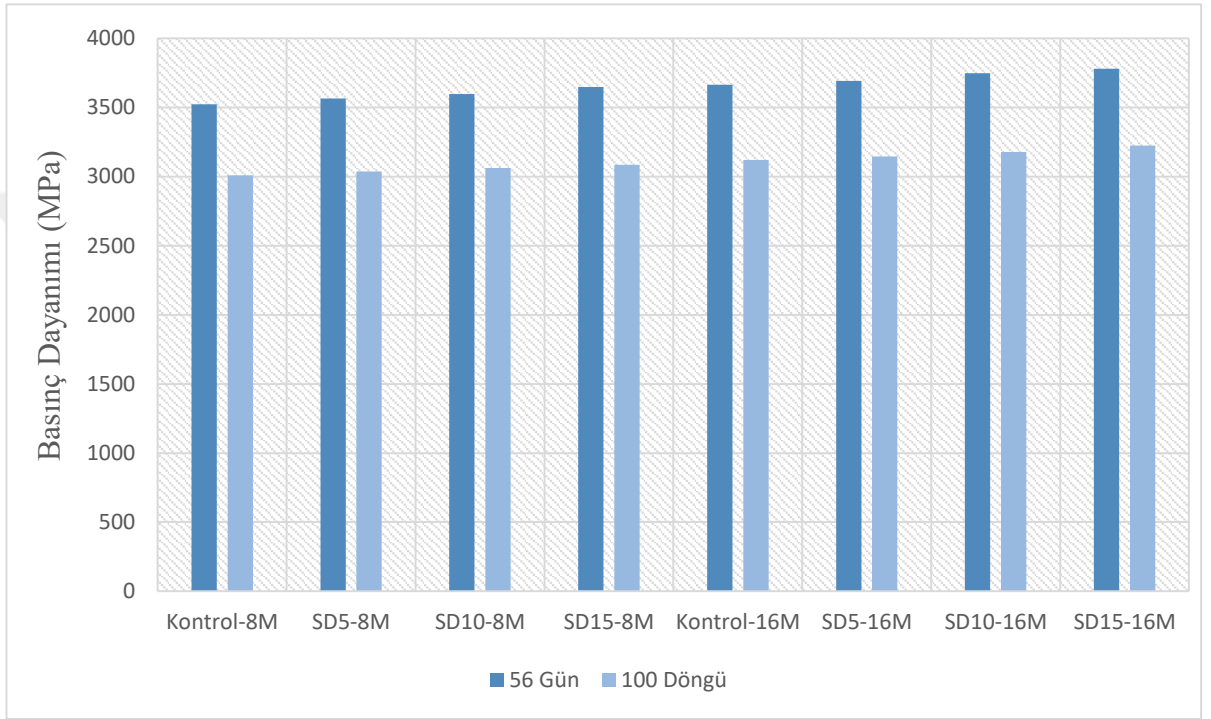
Silis dumanı katkılı geopolimer harç numuneleri ve kontrol numuneleri 56 gün sonunda 100 döngü donma çözülme etkisine maruz bırakılmıştır. Deney sonrası numunelerin ağırlık kaybı, basınç ve eğilme dayanımı ve ultrases geçiş hızı sonuçlarına bakılmıştır. Bu çalışma basınç dayanımı için 50\*50\*50 mm küp numuneler ve eğilme dayanımı için 40\*40\*160 mm prizma numuneler kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen bütün sonuçlar Çizelge 3.9’da verilmiştir.

**Çizelge 3.9** Donma Çözülme Testi Sonuçları

	Sıcaklık °C	Basınç Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Ağırlık Kaybı (%)	Ultrases Geçiş hızı (m/s)
Kontrol-8M	Oda koşulları/ 100 Döngü	54,48/ 40,36	8,41/5,89	0,00/0,51	3523/3008
SD5-8M	Oda koşulları/ 100 Döngü	56,73/43,45	8,72/6,26	0,00/0,47	3565/3037
SD10-8M	Oda koşulları/ 100 Döngü	60,22/45,74	9,17/6,45	0,00/0,42	3596/3062
SD15-8M	Oda koşulları/ 100 Döngü	63,82/48,21	9,49/6,71	0,00/0,39	3648/3084
Kontrol-16M	Oda koşulları/ 100 Döngü	65,06/48,86	9,83/7,14	0,00/0,36	3663/3119
SD5-16M	Oda koşulları/ 100 Döngü	67,23/51,24	10,35/7,39	0,00/0,32	3691/3145
SD10-16M	Oda koşulları/ 100 Döngü	70,31/53,89	10,87/7,83	0,00/0,26	3746/3178
SD15-16M	Oda koşulları/ 100 Döngü	73,28/57,72	11,26/8,06	0,00/0,23	3779/3223

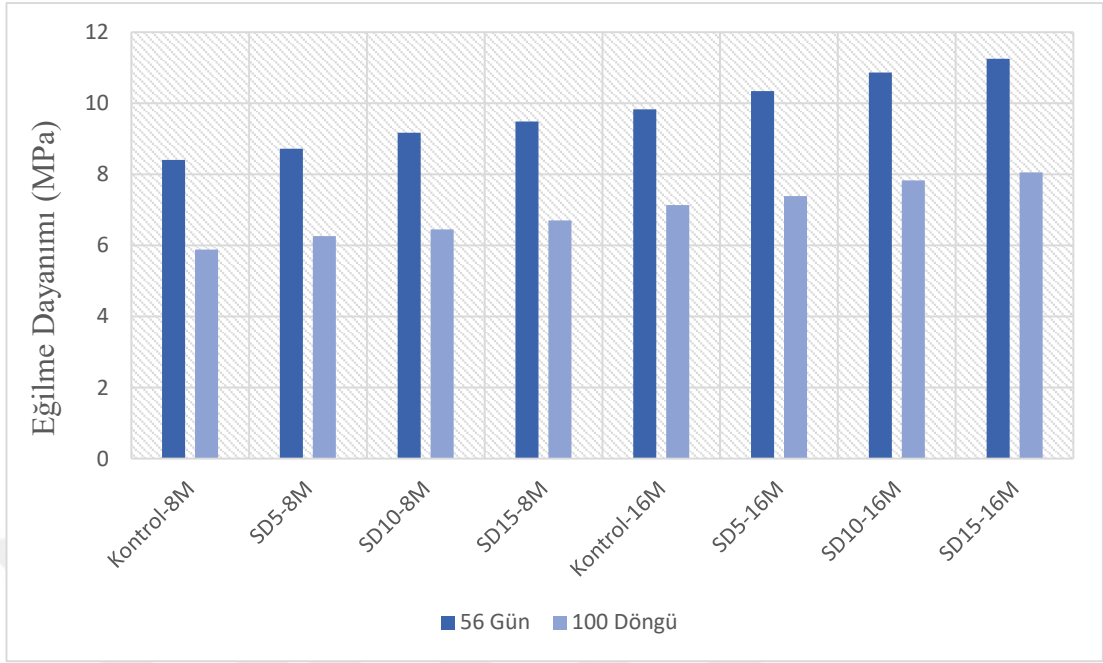
Şekil 3.8-3.10, 100 döngüden sonra geopolimer numunelerinin kalan dayanımlarını ve UGH'sini göstermektedir. Donma-çözülme testlerinin sonuçları 56 günlük sonuçlarla karşılaştırılmıştır. 100 donma-çözülme döngüsünden sonra geopolimer numunelerinin hem basınç dayanımı hem de eğilme dayanımı ile UGH değerleri biraz azalmıştır. Sonuçlar, donma-çözülme saldırısından kaynaklanan en yüksek dayanım kaybının 8M NaOH molaritesine sahip kontrol numunelerinde elde edildiğini göstermiştir. Dayanım ve UGH'deki azalma, silis dumanı ilavesi ve NaOH molaritesindeki artışla azalmıştır. Donma-çözülme testi sırasında numuneler nemli bir ortamda tutulmuş; bu durum alkali aktivasyon reaksiyonu için uygun bir ortam yaratarak gözeneklerin dolmasını sağlamıştır. Bazı donma-çözülme döngülerinden sonra numuneler yüzeylerinden bozulmaya başlamış, yüzeydeki bazı harç parçaları parçalanmış, daha sonra bozulma numunelerin içlerine doğru ilerlemiştir. Parçalanmanın arkasındaki en kritik neden, donma sırasında suyun genleşmesidir. Donma meydana geldiğinde su hacmi %9'a kadar artmış ve numunelerde hidrolik basınç oluşmuştur (Pilehvar vd., 2019). Bu gerilme seviyesi, geopolimer numunelerin

çekme dayanım kapasitesini aşarsa, çekme mikro çatlakları oluşur ve bu çatlak bölgeden bozulma başlar. Bu nedenle, donma-çözülme döngülerinden sonra dayanımlarda bir azalma beklenmiştir (Allahverdi vd., 2014; Basheer vd., 2001). Geopolimer numuneler, 100 döngüden sonra ilk dayanım ve UGH değerlerinin %70'inden fazlasını koruyarak donma-çözülme döngülerine karşı daha iyi direnç göstermiştir.

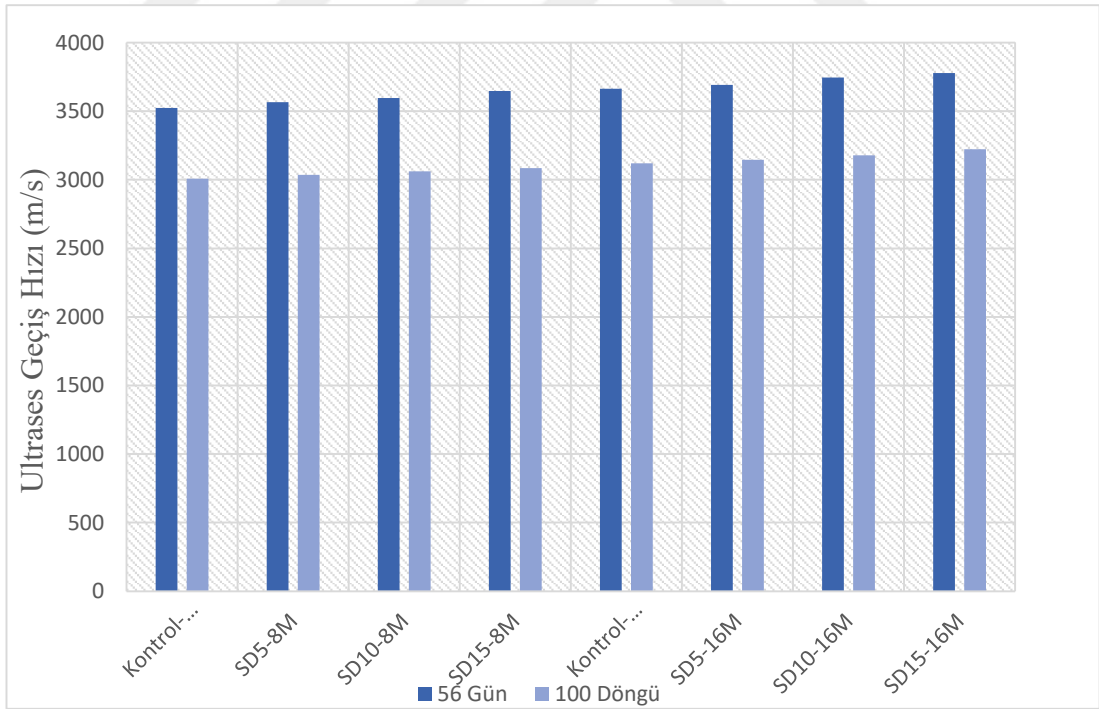


**Şekil 3.8** Donma çözülme testi sonrası kalan basınç dayanımı sonuçları





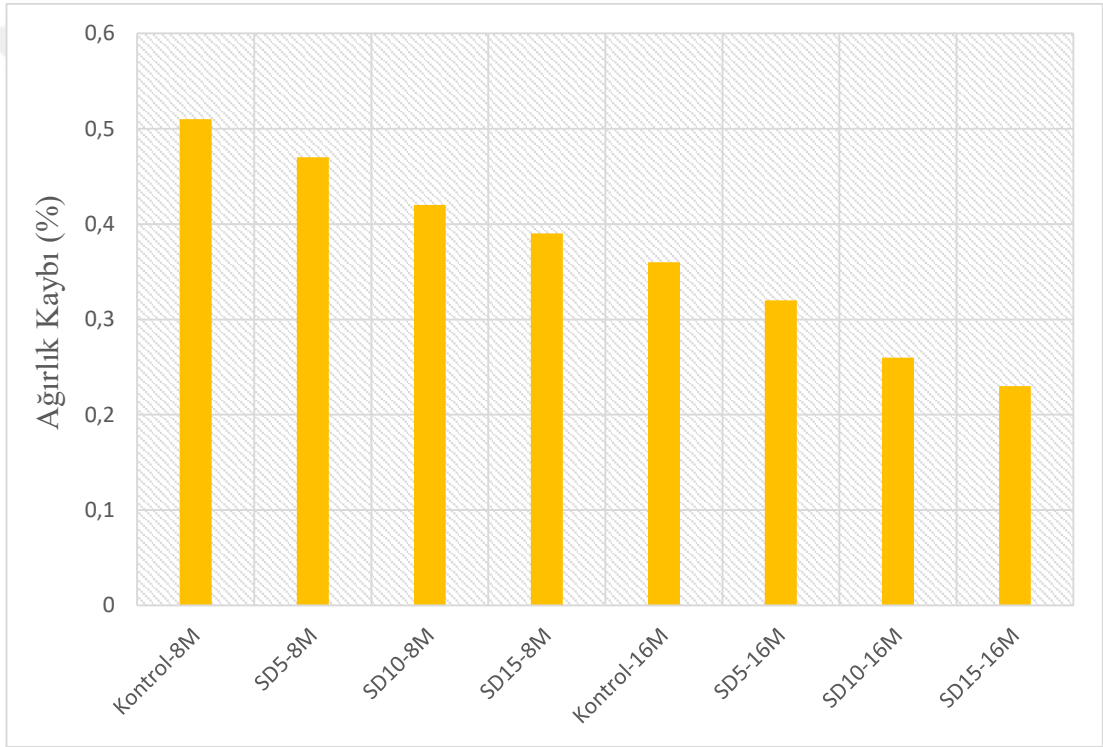
**Şekil 3.9** Donma çözülme testi sonrası kalan eğilme dayanımı sonuçları



**Şekil 3.10** Donma çözülme testi sonrası kalan UGH sonuçları

100 döngü donma-çözülme saldırılarından sonra, en düşük basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve UGH değerleri sırasıyla yaklaşık 40 MPa, 6 MPa ve 3000 m/s

olmuştur. Bu değerlerin artan silis dumanı içeriği ve molaritesi ile arttığı bulunmuştur. Bu durum, matris ve agregalar arasında daha fazla aderansa ve gelişmiş gözenek yapısına bağlanabilir. Geçirgenlik sadece gözenekliliğe değil, gözeneklerin süreklilik derecesine ve boyutlarına da bağlıdır. Ayrıca hem silis dumanı ilavesi hem de yüksek molarite matrisin geçirimsiz olmasını sağlamış, gözenek yapısı arasında taşınmayı zorlaştırmıştır. Bu sayede, silis dumanı ikamesiz ve düşük NaOH molariteli numunelere göre dayanım ve UGH değerlerindeki azalma daha az olmuştur. Benzer bir sonuç, Şekil 3.11'de gösterildiği gibi 100 döngü donma-çözülmeden sonraki ağırlık kaybı sonuçlarında da gözlenmiştir.



**Şekil 3.11** Donma çözülme testi sonrası ağırlık kayıpları

### 3.7 Yayılma Tablası ve Priz Süresi Deney Sonuçları

Çizelge 3.10, geopolimer karışımlarının taze durum test sonuçlarını göstermektedir. Sonuçlar, akışkanlığın molarite ile arttığını ortaya koymuştur. 16M geopolimer karışımları, 8M geopolimer karışımlarından daha iyi akışkanlık sergilemiştir. Akışkanlık, kontrol karışımları için 13.60 cm'den 14.13 cm'ye, %5 silis dumanı içeren karışımlar için 14.76 cm'den 15.23 cm'ye, %10 silis dumanı için 15.25 cm'den 16.58 cm'ye, %15 silis dumanı için 13.64 cm'den 15.26 cm'ye yükselmiştir.

Ayrıca, %10 silis dumanı ikamesine kadar akıcılık artışı gözlemlenmiş, daha sonra diğer (%15) silis dumanı ikamesi için akıcılık azalmaya başlamıştır. Geopolimer karışımların akışkanlığı için optimum silis dumanı içeriği %10 olarak bulunmuştur. Ayrıca geopolimer karışımlarının priz başlama ve bitiş süreleri belirlenmiş ve sonuçlar artan molarite ile hem priz başlama süresinin hem de priz bitiş süresinin azaldığını ortaya koymuştur. Ayrıca, geopolimer karışımlarının priz başlama ve bitiş süresi, artan silis dumanı ilavesi ile azalmış, böylece %15 silis dumanı içeren karışımlar en düşük priz başlama ve bitiş süresine sahip olmuştur. Bu durum, karışımların hızlı sertleşmesiyle sonuçlanan C-N-A-S-H tipi jel oluşumunda gelişmeye katkıda bulunan daha fazla silika içeriğine bağlanabilir.

**Çizelge 3.10** Yayılma tablası ve priz süresi testleri sonuçları

<b>Materials</b>	<b>Kontrol -8M</b>	<b>Kontrol- 16M</b>	<b>SD5- 8M</b>	<b>SD5- 16M</b>	<b>SD10- 8M</b>	<b>SD10- 16M</b>	<b>SD15- 8M</b>	<b>SD15- 16M</b>
Yayılma-D1 (cm)	13.50	14.00	14.70	15.00	15.00	16.50	13.50	15.15
Yayılma -D2 (cm)	13.70	14.15	14.90	15.40	15.30	16.55	13.65	15.25
Yayılma -D3 (cm)	13.45	14.20	14.65	15.35	15.45	16.65	13.95	15.30
Yayılma -D4 (cm)	13.75	14.15	14.80	15.15	15.25	16.60	13.45	15.35
ORTALAMA (cm)	13.60	14.13	14.76	15.23	15.25	16.58	13.64	15.26
Priz başlama süresi (dakika)	30	28	26	22	20	19	15	13
Priz bitiş süresi (dakika)	75	70	66	63	54	51	50	47

## SONUÇLAR

Bu çalışma, silis dumanı içeriğinin (%0, 5, 10 ve %15) ve farklı NaOH molaritelerinin (8M ve 16M), oda koşullarında kürlenmiş geopolimer harç numunelerinin farklı yüksek sıcaklıklar ve donma-çözülme koşulları altında kalan dayanım ve dayanıklılık performansı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1- NaOH molaritesindeki artışla akışkanlık artmıştır. Ayrıca, akışkanlık, %10 ikame oranlarına kadar silis dumanı ile artmış, fakat %15'lik silis dumanı ikamesinde bir azalma gözlemlenmiştir. Geopolimer karışımların akışkanlığı için optimum silis dumanı içeriği %10 olarak bulunmuştur.

2- Hem daha yüksek NaOH molaritesi hem de silis dumanı içeriği ile karışımların ilk ve son priz süresi azalmıştır. Ayrıca, NaOH molaritesindeki ve silis dumanı içeriğindeki artışla boşluk oranı ve su emme azalmıştır. 16M NaOH molaritesine ve %15 silis dumanına sahip numuneler, kompakt ve yoğun mikro yapı nedeniyle en düşük priz başlama ve bitiş süresi, boşluk oranı ve su emme oranına sahip olmuştur.

3- Basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve ultrases geçiş hızı değerleri, silis dumanı ilaveleri ve artan molarite ile iyileştirilmiştir. Sürekli alkali aktivasyon reaksiyonları nedeniyle, oda koşullarında kürlenmiş numunelerin mekanik özelliklerinde artışlarının zamanla daha fazla olduğu bulunmuştur.

4-300°C'de, numunelerin basınç dayanımları biraz iyileşmiştir (~%5), bu da sürekli alkali aktivasyon reaksiyonlarına atfedilebilir, gözenekleri CASH ve CSH oluşumu ile doldurarak daha yüksek basınç dayanımı sağlar. Öte yandan, eğilme dayanımları 300°C'de önemli ölçüde azalmıştır (~%50 azalma). Bunun nedeni, eğilme dayanımlarının iç mikroyapısal kusur gelişimine, çatlak oluşumuna ve yayılmasına ve gözenekli mikro yapının büyümesine karşı daha duyarlı olmasıdır. 300°C'de biraz daha düşük UGH değerleri elde edilmiş ve bu durum mikroyapısal çatlak oluşumlarını ve gözenekli mikroyapıyı kanıtlamıştır.

5- Geopolimer matrisinin serbest su buharlaşması ve dehidrasyonu ve termal reaksiyon mekanizmaları nedeniyle, 600 ve 900 °C'den sonra geopolimer numunelerin eğilme ve basınç dayanımları önemli ölçüde azalmıştır. Kayıplar, 600°C'de basınç

dayanımı için yaklaşık %50 ve eğilme dayanımı için yaklaşık %70 iken, 900°C'de hem basınç dayanımı hem de eğilme dayanımı için %85-90 olmuştur.

6- Yüksek sıcaklıklarda, farklı silis dumanı ikameleri ve NaOH molaritesiyle 300, 600 ve 900 °C'de benzer basınç dayanımı kayıpları elde edilmiştir, bu da yüksek sıcaklıklarda bulunan silis dumanının ve yüksek NaOH molaritesinin olumlu bir etkisinin olmadığını gösterir. Öte yandan, daha yüksek silis dumanı ikameleri ve NaOH molaritesi ile tüm sıcaklıklarda kalan eğilme dayanımlarının daha fazla olduğu bulunmuştur, bu da gelişmiş arayüzey geçiş bölgesine atfedilebilir ve ilk çatlak oluşumunu geciktirir.

7- Basınç dayanımı sonuçlarına benzer şekilde, 300, 600 ve 900 °C'de çeşitli silis dumanı ikameleri ve NaOH molaritesi ile hemen hemen benzer UGH kayıpları elde edilmiştir, bu durum da silis dumanı ve yüksek NaOH molaritesinin UGH sonuçları üzerinde olumlu etkisinin olmamasına veya ihmal edilebilir olmasına atıfta bulunmaktadır. Bu arada, hem silis dumanı oranı hem de NaOH molaritesindeki artışla birlikte yüksek sıcaklıktan kaynaklanan ağırlık kayıpları azalmıştır.

- 100 döngü donma-çözülme saldırılarından sonra, güçlendirilmiş gözenek mikroyapısı nedeniyle silis dumanı ilavesi ve NaOH molaritesindeki artışla dayanım, UGH ve ağırlık kaybındaki azalma azalmıştır. 16M NaOH molaritesine ve %15 silis dumanı içeren numuneler, donma-çözülme saldırısına karşı en iyi direnci sergilemiştir.

## KAYNAKÇA

- Akçaözöglü, K. (2007). *Silis Dumanı İçeren Yüksek Dayanımlı Harçlarda Numune Boy Değişiminin Basınç Dayanımı ve Birim Kısalma Üzerindeki Etkisi*, (Yayımlanmış Doktora Tezi), Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Al-Akhras, N. M., Al-Akhras, K. M., & Attom, M. F. (2008). *Thermal cycling of wheat straw ash concrete*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials, 161(1), 9-15.
- Allahverdi, A., Abadi, M. M. B. R., Hossain, K. M. A., & Lachemi, M. (2014). *Resistance of chemically-activated high phosphorous slag content cement against freeze-thaw cycles*. Cold regions science and technology, 103, 107-114.
- Al-Tayyib, A. J., Baluch, M. H., Sharif, A. F. M., & Mahamud, M. M. (1989). *The effect of thermal cycling on the durability of concrete made from local materials in the Arabian Gulf countries*. Cement and Concrete Research, 19(1), 131-142.
- Altındal, İ.(2020). *Değişik Geopolimer Beton Numunelerin Farklı Kür Koşulları Altında Basınç Dayanımının Değişimi*. (Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi), Gelişim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Antonakakis, N., Chatziantoniou, I., ve Filis, G. (2017). *Energy consumption, CO2 emissions, and economic growth: An ethical dilemma*.Renewable and Sustainable Energy Reviews, Webster Vienna Private University, Department of Business and Management, Praterstrasse, Austria.
- ASTM C 1437-07. (2009). *American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar*. Annual Book of ASTM Standards, 6-7.
- ASTM C348, in: *Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic- Cement Mortars ASTM C348, Annual Book of ASTM Standards*, 1998, pp. 2-7.
- ASTM, *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens) 1*. Chemical Analysis, (C109/C109M-11b) (2010) 1-9.
- Aygörmez, Y. (2018). *Fiber Katkılı Sürdürülebilir Metakoalin Tabanlı Geopolimer Harcın Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi*, (Yayımlanmış Doktora Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Bakırdöven, A. (2021). *Endüstriyel Atıkların Geopolimerler Eldesinde Kullanılabilirliği ve Karakterizasyonu*, (Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi), İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Malatya.

- Barbosa, V.F.F. ve Mackenzie, K.J.D., (2003). “*Thermal behaviour of inorganic geopolymers and composites derived from sodium polysialate*“, Mater. Res. Bull., 38: 319–331.
- Basheer, L., Kropp, J., & Cleland, D. J. (2001). *Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review*, Construction and building materials, 15(2-3), 93-103.
- Çelik, Ö. (2004). *Uçucu kül, silis dumanı ve atık çamur katkılarının çimento dayanımlarına etkileri*. Beton 2004 Hazır Beton Kongresi, 455-462, İstanbul.
- Davidovits, J. (2002). *Years of successes and failures in geopolymer applications. Market trends and potential breakthroughs*. Australia: Geopolymer Institute.
- Davidovits, J. (2008). *Geopolymers Chemistry and Applications*, 3rd edition, Institut Geopolymere, St. Quinten, 392-398.
- Demirboğa, R. & Gül, R. (2003). *The effects of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete*. Cement and Concrete Research, 33(5), 723-727.
- Dinçer, A. (2013). *Pomza, Silis Dumanı, Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Betonların Durabilite Özellikleri*. (Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi), Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- Dorum, A., Koçak, Y., Yılmaz, B., Uçar, A. (2020). “*Pirinç Kabuğu Külü İkameli Çimentoların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması*“. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, (7)
- Ghutke, V.S., Bhandari, P.S. (2014). “*Influence of silica fume on concrete*“, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, (IOSR-JMCEPP), 44-47.
- Görhan, G. (2020). *Geopolimer Harç Özelliklerine Metakaolin Kalsinasyon Sıcaklığının Etkisi*, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, Afyon.
- Görür, E.B. (2007). *Yüksek Fırın Cürufu ve Bazaltik Pomza Katkılı Betonların Durabilite Özellikleri*. (Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi), Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- Güner, M.S. (1999). *Malzeme Bilimi–Yapı Malzemesi ve Beton Teknolojisi*, Aktif Yayınevi, İstanbul.
- Güneşli U. (2008). “*Uçucu Kül, Silis Dumanı ve Yüksek Fırın Cürufunun Beton ve Çimento Katkısı Olarak Kullanımı Üzerine Bir Kaynak Taraması*“. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana.

- İlter, E.(2007). *CEM I 42.5 Çimentolu Yüksek Dozajlı Betonlarda Silis Dumanının Etkinliği*, (Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Kadhim, S., Çevik, A., Niş, A., Bakbak, D., & Aljanabi, M. (2022). *Mechanical behavior of fiber reinforced slag-based geopolymer mortars incorporating artificial lightweight aggregate exposed to elevated temperatures*. *Construction and Building Materials*, 315, 125766.
- Kalaycıklı, İ. (2020). *Farklı Geopolimer Betonların Dayanımlarının Zamanla Değişimi ve Durabilitesi*. (Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi), Gelişim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Kaya, M. (2020). *Yüksek ve Düşük Kalsiyum İçeren Uçucu Küller ile Üretilen Geopolimer Harçların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Türk Doğa ve Fen Dergisi*.
- Keklik, U. (2020). *Silis Dumanı İçeren Geopolimer Betonların % 5 Sülfürik Asit Etkisinde Durabilite Performanslarının İncelenmesi*, (Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Gelişim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Kong, D. L., Sanjayan, J. G., & Sagoe-Crentsil, K. (2007). *Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures*. *Cement and concrete research*, 37(12), 1583-1589.
- Maraş, M. (2013). *Elazığ Ferrokrom Cürufundan Üretilen geopolimer çimentolu Betonların Sülfat Değerlerinin Araştırılması*. (Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi), İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- Maslehuddin, M., Sharif, A. M., Shameem, M., Ibrahim, M., & Barry, M. S. (2003). *Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes*. *Construction and building materials*, 17(2), 105-112.
- Muller, A. C. A., Scrivener, K. L., Skibsted, J., Gajewicz, A. M., & McDonald, P. J. (2015). *Influence of silica fume on the microstructure of cement pastes: New insights from 1H NMR relaxometry*. *Cement and Concrete Research*, 74, 116-125.
- Niş, A., & Altındal, İ. (2021). *Compressive Strength Performance of Alkali Activated Concretes under Different Curing Conditions*. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 65(2), 556-565.
- Oğuz, M. (2019). *Geri Dönüştürülmüş Betonların Köpük Betonda Kullanabilirliğinin Araştırılması*, (Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi), Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Bartın.



- Özbebek, İ.H. (1993). *Yüksek Dayanımlı Beton Üretiminde Kullanılan Katkı Maddelerinin Betona Etkisi*. (Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi), Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Özdemir, E. (2006). *PÇ ve Mineral Katkı Maddelerinin İkili, Üçlü ve Dörtlü Kombinasyonlarını İçeren Harç Numunelerinin Bazı Özelliklerinin İncelenmesi*. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana.
- Özturan, T. (1993). *Uluslararası IV. Betonda Uçucu Kül, Silis Dumanı, Curuf ve Doğal Puzolanların Kullanımı Konferansının Değerlendirilmesi*. Endüstriyel Katı Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu Bildiriler Kitabı, s.57-78.
- Pilehvar, S., Szcotok, A. M., Rodríguez, J. F., Valentini, L., Lanzón, M., Pamies, R., & Kjøniksen, A. L. (2019). *Effect of freeze-thaw cycles on the mechanical behavior of geopolymer concrete and Portland cement concrete containing micro-encapsulated phase change materials*. Construction and Building Materials, 200, 94-103.
- Poyraz, Ü. (2016). *Türkiye İnşaat Yıkıntı Atık Yönetim Sisteminin Geliştirilmesi*. (Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi), Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Purdon, A. (1940). *The action of alkalis on blast furnace slag*. Journal of the Society of Chemical Industry. 59, 191–202.
- Rashad, A. M., & Zeedan, S. R. (2012). *A preliminary study of blended pastes of cement and quartz powder under the effect of elevated temperature*. Construction and building materials, 29, 672-681.
- Savaş, Ö. (2002). *Atık Betonların Geri Kazanımı*. (Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi), Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Selim, F. A., Amin, M. S., Ramadan, M., & Hazem, M. M. (2020). *Effect of elevated temperature and cooling regimes on the compressive strength, microstructure and radiation attenuation of fly ash–cement composites modified with miscellaneous nanoparticles*. Construction and Building Materials, 258, 119648.
- Siddique, R. (2011). *Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties*. Resources, Conservation and Recycling, 55(11), 923-932.
- TS 10088 EN 9323 (1997). *Agregaların genel özellikleri için deneyler- kısım 3: Basıtleştirilmiş petrografik tanımlama için işlem ve terminoloji*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- TS EN 1015-11 (2000). *“Kağır Harcı Deney Metodları-Bölüm 11: Sertleşmiş Harcın Basınç ve Eğilme Dayanımının Tayini”*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

- TS EN 450-1 (2005). *Uçucu Kül-Betonda Kullanım İçin, Tarifler, Özellikler ve Uygunluk Kriteri*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 35s
- TS EN 934-2 (2002). *Kimyasal Katkılar- Beton, Harç ve Şerbet İçin Beton Katkıları-Tarifler ve Özellikler, Uygunluk, İşaretleme ve Etiketleme*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Tuyan, M. (2017). *Doğal ve atık malzemelerle geopolimer harç ve beton geliştirilmesi*. (Yayımlanmış Doktora Tezi), Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Wang, K. T., He, Y., Song, X. L., & Cui, X. M. (2015). *Effects of the metakaolin-based geopolimer on high-temperature performances of geopolimer/PVC composite materials*. Applied Clay Science, 114, 586-592.
- Yalçın, H., Gürü, M. (2006). *“Çimento ve beton”*, Ankara: Palme Yayıncılık.
- Yazıcı, Ş. (1996). *The Mechanical Properties and Durability of High Strength Concrete with Silica Fume and Fly Ash*. (Yayımlanmış Doktora Tezi), Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Yeğinobalı, A. (1993). *Silis Dumanının Betonda Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi*. Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu Bildirileri, Ankara, s.149-167
- Yeğinobalı, A. (2003). *“Çimentoda yeni standartlar ve mineral katkıları”*, İstanbul: Türkiye Mühendislik Haberleri.
- Yıldız, K. (2008). *The Performance of Silica Fume Admixed Concrete Under the Effect of Ammonium Sulfate*. E-Journal of New World Sciences Academy, Volume: 3, Number: 2.
- Yılmaz, İ. (2018). *Uçucu Kül, Yüksek Fırın Cürufu ve Zeolit Katkılı Kendiliğinden Yerleşen Betonların İşlenebilirlik ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*. (Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi), Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Yılmaz, Y. (2014). *Beton Üretiminde Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Kullanılmasının Etkileri ve Maliyet Analizi*. (Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi), Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.
- Zhang, H. Y., Kodur, V., Wu, B., Cao, L., & Qi, S. L. (2016). *Comparative thermal and mechanical performance of geopolymers derived from metakaolin and fly ash*. Journal of Materials in Civil Engineering, 28(2), 04015092.
- Zhang, Y. J., Li, S., & Wang, Y. C. (2012). *Microstructural and strength evolutions of geopolimer composite reinforced by resin exposed to elevated temperature*. Journal of Non-Crystalline Solids, 358(3), 620-624.

## TEŐEKKÖR

Bu alıŐma “Atık Malzemelerle Üretilen Farklı Geopolimer Harç Numunelerinin Yüksek Sıcaklık Etkisi Altında Durabilite Performansının İncelenmesi” isimli proje kapsamında Bilimsel Araştırma Projeleri Uygulama ve Araştırma Merkezi, Gelişim Üniversitesi tarafından desteklenmiŐtir (Proje No: HD-190220-AN).



## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

ADI-SOYADI BUKET OSMANÇELEBİOĞLU

YABANCI DİL İNGİLİZCE

### ÖĞRENİM DURUMU

2020-2022 İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS

2016 İSTANBUL AREL ÜNİVERSİTESİ İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

2011 İSTANBUL YAHYA KEMAL ANADOLU LİSESİ

### İŞ TECRÜBESİ

2018-2019 ÖZKANCA İNŞAAT MÜHENDİS/ŞANTIYE ŞEFİ

2022 SİVİL HAVACILIK GENEL MÜDÜRLÜĞÜ HAVAALANLARI DAİRE  
BAŞKANLIĞI/HAVAALANI FİZİKSEL ÖZELLİKLER DENETÇİSİ

