



T.C.

**RECEP TAYYIP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**SODYUM HİDROKSİT İLE AKTİVE EDİLMİŞ OBSİDYEN,
ATIK CAM VE UÇUCU KÜL İÇEREN HARÇLARIN MEKANİK
VE MİKROYAPI ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

(Yüksek Lisans Tezi)

Talip ÇAKMAK

Danışman

Doç. Dr. İlker USTABAŞ

RİZE

2022

KABUL VE ONAY

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında, Doç. Dr. İlker USTABAŞ danışmanlığında, Talip ÇAKMAK tarafından hazırlanan *Sodyum Hidroksit İle Aktive Edilmiş Obsidyen, Atık Cam Ve Uçucu Kül İçeren Harçların Mekanik Ve Mikroyapı Özelliklerinin İncelenmesi* adlı bu tez çalışması, 20.06.2022 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği/oy çokluğu ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvanı, Adı Soyadı

İmza

Başkan

: Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU

Üye

: Doç. Dr. İlker USTABAŞ

Üye

: Doç. Dr. Erol YILMAZ

ETİK BEYAN

İnşaat Mühendisliği Programından mezun olmak üzere teslim ettiğim “Sodyum Hidroksit İle Aktive Edilmiş Obsidyen, Atık Cam Ve Uçucu Kül İçeren Harçların Mekanik Ve Mikroyapı Özelliklerinin İncelenmesi” adlı tezim, bilim ve araştırma etiği prensiplerine riayet edilerek tarafımdan yazılmıştır.

Tez çalışmamda, başka kaynaklardan aktarılan bütün bilgi ve alıntılar, Enstitünüz Tez Yazım Kılavuzuna uygun olarak açıkça gösterilmiştir. Kaynağı gösterilenler dışında kalan bütün bilgiler uygun araştırma yöntemi kullanılarak tarafımdan edinilmiş ve esere bu şekilde yansıtılmıştır. Şahsıma ait olmayan hiçbir bilgi, kasıt veya kusurlar, şahsıma aitmiş gibi gösterilmemiştir. İnternet kaynakları dâhil, sahibine/kaynağına atıf yapılmaksızın hiçbir bilgi kullanılmamıştır. Aksinin ortaya çıkması halinde doğacak bütün hukuki, idari, akademik ve etik sorumluluk tarafıma ait olacaktır. Eserin tesliminden sonra herhangi bir zamanda, bilim etiğine aykırılık tespit edilmesi ve / veya eserimle ilgili intihal veya intihal şeklinde anlaşılacak bir durumun ortaya çıkması halinde; Üniversiteniz ve eğitim kadronuzun hiçbir şekilde sorumlu tutulmayacağını hür irademle kabul, beyan ve taahhüt ederim.

20 /06/2022

Talip ÇAKMAK

ÖNSÖZ

Değerli fikirleri ile bana yön gösteren, destek ve emekleriyle çalışmalarına ışık tutan öğrencisi olmaktan daima gurur duyacağım Sayın hocam Doç. Dr. İlker USTABAŞ'a saygı ve teşekkürlerimi sunmaktan mutluluk duyarım.

Tez çalışmamın her aşamasında bana yardımcı olan Arş. Gör. Zafer KURT'a teşekkür ederim.

Destekleriyle beni onurlandıran, haklarını asla ödeyemeyeceğim annem İnci ve babam Necati ÇAKMAK'a, hayatımın her dönemini sevgisiyle çiçeklendiren sevgili eşim Gül ÇAKMAK olmak üzere tüm aileme teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasına maddi destek veren Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne (BAP Proje No: FYL-2021-1300) teşekkür ederim.

Talip ÇAKMAK

2022 / Rize

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	I
ETİK BEYAN.....	II
ÖNSÖZ.....	III
İÇİNDEKİLER	IV
TÜRKÇE ÖZET.....	VI
ABSTRACT.....	VII
KISALTMALAR	VIII
TABLolar LİSTESİ	IX
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	X
GİRİŞ.....	1
1. GENEL BİLGİLER.....	4
1.1. Geopolimerlerin Ortaya Çıkışı.....	4
1.2. Geopolimer Hakkında Genel Bilgiler	5
1.3. Geopolimer Kimyası	7
1.4. Geopolimer Beton.....	10
1.5. Geopolimerde Kullanılan Bağlayıcılar	12
1.6. Literatür Özeti.....	15
2. YAPILAN ÇALIŞMA VE KULLANILAN MALZEMELER	22
2.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	22
2.1.1. Malzemeler.....	23
2.1.1.1. Obsidyen (OB)	23
2.1.1.2. Atık Cam (AC).....	26
2.1.1.3. Uçucu Kül (UC)	27

2.1.1.4. Standart Kum	28
2.1.1.5. Sodyum Hidroksit (NaOH).....	28
2.2. Geopolimerde Kullanılan Malzeme Miktarları ve Geopolimerin Üretimi.....	29
2.3. Deneyler	33
2.3.1. Eğilme Dayanımı Deneyi.....	33
2.3.2. Basınç Dayanımı Deneyi	33
2.3.3. Mikro Yapısal Analizler	34
2.4. Bulgular	34
2.4.1. Harç Numunelerin Basınç Dayanımları.....	34
2.4.2. Harç Numunelerin Eğilme Dayanımları	37
2.4.3. Harç Numunelerdeki Mikroyapı Analizleri	39
2.4.3.1. XRD Analizleri	39
2.4.3.2. SEM-EDS Analizleri	40
3. TARTIŞMA VE SONUÇLAR	45
3.1 Tartışma.....	45
3.2 Sonuçlar.....	57
KAYNAKÇA.....	58

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ana Bilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Tez Türü : Yüksek Lisans

Danışman : Doç. Dr. İlker USTABAŞ

Hazırlayan : Talip ÇAKMAK

Yıl : 2022

Sayfa Sayısı : 75

TÜRKÇE ÖZET

**SODYUM HİDROKSİT İLE AKTİVE EDİLMİŞ OBSİDYEN, ATIK CAM VE
UÇUCU KÜL İÇEREN HARÇLARIN MEKANİK VE MİKROYAPI
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Dünyada su tüketiminden sonra en çok kullanılan malzeme betondur. Betonun inşaat sektöründen bu derece fazla kullanılması betonun ekonomik oluşundan ve sahip olduğu dayanım ve dayanıklılık gibi özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Ancak betonun ham maddesi olan çimentonun betona sağladığı katkıların yanında üretimi ve kullanılması sırasında ortaya çıkan CO₂ salınımı nedeniyle çevreye zarar verdiği gözlemlenmektedir. Dünya genelinde çimento üretimi ve kullanımından dolayı gerçekleşen salınım tüm salınımın %7-9'luk kısmını oluşturmaktadır. Bu gibi faktörler göz önüne alınarak sürdürülebilir teknolojiler düşünüldüğünde çimentosuz beton teknolojileri bir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır. Sanayi ve inşaat atığı malzemelerin (uçucu kül ve atık cam vb.) depolama, çevre ve ekosisteme verdikleri zararlar da göz önüne alındığında bu malzemelerin sürdürülebilir teknolojilerde kullanılması, atıkların çevreye zararlarını önlemekte ve yeni malzemeler geliştirilmesini sağlamaktadır.

Bu çalışmada obsidyen, atık cam, uçucu kül ve bu üç malzemenin %75, %50 ve %25 oranlarında karışımları, sodyum hidroksit (NaOH) ile aktive edilerek harç numuneler üretilmiştir. Harçların üretiminde 12 molar (M) NaOH çözeltisi kullanılarak 13 farklı obsidyen, atık cam ve uçucu kül içeren harç numuneler hazırlanmıştır. Bu üretilen harç numuneler dört farklı gruba ayrılarak her bir grup 75 °C, 90 °C, 105 °C ve 120 °C sıcaklıklara sahip etüvlerde 72 saat bekletilmişlerdir. Elde edilen harç numuneler 7, 28 ve 90 gün sonunda eğilme ve basınç testine tabi tutulmuştur. Kullanılan bağlayıcı malzemelerin kimyasal analizleri, harç numunelerin taramalı elektron mikroskobu (SEM-EDS) görüntüleri üzerinden mikro yapısal incelemeleri yapılmıştır.

Bu çalışma sonucunda, obsidyen ve atık camın geopolimer üretiminde kullanılabileceği görülmüştür. Obsidyen, atık cam ve uçucu kül karışımlarının birbirlerinin eğilme ve basınç dayanımlarını etkilediği tespit edilmiştir. 90°C sıcaklığının en uygun geopolimer üretme sıcaklığı olduğu görülmüştür. Ayrıca yapılan farklı kombinasyonlarda ise kullanılan malzemelerin birbiri ile uyumlu çalışarak mekanik özelliklerin gelişmesine katkı sağladığı görülmüştür. SEM ve EDS analizlerinde en kompakt yapıya sahip numunelerde en yüksek dayanım değerleri tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler; Geopolimer, obsidyen, atık cam, uçucu kül, kür sıcaklığı

Recep Tayyip Erdogan University Institute of Graduate Studies

Department : Civil Engineering

Thesis Type : Master Thesis

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. İlker USTABAŞ

Author : Talip ÇAKMAK

Year : 2022

Pages : 75

ABSTRACT

INVESTIGATION OF MECHANICAL AND MICROSTRUCTURAL PROPERTIES OF MORTARS CONTAINING OBSIDIAN, WASTE GLASS AND FLY ASH ACTIVATED WITH SODIUM HYDROXIDE

Concrete is the most used material after water consumption in the world. The fact that concrete is used so much in the construction sector is due to the economic nature of concrete and its properties such as strength and durability. However, it is observed that cement, which is the raw material of concrete, causes harm to the environment due to the CO₂ emissions that occur during its production and use, as well as the additives it provides to the concrete. Worldwide, the emission due to cement production and use constitutes 7-9% of all emissions. Considering such factors and considering sustainable technologies, cementless concrete technologies emerge as an alternative. Considering the damages they cause to the storage, environment and ecosystem of industrial and construction waste materials (fly ash and waste glass, etc.), the use of these materials in sustainable technologies prevents the harm of wastes to the environment and enables the development of new materials.

In this study, mortar samples were produced by activating obsidian, waste glass, fly ash and 75%, 50% and 25% mixtures of these three materials with sodium hydroxide (NaOH). Mortar samples containing 13 different obsidian, waste glass and fly ash were prepared by using 12 molar (M) NaOH solution in the production of mortars. These produced mortar samples were divided into four different groups and each group was kept in ovens with temperatures of 75 °C, 90 °C, 105 °C and 120 °C for 72 hours. The obtained mortar samples were subjected to bending and compression tests at the end of 7, 28 and 90 days. Chemical analyzes of the binder materials used and microstructural examinations of the mortar samples were made on scanning electron microscope (SEM-EDS) images.

As a result of this study, it has been seen that obsidian and waste glass can be used in the production of geopolymer. It has been determined that the mixtures of obsidian, waste glass and fly ash affect the bending and compressive strengths of each other. It has been observed that 90 °C temperature is the most suitable geopolymer production temperature. In addition, it has been observed that the materials used in different combinations work in harmony with each other and contribute to the development of mechanical properties. In the SEM and EDS analyzes, the highest strength values were determined in the samples with the most compact structure.

Keywords ; Geopolymer, obsidian, glass waste, fly ash, curing temperature

KISALTMALAR

AC	: Atık Cam
ASTM	: American Society for Testing and Materials
CFA	: C Sınıfı Uçucu Kül
CO ₂	: Karbon Dioksit
EDS	: Enerji Dağılım Spektrometrisi
FFA	:F Sınıfı Uçucu Kül
ISO	: International Organization for Standardization
KOH	: Potasyum Hidroksit
LOI	: Kızdırma Kaybı
M	: Molarite
NaOH	: Sodyum Hidroksit
OB	: Obsidyen
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SH	: Sodyum Hidroksit
SS	: Sodyum Silikat
UC	: Uçucu Kül
XRD	: X-Işınları Difraktometresi
XRF	: X-Işını Floresans

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1. Si/Al oranlarına göre oluşan geopolimer malzemeler	8
Tablo 2. Geopolimer yapımından yaygın olarak kullanılan bazı bağlayıcı malzemeler ve kimyasal bileşimleri.....	12
Tablo 3. Geopolimer üretiminde kullanılan yaygın bağlayıcılar	15
Tablo 4. Geopolimer numunelerin bağlayıcı türüne göre isimlendirilmesi	23
Tablo 5. Obsidyenin kimyasal bileşimi (%).....	26
Tablo 6. Atık camın kimyasal bileşimi (%)	26
Tablo 7. Uçucu külün kimyasal bileşimi (%).....	27
Tablo 8. Alkali aktivatörün bazı kimyasal özellikleri	29
Tablo 9. Geopolimerde kullanılan malzeme miktarları (gram).....	30
Tablo 10. Harç numunelerin 7 günlük basınç dayanımı değerleri	35
Tablo 11. Harç numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değerleri	36
Tablo 12. Harç numunelerin 90 günlük basınç dayanımı değerleri	36
Tablo 13. Harç numunelerin 7 günlük eğilme dayanımı değerleri.....	37
Tablo 14. Harç numunelerin 28 günlük eğilme dayanımı değerleri.....	38
Tablo 15. Harç numunelerin 90 günlük eğilme dayanımı değerleri.....	38

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Geopolimer oluşumu şeması.....	9
Şekil 2. Geopolimer beton malzeme maliyetleri	11
Şekil 3. Normal Portland çimentolu beton malzeme maliyetleri.....	11
Şekil 4. Rize ili İkizdere ilçesi obsiyen kaynakları haritası.....	24
Şekil 5. a)-b) Obsidyen yataklarına ait görüntüler.....	24
Şekil 6. Obsidyenin öğütülmüş toz haline getirilmiş hali	25
Şekil 7. a)Bilyeli değirmen, b) Çeneli kırıcı.....	25
Şekil 8. a)Geri dönüşümden elde edilmiş atık cam, b)Öğütülmüş toz hali	26
Şekil 9. Uçucu kül.....	27
Şekil 10. Standart kum	28
Şekil 11. Sodyum Hidroksit a) Sodyum Payet b) Sodyum Çözeltisi.....	29
Şekil 12. Harç numunesinin mikserde karılması	31
Şekil 13. Harç numunelerin kalıbına yerleştirilmesi.....	31
Şekil 14. Üretimi tamamlanmış harç numunesi.....	32
Şekil 15. Etüvde bekletilen harç numuneleri.....	32
Şekil 16. Eğilme dayanımı ölçüm cihazı.....	33
Şekil 17. Basınç dayanımı ölçüm cihazı	34
Şekil 18. XRD analizi yapılan OB100AC0UC0 numunesine ait görüntü	39
Şekil 19. XRD analizi yapılan numunelere ait görüntüler	40
Şekil 20. SEM analizi yapılan numunelere ait x3000 kez büyütülmüş görüntüler....	41
Şekil 21. SEM analizi yapılan numunelere ait x2000 kez yaklaştırılmış görüntüler.	42
Şekil 22. SEM analizi yapılan numunelere ait x1000 kez yaklaştırılmış görüntüler.	43
Şekil 23. EDS Spektroskopileri	44
Şekil 24. %100 oranında obsidyen, atık cam ve uçucu kül kullanılan harç numunelerinin basınç dayanımları	46
Şekil 25. %75 oranında obsidyen, atık cam ve uçucu kül kullanılan harç numunelerinin basınç dayanımları.....	47
Şekil 26. %50 oranında obsidyen, atık cam ve uçucu kül kullanılan harç numunelerinin basınç dayanımları.....	48

Şekil 27. %25 oranında obsidyen, atık cam ve uçucu kül kullanılan harç numunelerinin basınç dayanımları.....	49
Şekil 28. 7 günlük basınç dayanımı değerleri.....	50
Şekil 29. 28 günlük basınç dayanımı değerleri.....	51
Şekil 30. 90 günlük basınç dayanımı değerleri.....	52
Şekil 31. 7, 28 ve 90 gün 75 °C ısıtma işlemine maruz kalmış numunelere ait basınç dayanımı değerleri.....	53
Şekil 32. 7, 28 ve 90 gün 90 °C ısıtma işlemine maruz kalmış numunelere ait basınç dayanımı değerleri.....	54
Şekil 33. 7, 28 ve 90 gün 105 °C ısıtma işlemine maruz kalmış numunelere ait basınç dayanımı değerleri.....	55
Şekil 34. 7, 28 ve 90 gün 120 °C ısıtma işlemine maruz kalmış numunelere ait basınç dayanımı değerleri.....	56

GİRİŞ

İnşaat endüstrisinde en çok kullanılan malzemelerin başında beton gelmektedir. Türkiye’de 2005 yılında beton üretimi 109 milyon ton iken bu sayı 2020’de bir önceki yıla göre %23 artış göstererek 223 milyon ton olmuştur (Türkiye Hazır Beton Birliği, 2021). 2005 yılında dünyada yıllık beton üretimi 6 milyar ton iken bir yılda kişi başına düşen beton miktarı 1 ton olmuştur (ISO, 2005). 2021 yılında dünya genelinde beton üretimi 32 milyar ton olup bu sayının her geçen gün giderek artacağı düşünülmektedir (ISO, 2021). Betonun bu denli yaygın kullanımı çimento üretimini de sürekli artırmaktadır. Çimentonun ana bağlayıcı ürünlerinden biri olan klinkerin üretimi sırasında atmosfere karbondioksit salınımı olmaktadır. Geleneksel Portland çimentosunun üretim aşamaları olan kireç taşının kirece dönüşüm sürecinde ve fosil yakıtların kalsinasyon için gerekli olan enerji sağlaması sırasında karbondioksit salınımı meydana gelmektedir (Lee, Jang ve Lee, October 2014). Bir ton klinker üretilmesi için kalsinasyon sürecinde 0,54 ton ve bu süreçte gerekli enerjiyi sağlaması için kullanılan fosil yakıtlardan ise 0,46 ton karbondioksit salınımı meydana gelmektedir. Bu yüzden Portland çimentosunun daha az kullanılması çevre için yararlı olacaktır (Gunasekara, Law, Setunge ve Sanjayan, October 2015).

Endüstriyel gelişmelerdeki büyümeden dolayı çimento üretim endüstrisi yıllık olarak 1,35 milyar ton karbondioksit salınımına neden olmaktadır ve bu sayı küresel çaptaki karbondioksit salınımının yüzde %7 sini oluşturmaktadır (Meesala, Verma ve Kumar, 2019). 2020 yılında dünya çimento üretimi yaklaşık % 5 büyüme ile 5,20 milyar ton olarak gerçekleşirken 2025 yılında bu sayının 6 milyar ton olacağı düşünülmektedir (Duve, 2015). Bu durum çimentodan kaynaklanan atmosfere karbondioksit salınımının artacağını göstermektedir.

Termik santrallerde fazla miktarda uçucu kül açığa çıkmakta ve bu malzemenin bir kısmı çimento ve beton sektöründe geri dönüşümü gerçekleştirilmektedir. Uçucu külün çimento ve beton endüstrisinde kullanımının artırılması durumunda da yeterli miktarda termik santral atığı uçucu kül bulunmaktadır. Termik santrallerden açığa çıkan uçucu külün bertaraf edilmesi için uçucu külün geopolimerde bağlayıcı olarak kullanılması uygun yöntemlerden biridir. Geopolimer yöntemiyle beton üretimi Portland çimentosu ile beton üretimi yerine kullanılması durumunda çimento

üretiminden kaynaklanan karbondioksit salınımını azaltacaktır. Küresel ısınma açısından düşünüldüğünde, alkali aktivatörlü malzemeler yani geopolimerler sadece Portland çimentosunun karbon ayak izini önemli derecede azaltmakta kalmayıp aynı zamanda Portland çimentosuna alternatif olacaklardır (Meesala, Verma ve Kumar, 2019). Ayrıca karbon salınımını ve karbon ayakizini azaltabilmek için alkali aktiviteli, kalsiyum karbonat, magnezyum oksit gibi bağlayıcı özellikleri olan alternatif çözümlere de ihtiyaç duyulmaktadır (Gartner ve Sui, December 2018). Alkali aktiviteli bağlayıcı malzemeler çimento üretiminden kaynaklanacak karbondioksit salınımını azaltarak çevreye sağlayacağı yarardan dolayı beton ve çimento sektöründe dikkatleri üzerine çekmektedir (Ma ve Ye, February 2015). Çimentodan kaynaklı karbondioksit salınımını azaltmak için çimento içerisindeki kalsine miktarını azaltmak, katkılı çimento üretmek gibi yöntemler kullanılmaktadır. Geopolimer betonu karbondioksit salınımına tüm bu yöntemlerden daha fazla katkı sağlayacak bir yöntemdir (Meesala, Verma ve Kumar, 2019).

Geopolimerler puzolanlara alkali aktivatör katılarak serbest kalan silislerin diğer ürünlerle güçlü bağlar kurarak oluşan bir yapı malzemesidir. Betonun tarihsel gelişimi göz önüne alındığı durumda kireç ve klasik Portland çimentosu bir ve ikinci nesil betonu oluştururken geopolimer üçüncü nesil beton olarak tanımlanabilmektedir (Meesala, Verma ve Kumar, 2019). Geopolimerizasyon yüksek alkali altında Al-Si minerallerinin üç boyutta bağ kurma tepkimeli ekzotermik bir süreçtir. İnorganik polimer malzeme olarak bilinen geopolimerler alkali aktiviteli malzemeler olarak bilinmektedirler. Geopolimerler doğal malzemelerden oluşabilecekleri gibi ana ham maddesi alkali ya da asit aktiviteli reaksiyonlarda sentezlenen atık malzemelerden de oluşabilirler. 1980'lerin ilk zamanlarından beri, geopolimerler düşük karbon salınımı ve performans avantajından dolayı klasik Portland çimentosunun yerine kullanılmaktadır (Meesala, Verma ve Kumar, 2019). Geopolimerler çevre dostu çimentomsu malzemeler olarak adlandırılmaktadır. Geopolimerler yüksek mekanik özelliklere sahip malzemelerdir. Geopolimerlerin yangın dayanımı ve korozyon direnci de yüksektir. Geopolimerlerde mineral katkılardan birçok atık malzemenin küllerine kadar bağlayıcı olarak çok geniş bir yelpazede atık kullanılabilmektedir. Bu atıkların geopolimer üretiminde kullanılmasıyla çevreye zarar vermesi de engellenmektedir (Zhang, Zhang ve Liu, 2020). Ayrıca kullanılacak olan atık

malzemeler sayesinde doğal kaynaklarında tüketiminin de azalacağı düşünülmektedir (Cong ve Cheng, 2021). Geopolimerlerde çoğu endüstriyel katı atıkların ve dip küllerinin kullanılması sayesinde bu malzemelerin depolama sorunları ve çevreye verebilecekleri kötü etkileri de bertaraf edilmektedir (Cong ve Cheng, 2021)

Obsidyen volkanik cam olarak bilinen doğal bir malzemedir. Camsı bir yapıya sahip obsidyene volkanik bölgelerde rastlanmaktadır ve endüstriyel olarak kullanımı olan bir malzeme değildir. Çimentoda pozolan olarak kullanılabilirliği ile ilgili araştırmalar vardır (Ustabas ve Kaya, 2012).

Cam tamamıyla doğadan elde edilen ve yüzde yüz geri dönüştürülen bir malzemedir. Betonda cam kullanmanın olumlu ve olumsuz özellikler getirdiği görülmüş ve bu konuda araştırmalar yapılmıştır (Özgüden, 2019). Atık camların betonda kullanımını içinde birçok çalışma yapılmıştır.

Bu çalışmada obsidyen, atık cam ve uçucu külün geopolimer yapımında bağlayıcı olarak kullanılması araştırılmıştır. Bu çalışma ile obsidyenin ilk kez geopolimer yapımında kullanılmıştır. Atık camların geopolimer yapımında kullanılması ile ilgili yeni bir öneri geliştirilmiştir. Obsidyen ve atık camlı geopolimerlerin özellikleri geopolimer üretiminde yaygın olarak kullanılan uçucu kül ile kıyaslanmıştır. Obsidyen, atık cam ve uçucu kül karışımı geopolimerlerin mekanik ve mikro yapısal özellikleri araştırılmıştır.

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Geopolimerlerin Ortaya Çıkışı

20. yüzyılda Fransa şehirlerinde özellikle çelik ve ahşap malzemelerin kullanıldığı yapılarda meydana gelen yangınların artması sonucunda yangına dayanıklı yeni kaplama malzemelerinin keşfedilmesi gereği duyulmuştur. Yapılardaki pencere ve kapılarda kullanılan poli vinil klorür, ve yalıtımda kullanılan poliüretan gibi organik polimerlerin ana yapısında bulunan petrol türevi malzemelerin karbon içermesinden dolayı termoplastikler yanıcı özellik göstermektedir (Görür, 2015). Yangına dayanıklı malzemeler için mineral kökenli malzemelerle çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalardan yola çıkarak silika moleküllerinin zincir bağlardan oluşmuş silokson veya silikat moleküllerinin alüminat molekülleri ile oksijen atomu elektronlarını paylaşması ile elde edilen polisialatların keşfi ile geopolimerlerin kimyasının temelleri oluşmuştur (Davidovits, 2008).

Silisyum (Si) ve karbon (C) elementleri göstermiş oldukları atom özellikleri ile ametal malzemelerdir. Silisyum elementi aynı zamanda metaloit özelliği göstermektedir. Metaloidler kimyasal olarak ametal gibi davranması yanı sıra sahip oldukları yarı iletkenlik özellikleriyle metal gibi de davranmaktadırlar (Davidovits, 2008). Metaloid olan silisyumun iyonlaşma enerjisi de karbon elementine göre daha düşüktür. Silisyum 4 elektron vererek kararlı yapıya ulaşmak isteyen bir katyondur. Silisyumun oksijen ve diğer elementlerle kurdukları yapılar kararlı davranmaktadır. Kararlı davranması daha sıkı kristalize ve yanıcılığı daha az olan bir malzeme yapısına sebep olmaktadır. Silikat (SiO_3) molekülleri ile oluşan piroksen vollastonit kristalleri birer kayaç olarak karşımıza çıkmakta aynı zamanda yapay olarak üretmesi zor olan doğadaki kuvarz SiO_4 bileşiği ise en sert taş olarak bilinmektedir. Ancak başka açıdan bakılırsa başka elementlerin ve bileşikler silikatlarla kovalent bağlı polimer oluşturmasıyla üç boyutlu yarı kristal amorf yapıya sahip yanma ve basınç dayanımları yüksek olan malzemeler elde edilebilmektedir.

Kilin içerisinde bulunan oksit mineraller seramiklerin yapımında önem arz etmektedirler. Pirofilit, kaolin, klorit, laterit, muskovit vb. gibi killi toprak türleri NaOH, KOH gibi alkali sodalarla tepkimeye girerek ısı etkisi altında katılaşmaktadırlar. Özellikle kaolin kili gibi içeriğinde yüksek orandaki Si ve Al

elementlerinin oksitli bileşikleri hacimsel tokluk ve bağlayıcılık sağlayıcı monomerleri oluşturabilmektedir. Elde edilen polimer malzemelerin ana bileşenleri silisyum içeren monomerler olmasından dolayı Davidovits tarafından “Siliface” olarak adlandırılmıştır (Brady ve Holum, 1996).

Bütün killi toprak çeşitleri NaOH, KOH vb. gibi alkali sodalarla tepkimeye girerek ısı etkisinde katılaşmadır (Zeybek, 2009). 1973-1976 yılları arasında reçine ile yapıştırılmış olan odun talaşlarının yüzey kısımlarına siliko-alüminat minerallerinin yapıştırılması sonucunda yapı malzemesi olarak kullanılan yanmaya karşı dirençli geopolimer suntaların üretimi sağlanmıştır (Çakmak, 2019). 1977-1978 yılları arasında 1460 °C olan erime noktasında kuvars bileşimindeki ve doğal kaolinit sentetik kordiyerit Al_3Mg_2 ile yer değiştirilmesi sağlanarak seramik geopolimer üretimi sağlanmış ve sahip olduğu termal genleşme düşüklüğü nedeniyle elektrik sigortalarından kullanılması amacıyla test edilmiştir (Çakmak, 2019). Ayrıca 1977-1982 yılları arasından yapılan çalışmalarda 125-250 °C’deki sodyum polisilat ya da potasyum polisilat geopolimerler 1000-1200 °C’de çok hızlı fırınlanarak daha yüksek kaliteye sahip seramiklerin üretimi sağlanmıştır (Çakmak, 2019).

İçeriğinden yüksek fırın cürufu, uçucu kül gibi bağlayıcı ve NaOH ve KOH gibi aktivatörlerin bulunduğu geopolimer betonlar sahip oldukları yüksek basınç dayanımı, yüksek erken dayanım ve durabilite özellikleri ile dikkat çekmektedir. Ticari bir firma tarafından 1984 yılında Amerika da bir havalimanında yapılan çalışmada geopolimerik çimento hamuru Portland çimentolu betonla karıştırılarak kullanılmış ve uçağın inebileceği kadar dayanım ve sertliğe 6 saatlik bir sürede ulaştığı görülmüştür. Kullanılan betonun 28 günlük dayanımı ise 80 MPa’dır (Brady ve Holum, 1996).

1.2. Geopolimer Hakkında Genel Bilgiler

Davidovits, içerisinde Al ve Si oksitli bileşiklerin bulunduğu alkali ortamlarda meydana gelen reaksiyonlarla oluşan jeolojik kayalardan etkilenecek geopolimer kelimesini ilk olarak kullanmıştır (Davidovits, 2008). Geopolimer malzemelerin plastiği andıran pürüzsüz ve parlak yüzeyleri geopolimere verilen polimer isimlendirmesinin uygunluğunu pekiştirmektedir. Geopolimer oluşum süreci bir füzyon sinterleme veya eritme işleminin aksine polimerleşme sürecidir. Geopolimerler özellikle Al-Si-Ca-Mg-K-P-Na vb. gibi mineral moleküllerini içeren monomerlerin

aralarında kurdukları polikondensasyon sonucunda oluşan kovalent kompleks zincir bağlı polimerle kurması sonucunda oluşmaktadır (Davidovits, 2008). Geopolimer malzemelerin en ideal özelliklerinin ortaya çıkması için 750 °C’de kalsine edilmiş metakaolin kilinin alkali silikatlar ve alkali tuz ile aktifleştirilmesi sonucunda elde edilen çözeltinin, düşük sıcaklıkta fırınlanmasıyla elde edilir (Davidovits, 2008). Geopolimerler görmüş oldukları ısıt işlemler sonucunda seramik yapıya dönüşürler (Görür, 2015). Geopolimerler, toz bağlayıcı malzemenin kimyasal aktivatörle tepkimeye girmesi sonucunda elde edilir. Toz bağlayıcılar genel itibariyle metakaolin, uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi alümino silikatlardır. Kimyasal aktivatörler için ise genellikle sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmaktadır. Ancak toz bağlayıcı olarak metal cürufları kullanılabildiği gibi, aktivatör yerine de farklı asit çözeltileri de kullanılabilmektedir (Erdoğan, 2014).

Geopolimerler hidrotermal polikondensasyon neticesinde içerisinde bulunan suyu hem fiziksel hem de kimyasal yollarla atarak zeolit kayaçlarının tanecik yapısına benzer bir yapıya ulaşan, ancak zeolit kristallerinden farklı olarak amorf şekilde üç boyutlu hekzagonal moleküler bağ yapıda bulunan alümino silikat toprak malzemelerdir (Keyte vd., 2006). Geopolimerler 80°C de sentezlenebilmektedirler ve yapısında su moleküllerinin bir bölümünü tutabilmektedir (Zeybek, 2009).

Geopolimerlerin dayanım ve elastik modülü özellikleri malzemenin içeriğindeki Si/Al oranına göre değişmektedir (Palomo vd.,1999). Geopolimerlerin dayanımları ideal aktivatör konsantrasyonundan önemli derecede etkilenmektedir. İdeal orandan fazlasında geopolimer malzemenin yapısında değişiklik meydana getirecek alkali aktifleştirilmiş matris içerisinde serbest halde bulunan OH⁻ iyonları mekanik özelliklerde kayıplara neden olabilmektedir. Konsantrasyonun yanı sıra geopolimer malzemelerin kür sıcaklığı ve yaşı da basınç dayanımı üzerinde etkili olabilmektedir (De Vargas vd., 2011). Özellikle geopolimerin sahip olduğu yüksek erken dayanım, sülfat ve asit direnci gibi durabilite özelliklerinden dolayı normal geleneksel Portland çimentosuna karşı alternatif bir ürün olma özelliği taşımaktadır. Geopolimerin üretim sürecinde bağlayıcı olarak yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı vb. gibi silis ve alümin kaynaklı ürünler kullanılsa da özellikle uçucu külün bağlayıcı olarak kullanıldığı geopolimerler genel itibariyle daha fazla dikkat çekmektedir. Geopolimerler sahip oldukları durabilite özelliklerinden dolayı asit

etkisine dirençli beton üretimine alternatif bir malzeme olabileceği düşünülmektedir (Thokchom vd., 2009).

Geopolimerler normal Portland çimentosu ile kıyaslandığı durumda düşük CO₂ salınımı, düşük üretim maliyeti ve enerji tüketimi gibi başlıca özellikleriyle öne çıkmaktadır. Rodaki amfi tiyatroların ve Mısır'daki piramitlerin yapımından kullanılan malzemelerin yapısı incelendiğinde sertleşmiş geopolimerik malzemelerin yapısına benzediği görülmüştür. Bu gibi örnekler düşünüldüğünde eski yapıların yapımından doğal malzemelerin kullanımından ziyade geopolimer malzeme esasına dayanan malzemelerin kullanıldığı görülmektedir (Li vd., 2004).

1.3. Geopolimer Kimyası

Geopolimerizasyon süreci genel olarak uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu vb. gibi silikat ve alüminat kaynaklı bağlayıcılar ile alkali tuz ve alkali silikatların düşük sıcaklıkta tepkimeye girmesi olarak tanımlanmaktadır. Katı hammadde içeriği, karışım oranları, uygulanan kür süresi ve sıcaklığına bağlı olarak üretilen geopolimerin fiziksel özelliklerinde farklılıklar görülmektedir (Zeybek, 2009). Geopolimerizasyon yüksek alkali ortamdaki moleküllerin çözünme, taşınma, yönelme ve polikondensasyon hareketlerini kapsayan ekzotermik bir süreçtir (Zeybek, 2009). Geopolimerler genel olarak fırınlanmış kil içerisinde bulunan silikatlar ve alüminatlarda bulunan oksijen atomunun elektronlarını beraber kullanarak kovalent bağlı bileşik oluşturması ile açıklanabilmektedir. Silikat minerali son derece kararlı bileşiklerdir. Alkali aktifleştiricilerin silikat monomerlerinin üç boyutlu ağ yapısında meydana gelen zayıflama sonucunda ilerleyen tepkime sürecinde geopolimerin ana bileşiği Si-O-Al yapısı oluşmaktadır (Zeybek, 2009). Geopolimerin kimyasal reaksiyonlarla oluşumunda bağlayıcılar ve aktifleştirici alkali silikatların toplam Si/Al oranı önemli rol oynar. Si/Al oranının 1'e eşit olduğu durumlarda zeolit kristaline benzeyen seramik, tuğla ve yangına karşı koruyucu özellik gösteren ürünler elde edilmektedir (Davidovits, 2008). Si/Al oranının 2'ye eşit olması durumunda seramik amorf arasından geopolimer çimento ve betonu üretilebilirken bu oranın biraz daha büyümesi sonucunda radyoaktif atıkların istiflenmesi için gerekli malzemeler üretilebilmektedir (Görür, 2015). Si/Al oranının 3 olduğu durumlarda fırın kaplamaları gibi yangından koruyucu kaplamalar elde edilmekte ve gelişmiş

teknolojilerde kullanılması amacıyla 1000°C kadar dayanabilen geopolimer ürünler üretilmektedir. Si/Al oranının 3'ün üzerine çıkması sonucunda dolgu malzemesi köpük ve benzeri ürünler elde edilir. Si/Al oranının 15'ten büyük olduğu durumlarda iki boyutlu moleküler ağ yapısında geopolimer harcı oluşmakta ve nano kompozit olarak bilinen yangın ve ısı dayanımı yüksek olan malzemeler oluşmaktadır (Davidovits, 2008). Tablo 1'de Si/Al oranına göre oluşan geopolimer malzemeler görülmektedir.

Tablo 1. Si/Al oranlarına göre oluşan geopolimer malzemeler

Si/Al oranı	Uygulamalar
1	Briketler Seramikler Ateşe karşı koruyucular
2	Düşük CO ₂ li çimento ve betonlar Radyoaktif ve toksik atık depo malzemesi
3	Ateşe karşı koruyucu fiber cam kompozitler Sıcaklığa dayanıklı kompozitler, 200-1000 °C
>3	Endüstri için matrisler
20--35	Ateşe ve sıcaklığa karşı dayanıklı fiber kompozitler

Geopolimerizasyon süreci alkali tuzların etkisiyle ekzotermik olarak gerçekleşmektedir. Su moleküllerinin dehidratasyonu geopolimerlerin polikondensasyonunda önemli rol oynamaktadır. Geopolimer malzeme üretiminde kullanılacak olan malzemelerin içeriği, incelik modülü vb, gibi faktörler oluşacak olan ürünün fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkilemektedir (Rangan vd., 2005). Seramik üretim sürecinde uygulanan fırınlama işlemi, boşluk suyunun ve karbonlu bileşenlerin ayrışmasını sağlamaktadır. Böylelikle malzeme kompozisyonu içerisinde bulunan mineral ve bileşiklerin enerji düzeyinin yükselmesi ile daha kolay iyonize olmalarını sağlamakta ve böylece üretilcek olan geopolimer malzemenin reolojik özellikleri iyileşmektedir (Görür, 2015). Geopolimerlerin 40 ile 100°C derece sıcaklıklar arasında işleme tabi tutulması durumunda polimerleşme süresi hızlandırılmaktadır. Böylece üretilcek olan geopolimer malzemenin istenilen özellikleri iyileşmektedir (Gümüş, 2016). Geopolimerler de 3 boyutlu oligomer makro moleküler yapıyı oluşturuncaya kadar reaksiyonlar devam eder. Alümino silikat hidratların ısıtılması

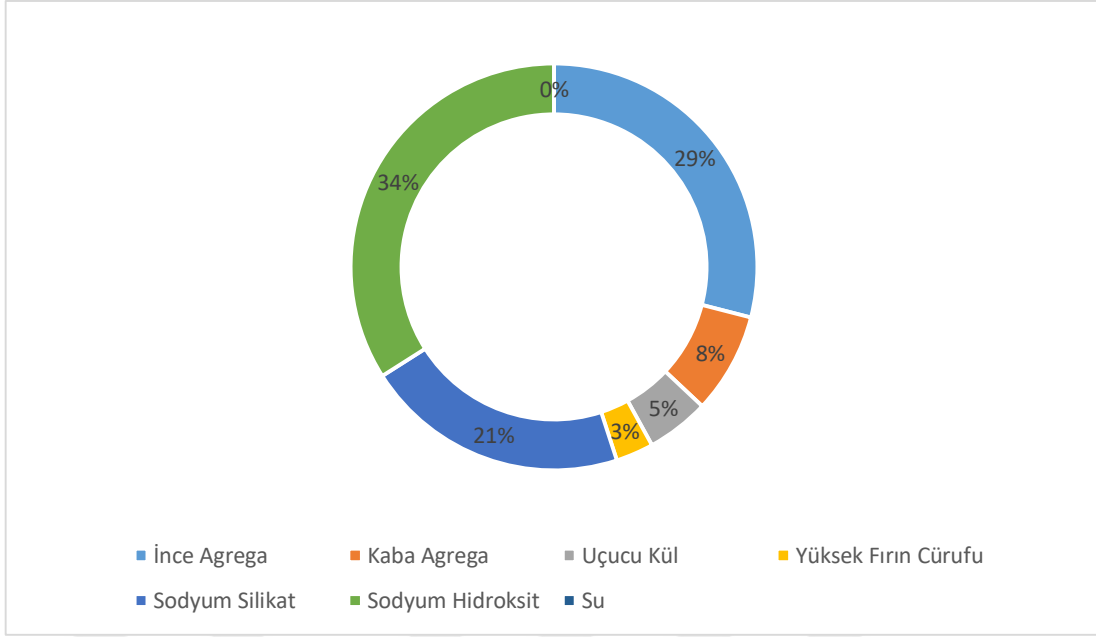
- 2- Katılma yada jelasyon malzemelerin transferi sonucu alümina ve silika hidroksilin yoğunlaşma reaksiyonu inorganik geopolimer jel fazını oluşturmaları ve
- 3- Jel fazın sertleşmesiyle, üç boyutlu silika alümina bağları oluşarak geopolimerin oluşmasıdır.

1.4. Geopolimer Beton

Geopolimer beton, bağlayıcı olarak Portland çimentosuna ihtiyaç duymayan yeni bir malzemedir. Çimento yerine, silisyum ve alüminyum içeriği zengin olan uçucu kül gibi hammaddelerin geopolimer bağlayıcı olarak kullanılabilmesi için alkali çözeltisi ile aktive olması gerekir. Bunun sonucunda da Portland Çimentosu içermeyen bir beton elde edilmektedir (Hardjito, 2005).

Geopolimer beton, çevre dostu bir beton çeşidi olarak bilinmektedir ve çimentosuz beton anlamına da gelmektedir. Geopolimer beton üretiminde puzolanik özellik gösteren ve depolanma açısından kısıtlı endüstriyel atıkların kullanılması, çevreci beton olarak bilinmesine de olanak sağlamıştır. Beton içerisinde çimentonun yerine endüstriyel atıkların kullanılabilir olması çimento tüketimini azaltmakla birlikte betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine olumlu katkılar da yapmaktadır (Şinik, 2019).

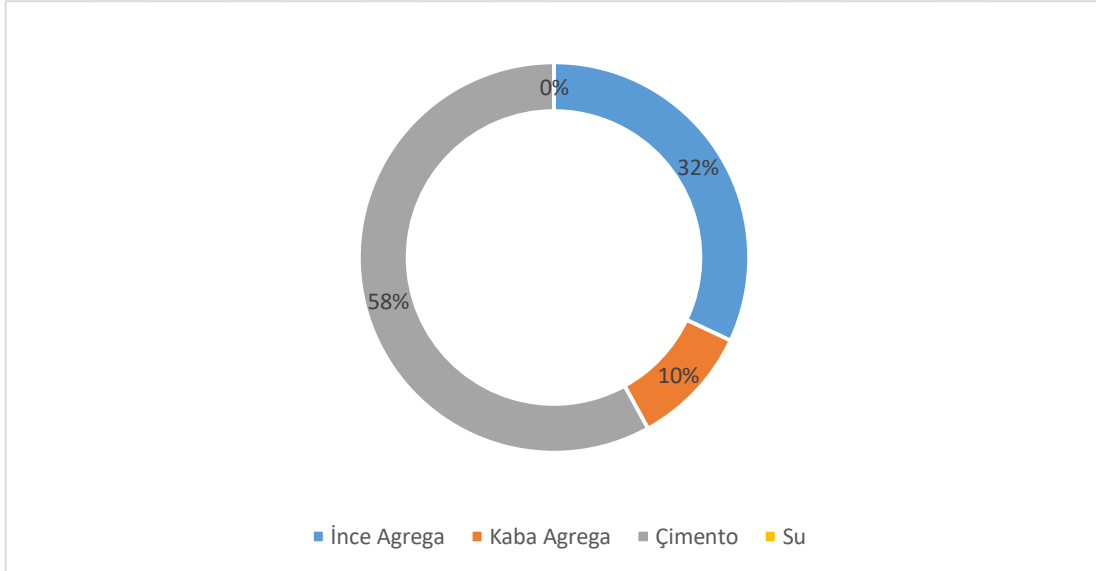
Mathew ve diğerleri (2013) geopolimer beton ile normal Portland çimentolu betonların maliyetleri karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda Geopolimer betonların maliyetlerinin normal Portland çimentolu betonların maliyetlerine kıyasla %20-30 daha az maliyetli olduğu belirtmiştir. Şekil 2 ve Şekil 3’de geopolimer ve normal beton üretim malzemelerinin maliyetleri oran olarak görülmektedir. Geopolimer beton üretiminde ana maliyet unsuru sodyum silikat ve sodyum hidroksittir.



Şekil 2. Geopolimer beton malzeme maliyetleri

Kaynak: (Mathew, Sudhakar ve Natarajan, 2013)

Şekil 3’te normal beton üretiminin %58’den fazla kısmını çimento maliyeti oluşturmaktadır.



Şekil 3. Normal Portland çimentolu beton malzeme maliyetleri

Kaynak: (Mathew, Sudhakar ve Natarajan, 2013)

Şekil 2 ve Şekil 3'teki geopolimer ve normal betonun maliyet karşılaştırması araştırmacıların bulunduğu bölgeye ait olmalarına rağmen geopolimer ve normal betonun maliyet karşılaştırmacı açısından araştırmacılara fikir sunmaktadır. 2020 verilerine göre 25 milyar metreküp beton üretilmiştir (World Cement, 15 January 2020). Bu miktar betonda geopolimer betondan sağlanacak ekonomiklik önemli miktara karşılık gelmektedir (Shaikh , December 2016).

1.5. Geopolimerde Kullanılan Bağlayıcılar

Uçucu kül, taban külü, yüksek fırın cürufu, silis dumanı gibi endüstriyel atıklar, pişirilmiş killer, metakaolin gibi ısıtıl işlem görmüş malzemeler, volkanik küller, traslar ve diatomit topraklar gibi doğal puzolanlar geopolimer beton içerisinde kullanılabilir. Geopolimer üretiminde Tablo 1'de görülen kaolin, metakaolin, laterit, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, kırmızı çamur, zeolit ve diatomit gibi bazılarının yapılan çalışmalardan elde edilen bağlayıcı malzemelerin kimyasal bileşimi görülmektedir. Uçucu kül, cüruf, kırmızı çamur ve ağır metal atıkları gibi endüstrinin zararlı katı atıkların büyük miktarlarda açığa çıkması bu atıkların bertaraf edilmesi konusunda çimentolu ve geopolimerli malzemeleri ön plana çıkarmaktadır. Uçucu külün yıllık atık miktarı 71 milyon ton ile 1 milyar ton arasında değişmektedir. Bu kadar büyük miktarda zararlı atığın depolama çalışmaları sonucunda çevreye özellikle yeraltı suyu ve toprağa verdiği zararlar büyük olacaktır (Dindi, Quang, Vega, Nashef ve Abu-Zahra, 2019) .

Tablo 2. Geopolimer yapımından yaygın olarak kullanılan bazı bağlayıcı malzemeler ve kimyasal bileşimleri

Bağlayıcı Malzeme	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
Kaolin	46,15	49,91	0,87	0,04	0,37	0,06	0,51	1,59
Metakaolin	58,39	35,47	2,71	0,01	0,3	-	-	1,44
Laterit	64,48	19,01	13,74	0,1	-	-	-	0,63
Uçucu Kül	55,38	28,14	3,31	3,45	1,85	0,32	2,3	1,39
Yüksek Fırın Cürufu	35,34	20,69	0,18	31,31	8,11	1,79	1,36	0,29
Kırmızı Çamur	14,4	22,2	40,2	2	0,17	0,28	12,7	0,11
Zeolit	78,68	11,68	1,12	3,43	1,12	0,17	0,44	3,08
Diatomit	80,3	6,1	6,79	1,04	0,65	0,12	0,62	0,44

Geopolimer betonda uçucu kül kullanımı kaynak ve enerji tasarrufu sağlamaktadır. Ayrıca doğrudan olmasada dolaylı yoldan çimento üretimi sırasında gerçekleşen karbondioksit salınımını azaltmaktadır. Ayrıca Geopolimer betonlar yapıda kullanıldığı durumlarda örneğin düşük büzülme ve sünme, iyi asit ve sülfat dayanımı ve düşük geçirgenlik gibi iyi uzun dönem ve durability gibi özelliklerinin de ayrıca bir ekonomik katkı sağlayacaktır (Meesala, Verma ve Kumar, 2019).

Geleneksel betona alternatif olarak üretilen sürdürülebilir beton teknolojileri çimento üretiminden ve karbondioksit salınımına neden olan aşamaları da ortadan kaldırdığı için karbondioksit salınımının azaltılmasına yardımcı olmaktadır. Uçucu kül, atık kazan külleri gibi atık malzemelerinde çevreye zarar vermeden geopolimer içerisinde bağlayıcı olarak kullanılabilir (Amran, ve diğerleri, 30 July 2021). 20. yüzyılın başlarından beri uçucu kül çimento veya beton katkısı olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Uçucu külün katkı malzemesi olarak kullanılmasındaki en önemli sebebi çevreye vereceği zararların azaltılması olmakla beraber ayrıca karbondioksit salınımını azaltıcı etkisi ve inşaat maliyetinde azaltması gibi olumlu etkileri de bulunmaktadır. Uçucu kül düşük maliyet, kolay erişilebilirlik, uygun küresel parçacıklara sahip olması, zengin yüksek aktiviteli alüminat ve amorf silikat içeriği gibi avantajlara sahiptir. Bu gibi özelliklerinden dolayı geleneksel beton yapımında özellikle de geopolimer yapımında önemli derecede dikkat çekmektedir (Environmet, Scrivener, John ve Gartner, 2018). Küçük parçacıklarıyla ve aynı zamanda geniş yüzey alanına sahip olmasının yanında yüksek derecede reaktif bir malzeme olmasından dolayı uçucu kül geopolimer yapımında en yaygın olarak kullanılan malzeme olarak bilinir (Assi, Deaver ve Ziehl, 2018). Düşük amorf birleşim içeriğiyle uçucu kül, yüksek oranda SS/SH (sodyum silikat/sodyum hidroksit)'a ihtiyaç duymakta ve sodyum hidroksit dozajı basıncı etkilemektedir (Hadi, Al-Azzawi ve Yu, 2018). Yapılan araştırmalara göre bir yılda yaklaşık olarak 544 milyon ton uçucu kül üretimi olmakta bu miktarın %80'e yakını ise dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, uçucu kül çevre dostu bir malzeme olarak bilindiğinden dolayı çimento içerisinde kullanılarak CO₂ salınımı etkilemektedir (Awalludin, Sulaiman, Hashim ve Nadhari, October 2015).

Küresel olarak dünya genelinde her yıl 130 milyon ton cam üretimi sağlanmaktadır ancak yaklaşık olarak 100 milyon ton miktarındaki bir kısmı atık

olarak değerlendirilmektedir. Ancak atık camların yalnızca % 21'i geri dönüşüme kazandırılmakta ve geri kalan kısmı ise renk, içerik ve kırık olma durumları gibi nedenlerden dolayı dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. 2019 yılında Avustralya da yapılan çalışmaya göre ülkedeki geri dönüşüm oranı %57'dir. Amerika, İngiltere, Singapur gibi gelişmiş ülkelerde bile bu oran %50'nin altında kalmaktadır. Dünya genelinden en büyük geri dönüşüm oranına %73 ile Avrupa Birliği Üyesi ülkeleri sahiptirler. Atık cam sahip olduğu silis içeriği ile yüksek pozolanik indeksiyle geopolimer betonlarda kullanılması için önemli derecede yüksek potansiyele sahiptir. Atık camların kimyasal bileşenleri genel olarak %71-75SiO₂, %8-11CaO, %0,95-2,5 Al₂O₃, %0-14,5 Na₂O, %1,6-3,6MgO, %0,3-1 Fe₂O₃ gibi bileşiklerden oluşmaktadır (Siddika, Hajimohammadi, Al Mamun, Alyousef ve Ferdous, 2021).

Obsidyen ikameli çimentolarla üretilen harçların pozolanik aktivitesi, pozolanik aktivite indeksi ve basınç dayanımları uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ikameli harçları ile kıyaslanmış ve obsidyen katkılı betonun uçucu kül katkılı betona nazaran daha fazla pozolanik etki ve basınç dayanımı gösterdiği görülmüştür (Ustabas ve Kaya, 2012). 5-20 mm aralığında tane boyutuna sahip obsidyen agregaların 3-10 dakika arasında 1000-1200 °C derecede ısı işlem görmesi sonucu boşluklardaki havanın 4-5 kat daha büyüyerek şişmesi sonucu elde edilen büyük hacimli hafif ağırlıklı ortalama 200-350kg/m³ birim hacim ağırlığı olan hafif betonlarda kullanılmak istenen agregalar üretilmiştir. Hafif betonlar 400-1350 kg/m³ birim hacim ağırlıklı 0,2-16,9 MPa dayanıma sahip olan özel betonlardır. Çalışmada kullanılan ısı işlem görmüş obsidyen agregasından elde edilen hafif betonlar 180-200 kg/m³ birim hacim ağırlıklı, 1,2-1,5 MPa dayanıma sahip, 25 döngü donma çözünme dirençli, 800-850 °C derece sıcaklığı dayanıklı, 600-650 °C hafif beton üretilmiştir. Bu gibi özellikler dikkate alındığı durumda oluşan hafif betonun yalıtım malzemesi ve dekoratif amaçlarla olarak kullanılabileceği görülmüştür (Safaryan, Sargsyan, Kalantaryan ve Melyan, 2019).

Geopolimerler, hem alkali ile aktifleştirilmiş malzemeler olarak hem de inorganik polimer malzemeler olarak da bilinmektedir. Geopolimerler hammadde olarak doğal malzemeler ve atık ürünlerin alkali veya asit aktivasyon reaksiyonu ile sentezlenen malzemelerdir. Geopolimer üretimin de kullanılan bazı malzemeler

Tablo 3’de verilmiştir. Geopolimerler dayanıma getirdiği yüksek özelliklerin yanında yangın dayanımı, kimyasal korozyon direnci ve diğer dayanıklılık özelliklerinde de normal betona göre yüksek avantajlar sağlamaktadır (Aliques-Granero ve Tognonvi, 2019).

Tablo 3. Geopolimer üretiminde kullanılan yaygın bağlayıcılar

Uçucu Kül	Kırmızı Kil Tuğla Atığı
Obsidyen(Volkanik Cam)	Pirinç Kabuğu Külü
Atık Cam	Kaolin
Metakaolin	Zeolit
Kil	Bentonit
Mullit	Boksit
Diatomit	Yüksek Kalsiyumlu Uçucu Kül
Kırmızı Çamur	Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu
Silis Dumanı	Arıtma Çamuru külü

Kaynak: Aliques-Granero ve Tognonvi, 2019

Geopolimerlerin bazı uygulamaları ve özellikleri ülkemizde ve yurtdışında araştırmalara konu olsa da henüz tam olarak sonuca varılmış değildir. Betonda atık malzeme ve diğer malzemelerin kullanımının bu kadar önemli olduğu görüldüğünden bu çalışma kapsamında da atık cam, obsidyen ve uçucu kül gibi malzemeler kullanarak geopolimerizasyon yöntemi ile geopolimer beton üretmek istenmektedir. Bu kapsamda detaylı çalışmalar yapılmakta ve araştırmalar devam etmektedir.

1.6. Literatür Özeti

Wang ve vd., geopolimerin sahip olduğu yüksek ve düşük sıcaklık döngüsü, vakum stabilitesi, neredeyse sıfır su tüketimi ve mükemmel mekanik özelliklerinden dolayı geopolimer ayda yapı yapmak için gerekli olan tüm özelliklere sahip olduğunu belirtmişlerdir (Wang, Tang, Cui, He ve Liu, 2016).

Shill ,ve diğerleri tarafından yapılan çalışmaya göre geopolimerin keşfinden beri yapıların restorasyonunda ümit verici bir malzeme olarak dikkat çekmiştir (Shill, Al-Deen, Ashraf ve Huchison, 2020).

Özsoy 2021 yılında yaptığı çalışmasında F sınıfı uçucu kül ile üretilen geopolimer harç numunelerine, uçucu kül ağırlığının %1, %2, %3, %4 ve %5

oranlarında diatomit ikamesinin harçların mekanik ve fiziksel özelliklerine yarattığı etkileri incelemişlerdir. Harçlara alkali aktivatör olarak bağlayıcı malzemenin ağırlığının %8, %10 ve %12 oranında Na⁺ muhteva edecek şekilde NaOH ilave etmişlerdir. Uygulanan kür sıcaklığı 60 °C, 75 °C ve 90 °C ve kür süresi 24, 48, 72 saattir. Elde edilen bulgulara göre diatomit ikame oranı arttıkça işlenebilirlik değerlerinde düşüş olduğu, bu duruma diatomitin gözenekli yapısı ve yüksek BET yüzey alanının sebep olduğunu ifade etmiştir. Diatomitin özgül ağırlığı uçucu küle göre düşük olduğundan genel olarak diatomit ikamesi numunelerin birim ağırlıklarını azaltmıştır. Eğilme ve basınç dayanımları incelendiğinde, 24 ve 48 saat kür süresi ve tüm sıcaklıklar için %1 ve %2 diatomit ikamesi dayanımları artırırken, %3, %4 ve %5 kür süresi için azaldığı tespit edilmiştir. Kür süresi etkisi ele alındığında, genel olarak 24 saatten 48 saate çıktığında dayanımlar artarken, 72 saat için azaldığı ortaya çıkmıştır. Yüksek sıcaklık etkisi incelendiğinde, 60 °C sıcaklığı ve 24 saat kür süresi için numunelerin iç yapısındaki tepkimeleri tamamlamamış olduğundan dolayı bazı numunelerde basınç dayanımlarında artış, ancak kür süresi ve sıcaklığı arttığında basınç dayanımlarında düşüş olduğu gözlemlenmiştir. FESEM ve EDX analiz sonuçlarında göre 300 °C sonrası küçük kısmi hasar olduğu, 600 °C ve 900 °C den sonra ise agrega ile matris arasındaki ara geçiş yüzeyinde bozulmalar olduğu belirtilmiştir.

Keklik (2020) %95 uçucu kül ve %5 silis dumanı karışımı, %35 yüksek fırın cürufu, % 60 uçucu kül ve %5 silis dumanı karışımı, %85 yüksek fırın cürufu, %10 uçucu kül ve %5 silis dumanı olacak şekilde üç farklı karışım reçetesi ile geopolimer beton üretmiştir. Bu betonlar %5 konsantrasyonlu sülfürik aside maruz bırakılmıştır. %95 uçucu küllü numunelerin 28 günde ortalama 13 MPa, %35 yüksek fırın cürufu numuneler 20 MPa, %85 yüksek fırın cürufu numuneler ise yaklaşık 26 MPa basınç dayanım değerlerini tespit etmiştir. Çevresel etkilere karşı durabilite özelliği açısından %85 cüruf içeriğine sahip numunelerin maksimum dirence, %95 cürufu sahip numunelerin ise minimum dirence sahip olduğunu ifade etmiştir (Keklik, 2020).

Altındal (2020) %100 yüksek fırın cürufu, %75 yüksek fırın cürufu ile %25 F tipi uçucu kül ve %50 yüksek fırın cürufu ile %50 F tipi uçucu kül içeren 3 farklı bağlayıcı ile havada ve suda ısıl kürler uygulayarak alkali aktive edilmiş betonlar üretmiştir. Bu betonların 2, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri ölçülmüştür.

%100 yüksek fırın cürufu içeren numuneler maksimum dayanımı verirken, %50 yüksek fırın cürufu ile %50 F tipi uçucu kül içeren numuneler minimum dayanımı vermiştir. Altındal (2020) yüksek fırın cürufu arttıkça numunedeki basınç dayanımının artmasını bağlayıcı içeriğindeki yüksek CaO miktarına bağlamıştır. 2 gün ısıl kür işleminden sonra 26 günde suda bekletilen numunelerden 34,68 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. Elde edilen en düşük dayanım ise 2 gün 22,29 MPa olarak elde edilmiştir (Altındal, 2020).

Al-Azzawi (2019) F sınıfı uçucu kül ile metakaolini %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranında ikame ederek % 10 sodyum metasilikat konsantrasyonuna sahip çözelti ile harçlar üretmiştir. Bu harçların 3., 7., 28., 90. ve 180. gündeki basınç ve eğilme dayanımlarını tespit etmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, yalnızca F tipi uçucu kül kullanılan numunelerde 28 günde 15,1 MPa dayanım elde edilirken, ağırlıkça %50 metakaolin ikame edilen numunelerde 60,2 MPa dayanım değerine ulaşmıştır. 28 günden sonra yapılan uzun kür süresinin dayanıma önemli ölçüde etkilemediğini belirtmiştir (Al Azzawi, 2019).

Annakoa (2019) yüksek fırın cürufu ile atık camın %0, %10, %20 ve %30 oranında ikame edilmesiyle geopolimer harçlar üretmiştir. Alkali aktivatör olarak sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı sırasıyla 0.67, 1.0 ve 1.5 olarak karıştırarak kullanmıştır. Üretilen harç numuneleri yüksek sıcaklık etkisi için 300, 600, 900 ve 1200 °C sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Harç numunelerde 7 günde en fazla 54.93 MPa, 28 günde en fazla 58.8 MPa dayanıma ulaşılmıştır. Bu numunelerin eğilme dayanımları sırasıyla 7 günde 3.30 MPa, 28 günde 4.02 MPa ölçmüştür. Yüksek sıcaklığa maruz harçlarda sıcaklık arttıkça dayanımın düştüğü, 1200 °C’de ise dayanım okunamadığını ifade etmiştir. Annakoa (2019) dayanımlar için en etkili aktivatör karışım oranı 0.67 olduğu, sodyum silikat oranı arttıkça harçların bu durumdan olumsuz etkilendiğini belirtmiştir.

Altundal (2019) %100 yüksek fırın cürufu, %100 uçucu küllü ve %50 yüksek fırın cürufu ile %50 uçucu kül karışımıyla geopolimer harçlar üretmiştir. Alkali aktivatör olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit karışımı tercih edilmiştir. Elde ettikleri sonuçlara göre, uçucu küllü harçlar ısı kürüne ihtiyaç gerektirirken, cürufu numuneler ısı kürü olmadan da gerekli dayanıma ulaşmıştır. Durabilite sonuçları

incelendiğinde ise %5 konsantrasyonlu sülfürik asit etkisine en iyi performansı %50 uçucu kül ile %50 cüruf karışımı içeren numunelerde rastlanmıştır (Altundal, 2019).

Ekinci (2017) silis modülü 0,6 ve 0,8 olan Nevşehir yöresinden aldıkları iki farklı volkanik tuf ile 10, 12, 14 ve 16 molar NaOH alkali aktivatörlerle 90, 120, 150 °C sıcaklıklarda harçlar üretmiştir. Üretilen numunelere ağırlıkça %1, %2 ve %3 oranlarında nano silika ve %5, %10 ve %15 oranlarında stiren bütadien lateks katılarak elde ettiği harçların dayanımını incelemiştir. Elde edilen sonuçlara göre aktivatör/bağlayıcı katkı oranı 0,6'dan 0,5'e düştüğünde dayanımlarda düşüş tespit etmiştir. Harçların kür sıcaklığı 90 °C'den 150 °C'ye yükseldiğinde harçların basınç dayanımlarında azalma tespit edilmiştir. Stiren-Bütadien Lateks katkısının ağırlıkça %5 oranda kullanımı basınç dayanımlarını artırırken bu oranın üzerindeki değerler için dayanımlarda azalma meydana gelmiştir (Ekinci, 2017).

Tuyan (2017) Ege Bölgesi'nden temin ettiği zeolit ve trası, tuğla tozu, C ve F sınıfı uçucu kül ile karıştırarak farklı alkali aktivatör oranı, kür koşulları, su/bağlayıcı oranı gibi değişkenlerin harçların üzerindeki etkilerini incelemiştir. Tuyan (2017) alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltilerinin karışımını kullanmıştır. Geopolimer harçlarda su/bağlayıcı oranının azalması basınç dayanımlarında artışa sebep olmuş; atık tuğla tozu, zeolit ve tras içeren harçlarda optimum su/ bağlayıcı oranı 0,40 iken, C ve F tipi uçucu kül esaslı geopolimer harçlarda ise bu oran sırasıyla 0,38 ve 0,42 değerlerinin basınç dayanımı için optimum değerler olduğu belirtilmiştir (Tuyan, 2017).

Mamaseni (2021) pomzaya %0, %0,5, %1 ve %1,5 oranlarında nanosilika karıştırılarak 10, 12, 14 molar KOH ve NaOH ile alkali/bağlayıcı oranı 0,45, 0,50 ve 0,55 olan geopolimer betonlar üretmiştir. Betonlarda en yüksek dayanıma 12 molar sodyum ve potasyum oksit çözeltisi, alkali/bağlayıcı oranı 0,5 ve kür süresi 2 gün olan %1 nanosilika oranlı numunelerde rastlanmıştır (Mamaseni, 2021).

Rasheed (2019) %50 yüksek fırın cürufu ile %50 uçucu kül karışımını 0,5 aktivatör/bağlayıcı oranında nano silika ve çelik lifli kendiliğinden yerleşen geopolimer beton üretmiştir. Çözeltide $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 2,5 olacak şekilde kullanılmıştır. Nanosilikanın basınç mukavemetini iyileştirirken, çelik lifin eğilme dayanımının üzerinde olumlu etkiye sahip olduğu belirtilmiştir (Rasheed, 2019).

Gümüş (2016) metakaolin ve uçucu külü kullanarak geopolimer betonlar üretmiştir. Geopolimer betonda kullandığı agrega 0-5, 5-15 ve 15-22 mm aralığında üç farklı tane çapına sahiptir. Alkali aktivatör olarak 12 molar sıvı/bağlayıcı oranı 0,6 olan NaOH ve Na₂SiO₃ karışımı kullanılmıştır. 60 °C’de 24 saat kür edilen %40 uçucu kül ikameli numunelerde 30.1 MPa, 90 °C’de 24 saat kür edilen %40 uçucu kül ikameli numunelerde 31.4 MPa dayanım elde edilmiştir (Gümüş, 2016).

Hamid (2021) pomza ile uçucu külü farklı oranlarda karıştırılmış bağlayıcıları 12 molar NaOH ile aktive ederek geopolimer harçlar üretmiştir. Kür süresi ve sıcaklığı olarak sırasıyla 2, 4 ve 6 gün, 60 °C seçilmiştir. Uçucu kül oranı arttıkça numunelerin basınç dayanımının arttığı ve optimum kür süresinin 6 gün olduğu tespit edilmiştir (Hamid, 2021).

Alnkaa (2019) cüruf, uçucu kül ve atık cam tozunu kullanarak geopolimer harçlar üretmiştir. Numunelere kür işlemi 85°C’de 12 saat buhar kürü ve oda sıcaklığında su kürü uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, buhar kürünün su kürüne göre daha etkili sonuçlar verdiği; cüruf ve uçucu kül karışımlarında her iki kür yönteminin etkili olduğu; cüruf ve atık cam tozu içeren numunelerde su kürünün etkili olmadığı ifade edilmiştir (Alnkaa, 2019).

Özer (2018) Portland çimentosuna %0, %10, %25, %40, %55, %70, %85 ve %100 oranlarında doğal zeoliti ikame ederek geopolimer harçlar üretmiştir. Geopolimer harçlar NaOH ile aktive edilmiş ve 72 saat boyunca 90°C’de kür altında tutulmuştur. Harç numunelerde en yüksek dayanım 78.5 MPa ile agrega /bağlayıcı oranı 1,75, %10 zeolit ikameli numunelerde elde edilmiştir (Özer, 2018).

Kwami (2020) F sınıfı uçucu kül ile ürettikleri geopolimerlere kür farklılıklarının etkisini araştırmıştır. Kür tipi olarak önce numuneler 6 saat boyunca 75 °C’de ısıtılmış, ardından mikrodalgada 180 W gücünde 15, 30, 45, 60, 75 ve 90 dakika tutulduktan sonra 3, 7, 28, 56, 90 ve 180 günlük dayanım testleri uygulanması süresince normal oda şartlarında bırakılmıştır. Elde edilen basınç dayanımı sonuçlarına göre, belirtilen kür sistemi ile üretilen numunelerin basınç dayanımının geleneksel yöntemde 24 saat boyunca 75°C’de kür edilenlere göre daha fazla dayanıma sahip olduğu ifade edilmiştir. Deney sonucunda 180 günde maksimum 94 MPa dayanıma ulaşılmıştır (Kwami, 2020).

Çakmak (2019) yılında yaptığı çalışmasında metasezgisel algoritmalarından olan öğrenme tabanlı algoritma (TLBO) ve çiçek tozlaşma algoritması (FPA) kullanarak betonarme taşıyıcı sistem tasarımını hem geleneksel beton hem de geopolimer beton için gerçekleştirmiştir. Optimizasyon ile betonarme kısıtları sağlayacak minimum CO₂ salınımı gerçekleştirecek yapısal taşıyıcı eleman boyutları belirlenmiştir. Portland çimentosu ile üretilen beton yerine geopolimer beton kullanmak CO₂ salınımını yaklaşık %40-%58 arasında azaltılmıştır. Algoritmalar karşılaştırıldığında ise TLBO algoritması FPA algoritmasına göre daha iyi sonuçlar verdiğini tespit edilmiştir (Çakmak, 2019).

Polat (2019) metakaolin tabanlı geopolimer harçlara bakteri tipi mikroorganizmalar ekleyerek betonda oluşan iyileşmeyi ve yüzey çatlaklarında karbonat çökelmelerini incelemiştir. NaOH molaritesi 12, kür sıcaklığını 60 °C'de bakterilerin çatlağı iyileştirmeyi başardığı, ancak iyileşme süresinin alkali ortamın yoğunluğu arttıkça uzadığını tespit edilmiştir (Polat , 2019).

Atabey (2017) iki farklı termik santralden elde ettikleri F sınıfı uçucu kül ile geopolimer üretmiştir. Alkali aktivatör olarak NaOH ve Na₂SiO₃ karışımını Na oranı ağırlıkça %6, %9, %12 ve %15 olacak şekilde kullanmıştır. Atabey (2017) geopolimer üretiminde kür sıcaklığı 60°C, 80°C ve 100 °C ve kür süresi ise 3, 6, 12, 24, 48 ve 72 saat olarak kullanmıştır. Na oranı %15, kür süresi 100 °C ve 24 saat ısıl kür uygulanan numunelerde en yüksek basınç dayanımı 100.7 MPa olarak elde edilmiştir. Na₂SiO₃'ün tek başına alkali aktivatör olarak kullanıldığı numunelerde en düşük basınç dayanımına rastlanılmıştır (Atabey, 2017).

Yonar (2014) uçucu kül bağlayıcılı, hacimce %0, %1 ve %2 oranında polivinil alkol lifler ekleyerek ürettiği geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altındaki davranışlarını incelemiştir. Üretilen lifli ve lifsiz betonlar 60, 80 ve 100 °C'de 24 saat kür uygulanmıştır. Bu numuneler 28 gün boyunca oda sıcaklığında bekletildikten sonra 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C'de yüksek sıcaklığa maruz bırakılmışlardır. Geopolimer betonlara lif ilavesi betonların yüksek sıcaklık dayanımını artırmıştır (Yonar, 2014).

Durak (2019) F tipi uçucu kül bağlayıcılı, ağırlıkça %1, %2 ve %3 nano parçacık SiO₂ ve CaCO₃ ilave edilmiş harçların dayanım özelliklerini incelemiştir. Su/bağlayıcı ve kum/bağlayıcı oranı sırası ile 0.3, 3 olan, alkali aktivatör ağırlıkça %8,

%10 ve %12 sodyum konsantrasyonuna sahip NaOH kullanarak harç numuneler üretilmiştir. Basınç ve eğilme dayanımı için optimum kür süresinin 24 saat olduğu, bu süre içerisinde numunelerin parçacık içermeyen kontrol grubuna göre yaklaşık olarak %50-%65 arasında arttığı belirtilmiştir (Durak, 2019).

Their (2018) %90 uçucu kül ve %10 Portland çimentosu karışımına nano silis ve çelik elyaf ekleyerek 12 molar NaOH çözeltisiyle harçlar üretmiştir. En yüksek eğilme dayanımının ağırlıkça %1.5 çelik elyaf ve %2 nano silika kullanılan numunelerde tespit edilmiştir. %100 uçucu kül ile üretilen numunelerde 49.1 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir (Their, 2018).



2. YAPILAN ÇALIŞMA VE KULLANILAN MALZEMELER

2.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Uçucu kül geopolimer üretiminde yaygın olarak kullanılan bir bağlayıcıdır. Obsidyen ve atık camın geopolimer üretiminde kullanılabilirliği hakkında yeterli literatür bilgisi bulunmamaktadır. Bu çalışmanın birinci amacı hem bu bilgi eksikliğini doldurmak hem de bu üç malzemenin birbirleriyle karışımından oluşan malzemenin geopolimer üretiminde bağlayıcı olarak kullanımını araştırmaktır. Bu çalışmanın diğer bir amacı, sodyum hidroksit ile aktive edilmiş obsidyen ve atık cam içeren harçların eğilme ve basınç dayanımını uçucu kül içeren harçların dayanımları ile geopolimerlerle kıyaslamaktır. Uçucu kül geopolimer üretimde kullanılan ve özellikleri bilinen bir malzemedir. Ancak geopolimer üretiminde obsidyen ve atık cama ait yeterince araştırma bulunmamaktadır. Farklı oranlarda obsidyen, atık cam ve uçucu kül karışımlarıyla hazırlanan bağlayıcının geopolimer özelliklerine etkisi de bu çalışmada araştırılmıştır. Geopolimer üretiminde 40 °C ile 100 °C sıcaklıklarda kür uygulanması gerektiği, 70 °C ile 90 °C sıcaklıkların en ideal sıcaklıklar olduğu belirtilmektedir. Çalışmanın üçüncü amacı ise 75 °C, 90 °C, 105 °C ve 120 °C sıcaklığına geopolimerleri maruz bırakarak en uygun kür sıcaklığını belirlemektir. Çalışma kapsamında obsidyen, atık cam ve uçucu kül %100, %50, %25 ve %0 oranlarında birbirleriyle karıştırılmış bu karışımlarla geopolimer üretilmiştir. Geopolimerde alkali aktivatör olarak 12 molarlık konsantrasyona sahip sodyum hidroksit kullanılmıştır. Tek seferlik üretimde 450 gram bağlayıcı, 1350 CEN standart kumu, 86,4 gram su ve 93,6 gram alkali aktivatör mikserde karıştırılarak harçlar hazırlanmıştır. Tablo 4'te görülen 13 farklı bağlayıcı karışımları ile hazırlanan harçlar TS EN 196-1'e göre 40x40x160 mm'lik harç numune kalıplarına sarsma tablasıyla yerleştirilmiştir. Tablo 4'te görülen OB100AC0UC0 gösteriminde geopolimerde kullanılan obsidyenin OB ile sembolize edildiği ve %100 oranında katıldığı, AC ile gösterilen atık camın %0 oranında katıldığı, UC ile gösterilen uçucu külün %0 oranında katıldığını ifade etmektedir. Tablo 4'te görülen 100, 75, 50, 25 ve 0 rakamları o malzemenin karışımındaki kütlece oranını göstermektedir. %100, %75, %50, %25 ve %0 oranlarında obsidyen, atık cam ve uçucu kül karışımları geopolimerde kullanılan bağlayıcılardır. Her bir kalıbına yerleştirilen harç numunesi 24 saat iklimlendirme

dolabında tutulduktan sonra 75 °C, 90 °C, 105 °C ve 120 °C sıcaklığa sahip etüvlerde 72 saat bekletilmiştir. Bu numunelerin 7., 28. ve 90. günlerinde TS EN 196-1'e göre eğilme ve basınç dayanımları ölçülmüştür.

Tablo 4. Geopolimer numunelerin bağlayıcı türüne göre isimlendirilmesi

OB100AC0UC0	OB0AC100UC0	OB0AC0UC100
OB75AC25UC0	OB25AC75UC0	OB0AC25UC75
OB75AC0UC25	OB0AC75UC25	OB25AC0UC75
OB50AC50UC0	OB25AC50UC25	OB25AC25UC50
OB50AC0UC50		

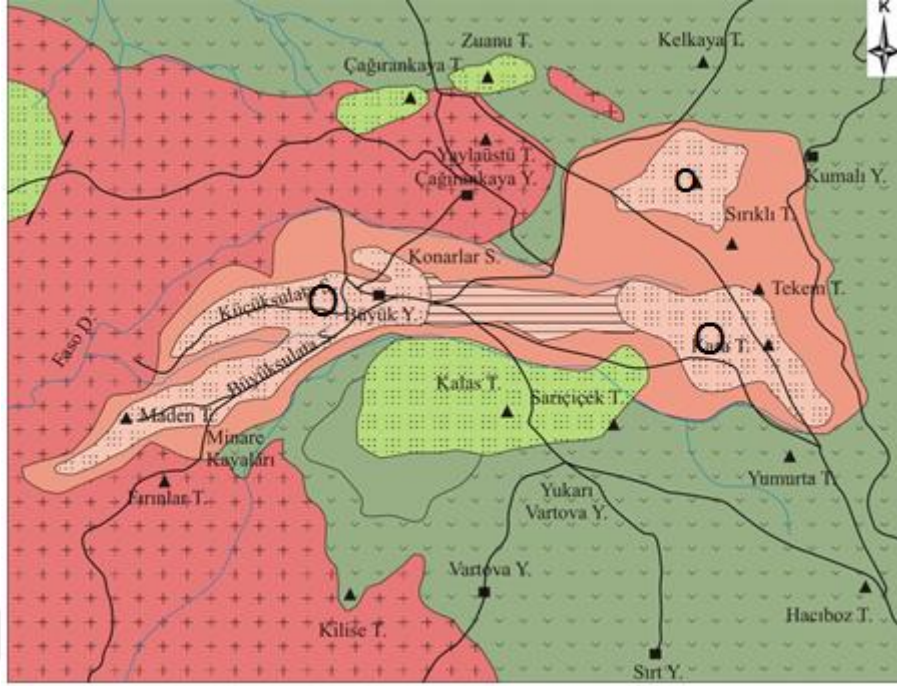
Bu çalışmada obsidyen, atık cam, uçucu kül ile bunların karışımları ile hazırlanan harç numunelerin eğilme ve basınç dayanımları ölçülmüştür. Ayrıca geopolimerlerin X ışını spektrometresine (XRF) göre kimyasal bileşimleri, X ışını difraksiyonu (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile mikro yapılan özellikleri incelenmiştir.

2.1.1. Malzemeler

Bu çalışmada Rize İkizdere yöresi obsidyeni, inşaat atığı cam, Zonguldak Çatalağzı Termik Santralinin uçucu külü ve bu üç malzemenin karışımları bağlayıcı, CEN standart kumu ince agrega ve sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi alkali aktivatör olarak kullanılmıştır.

2.1.1.1. Obsidyen (OB)

Obsidyen volkanik cam olarak bilinen, endüstriyel olarak kullanımı olmayan, camsı yapısı yüzünden canlılara zarar verebilen bir kayadır. Çalışmada kullanılan obsidyenler Şekil 4'te haritası görülen Rize ili İkizdere İlçesi Çağırankaya mevkisinden tedarik edilmiştir.

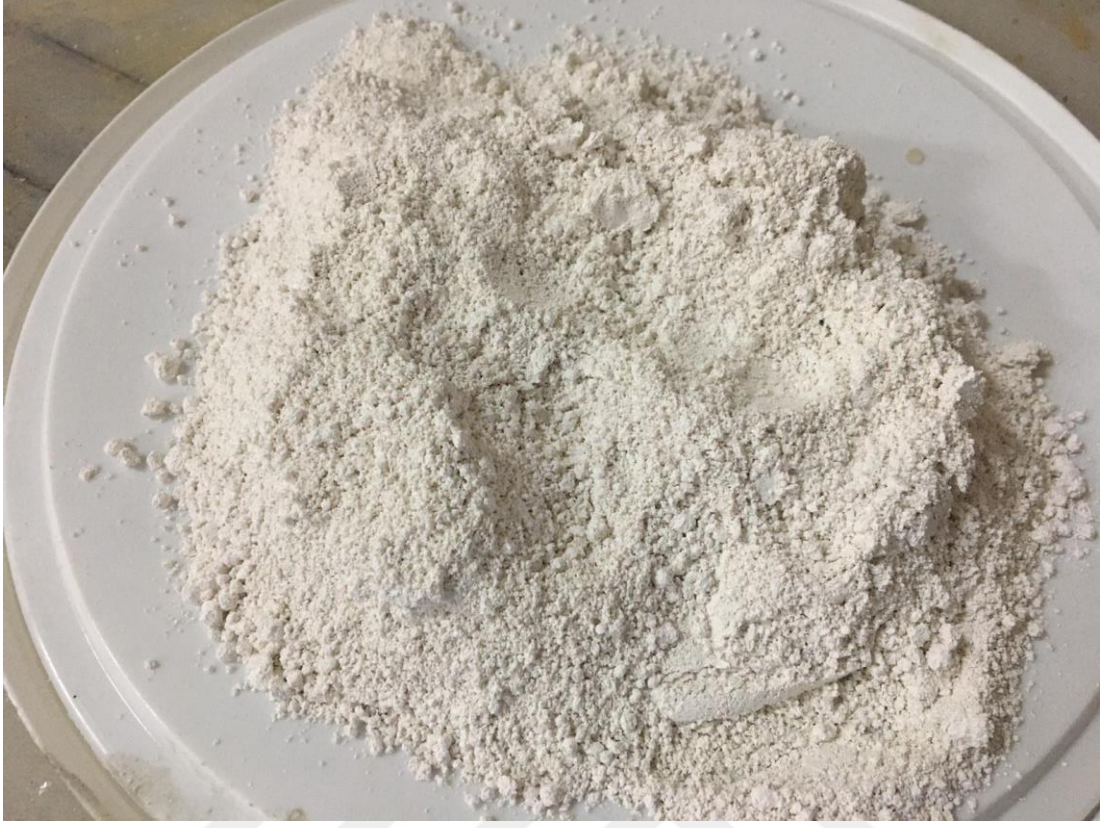


Şekil 4. Rize ili İkizdere ilçesi obsiyen kaynakları haritası (O ile gösterilen yerler obsidyen kaynaklarını göstermektedir.)

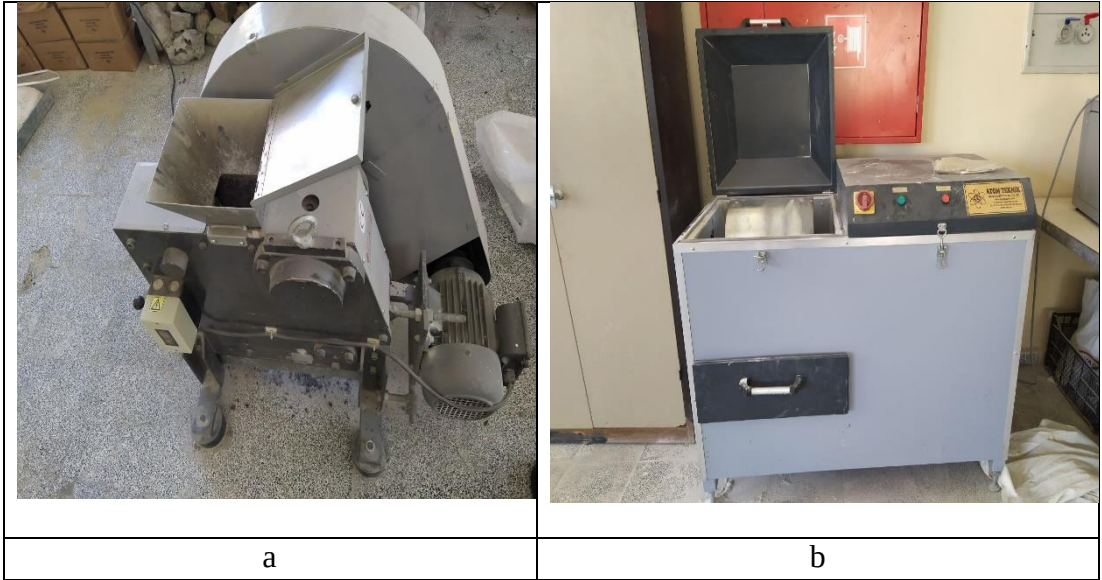
Şekil 5 (a) da arazide yığın olarak, Şekil 5(b) de tane olarak görülen obsidyenler Şekil 6’da görülen geopolimerde bağlayıcı inceliğine getirilmesi için Şekil 7 (a)’da görülen çeneli kırıcıda kırılarak tane boyutu düşürüldükten sonra Şekil 7 (b)’de görülen bilyeli değirmende öğütülerek toz haline getirilmiştir.



Şekil 5. a)-b) Obsidyen yataklarına ait görüntüler



Şekil 6. Obsidyenin öğütülmüş toz haline getirilmiş hali



a

b

Şekil 7. a) Bilyeli değirmen, b) Çeneli kırıcı

Çalışmada kullanılan Tablo 5’te kimyasal bileşimi görülen obsidyende %73,624 oranında silis ve %13,779 oranında alümin olduğu görülmektedir. Reaktif

silis içeriği de %40'tır. Bu veriler altında bu malzemenin geopolimer de kullanımına uygun bir kimyasal bileşime sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 5. Obsidyenin kimyasal bileşimi (%)

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Lol
Obsidyen	1,044	73,624	13,779	1,263	0,075	5,296	3,959	0,510

2.1.1.2. Atık Cam (AC)

Çalışmada Şekil 8 (a)'da görülen inşaat atığı cam kullanılmıştır. Bu atık camlar çeneli kırıcı ve bilyeli değirmende işlem görerek Şekil 8 (b) de görülen toz boyutuna getirilmiştir. Atık camın kimyasal bileşimi Tablo 6'da görülmektedir. Camın kimyasal içeriğinin %70'den fazlası SiO₂ bulunmaktadır ve özgül ağırlığı 2,6 g/cm³'tür



Şekil 8. a)Geri dönüşümden elde edilmiş atık cam, b)Öğütülmüş toz hali

Tablo 6. Atık camın kimyasal bileşimi (%)

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Lol
Atık Cam	8,537	70,938	1,997	0,22	3,664	0,614	12,945	0,600

2.1.1.3. Uçucu Kül (UC)

Çalışmada kullanılan uçucu kül, Zonguldak Çatalağzı Termik Santralinden temin edilmiştir. Şekil 9’da görülen uçucu kül ASTM C618 standardına göre $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ değerinin %70’den fazla olması nedeniyle F sınıfı, TS EN 450’e göre ise V sınıfı silissi bir uçucu küldür. Çalışmadan kullanılan uçucu küle kimyasal bileşimi Tablo 7’de görülmektedir. Çalışmada kullanılan uçucu külün $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplam değeri 87,815’tir ve özgül ağırlığı $2,06 \text{ g/cm}^3$ ’tür.



Şekil 9. Uçucu kül

Tablo 7. Uçucu külün kimyasal bileşimi (%)

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Lol
Uçucu Kül	3,264	58,921	22,357	6,537	1,818	2,958	0,614	1,700

2.1.1.4. Standart Kum

Deneyler de Standart CEN kumu kullanılmıştır. Standart kumlar Şekil 10’da görülen Limak Firmasının Trakya Çimento Fabrikasında ürettiği 1350 gram olarak hazır torbalanmış kumlardır.



Şekil 10. Standart kum

2.1.1.5. Sodyum Hidroksit (NaOH)

Goepolimer alkali aktivatör olarak toz halde temin edilen sodyum hidroksit (NaOH) Şekil 11 (a) 12 molar konsantrasyonda olacak şekilde su ile çözünerek (Şekil 11 (b)) hazırlanan çözeltiler geopolimerlerde kullanılmıştır. Harçlarda alkali aktivatör/bağlayıcı oranı 0,45 olarak seçilmiştir. Bu değer literatür çalışmaları incelenerek en uygun değer olduğu kanaatine varılarak belirlenmiştir. Tablo 8’de alkali aktivatöre ait kimyasal özellikler görülmektedir. Çalışmada kullanılan sodyum hidroksitin saflığı %98’den fazladır.



Şekil 11. Sodyum Hidroksit a) Sodyum Payet b) Sodyum Çözeltisi

Tablo 8. Alkali aktivatörün bazı kimyasal özellikleri

Sodyum Hidroksit Çözeltisi (NaOH)
12 M
M: 40 g/mol
Yoğunluk (20 °C) 2,13 g/cm ³
NaOH ≥ 98,0
Na ₂ CO ₃ < %0,5

2.2. Geopolimerde Kullanılan Malzeme Miktarları ve Geopolimerin Üretimi

Çalışmada geopolimerlerde on üç farklı bağlayıcı kombinasyonu belirlenmiştir. Bu 13 farklı kombinasyon obsidyen ve atık camla üretilecek harçların eğilme ve basınç değerlerinin iyileştirilmesi hedeflenerek rastgele seçim yoluyla belirlenmiştir. 13 farklı bağlayıcı ile 7, 28, 90 gün olarak üç farklı yaşta ve 75 °C, 90 °C, 105 °C, 120 °C olarak dört farklı kür sıcaklığında her test gurubu için üç numune olmak üzere toplam 468 adet 40x40x160 mm ebadında prizmatik harç numuneleri üretilmiştir. Deneyler Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Yapı Malzemeleri Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Harç numunelerin üretiminde su ve sodyum hidroksit miktarları sabit tutulmuş olup obsidyen, atık cam ve uçucu kül Tablo 9’da da görüldüğü gibi farklı miktarlarda kullanılmıştır.

Tablo 9. Geopolimerde kullanılan malzeme miktarları (gram)

Numune Kodu	Obsidyen	Atık Cam	Uçucu Kül	Aktivatör	Standart kum	Su	NaOH
OB100AC0UC0	450	0	0	450	1350	86,4	93,6
OB75AC25UC0	337,5	112,5	0	450	1350	86,4	93,6
OB75AC0UC25	337,5	0	112,5	450	1350	86,4	93,6
OB50AC50UC0	225	225	0	450	1350	86,4	93,6
OB50AC0UC50	225	0	225	450	1350	86,4	93,6
OB25AC25UC50	112,5	112,5	225	450	1350	86,4	93,6
OB25AC50UC25	112,5	225	112,5	450	1350	86,4	93,6
OB25AC0UC75	112,5	0	337,5	450	1350	86,4	93,6
OB25AC75UC0	0	112,5	337,5	450	1350	86,4	93,6
OB0AC25UC75	112,5	337,5	0	450	1350	86,4	93,6
OB0AC75UC25	0	337,5	112,5	450	1350	86,4	93,6
OB0AC100UC0	0	450	0	450	1350	86,4	93,6
OB0AC0UC100	0	0	450	450	1350	86,4	93,6

Geopolimerlerin üretiminden önce 86,4 grama 93,6 gram sodyum hidroksit katılarak çalkalanarak kapalı kaplarda hazırlanan çözeltiler 24 saat bekletildikten sonra harç numunelerde kullanılmıştır. Harçlar hazırlanırken ilk önce mikser düşük devirde çalışırken bağlayıcılar konularak 30 saniye kadar karıştırılmıştır. Ardından bağlayıcıya kum ilave edilerek düşük hızda 30 saniye daha karıştırıldıktan sonra alkali aktivatör çözeltisi eklenerek karışımın her yerine dağılması sağlanmıştır (Şekil 12). Alkali aktivatörün tamamı karışıma döküldükten sonra 60 saniye daha karıştırılarak harç numunesi kalıbına yerleştirilmeye hazır hale getirilmiştir. Elde edilen harç 40x40x160 mm boyutlarındaki harç numune kalıbına her bir seferde 60 vuruş olacak şekilde iki tabaka halinde kalıbına yerleştirilmiştir (Şekil 13). Şekil 14’te görülen kalıplanmış numuneler dört farklı gruba ayrılarak her bir grup numune 24 saat süre ile iklimlendirme dolabında bekletildikten sonra 72 saat 75°C, 90°C, 105°C, 120 °C derecede etüvde bekletilmişlerdir (Şekil 15). Etüvden çıkarılan numuneler basınç ve eğilme dayanımı testleri uygulanacağı 7., 28. ve 90. güne kadar çevresel etkilerden etkilenmemesi amacıyla hava almayan şeffaf poşetlerde saklanmışlardır.



Şekil 12. Harç numunesinin mikserde karılması



Şekil 13. Harç numunelerin kalıbına yerleştirilmesi



Şekil 14. Üretimi tamamlanmış harç numunesi



Şekil 15. Etüvde bekletilen harç numuneleri

2.3. Deneyler

2.3.1. Eğilme Dayanımı Deneyi

Eğilme deneylerinde önceden dökümü yapılmış ve kür uygulanmış 40x40x160 mm boyutlarında üretilen numunelere TS EN 196-1'deki standart çimento numunelerine uygulanan eğilme ve basınç yükleme hızlarında deneyler uygulanmıştır. Şekil 16'de görülen eğme deney cihazıyla numunelerin eğilme dayanımları ölçülmüştür. Eğilme dayanımları Denklem 1'e göre hesaplanmıştır.

$$R_f = 1,5 \frac{Fxl}{b^3} \quad (1)$$

Denklem 1'deki R_f eğilme dayanımını (N/mm²), b prizmanın kare kesitinin kenar uzunluğunu (40 mm), F prizmanın ortasına uygulanmış olan kuvveti (N), l destek silindirlerin eksenleri arasındaki uzaklığı (100 mm) göstermektedir.



Şekil 16. Eğilme dayanımı ölçüm cihazı

2.3.2. Basınç Dayanımı Deneyi

Eğilme dayanımını ölçmek amacıyla test edilen numunelerden ikiye bölünen parçaların uç kısımlarına basınç deneyi uygulanmıştır. Şekil 17'de basınç deneyi uygulanan numunenin kuvvet uygulandığı alanı 40x40 mm'dir. Denklem 2'ye göre

basınç dayanımları ölçülerek altı numunenin ortalaması alınarak çalışmada sunulmuştur.

$$Rc = \frac{Fc}{b^2} \quad (2)$$

Denklem 2’de, Rc basınç dayanımını (N/mm²), b basınç plakasının kenar uzunluğunu (40 mm), Fc, kırılmadaki en büyük kuvveti (N) göstermektedir.



Şekil 17. Basınç dayanımı ölçüm cihazı

2.3.3. Mikro Yapısal Analizler

Çalışmada kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimleri XRF ile yapılmıştır. XRF ile belirlenen kimyasal bileşimde dikkate alınarak XRD ile de mineralojik yapı tespiti yapılmıştır. Belli harç numunesi guruplarından kesilen parçalar üzerinden de SEM analizleri yapılmıştır.

2.4. Bulgular

2.4.1. Harç Numunelerin Basınç Dayanımları

Bu çalışmada 13 farklı kompozisyonda üretilen harç numunelerden elde edilen eğilme ve basınç dayanımları Tablo 10, Tablo 11 ve Tablo 12’de verilmiştir. Tablo

10'da 13 farklı bağlayıcı ile üretilen dört farklı sıcaklıkta kür uygulanan numunelerden 7. günde ölçülen basınç dayanımlarıdır.

Tablo 10. Harç numunelerin 7 günlük basınç dayanımı değerleri

Numune Kodu	7/75	7/90	7/105	7/120
OB100AC0UC0	37,05	41,70	38,93	36,20
OB75AC25UC0	25,40	35,30	33,40	30,37
OB75AC0UC25	44,05	49,60	45,20	36,80
OB50AC50UC0	25,65	27,40	29,30	30,02
OB50AC0UC50	21,95	30,60	25,90	24,27
OB25AC25UC50	29,30	27,40	34,20	34,70
OB25AC50UC25	35,60	33,10	32,80	30,72
OB25AC0UC75	27,30	30,30	33,65	30,25
OB25AC75UC0	27,45	31,80	28,70	31,10
OB0AC25UC75	28,60	26,10	31,30	24,75
OB0AC75UC25	32,65	28,70	25,30	23,65
OB0AC100UC0	32,60	33,10	36,80	21,85
OB0AC0UC100	43,05	41,30	36,70	29,35

OB:Obsidyen AC:Atık Cam UC: Uçucu Kül (28/75; 28: Gün, 75: Isıl kür sıcaklığı)

Tablo 10'daki her bir basınç dayanımı altı numunenin ortalama basınç dayanımıdır. Tablo 10'da en yüksek basınç dayanımı 49,6 MPa ile %75 obsidyenle %25 uçucu kül karışımı içeren bağlayıcılı 90 °C sıcaklık uygulanmış numunelerde tespit edilmiştir. En düşük basınç dayanımına ise 25,3 MPa ile %75 atık cam ile %25 uçucu kül karışımı içeren numunelerde rastlanmıştır.

Tablo 11'de 75°C, 90 °C, 105 °C ve 120 °C'de üç gün yüksek sıcaklık kürü uygulanan numunelerden 28. gününde elde edilen basınç dayanımları görülmektedir. Tablo 11'deki en yüksek basınç dayanımına 60,13 MPa ile %25 obsidyen ile %75 atık cam karışımı içeren numunelerde rastlanmıştır.

Tablo 11. Harç numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değerleri

Numune Kodu	28/75	28/90	28/105	28/120
OB100AC0UC0	37,43	46,4	41,48	41,40
OB75AC25UC0	52,13	48,6	40,55	36,22
OB75AC0UC25	49,50	45,9	37,13	39,40
OB50AC50UC0	49,65	52,10	44,85	38,62
OB50AC0UC50	41,30	34,00	30,57	26,57
OB25AC25UC50	47,85	46,40	45,63	38,37
OB25AC50UC25	50,73	41,00	41,55	42,57
OB25AC0UC75	40,80	34,90	36,15	37,50
OB25AC75UC0	60,13	55,00	40,67	39,22
OB0AC25UC75	32,55	30,30	30,49	33,07
OB0AC75UC25	48,65	46,70	40,30	39,40
OB0AC100UC0	49,10	52,60	40,30	45,32
OB0AC0UC100	30,75	35,80	39,63	36,07

OB:Obsidyen AC:Atık Cam UC: Uçucu Kül (28/75; 28: Gün, 75: Isıl kür sıcaklığı)

Tablo 12'den yüksek basınç dayanımı 49,05 MPa ile %100 obsidyen içeren numunelerde, en düşük basınç dayanımı ise 19,7 MPa ile %75 obsidyen ile %25 uçucu kül karışımına sahip numunelerde tespit edilmiştir.

Tablo 12. Harç numunelerin 90 günlük basınç dayanımı değerleri

Numune Kodu	90/75	90/90	90/105	90/120
OB100AC0UC0	49,05	42,30	32,98	32,05
OB75AC25UC0	24,50	26,70	28,00	29,65
OB75AC0UC25	21,10	19,70	32,13	24,25
OB50AC50UC0	27,00	26,10	38,50	35,57
OB50AC0UC50	21,03	22,30	22,38	29,57
OB25AC25UC50	40,15	35,20	42,05	33,60
OB25AC50UC25	48,73	41,70	42,50	48,32
OB25AC0UC75	27,60	38,40	42,53	31,97
OB25AC75UC0	33,93	29,60	22,87	25,87
OB0AC25UC75	38,73	48,30	35,10	29,30
OB0AC75UC25	47,90	46,70	33,33	29,75
OB0AC100UC0	24,70	24,20	32,98	34,52
OB0AC0UC100	30,5	29,60	27,18	20,17

OB:Obsidyen AC:Atık Cam UC: Uçucu Kül (28/75; 28: Gün, 75: Isıl kür sıcaklığı)

2.4.2. Harç Numunelerin Eğilme Dayanımları

Tablo 13, Tablo 14 ve Tablo 15'te harç numunelerde sırasıyla 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları görülmektedir. Tablo 13'te en yüksek eğilme dayanımı 14,65 MPa ile %75 atık cam ile %25 uçucu kül karışımı içeren numunelerde, en düşük eğilme dayanımı 3,6 MPa %25 atık cam ile %75 uçucu kül karışımı içeren numunelerde tespit edilmiştir.

Tablo 13. Harç numunelerin 7 günlük eğilme dayanımı değerleri

Numune Kodu	7/75	7/90	7/105	7/120
OB100AC0UC0	11,25	10,80	8,10	7,80
OB75AC25UC0	13,30	6,25	9,45	9,75
OB75AC0UC25	13,90	7,45	9,95	6,70
OB50AC50UC0	15,20	4,60	9,95	4,85
OB50AC0UC50	8,60	5,95	9,50	5,20
OB25AC25UC50	12,30	6,75	6,35	7,10
OB25AC50UC25	9,70	6,10	4,50	5,25
OB25AC0UC75	11,30	7,45	7,30	6,50
OB25AC75UC0	8,75	6,40	4,70	3,75
OB0AC25UC75	6,30	3,60	6,90	3,60
OB0AC75UC25	14,65	6,50	3,65	2,25
OB0AC100UC0	13,50	4,85	6,50	2,25
OB0AC0UC100	12,00	6,05	7,45	5,90

OB:Obsidyen AC:Atık Cam UC: Uçucu Kül (28/75; 28: Gün, 75: Isıl kür sıcaklığı)

Tablo 14'te en yüksek eğilme dayanımına 16,9 MPa ile %75 obsidyen ile %25 uçucu kül içeren bağlayıcılı numunelerde rastlanırken en düşük eğilme dayanımı 5,7 MPa ile %100 uçucu kül içeren numunelerde tespit edilmiştir.

Tablo 14. Harç numunelerin 28 günlük eğilme dayanımı değerleri

Numune Kodu	28/75	28/90	28/105	28/120
OB100AC0UC0	12,45	13,40	13,75	11,75
OB75AC25UC0	17,30	15,95	11,65	6,05
OB75AC0UC25	13,55	16,90	8,80	6,05
OB50AC50UC0	16,30	11,10	7,30	5,75
OB50AC0UC50	8,24	9,15	7,80	5,25
OB25AC25UC50	11,00	10,70	9,60	8,50
OB25AC50UC25	12,60	11,70	10,50	8,20
OB25AC0UC75	12,20	7,65	8,00	6,85
OB25AC75UC0	14,40	9,60	6,90	6,00
OB0AC25UC75	7,80	8,90	8,50	8,25
OB0AC75UC25	15,40	12,60	9,50	7,40
OB0AC100UC0	14,20	13,40	4,30	5,30
OB0AC0UC100	5,70	11,00	7,10	7,25

OB:Obsidyen AC:Atık Cam UC: Uçucu Kül (28/75; 28: Gün, 75: Isıl kür sıcaklığı)

Tablo 15’te en yüksek eğilme dayanımı 17,5 MPa OB0AC75UC25 serisi harçlarda, en düşük eğilme dayanımına 2,65 MPa ile OB0AC100UC0 serisi harçlarda görülmüştür.

Tablo 15. Harç numunelerin 90 günlük eğilme dayanımı değerleri

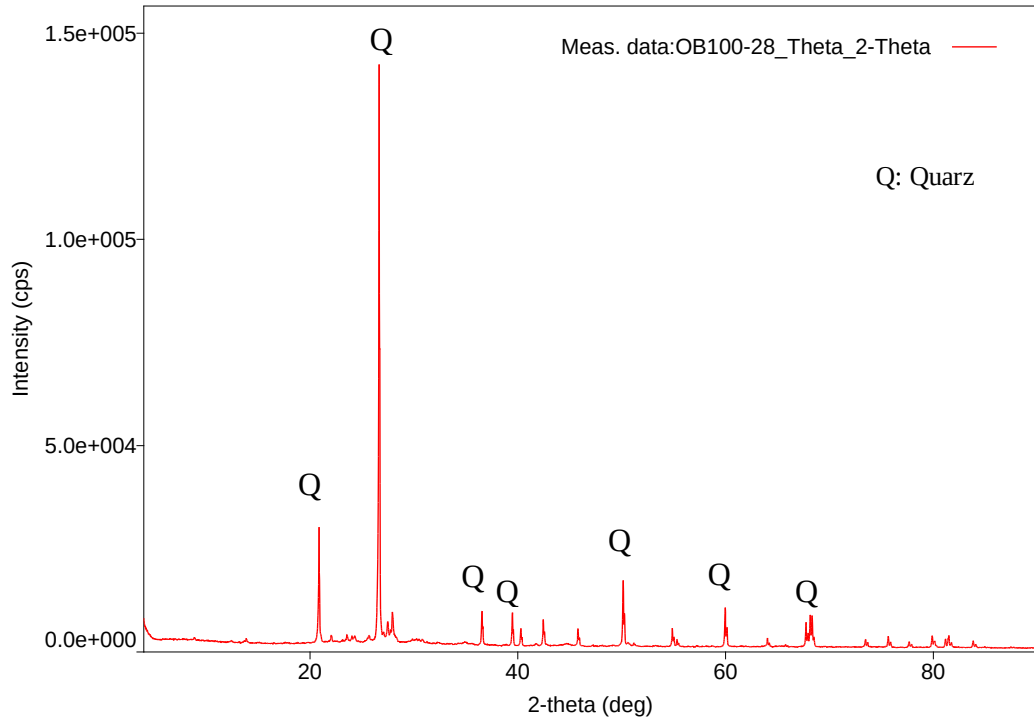
Numune Kodu	90/75	90/90	90/105	90/120
OB100AC0UC0	17,00	16,9	8,20	9,20
OB75AC25UC0	4,50	5,15	4,70	4,50
OB75AC0UC25	5,75	5,45	5,35	6,00
OB50AC50UC0	5,10	5,20	5,25	5,20
OB50AC0UC50	5,80	5,60	6,35	5,60
OB25AC25UC50	7,85	6,95	7,40	4,20
OB25AC50UC25	10,25	10,05	5,90	6,30
OB25AC0UC75	7,10	5,75	8,70	6,60
OB25AC75UC0	4,10	4,15	3,00	4,45
OB0AC25UC75	8,30	9,65	7,75	4,95
OB0AC75UC25	17,5	9,80	5,65	4,50
OB0AC100UC0	3,10	2,65	5,40	4,70
OB0AC0UC100	4,60	4,40	7,10	4,80

OB:Obsidyen AC:Atık Cam UC: Uçucu Kül (28/75; 28: Gün, 75: Isıl kür sıcaklığı)

2.4.3. Harç Numunelerdeki Mikroyapı Analizleri

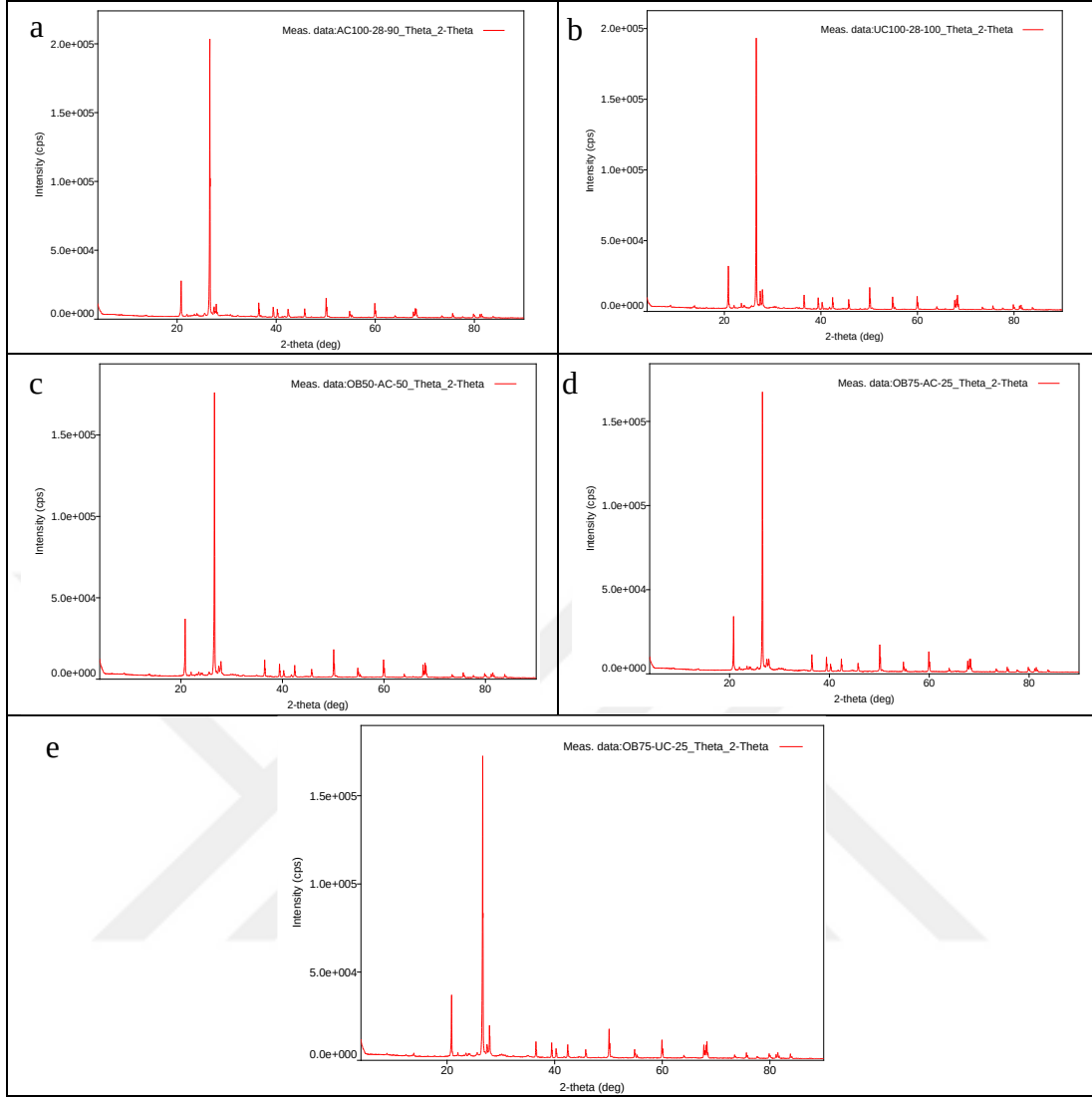
2.4.3.1. XRD Analizleri

Şekil 18’deki XRD analizi %100 obsdiyen içeren harç numunesinden alınan örneğin toz haline getirilen numunesinden elde edilmiştir.



Şekil 18. XRD analizi yapılan OB100AC0UC0 numunesine ait görüntü

Şekil 18’de görülen baskın pikin kuvars minerali olduğu tespit edilmiştir. Şekil 18 gibi Şekil 19(a), Şekil 19(b), Şekil 19 (c), Şekil 19(d) ve Şekil 19(e) numunelerinden elde edilen XRD analizi benzer desende olmakla birlikte ana kuvars minerali ile birlikte mullit, illit, lösit ve kalsit formlarıda tespit edilmiştir.

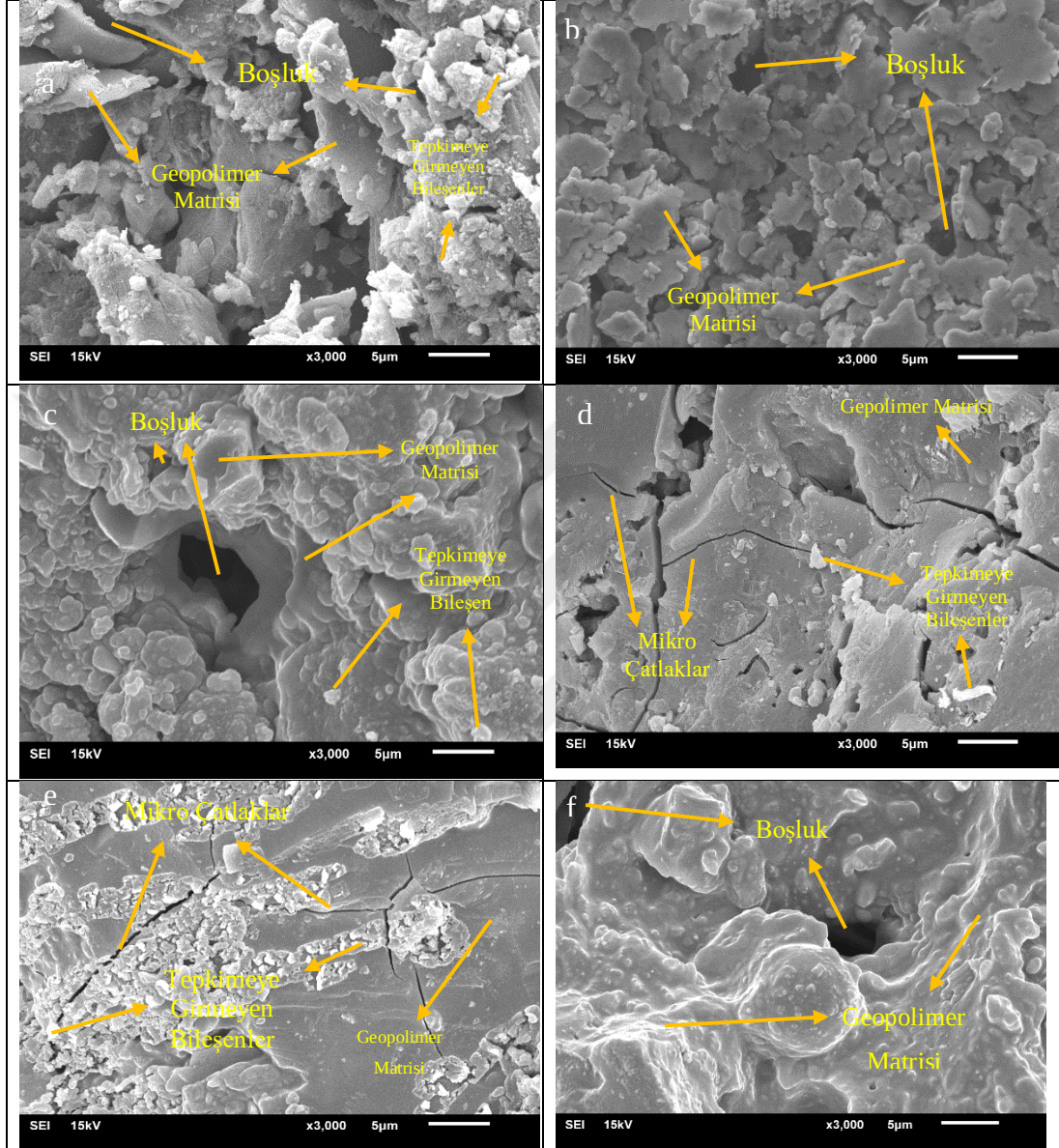


Şekil 19. XRD analizi yapılan numunelere ait görüntüler(a:OB0AC100UC0, b:OB0AC0UC100, c: OB50AC50UC0, d: OB75AC25UC0, e: OB75AC0UC25)

2.4.3.2. SEM-EDS Analizleri

Harç numunelerde ağırlıkça farklı oranlarda kullanılan bağlayıcı malzemeler arasındaki potansiyel ilişki için karakterizasyon sağlamak, oluşan farklı formlar ve geopolimer matrisler ile elde edilen dayanımlar arasındaki ilişkinin açıklanabilmesi için SEM ve EDS analizleri yapılmıştır. Çalışma kapsamında oluşturulan farklı karışımlardan %100 saf bağlayıcıların kullanıldığı ve ağırlıkça farklı oranlarda beraber kullanıldıkları karışımlar seçilerek daha net yorum yapılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda OB100AC0UC0, OB0AC100UC0, OB0AC0UC100, OB50AC50UC0,

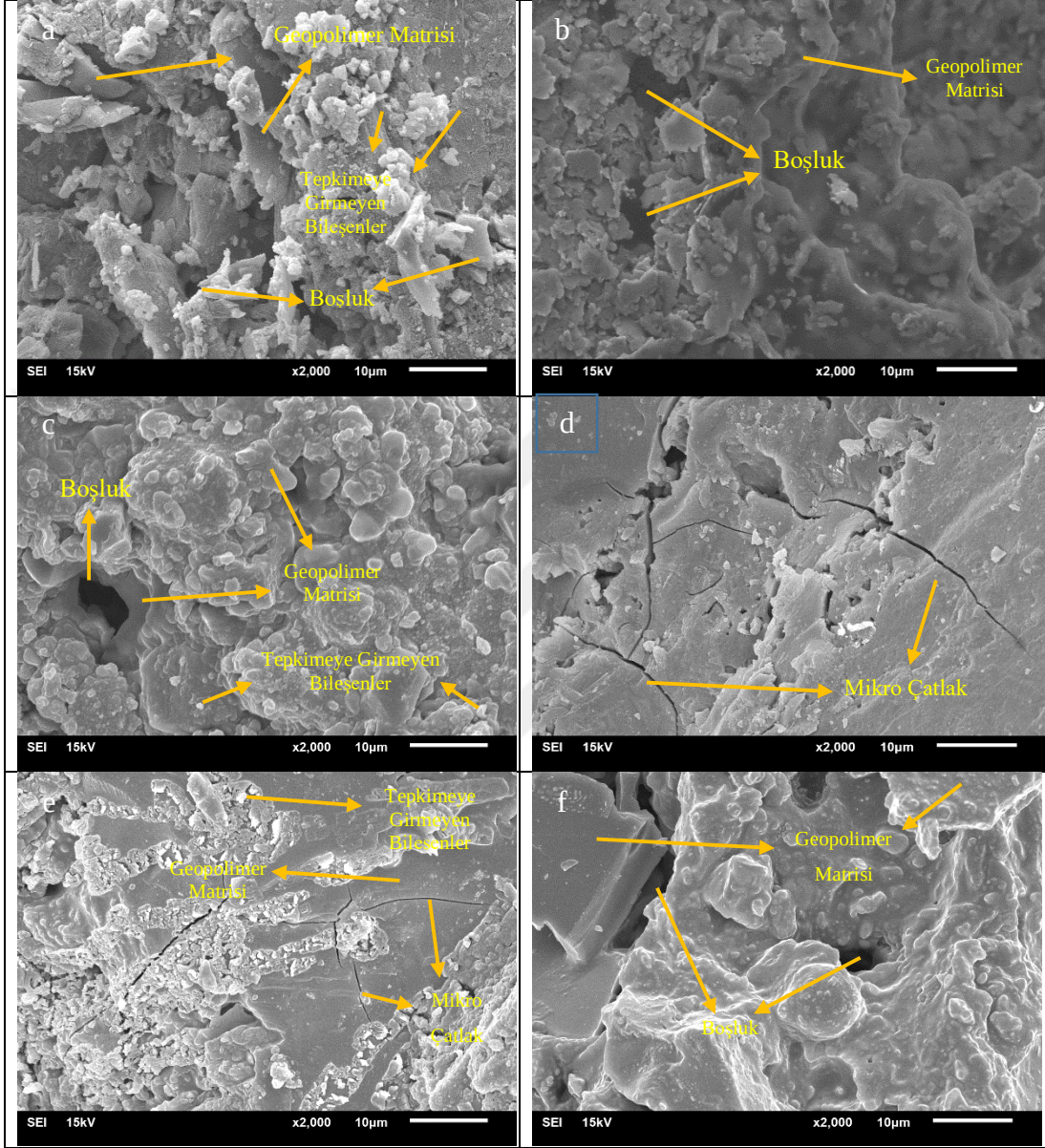
OB75AC25UC0 ve OB75AC0UC25 gibi farklı numuneler incelenmiştir. İncelenen numunelerden elde edilen farklı formlar ve görüntüler aşağıda verilmiştir.



Şekil 20. SEM analizi yapılan numunelere ait x3000 kez büyütülmüş görüntüler(a:OB100AC0UC0, b:OB0AC100UC0, c:OB0AC0UC100, d: OB50AC50UC0, e: OB75AC25UC0, f: OB75AC0UC25)

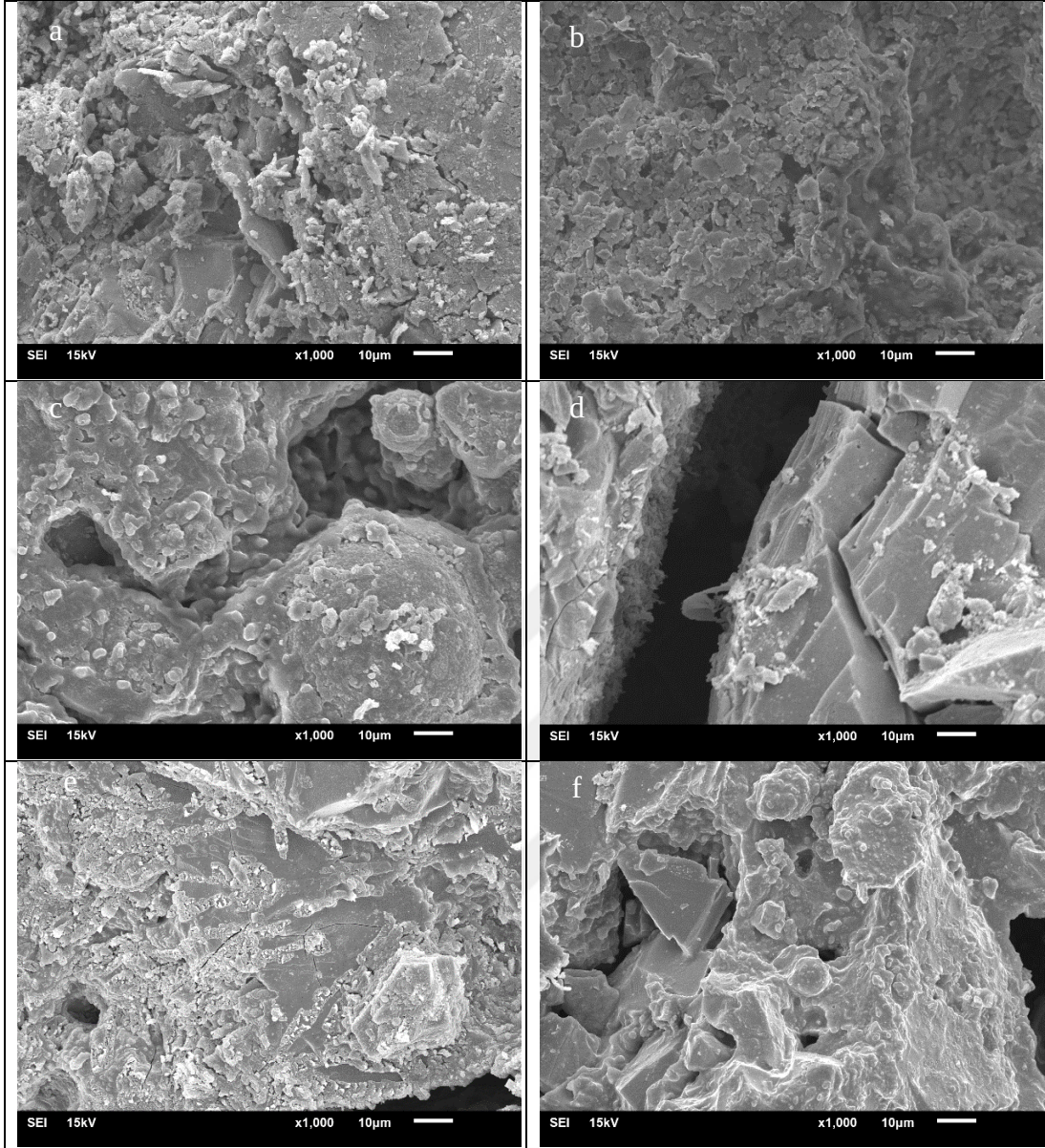
Şekil 20’de 6 farklı numuneye ait SEM görüntüleri 3000 kez büyütülerek elde edilmiştir. Şekil 20 (a)’da %100 obsidyen içeren harç numunelerin iç yapısı, boşluklar ve obsidyen parçacıkları belirgin olarak görülmektedir. Şekil 20 (b) atık cam içeren numunelerden elde edilmiş olup boşluklar ve cam taneciklerinden oluşmaktadır. Şekil 20 (c)’de uçucu külün ince yapısı ve harç numunesindeki boşluk görülmektedir. Şekil

20 (d) (e) ve (f) 'de obsidyen, atık cam ve uçucu kül karışımlarında yapı içerisindeki taneler, boşluk ve bazı çatlaklar görülmektedir.



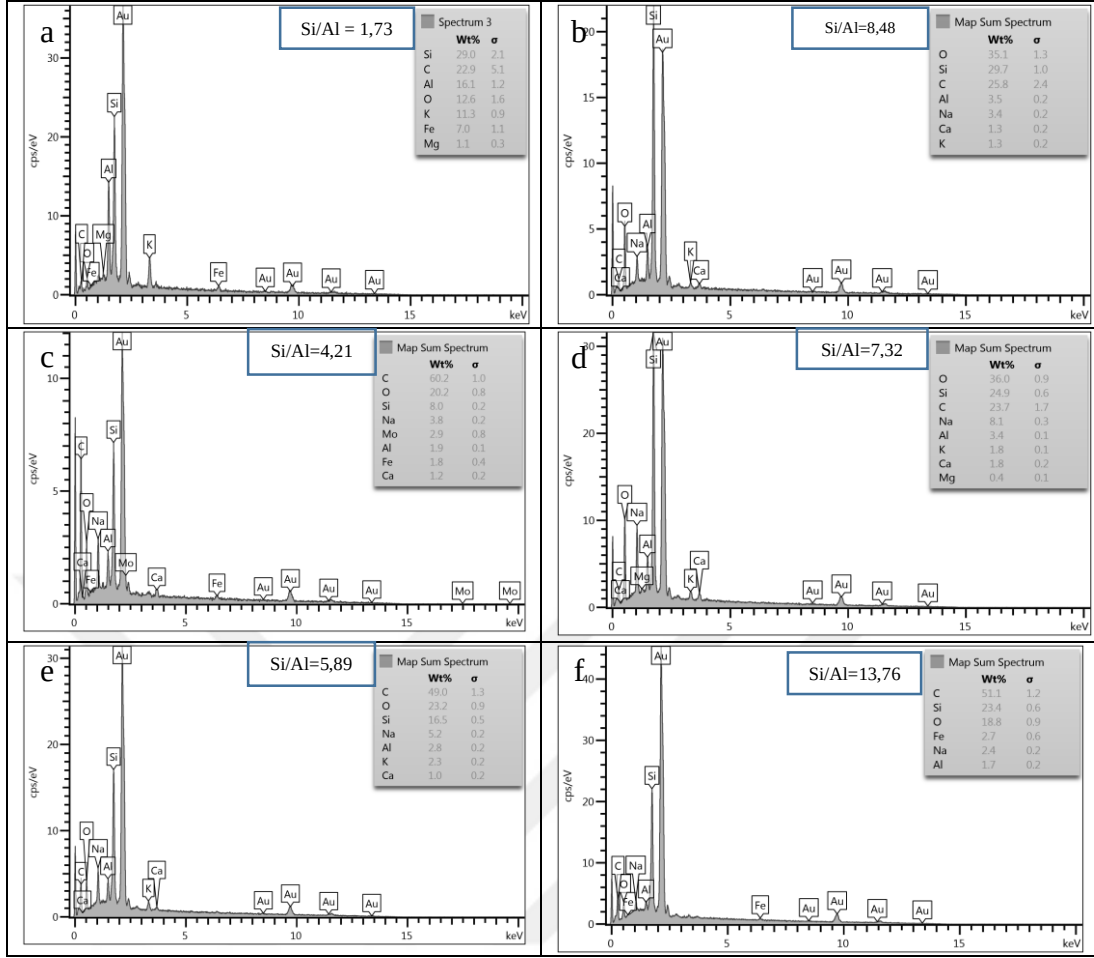
Şekil 21. SEM analizi yapılan numunelere ait x2000 kez yaklaştırılmış görüntüler(a:OB100AC0UC0, b:OB0AC100UC0, c:OB0AC0UC100, d: OB50AC50UC0, e: OB75AC25UC0, f: OB75AC0UC25)

Şekil 21’de görülen numunelere 2000 kez büyütülmesiyle elde edilen görsellerdir.



Şekil 22. SEM analizi yapılan numunelere ait x1000 kez yaklaştırılmış görüntüler(a:OB100AC0UC0, b:OB0AC100UC0, c:OB0AC0UC100, d: OB50AC50UC0, e: OB75AC25UC0, f: OB75AC0UC25)

Şekil 22 harç numunelerin 1000 kez büyütülmesiyle elde edilen görsellerdir. Şekil 20, Şekil 21 ve Şekil 22’de harçların iç yapıları, boşluk durumları ve harç numune içerisindeki çatlaklar görülmektedir.



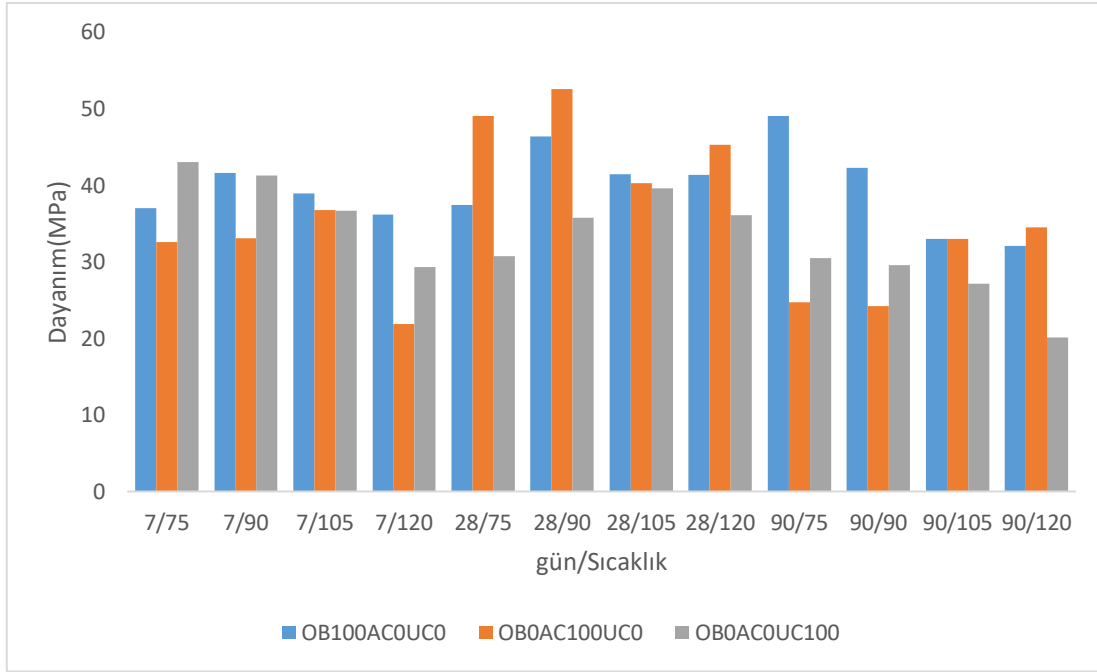
Şekil 23. EDS Spektroskopileri (a:OB100AC0UC0, b:OB0AC100UC0, c:OB0AC0UC100, d: OB50AC50UC0, e: OB75AC25UC0, f: OB75AC0UC25)

Şekil 23'te SEM analizleri gerçekleştirilen numunelere ait EDS analizleri verilmektedir. Yapılan EDS analizleri sonucunda numune yüzeylerinde bulunan element içerikleri oranları görüntülerde verilmektedir. Numunelere ait Si/Al oranı en yüksek 13,76 ile OB75AC0UC25 numunesinden elde edilirken, en düşük 1,73 ile OB100AC0UC0 numunesinden elde edilmiştir.

3. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

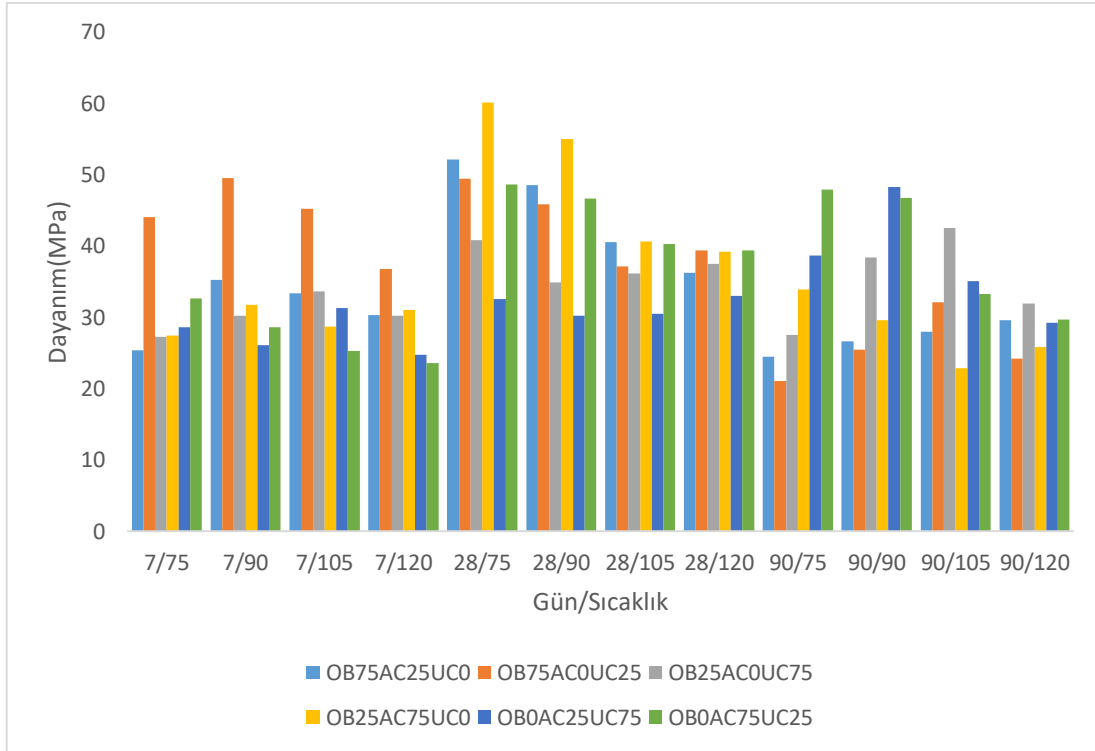
3.1 Tartışma

Şekil 24'te %100 obsidyen, %100 atık cam ve %100 uçucu kül içeren harç numunelerden elde edilen basınç dayanımları görülmektedir. Şekil 24'te en yüksek basınç dayanımı değeri OB00AC100UC0 serisi %100 atık cam içeren 28 günlük 90 °C sıcaklığa maruz bırakılan harç numunelerinde 52,60 MPa olarak elde edilmiştir. Şekil 24'teki en düşük basınç dayanımı ise OB0AC0UC100 serisi %100 uçucu kül içeren 90 günlük 120 °C'ye maruz kalan numunelerde 20,175 MPa olarak elde edilmiştir. Tek bağlayıcı içeren harç numunelerde en yüksek basınç dayanımları obsidyen ve atık cam içeren karışımlardan elde edilmiştir. Uçucu kül kullanılan harç numunelerin diğer karışımlara nazaran daha düşük basınç dayanımına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Altındal (2020) ağırlıkça %25 değişimlerle farklı oranlarda uçucu kül ve yüksek fırın cürufu karıştırarak elde ettiği numunelerde en yüksek dayanımı 28 günde 34,68 MPa olarak elde etmiştir. Altındal (2020) yüksek fırın cürufu içeriği yüksek numunelerde daha yüksek basınç dayanımlarına ulaşmıştır. Şekil 24'te tüm numune gruplarında en yüksek basınç dayanımlarına 28 günlük 90 °C'ye maruz kalmış numunelerde rastlanmıştır. 105 °C ve 120 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerin basınç dayanımlarında 75 °C ve 90 °C sıcaklığa maruz kalan numunelere göre belirgin bir azalma meydana gelmiştir.



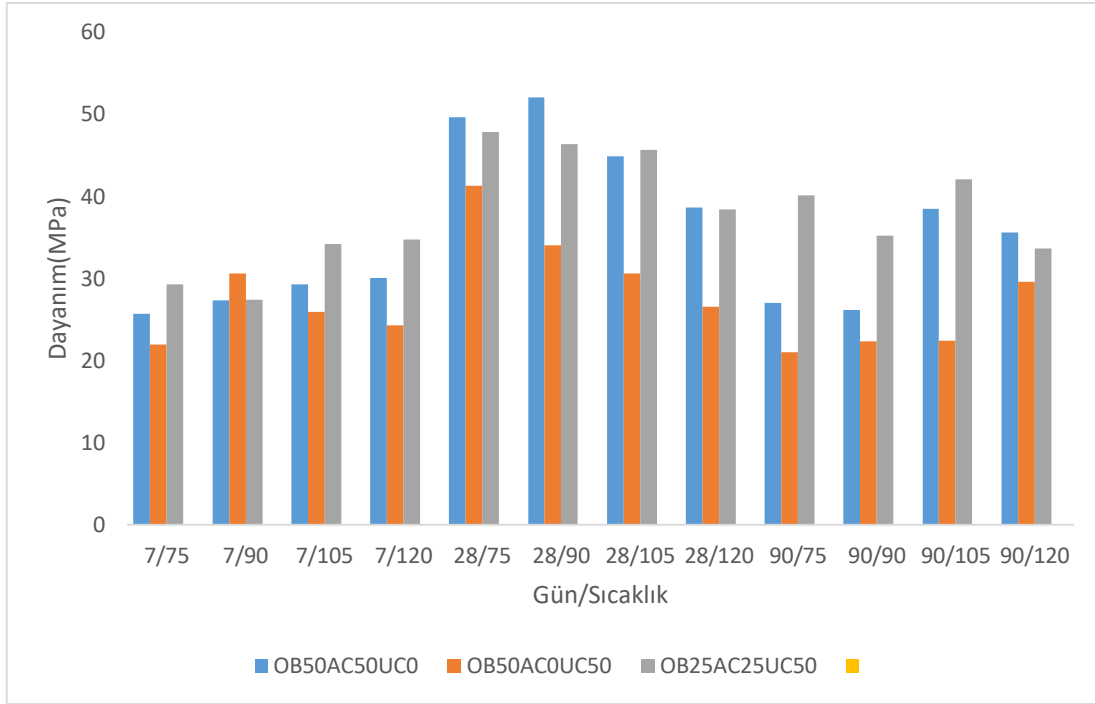
Şekil 24. %100 oranında obsidyen, atık cam ve uçucu kül kullanılan harç numunelerinin basınç dayanımları

Şekil 25'te ağırlıkça %75 oranında obsidyen, atık cam ve uçucu kül içeren numunelerin basınç dayanımları görülmektedir. Şekil 25'te en yüksek basınç dayanımı 60,133 MPa olarak OB75AC25UC0 serisi 28 günlük 75 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde tespit edilmiştir. En düşük basınç dayanımı değeri ise 21,1 MPa olarak OB75AC0UC25 serisi 90 günlük 75 °C sıcaklığa maruz numunelerde rastlanmıştır. Mikro yapı analizlerinde de obsidyen ve atık cam bağlayıcılı harç numunelerde uçucu kül bağlayıcılı numunelere göre daha kompakt içyapıya, yani daha az çatlak ve boşluksuz yapıya rastlanmıştır. Bu durum obsidyen ve atık cam içeren harç numunelerin dayanımlarının da yüksek olmasına yol açmıştır. Annakoa (2019) yüksek fırın cürufuna atık cam ikame edilerek yapılan çalışmada atık cam kullanılarak elde edilen numunelerden 28 günde 58,8 MPa basınç dayanımı değeri edilmiştir. Bu çalışmada atık cam bağlayıcılı numunelerin basınç dayanımı olan 60,133 MPa değeri Annakoa tarafından elde edilen değerden sadece %2 oranında daha fazladır. Bu çalışmada atık cam ile üretilen numunelerin basınç literatürde verilen değerlerle benzerlik göstermektedir.



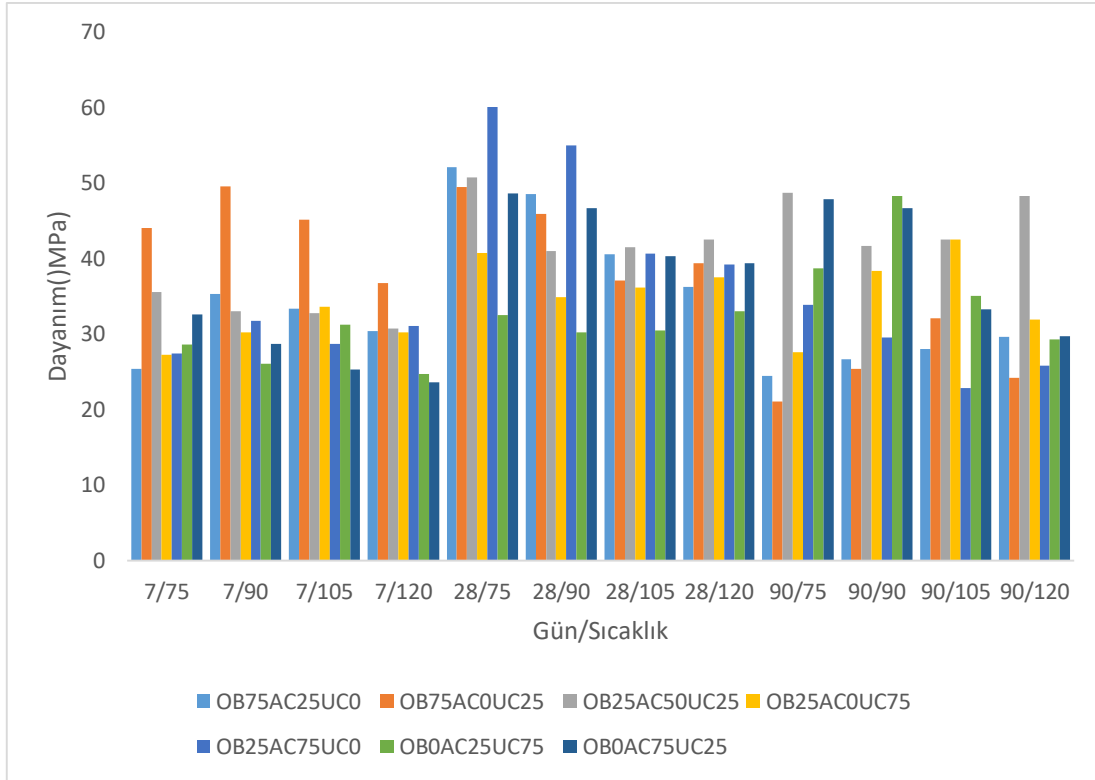
Şekil 25. %75 oranında obsidyen, atık cam ve uçucu kül kullanılan harç numunelerinin basınç dayanımları

Şekil 26’da ağırlıkça %50 oranlarda obsidyen, atık cam ve uçucu kül içeren harç numunelerin basınç dayanımları görülmektedir. Şekil 26’da en yüksek basınç dayanımına 52,075 MPa olarak OB25AC50UC25 serisi 28 günlük 90°C sıcaklığa maruz kalan numunelerde tespit edilmiştir. En düşük dayanım ise 21,025 MPa olarak OB50AC0UC50 serisi 90 günlük 75 °C sıcaklığa maruz kalmış numunelerdedir. Tüm harç numunelerin 90 günlük basınç dayanımlarında 28 günlük basınç dayanımlarına göre azalma meydana gelmiştir. Ağırlıkça %50 oranında değişim gösteren farklı karışımlardan elde edilen numunelerin basınç dayanımları obsidyen ve atık cam içeren numunelerde daha yüksek olduğu, uçucu kül ilavesinde ise basınç dayanımında azalma meydana geldiği görülmektedir. Al-Azzawi (2019) F sınıfı uçucu kül tabanlı ağırlıkça %10, 20, 30, 40, 50 metakaolin ikameli olarak üretilen numunelerden ağırlıkça %50 atık cam ve %50 metakaolin kullanılan numunelerde 28 günde 60,2 MPa basınç dayanımı elde etmiştir. Çalışma kapsamında ağırlıkça %50 oranında atık cam ve %50 obsidyen içeren numunelerden elde edilen basınç dayanımları Al-Azzawi (2019)’nin elde ettiği basınç dayanım değerleriyle benzerdir.



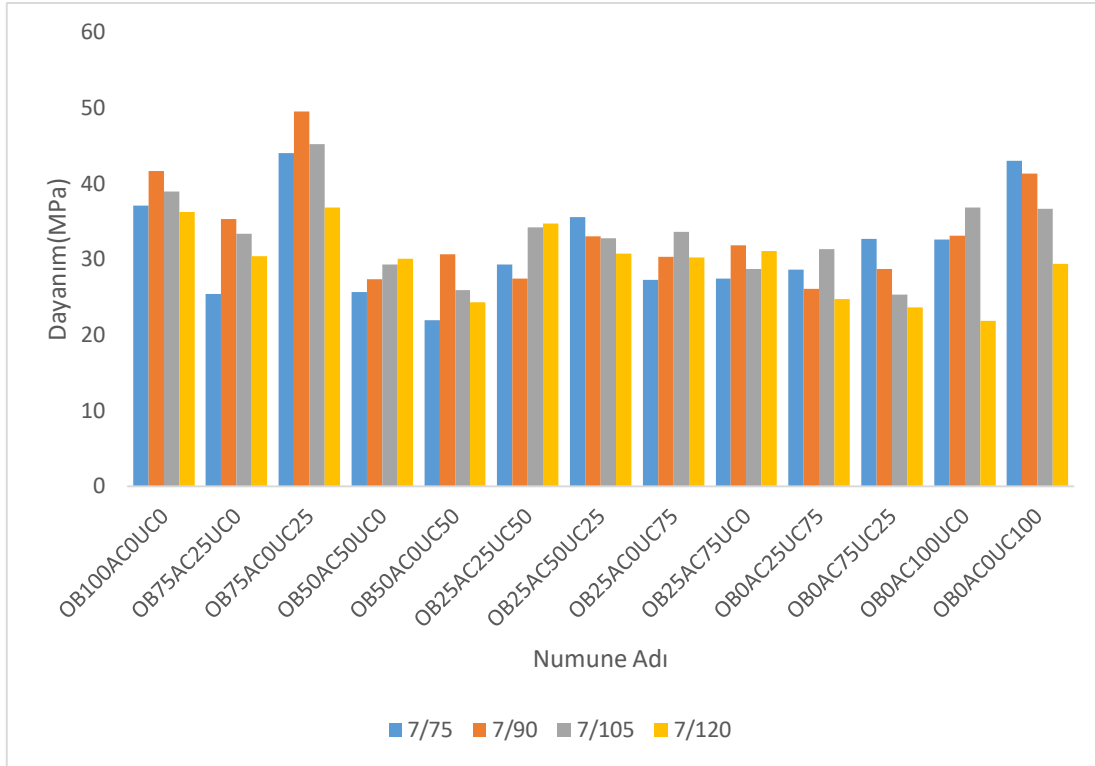
Şekil 26. %50 oranında obsidyen, atık cam ve uçucu kül kullanılan harç numunelerinin basınç dayanımları

Şekil 27’de ağırlıkça %25 oranında değişen bağlayıcılar içeren numunelere ait basınç dayanımları görülmektedir. Şekil 27’de en yüksek basınç dayanımı 60,133 MPa olarak OB25AC75UC0 serisi 28 günlük 75 °C sıcaklığa maruz kalmış numunelerde elde edilmiştir. En düşük dayanım ise 21,1 MPa olarak OB50AC0UC50 serisi 90 günlük 75 °C sıcaklığa maruz kalmış numunelerdedir. 28 günlük karışımlarda en uygun sıcaklığın literatüre paralel olarak 75 ve 90 °C derece olduğu gözlemlenmiştir. Ekinci (2017) farklı molarlarda sodyum hidroksit (NaOH), bağlayıcı/aktivatör ve ısıtıcı kür sıcaklıkları kullanılarak elde ettiği geopolimer numunelerden en ideal kür sıcaklığı 90 °C olarak belirlemiştir. Durak(2019) nanoparçacık katkı ve uçucu kül kullanılarak üretilen geopolimer numuneler 60, 75 ve 90 °C gibi farklı sıcaklıklarda ısıtıcı işlemine maruz bırakılmış ve 75 °C’de en yüksek basınç dayanımı 72,1 MPa olarak elde edilmiştir. Çalışma kapsamında 75 °C ve 90 °C’de elde edilen değerler ile literatürden elde edilen değerler paralellik göstermektedir.



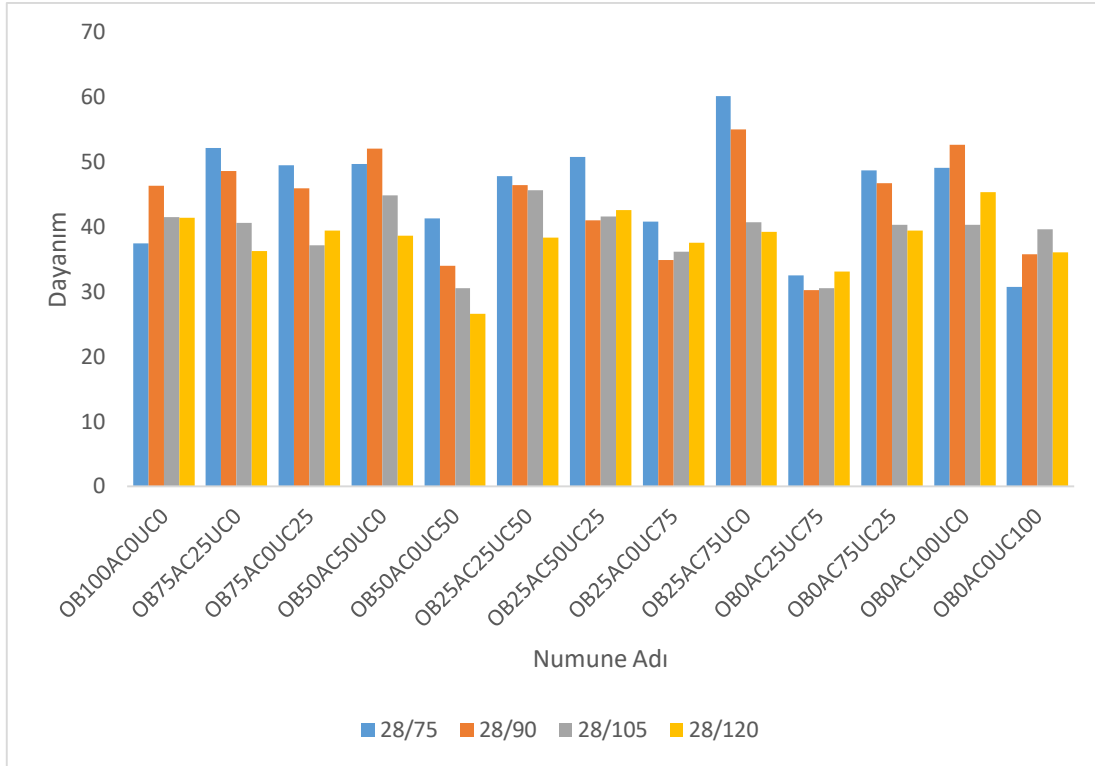
Şekil 27. %25 oranında obsidyen, atık cam ve uçucu kül kullanılan harç numunelerinin basınç dayanımları

Şekil 24, 25, 26 ve 27 incelendiğinde; 28 günlük dayanımların 7 ve 90 günlük dayanımlara göre tüm kür sıcaklıkları için daha yüksek değerlere sahip olduğu sonucuna varılabilmektedir. Ayrıca yüksek basınç dayanımı olan numuneler genel itibari ile obsidyen ve atık cam içeriği yüksek olan numunelerden elde edildiği görülmektedir. Obsidyen ve atık cam içeriği yüksek olan numunelerden yüksek basınç dayanımlarını elde edilmesinde obsidyen ve atık camın sahip oldukları yüksek SiO_2 kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 28. 7 günlük basınç dayanımı değerleri

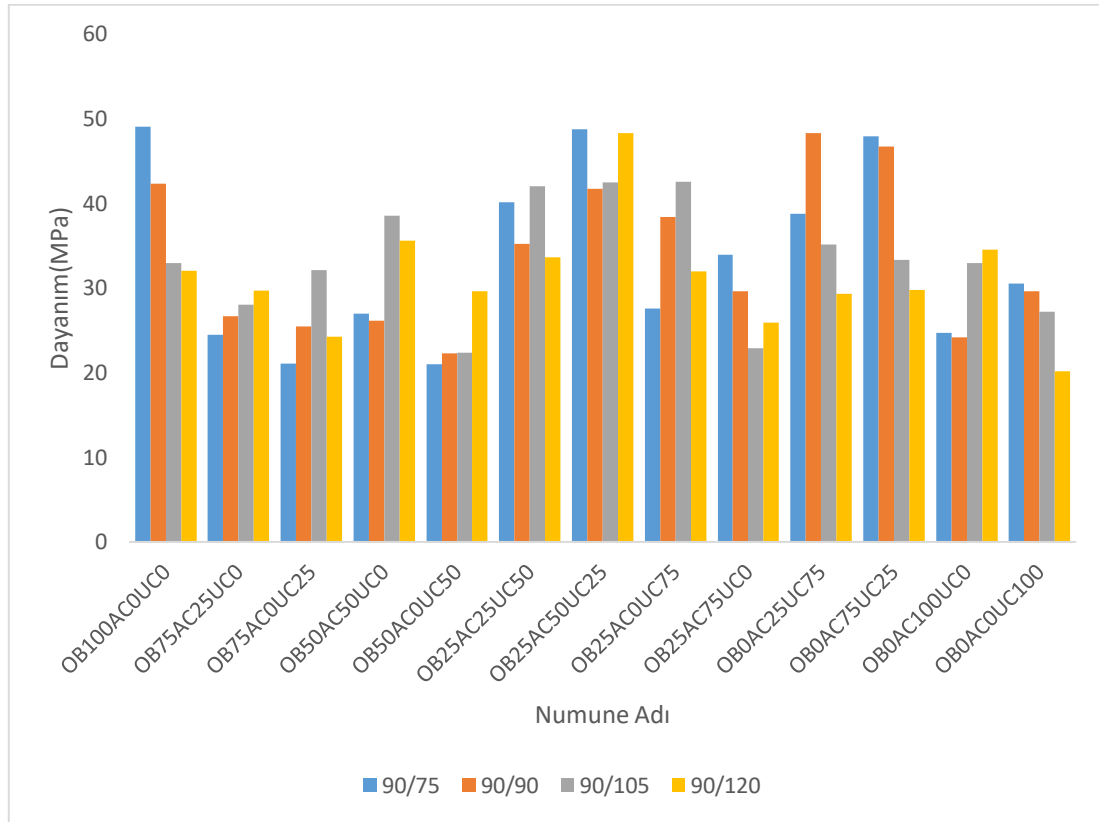
Şekil 28’de oluşturulan 13 farklı karışıma ait numunelerin 7 günlük basınç dayanımları görülmektedir. Şekil 27 incelendiğinde, en yüksek basınç dayanımı 49,55 MPa olarak OB75AC0UC25 serisi 7 günlük 90 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde tespit edilmiştir. En düşük dayanımın ise 21,85 MPa olarak OB0AC75UC25 serisi 7 gün 75 °C sıcaklığa maruz numunelerde elde edildiği görülmektedir. Numunelerin sahip oldukları basınç dayanımı değerleri sahip oldukları bağlayıcının içeriğine ve sıcaklık değerlerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Tüm karışımlara ait değerler genel itibari ile incelendiği durumda aynı sıcaklıkta ısıtılma işlemi uygulanan numunelerin maksimum basınç dayanımları sıcaklıklara göre değişkenlik göstermektedir. Şekil 28’deki basınç dayanımı değerleri incelendiğinde ağırlıkça obsidyen ve atık cam içeriği yüksek olan numunelerden elde edilen basınç dayanımları uygulanan ısıtılma sıcaklığı arttıkça azaldığı görülmüştür. Ancak ağırlıkça uçucu kül içeriği yüksek olan numunelerin ise uygulanan ısıtılma sıcaklığına paralel olarak elde edilen basınç dayanımlarının arttığı görülmektedir.



Şekil 29. 28 günlük basınç dayanımı değerleri

Şekil 29’de, oluşturulan 13 farklı karışıma ait farklı ısıl kür işlemine maruz bırakılmış numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değerleri verilmektedir. Şekil 28 incelendiğinde, en yüksek basınç dayanımı 60,13 MPa olarak OB75AC25UC0 serisi 28 gün 75 °C sıcaklığa maruz kalmış numunelerden elde edilmiştir. En düşük dayanım ise 26,58 MPa olarak OB50AC0UC50 serisi 28 günlük 120 °C sıcaklığa maruz kalmış numunelerden elde edilmiştir. Şekil 29’da verilen değerler incelendiğinde, elde edilen basınç dayanımları numunelerin maruz kaldığı ısıl kür sıcaklığı ve içerdiği bağlayıcı çeşidine göre değişkenlik göstermektedir. Şekil 29 ‘da yer alan 28 günlük basınç dayanımı değerleri incelendiğinde elde edilen yüksek dayanım eğiliminin 75 °C ve 90 °C gibi ısıl kür sıcaklığına maruz kalmış numunelerden elde edildiği görülmektedir. Kimyasal içeriğinde yüksek oranda SiO₂ bulunan numunelerden düşük sıcaklıklarda yüksek dayanım elde edilirken yüksek sıcaklıklarda ise düşük sıcaklıklarda elde edilen değerlerden daha düşük basınç dayanımlarının elde edildiği görülmektedir. Numunelerin içerdiği bağlayıcı çeşidi ve oranlarına bağlı olarak numuneler farklı kür sıcaklıklarında yüksek basınç dayanımları vermektedirler. 7 günlük dayanımlara paralel olarak obsidyen ve atık içeriği fazla olan

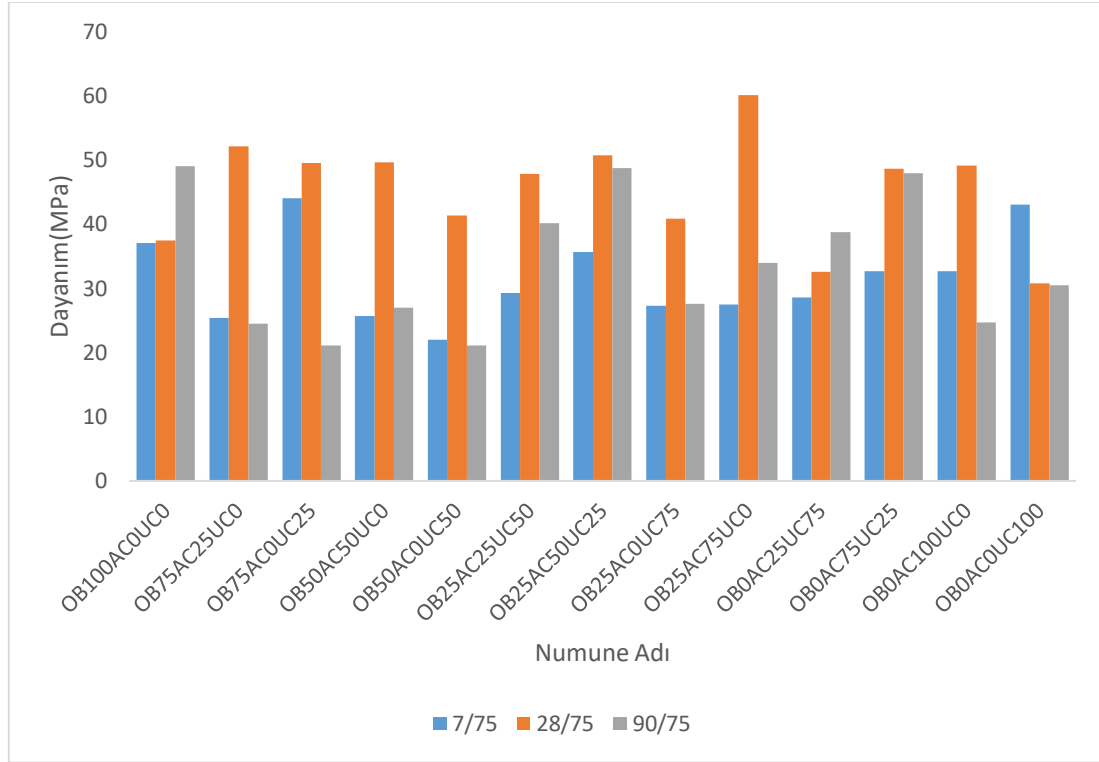
numuneler 75 °C ve 90 °C ısıl kür işlemine maruz bırakıldığı durumda daha yüksek dayanım değerleri elde edildiği görülmektedir. Annakoa (2019) atık cam ve yüksek fırın cüruf ikame ederek elde ettiği numunelerde 7 günlük en yüksek dayanım 54,93 MPa, 28 günlük en yüksek değer ise 58,8 MPa olarak elde edilmiştir. Çalışma kapsamında 7 günlük en yüksek dayanım 49,55 MPa, 28 günlük en yüksek dayanım ise 60,13 MPa olarak elde edilmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen değerler ile literatürde elde edilen değerler benzerlik göstermektedir.



Şekil 30. 90 günlük basınç dayanımı değerleri

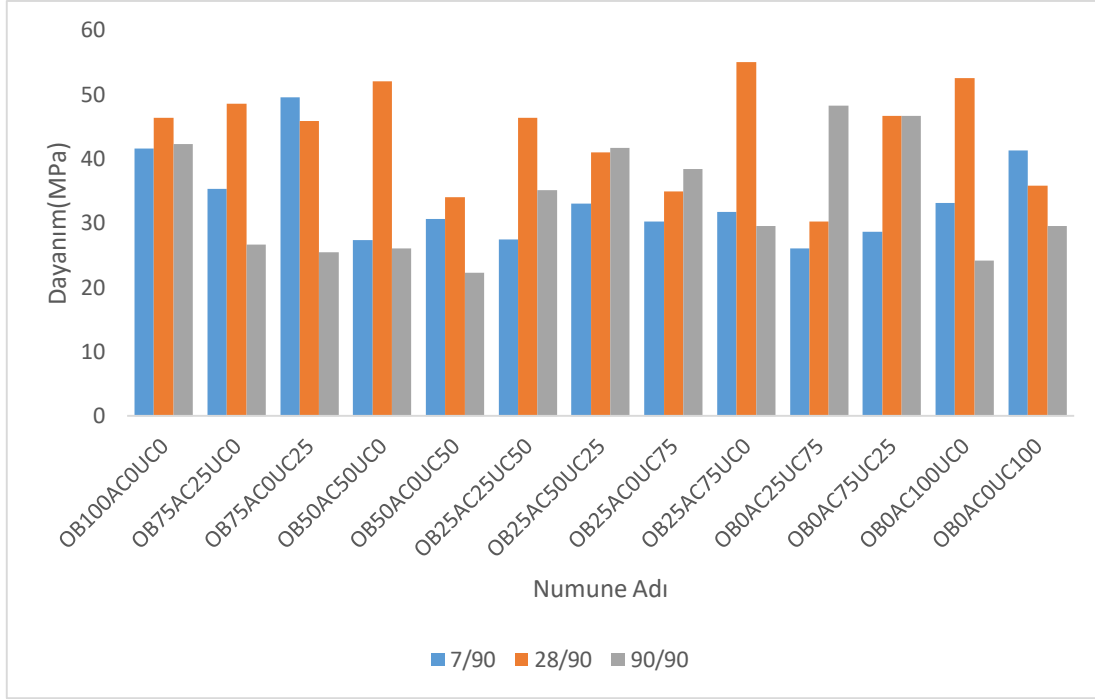
Şekil 30'de oluşturulan 13 farklı karışım için 90 günlük basınç dayanımı değerleri verilmektedir. Verilen değerler incelendiğinde, en yüksek basınç dayanımı 49,05 MPa olarak OB100AC0UC0 serisinde 90 günlük 75 °C ısıl kür işlemine maruz kalmış numunelerde elde edilmiştir. En düşük basınç dayanımı ise 21,1 MPa olarak OB75AC0UC25 serisi 90 günlük 75 °C sıcaklığa maruz kalmış numunelerde rastlanmıştır. Çalışma kapsamında elde edilen 90 günlük değerlerin 28 günlük değerlerden daha düşük olduğu görülmektedir. Koç (2021) silis dumanı katkılı uçucu

kül ile üretilen harçlarında silis dumanı içermeyen numunelerde 7 günlük dayanımlar ile 30 günlük dayanımlar arasında %30,57'lik dayanım kayıpları görülmektedir. Ayrıca silis dumanı içeren numunelerin 30 ile 90 günlük dayanımları arasında önemli derecede kayıplar dikkat çekmektedir. Ayrıca 28 ve 90 günlük dayanımlar arasında görülen basınç kayıpları literatürdeki çalışmalara benzer şekilde görülmüştür.



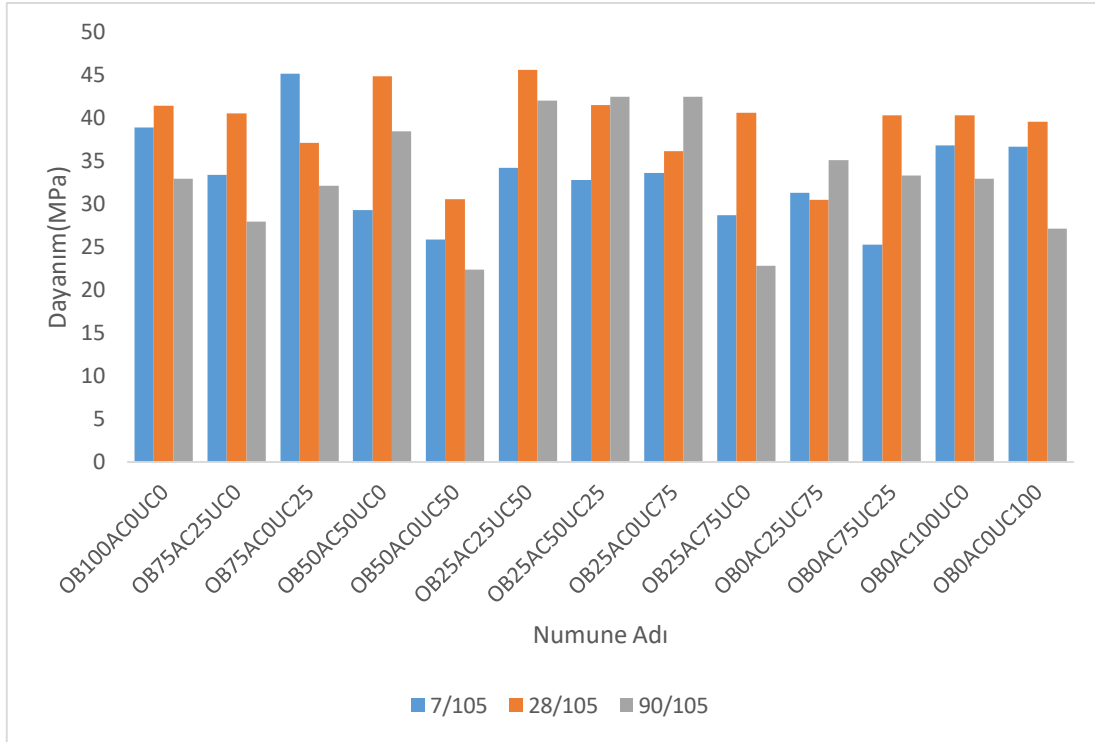
Şekil 31. 7, 28 ve 90 gün 75 °C ısı kütür işleme maruz kalmış numunelere ait basınç dayanımı değeri

Şekil 31’da 75 °C sıcaklığa maruz kalmış numunelere ait 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değeri verilmektedir. Numunelere ait değeri incelendiğinde, 28 günlük değeri 7 ve 90 günlük değeri den yüksek olduğu görülmektedir. Genel olarak değeri 28 günden sonra azalma eğilimine geçmektedir. Koç (2021) dayanımlarda 30 günden sonra önemli derecede kayıp yaşandığını görmüştür. Çalışma kapsamında bulunan değeri ve artış azalış eğilimlerinin literatür ile paralel olduğu görülmektedir 0



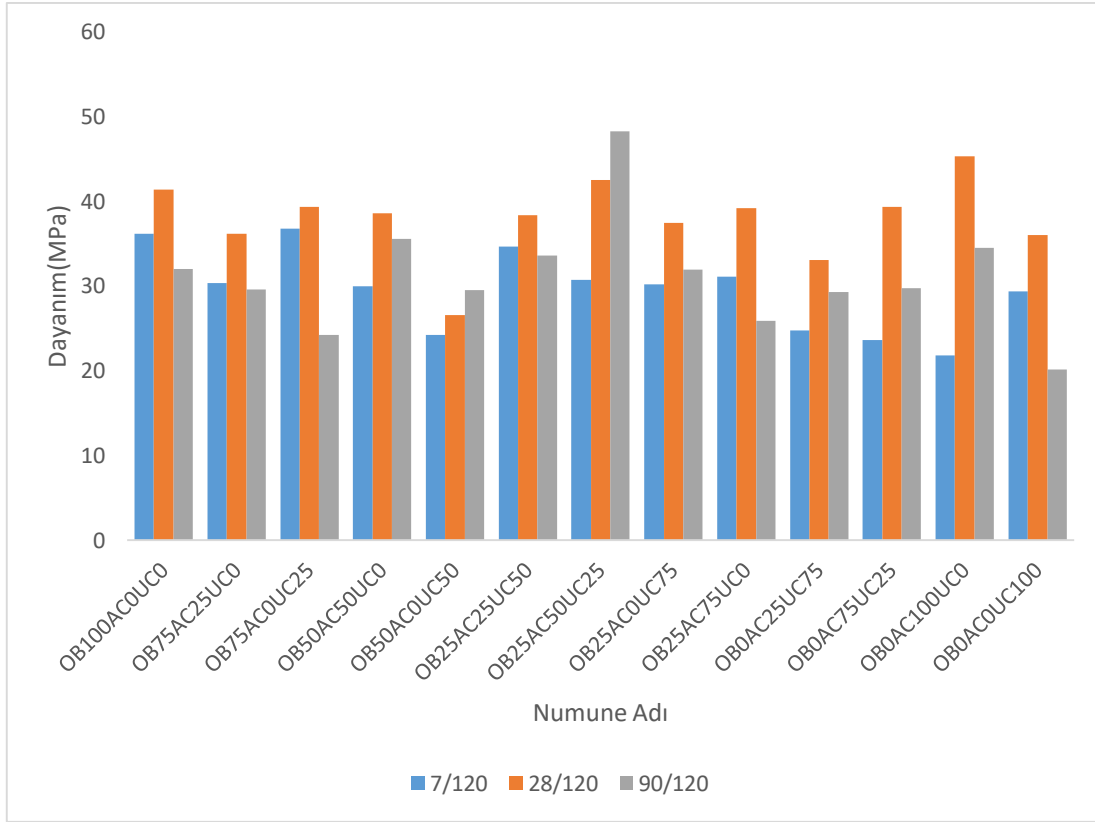
Şekil 32. 7, 28 ve 90 gün 90 °C ısıtılma işlemine maruz kalmış numunelere ait basınç dayanımı değerleri

Şekil 32’de 90 °C sıcaklığa maruz kalmış numunelere ait 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri verilmektedir. Numunelere ait değerler incelendiğinde, 28 gün 90 °C sıcaklığın numuneler için en uygun kür süresi ve kür sıcaklığı olduğu görülmektedir. İçeriğinde obsidyen ve atık cam içeriği fazla olan serilerde 7 günlük dayanımlar 90 günlük dayanımlardan fazla iken uçucu kül içeriği arttıkça 90 günlük değerlerin 7 günlük değerlerden fazla olduğu görülmektedir. Ekinci (2017) Nevşehir yöresinden elde edilen tuf kullanarak 90, 120 ve 150 °C gibi farklı sıcaklıklarda kür işlemi uygulanan numunelerde en yüksek basınç dayanımı 28 gün 90 °C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerde 23,6 MPa olarak elde edilmiştir. Uygulanan farklı kür sıcaklıkları sonucunda en ideal kür sıcaklığının 90 °C olduğu sıcaklığın yükselmesine bağlı olarak dayanım değerlerinde azalmaların olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Örkemez (2019) uçucu kül tabanlı ağırlıkça %1, 2, 3, 4 ve 5 oranlarında diatomit kullanarak yapılan çalışmada %1,2 ve 3 oranlarında diatomit katkılı geopolimerlerin 90 °C dayanımlarında artış olduğu gözlenmiştir.



Şekil 33. 7, 28 ve 90 gün 105 °C ısıl kür işlemene maruz kalmış numunelere ait basınç dayanımı değerleri

Şekil 33’de 105 °C sıcaklığa maruz kalmış numunelere ait 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri verilmektedir. Numunelere ait değerler incelendiğinde, en yüksek basınç dayanımı veren günler farklılık göstermektedir. Obsidyen içeriği yüksek olan numunelerin 7 günlük değerleri daha yüksek olarak elde edilirken, atık cam ve uçucu kül içeriği yüksek olan numunelerde en yüksek değerler 28 günde elde edilmiştir. Ayrıca atık cam ve uçucu kül içeriği yüksek olan numunelerden elde edilen 28 ve 90 günlük değerler yakın olarak elde edilmiştir. 75 °C ve 90 °C ısıl kür görmüş numunelerden farklı olarak yüksek dayanım verilen günler farklılık göstermektedir.



Şekil 34. 7, 28 ve 90 gün 120 °C ısıtılma işlemine maruz kalmış numunelere ait basınç dayanımı değerleri

Şekil 34’de 120 °C sıcaklığa maruz kalmış numunelere ait 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri verilmektedir. Numunelere ait değerler genel olarak incelendiğinde, 28 günlük değerlerin genel itibari ile en yüksek olduğu görülmektedir. Obsidyen içeriği yüksek olan numunelerde 7 ve 28 günlük değerler yakın olarak elde edilirken, atık cam ve uçucu kül içeriğinin artması durumunda 28 ve 90 günlük değerler yakın olarak elde edilmektedir.

3.2 Sonuçlar

Bu çalışmada, obsidyen, atık cam ve F tipi uçucu külden oluşan malzemelerin geopolimer bağlayıcı malzeme olarak kullanılabilirlikleri deneysel olarak araştırılmıştır. Elde edilen bulgular ışığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1-Obsidyen ve atık cam kullanılan numunelerin dayanımları uçucu kll numunelere göre daha yüksek çıkmıştır. Bu durum obsidyen ve atık camın geopolimer üretiminde kullanılabilceğini göstermektedir.

2-Yapılan deneysel çalışma literatüre paralel olarak optimum kr sıcaklığının 90  C olduğunu göstermiştir.

3-90 günlük dayanımların 28 günlük dayanımlara göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

4-Mekanik deney değerleri obsidyenin atık cam ile F tipi uçucu kle göre daha kompakt bir yapı oluşturduğu, diğer bir deyişle daha iyi çalıştığı ifade edilebilir. Bu duruma iki malzemenin de camsı amorf yapı da olmasının etkili olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, bu sonucu yapılan içyapı çalışmaları da desteklemiştir.

5- Genellikle atık cam ve uçucu kül bulunan karışımlarda 28 günlük ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri arasındaki fark azalmıştır.

6-Kombinasyonlar arasındaki basınç dayanımı farklarının 28 gün için 105  C ve 120  C’de en az olduğu gözlenmiştir.

7-Genel olarak obsidyen ve atık cam düşük sıcaklıklarda iyi değerler verirken, uçucu külün yüksek sıcaklıklarda daha iyi çalıştığı söylenebilir.

KAYNAKÇA

- Al Azzawi, Z. H. (2019). Investigation of Durability Properties of Geopolymer Containing Metakaolin, Ph.D. Thesis, Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Science, Kayseri, Turkey, 141 p.
- Aliques-Granero, J., Tohoue Tognonvi, M. ve Tangit-Hamou, A. (2019). Durability study of AAMs: Sulfate attack resistance. *Construction and Building Materials*, 117100.
- Alnkaa, A. A. (2019). Farklı kür koşullarının geopolimer harçların özelliklerine etkisi. *Doktora Tezi, Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kastamonu, Türkiye, 134 s.*
- Altındal, İ. (2020). Değişik geopolimer beton numunelerin farklı kür koşulları altında basınç dayanımının değişimi. *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Gelişim Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 70 s.*
- Altundal, M. (2019). Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül katkılı geopolimer betonların %5 sülfürik asit etkisinde mekanik davranışı. *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Gelişim Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 71 s.*
- Amran, M., Fediuk, R., Murali, G., Avuaiappan, S., Togay, O., Vatin, N., . . . Gholapour, A. (30 July 2021). Fly Ash-Based Eco-Efficient Concretes: A Comprehensive Review of the Short-Term Properties. *materials*, 4264.
- Annakoa, M. A. (2019). Geopolimer betonda cam tozu kullanımının araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kastamonu, Türkiye, 83 s.*
- +Assi, L. N., Deaver, E. E. ve Ziehl, P. (2018). Effect of source and particle size distribution on the mechanical and microstructural properties of fly Ash-Based geopolimer concrete. *Construction and Building Materials*, 372-380.
- Atabey, İ. İ. (2017). F sınıfı uçucu küllü geopolimer harcının durabilite özelliklerinin araştırılması. *Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, Türkiye, 200 s.*
- Awalludin, M. F., Sulaiman, O., Hashim, R. ve Nadhari, W. A. (October 2015). An overview of the oil palm industry in Malaysia and its waste utilization through thermochemical conversion, specifically via liquefaction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1469-1484.
- Brandy, J. E. ve Holum, J. R. (1996). Chemistry. The Study Of Matter And Its Changes.
- Cong, P. ve Cheng, Y. (2021). Advances in geopolimer materials: A. *JOURNAL OF TRAFFIC AND TRANSPORTATION ENGINEERING*, 283-314.

- Çakmak, A. (2019). Geopolimer beton ve geleneksel beton üretim süreçlerinden kaynaklı CO₂ salınımının metasezgisel yöntemlerle tespiti. *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 158 s.*
- Davidovits, J. (2008). They Built the Pyramids. Published by Institute Geopolymer. Saint Quentin.
- De Vargass, A. S., Dal Öolin, D. C., Vileda, A. C., Silva, F. J., Pavao, B. ve Veit, H. (2011). The effects of Na₂O/SiO₂ molar ratio, curing temperature and age on compressive strength, morphology and microstructure of alkali-activated fly ash-based. *Cement and Concrete Composites*, 653-660.
- Derinpinar, A. N. (2021). am tozu katkılı ve yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer betonların yangın dayanımının araştırılması. *İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.*
- Dindi, A., Quang, D. V., Vega, L. F., Nashef, E. ve Abu-Zahra, M. R. (2019). Applications of fly ash for CO₂ capture, utilization, and storage. *Journal of CO₂ Utilization*, 82-102.
- Durak, A. (2019). Nanoparçacık katkıların geopolimer harcın dayanım ve dayanıklılık özelliklerine etkisinin araştırılması. *Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, Türkiye, 176 s.*
- Duve, T. (2015). Seaborne trades of fly ash and global trends of cementitious products. *The 3rd International ASHTRANS Conference* (s. 19). The 3rd International ASHTRANS Conference.
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J., Lukey, G., Palomo, A. ve Van Deventer, J. (2007). Journal of Materials Science . *Advances in Geopolymer Science & Technology*, 2917-2933.
- Ekinci, E. (2017). Ekinci, E.(2017). Volkanik tüf kullanılarak üretilen geopolimer betonların bazı mekanik ve fiziksel özelliklerinin araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, Türkiye, 122 s.*
- Environmet, U., Scrivener, K. L., John, V. M. ve Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 2-26.
- Erdoğan, S. T. (2014). Jeopolimerler Çevre Dostumudur? *Çimento ve Beton Dünyası*, 50-55.
- Gartner, E. ve Sui, T. (December 2018). Alternative cement clinkers. *Cement and Concrete Research*, 27-39.
- Gönen, B. C. (2012). Hazır Beton Üretiminde Kaliteyi Etkileyen Parametrelerin Spss Yöntemiyle İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi. Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.*

- Görür, B. C. (2015). Alkali İle Aktifleştirilmiş Uçucu Kül Geopolimer Betonun Dayanım Ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması. *Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.*
- Gunasekara, C., Law, D. W., Setunge, S. ve Sanjayan, J. G. (October 2015). Zeta potential, gel formation and compressive strength of low calcium fly ash geopolymers. *Construction and Building Materials*, 592-599.
- Gümüş, A. (2016). Geopolimer beton özelliklerine termal kür prosesinin etkisi. *Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, Türkiye, 84 s.*
- Hadi, M., Al-Azzawi, M. ve Yu, T. (2018). Effects of fly ash characteristics and alkaline activator components on compressive strength of fly ash-based geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, 41-54.
- Hamid, M. A. (2021). Mechanical and durability of the geopolymer cement produced with pumice powder and fly ash. *M.Sc. Thesis, Van Yüzüncüyıl University, Institute of Natural and Applied Sciences, Van, Turkey, 149 p.*
- Harjito, D. (2005).). Studies on Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. Doctor Of. *Curtin University of Technology, Perth.*
- ISO. (2005). *Concrete, Reinforced Concrete and Prestressed.*
- ISO. (2021). *Strategic Business Plan . ISO.*
- Keklik, U. (2020). Silis dumanı içeren geopolimer betonların % 5 sülfürik asit etkisinde durabilite performanslarının incelenmesi. *İstanbul Gelişim Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.*
- Keyte, P. W., Ramli, M. ve Ban, C. C. (2015). An Overview On The İnfluence Of Various Factors On The Properties Of Geopolymer Concrete Derived From Industrial By- Products. *Construction and Building Materials* , 370-395.
- Koç , H. (2021). Silis Dumanı Katkılı Uçucu Kül İle Üretilen Alkali Aktive Edilmiş Harçların Farklı Sülfatlar Etkisi Altındaki Fiziksel Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Yozgat Bozok Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi.*
- Kwami, M. L. (2020). Mikrodalga kürüne ilave hava kürü süresinin f sınıfı uçucu kül geopolimer dayanımı üzerindeki etkisi. *Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, Türkiye, 63 s.*
- Lee, N. K., Jang, J. G. ve Lee, H. K. (October 2014). Shrinkage characteristics of alkali-activated fly ash/slag paste and mortar at early ages. *Cement and Concrete Composites*, 239-248.

- Li, Z., Ding, Z. ve Zhang, Y. (2004). Development Of Sustainable Cementitious Materials. International Workshop On Sustainable Development And Concrete Technology.
- Ma, Y. ve Ye, G. (February 2015). The shrinkage of alkali activated fly ash. *Cement and Concrete Research*, 75-82.
- Mamaseni, B. M. (2021). Development and properties of pumice based geopolymer incorporated nanosilica with sodium and potassium based activators at various rest period. *M.Sc. Thesis, Van Yuzuncuyil University, Institute of Natural and Applied Sciences, Van, Turkey, 135 p.*
- Mathew, R., Sudhakar, M. ve Natarajan, C. (2013). Strength, economic. *materials science*, 207-212.
- Meesala, C., Verma, N. K. ve Kumar, S. (2019). Critical review on fly-ash based geopolymer concrete. *Structural Concrete*.
- Örklemez, E. (2019). Uçucu kül tabanlı geopolimer harçlarda diatomit ikamesinin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine etkilerinin araştırılması. *Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.*
- Özer, C. (2018). Geopolimer harçların reolojik davranışı üzerinde zeolit etkisinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, Türkiye, 82 s.*
- Palomo, A., Grutzeck, M. ve Blanco, M. (1999). Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cement and Concrete Research*, 1323-1329.
- Pelomo, A., Grutzeck, M. W. ve Blanco, M. T. (1999). Alkali-Activated Fly Ashes, A Cement For The Future. *Cement And Concrete Research*, 1323-1329.
- Polat , B. (2019). Geopolimer harcın mikro organizmalar yardımıyla kendiliğinden iyileşmesinin araştırılması. *Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 170s.*
- Rasheed, A. A. (2019). Effect of nano silica and steel fiber on fresh state and mechanical properties of self-compacting geopolymer concrete. *M.Sc. Thesis, Gaziantep University, Graduate School of Natural and Applied Science, Gaziantep, Turkey, 85 p.*
- Safaryan, A., Sargsyan, T., Kalantaryan, M. ve Melyan, H. (2019). Ultralight large grain porous material - expanded obsidian. *XXII International Scientific*
- Shaikh , F. A. (December 2016). Mechanical and durability properties of fly ash geopolymer concrete containing recycled coarse aggregates. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 277-287.

- Shill, S. K., Al-Deen, S., Ashraf, M. ve Huchison, W. (2020). Resistance of fly ash based geopolymer mortar to both chemicals and high thermal cycles simultaneously. *Construction and Building Materials*, 117886.
- Siddika, A., Hajimohammadi, A., Al Mamun, M. A., Alyousef, R. ve Ferdous, W. (2021). Waste Glass in Cement and Geopolymer Concretes: A Review. *polymers*.
- Şinik, O. (2019). Geopolimer Betonlarda Dayanıklılık Özelliklerinin Araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Tangchirapat, W., Saeting, T., Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K. ve Siripanichgorn, A. (2007). Use of waste ash from palm oil industry in concrete. *Waste Management*, 81-88.
- Their, J. M. (2018). Mechanical and Transport Properties of Geopolymer Concrete with Artificial Lightweight Aggregate. *Ph.D. Thesis, , University of Gaziantep, Graduate School of Natural and Applied Science, Gaziantep, Turkey, 160 p*.
- Thokchom, S., Ghosh, P. ve Ghosh, S. (2009). Effect Of Na₂O Content On Durability Of Geopolymer Mortars In Sulphuric Acid. *Int. J. Civil Environ. Eng*, 193-199.
- Tuyan, M. (2017). Doğal ve atık malzemelerle geopolimer harç ve beton geliştirilmesi. *Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye, 291 s*.
- Türkiye hazır beton birliği. (2021). *Hazır beton sektör raporu*. Türkiye hazır beton birliği.
- USGS, Mineral Commodity Summaries. (2012). *Cement statistics and Information*. Washington: US Geological Survey.
- Wang, K. T., Tang, Q., Cui, X. M., He, Y. ve Liu, L. (2016). *Development of near-zero water consumption cement materials via the geopolymerization of tektites and its implication for lunar construction*. Scientific Report.
- World Cement. (15 January 2020). *2020 Vision*. World Cement.
- Yonar, Y. (2014). Geopolimer çimentolu ve polivinil alkol fiberli betonların yüksek sıcaklık dayanıklılığı. *Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Türkiye, 75 s*.
- Zeybek, O. (2009). Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Tuğla Üretimi. *Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Zhang, j., Zhang, S. ve Liu, B. (2020). Degradation technologies and mechanisms of dioxins in municipal solid waste incineration fly ash: A review. *Journal of Cleaner Production*, 119507.
- Zhang, M., Zhao, M., Zhang, G., Sietins, J. M., Granados-Focil, S., Pepi, M. S., . . . Tao, M. (2018). Reaction kinetics of red mud-fly ash based geopolymers:

Effects of curing temperature on chemical bonding, porosity, and mechanical strength. *Cement and Concrete Composites*, 175-185.

