

**T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TARİHİ YAPILARIN ONARIM VE GÜÇLENDİRİLMESİ İÇİN
GELİŞTİRİLEN HARCIN YAPI ELEMANLARI ÜZERİNDE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Erkay KUTLUSOY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Müslüm Murat MARAŞ

AĞUSTOS 2023

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TARİHİ YAPILARIN ONARIM VE GÜÇLENDİRİLMESİ İÇİN
GELİŞTİRİLEN HARCIN YAPI ELEMANLARI ÜZERİNDE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Erkay KUTLUSOY
(36213621009)

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Müslüm Murat MARAŞ
Eş Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Enes EKİNCİ

AĞUSTOS 2023

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Tez çalışmamın tüm sürecinde bilgi, birikim ve tecrübeleriyle destek olan danışman hocalarım Sayın Doç. Dr. Müslüm Murat MARAŞ ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Enes EKİNCİ'ye,

Tez alışması sürecinde yanımda olup, yardım ve desteklerini hoşgörüyüyle aktaran, beni motive eden İñř. Müh. Hasan Basri YURTSEVEN'e,

Tez çalışmamın yürütölmesi esnasında destekleriyle çalışma sürecini verimli kılan Yük. İñř. Müh. Abdultaha DEMEZ ve İñř. Müh. Mehmet Faruk ÖZDEMİR'e,

Tez alışması sürecinin deneysel aşamasında yanımda olan, etkili bir çalışma ortamı elde ettiğim İñř. Müh. Baraa RIHAVİ'ye,

Yürütmüő olduğum çalışma boyunca bilgi ve fikirlerinden yararlandığım, manevi olarak sürekli yanımda olan değerli dostlarım İñř. Müh. Emre AYDOėMUŐ ve İñř. Müh. Miraç İLBAY'a,

Hayatımın her anında olduğu gibi tez çalışmam esnasında sürekli desteğini hissettiğim, beni etkili bir Şekilde motive eden aileme,

teşekkür ederim.

ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak çalıştığım “Tarihi Yapıların Onarım ve Güçlendirilmesi İçin Geliştirilen Harçın Yapı Elemanları Üzerinde Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı çalışmanın bilimsel ahlak ve etik değerlerine uygun olarak tarafımda yazıldığını, yararlandığım tüm eserlerin uygun şekilde atıfta bulunarak kaynak gösterildiğini, tezimde gerçekleştirmiş olduğum çalışmanın özgünlüğünü belirtir, bu durumun şerefimle doğruluğunu belirtirim.

Erkay KUTLUSOY



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	viii
ONUR SÖZÜ	ii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
KISALTMALAR	vii
ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI.....	6
2.1. Horasan Harcı	6
2.2. Geopolimer	7
2.2.1. Geopolimer üretimlerde kullanılan puzolanik malzemeler	8
2.2.1.1. Yüksek fırın cürufu (YFC)	8
2.2.1.2. Uçucu kül.....	9
2.2.1.3. Silis dumanı	10
2.2.1.4 Metakaolin	11
3. METERYAL VE METOD	13
3.1. Meteryal.....	13
3.2. Metod.....	14
3.2.1. Restorasyon harcının hazırlanışı.....	14
3.2.2. Duvar birimlerinin hazırlanması.....	18
3.2.3. Kemer sistemlerinin üretimi	21
3.2.4. Harç numunelerinin basınç dayanımı testi	23
3.2.5. Duvar birimlerinin basınç dayanımı testi	24
3.2.6. Duvar birimlerinin kesme dayanımı testi	27
3.2.7. Kemer sistemlerinin eğilme dayanımı testi	30
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE DEĞERLENDİRME.....	32
4.1. Geopolimer harcın optimizasyonu.....	32
4.1.1. Basınç dayanımı	32
4.1.2. Mikro yapı analizi.....	40
4.2. Duvar birimleri	43
4.2.1. Duvar birimlerinin basınç dayanımı	43
4.2.2. Duvar birimlerinin kesme dayanımı	47
4.3. Kemer sistemleri.....	49
4.3.1. Kemer sistemlerinin eğilme dayanımı	49
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	54

KAYNAKLAR	56
ÖZGEÇMİŞ	60



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 : Bağlayıcı malzemelerin kimyasal yapısı	13
Çizelge 3.2 : Geopolimer tarihi yapı harçlarının karışım oranları	15
Çizelge 3.3 : Geopolimer tarihi yapı harçlarının karışım oranları.	16
Çizelge 3.4 : Standart tarihi yapı harcının karışım oranları	16
Çizelge 4.1 : Geopolimer tarihi yapı harçlarının basınç dayanımları	33
Çizelge 4.2 : Geopolimer tarihi yapı harçlarının basınç dayanımları	34
Çizelge 4.3 : Standart tarihi yapı harcının basınç dayanımları	34



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 : Çin Seddi	1
Şekil 1.2 : Petra Antik Kenti	2
Şekil 1.3 : Süleymaniye Camii	2
Şekil 1.4 : Efes Antik Kenti	3
Şekil 1.5 : Gize Piramitleri.....	4
Şekil 2.1 : Granüle yüksek fırın cürufu.....	8
Şekil 2.2 : Uçucu kül.....	9
Şekil 2.3 : Silis dumanı	10
Şekil 2.4 : Metakaolin	11
Şekil 3.1 : Üretilen duvar birimlerinin boyutları.....	17
Şekil 3.2 : Geopolimer harç kullanılarak basınç dayanımı testi için üretilen duvar birimi	18
Şekil 3.3 : Standart tarihi yapı harcı kullanılan basınç dayanımı için üretilen duvar birimi.....	19
Şekil 3.4 : Üretilen kemer sistemlerinin ölçüleri	20
Şekil 3.5 : Kemer sistemlerinin üretimi	21
Şekil 3.6 : Basınç dayanımı test cihazı.....	22
Şekil 3.7 : GHB1 duvar biriminin basınç dayanımı testi	24
Şekil 3.8 : HB1 duvar biriminin basınç dayanımı testi	25
Şekil 3.9 : GHK1 duvar biriminin kesme dayanımı testi	27
Şekil 3.10 : HK1 duvar biriminin kesme dayanımı testi.....	28
Şekil 3.11 : GHK ve HK kemer sistemlerinin eğilme dayanımı testi	30
Şekil 4.1 : K1-K8 basınç dayanımları	35
Şekil 4.2 : K9-K16 basınç dayanımları	35
Şekil 4.3 : K17-K24 basınç dayanımları	36
Şekil 4.4 : K25-K32 basınç dayanımları	36
Şekil 4.5 : K33-K40 basınç dayanımları	37
Şekil 4.6 : K41-K48 basınç dayanımları	37
Şekil 4.7 : K49-K56 basınç dayanımları	38
Şekil 4.8 : S1 basınç dayanımı	38
Şekil 4.9 : S1-K56 basınç dayanımları.....	39
Şekil 4.10 : K5 mikro yapı analizi	40
Şekil 4.11 : K56 mikro yapı analizi	41
Şekil 4.12 : HB1 duvar birimlerinin basınç dayanımı (56 gün).....	43
Şekil 4.13 : GHB1 duvar biriminin basınç dayanımı (56 gün)	44
Şekil 4.14 : GHB1 vs HB1 duvar birimlerinin basınç dayanımı (56 gün).....	44
Şekil 4.15 : HB1 duvar biriminin kırılması.....	45
Şekil 4.16 : GHB1 duvar biriminin kırılması.....	45
Şekil 4.17 : HK1 vs GHK1 duvar birimlerinin kesme dayanımı (56 gün)	47
Şekil 4.18 : HK1 duvar biriminin harcının ayrışması	47
Şekil 4.19 : GHK1 duvar biriminin harcının ayrışması	48
Şekil 4.20 : GHK kemer sisteminin eğilme dayanımı (56 gün).....	50
Şekil 4.21 : HK kemer sisteminin eğilme dayanımı (56 gün).....	51
Şekil 4.22 : GHK ve HK kemer sistemlerinin eğilme dayanımları (56 gün).....	51
Şekil 4.23 : HK kemer sisteminin dağılması.....	52
Şekil 4.24 : GHK kemer sisteminin dağılması.....	52

KISALTMALAR

YFC	: Granüle yüksek fırın cürufu
SS	: Sodyum silikat
SH	: Sodyum hidroksit
K	: Geopolimer harç karışımı
S1	: Standart tarihi yapı harcı karışımı
GHB1	: Basınç dayanımı için geopolimer tarihi yapı harcı kullanılarak üretilen duvar birimi
HB1	: Basınç dayanımı için standart tarihi yapı harcı kullanılarak üretilen duvar birimi
GHK1	: Kesme dayanımı için geopolimer tarihi yapı harcı kullanılarak üretilen duvar birimi
HK1	: Kesme dayanımı için standart tarihi yapı harcı kullanılarak üretilen duvar birimi
GHK	: Geopolimer tarihi yapı harcından üretilen kemer elemanı
HK	: Standart tarihi yapı harcından üretilen kemer elemanı

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TARİHİ YAPILARIN ONARIM VE GÜÇLENDİRİLMESİ İÇİN GELİŞTİRİLEN HARCIN YAPI ELEMANLARI ÜZERİNDE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Erkay KUTLUSOY

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

60 + ix sayfa

2023

Danışman: Doç. Dr. Müslüm Murat MARAŞ

Yürütülen tez çalışmasında bağlayıcı malzeme olarak yüksek fırın cürufu (YFC), tuğla tozu ve sönmüş kireç kullanılarak üretilen geopolimer tarihi yapı harçlarının mekanik özellikleri incelenmiştir. Standart tarihi yapı harcı kireç esaslı olduğundan geliştirilen geopolimer harçların da kireç esaslı olması sağlanmış, karışımlarda kullanılan sönmüş kireç miktarı sabit tutulup, bağlayıcı malzemenin ağırlıkça %48'i oranında kullanılmıştır. Optimum karışımı bulmak adına yüksek fırın cürufu (YFC) bağlayıcı malzemenin ağırlıkça %29, %33, %38 ve %43 oranlarında kullanılırken, tuğla tozu ise bağlayıcı malzemenin ağırlıkça %10, %14, %19 ve %24 oranlarında kullanılmıştır. Ayrıca aktivatör olarak farklı konsantrasyonlarda potasyum hidroksit (KOH), sodyum hidroksit (NaOH) çözeltileri kullanılmış, sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi kullanılarak gerçekleştirilen üretimler sodyum silikat sıvısı ilavesiyle tekrarlanmıştır. Aktivatör miktarı normal kıvam durumuna göre ayarlanmıştır. Agregatör/bağlayıcı oranı 2 olarak sabit tutulup, 0-2 mm tane çapında dere agregası kullanılmıştır. Ayrıca standart tarihi yapı harcının üretimi gerçekleştirilmiş ve bu sayede geliştirilen geopolimer tarihi yapı harcıyla mekanik özellikleri kıyaslanabilmiştir. Numuneler üzerinde yapılan basınç dayanımı testleri sonuçlarına göre en yüksek nihai dayanımı veren harç üretimi K56 (400 g kireç, 80 g tuğla tozu, 360 g YFC SS/SH (12 M) 820 g) numaralı karışımdır. Mekanik özelliklerin yapı elemanları üzerinde incelenebilmesi için model duvar birimleri ve kemer sistemleri üretilmiştir. Numuneler üzerinde gerçekleştirilen basınç dayanımı testlerinde geopolimer tarihi yapı harcı standart tarihi yapı harcına göre çok daha etkili sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Duvar birimleri üzerinde yapılan basınç ve kesme dayanımı testlerinde de geopolimer tarihi yapı harcında standart tarihi yapı harcına kıyasla belirgin iyileşmelere rastlanmıştır. Kemer sistemlerinde ise standart tarihi yapı harcı ile üretilen kemer elemanının eğilme dayanımında geopolimer tarihi yapı harcına kıyasla daha yüksek değerlere ulaşılmasına rağmen deplasman sonuçları göz önüne alındığında geopolimer tarihi yapı harcı ile üretilen kemer sisteminin daha sünük bir davranış sergilediği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Geopolimer, tarihi yapı, harç, dayanım, duvar birimleri, kemer sistemleri

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE MORTAR DEVELOPED FOR THE REPAIR AND STRENGTHENING OF HISTORICAL BUILDINGS ON BUILDING ELEMENTS.

Erkay KUTLUSOY

Inonu University
Graduate School of Nature and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

60 + ix pages

2023

Supervisor: Doç. Dr. Müslüm Murat MARAŞ

In this thesis study, the mechanical properties of geopolymer historical building mortars produced by using blast furnace slag (YFC), brick dust and hydrated lime as binder material were investigated. Since the standard historical building mortar is lime-based, it was ensured that the geopolymer mortars developed were also lime-based, the amount of slaked lime used in the mixtures was kept constant and 48% of the binder material by weight was used. In order to find the optimum mixture, GGBFS was used at the rates of 29%, 33%, 38% and 43% by weight of the binder material, while brick dust was used at the rates of 10%, 14%, 19% and 24% by weight of the binder material. In addition, potassium hydroxide (KOH) and sodium hydroxide (NaOH) solutions at different concentrations were used as activators, and the productions using sodium hydroxide (NaOH) solution were repeated with the addition of sodium silicate liquid. The amount of activator was adjusted according to the standart consistency. The aggregate/binder ratio was kept constant as 2 and stream aggregate with a grain diameter of 0-2 mm was used. In addition, the production of the standard historical building mortar was carried out, and thus its mechanical properties could be compared with the developed geopolymer historical building mortar. According to the results of the compressive strength tests performed on the samples, the mortar producing the highest final strength is the mixture numbered K56 (400 g lime, 80 g brick powder, 360 g GGBFS, SS/SH (12 m) 820 g). Model wall units and arch systems were produced in order to examine the mechanical properties on the building elements. In the compressive strength tests performed on the samples, it was determined that the geopolymer historical building mortar gave much more effective results than the standard historical building mortar. In the compressive and shear strength tests performed on the wall units, significant improvements were observed in the geopolymer historical building mortar compared to the standard historical building mortar. In arch systems, although the flexural strength of the arch element produced with the standard historical building mortar is higher than the geopolymer historical building mortar, the arch system produced with the geopolymer historical building mortar exhibits a more ductile behavior when the displacement results are taken into account.

Keywords: Geopolymer, historical building, mortar, strenght, wall units, arch systems

1. GİRİŞ

Dünyamızda insanlık tarihinden bu yana birçok farklı kültürün yaşamış olması dolayısıyla pek çok farklı işlev üstelenen tarihi yapılar mevcuttur. Peru'da And dağlarının tepesinde yüzyıllar önce inşa edilen antik şehir Machu Picchu, Ürdün Haşimi Krallığı içerisinde bulunan Petra Antik Şehri, klasik antik dönemin en büyük tapınağı rolünü üstlenen Parthenon ve 2000 yıldan daha uzun bir tarihi geçmişe sahip olan Kuzey Çin'in büyük bölümünü kapsayan Çin Seddi dünyamızdaki önemli tarihi yapılar arasında gösterilebilir (URL 1).

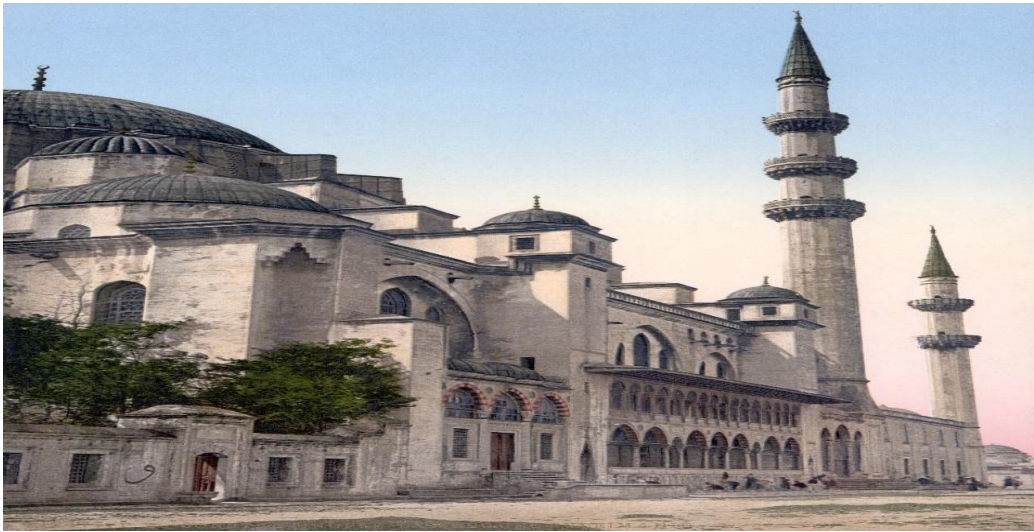


Şekil 1.1 : Çin Seddi (URL 1)



Şekil 1.2 : Petra Antik Kenti (URL 1)

Ülkemiz ise binlerce yıllık tarihi ve coğrafi koşulları değerlendirildiğinde birçok farklı medeniyete ev sahipliği yapması dolayısıyla farklı kültürlerin özelliklerini yansıtan ve çeşitli amaçlara hizmet eden uzun bir yapısal geçmişe sahiptir (Örmecioğlu, 2010; Döndüren ve diğ., 2017; İsafça ve diğ., 2021). İstanbul’da Mimar Sinan’ın kalfalık dönemi eseri olarak belirtilen Süleymaniye Camii, Edirne’de bulunan Mimar Sinan’ın ustalık eseri olarak belirttiği bilinen Selimiye Camii, İzmir’de geçmişi MÖ 6000 yıllarına dayanan Efes Antik Kenti, Trabzon ilinin Altındere Vadisi konumunda yer alan ve deniz seviyesinden 1150 m yükseklikte olan Sümela Manastırı ülkemizde bulunan tarihi yapılara örnek olarak gösterilebilir. (URL 2, URL 3, URL 4, URL 5).



Şekil 1.3 : Süleymaniye Camii (URL 2)



Şekil 1.4 : Efes Antik Kenti (URL 4)

Tarihi yapılar bizden önceki nesillerin kültürel miraslarının anlaşılıp gelecek nesillere aktarılması açısından kritik bir önem taşımaktadır. Bu yapılarda geçen zamanın etkisiyle deprem, zeminde oluşan sorunlar, sel, yangınlar, fiziksel ve kimyasal bozulmalar gibi etmenler dolayısıyla özellikle taşıyıcı sistemlerinde istenmeyen hasarlar meydana gelebilmektedir. Bu hasarlar yapının mevcut formunun bozulmasının yanı sıra yapının görüntüsünü de olumsuz etkileyerek estetik açıdan sorunlar teşkil edebilmektedir (Döndüren ve diğ., 2017).

Tarihi yapılar üzerinde birçok onarım ve güçlendirme çalışması mevcuttur. Yapılan bu çalışmalarda çimento esaslı harçların kullanılmasının erken zamanda ciddi bozulmalara yol açtığı ve bu harçların yapı ile uyumsuz olduğu gözlenmekte, yapıdaki özgün değerlerin korunması açısından etkili olmadığı belirtilmektedir. Ayrıca orijinal tarihi yapı harcı yerine modern yapı harçlarının kullanılması etkili bir uyumluluk gösterememekte bu sayede istenen dayanım değerleri elde edilememektedir. Dolayısıyla bu sorunların ortadan kalkması açısından tarihi yapılarda kullanılan harç parametrelerine uygun bir harç türüyle onarım ve güçlendirme çalışmalarının yapılmasının gerekliliği önemle vurgulanmaktadır (Fang ve diğ., 2015).

Tarihi yapılarda horasan olarak adlandırılan kireç esaslı olup, karışımında tuğla tozu ve farklı oranlarda kum bulunduran harç türüne sıkça rastlanmaktadır. Bu karışım, batılı

araştırmacılar tarafından Roma-Yunan buluşu olarak nitelendirilen ancak tam olarak hangi uygarlık ya da kavim tarafından üretildiği belli olmayan bir harç çeşididir. Osmanlılar, Selçuklular ve Bizanslılar tarafından inşa edilen yapılar da, Gize piramitleri ve Asur yapılarında, birbirinden bağımsız mekanlar ve çok farklı zamanlarda bu harç türüne rastlanılmıştır (Akman, 2003; Işıkdağ ve Topçu, 2014).



şekil 1.5 : Gize Piramitleri (URL 6)

Horasan harcı teknolojik gelişmelerin yetersiz olduğu eski zamanlarda üretilen bir harç olması dolayısıyla dayanım değerleri oldukça düşüktür. Bu yüzden yapılar da meydana gelen hasarların horasan harcı kullanılarak giderilmeye çalışılması uzun ömürlü olamamakta, özellikle taşıyıcı sistemi duvar olan yığma yapılar için taşıma kapasitesi ltleri bakımından yetersiz kalmaktadır. Bu durum tarihi yapıların onarım ve güçlendirilmesi için dayanım parametreleri yüksek ve esas değerin bozulmamasını sağlayacak bir harç gereksinimi ortaya koymaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında, tarihi yapıların onarım ve güçlendirilmesi için kullanılabilir geopolimer bir harç türü geliştirilmiştir. Geliştirmiş olduğumuz geopolimer harç, hidrolik kireç esaslı olup, tarihi yapılar da kullanılan harç türüyle benzerlik göstermektedir. Bu sayede tarihi yapıların onarım ve güçlendirilmesi çalışmaları

gerçekleştirilirken özgün değerin korunması amaçlanmıştır. Ayrıca yüksek dayanım özelliklerine sahip bu harç karışımlarının kullanımı ile, restorasyon çalışmalarının daha uzun ömürlü olmasına katkıda bulunması hedeflenmektedir.



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI

2.1. Horasan Harcı

Horasan harcı, Roma, Bizans, Selçuklu ve Osmanlı dönemlerinde sıkça karşımıza çıkmaktadır. Parçalanmış, öğütülmüş halde olan tuğla ve kiremit gibi pişirilmiş killere Horasan adı verilmektedir. Horasan kelimesi ise, İran sınırlarını içerisinde bulunan Horasan bölgesinden gelmektedir (Kılıç, 2021).

Horasan harcı bünyesinde genel olarak kireç, tuğla tozu veya parçaları bulunmaktadır. Bazı özel uygulamalarda ise, içerisine saman, bitki lifleri ve hayvan kılları ilave edilmektedir (Akman, 2003; Şimşek ve Kılıç, 2021). Bu harç türü yapının bulunduğu çevre şartları ve üretildiği dönemin özelliklerine göre farklı üretim teknikleriyle hazırlanabilmektedir (Şimşek ve Kılıç, 2021). Horasan harcının karışımında bulunan kireç hidrolik olan ve hidrolik olmayan olmak üzere iki çeşittir. Hidrolik olmayan kireç ile üretilen harçlar havadan gelen CO₂ etkisiyle CaCO₃ oluşumu sayesinde sertleşme göstermektedir. Hidrolik kireç kullanılarak elde edilen harçların sertleşme mekanizması ise kirecin kalsiyum karbonat oluşumu ile sertleşmesinin yanı sıra bünyesinde bulunan kalsiyum alüminat silikatların su ile reaksiyonu sonucu kalsiyum silikat hidrat ve kalsiyum alüminat hidratları oluşturması şeklinde gerçekleşmektedir. Horasan harcında kullanılan tuğla benzeri malzemelerin ham maddesi kil, kuvars ve feldspat minerallerinin birleşiminden meydana gelmektedir. Bu karışımlar 600-900°C'de pişirilecek olursa farklı puzolanik özelliklere sahip olmaktadır. Bu durum sıcaklığın etkisiyle kil minerallerinin yapısının bozulmasıyla birlikte amorf halde alümina silikatlar oluşması şeklinde açıklanabilmektedir. Agrega olarak kullanılan tuğla ise yoğunluğunun kireç taşı, bazalt, granit gibi agregalara kıyasla daha düşük olması nedeniyle daha hafif bir harç üretimi gerçekleştirme imkanı sağlamaktadır. Ayasofya'nın kubbesinde uygulanmış olan horasan harcı bu durumun güzel bir örneğidir (Böke ve diğ., 2007). Horasan harcının içerisine ilave edilen lifler ve hayvan kılları harcın mekanik özelliklerini iyileştirmek ve genleşmeyi önleyerek özellikle sıva uygulamalarında dökülmeleri azaltmak amacıyla kullanılmıştır. Horasan harç karışımlarında bağlayıcı/agrega oranları 1/1 ve 1/4 oranlarında farklılık göstermesine karşın çoğunlukla 1/2 veya 1/3 oranları tavsiye edilmektedir (Şimşek ve Kılıç, 2021).

2.2. Geopolimer

Standart yapı malzemesi üretimlerinde kullanılan çimentonun üretiminin maliyetli olması ve üretimi esnasında yüksek miktarda CO₂ açığa çıkarması gibi olumsuzluklar alternatif yöntemlerin açığa çıkmasına neden olmuştur (Durak ve Şimşek, 2022). Geopolimer adı verilen üretimlerde fabrikalarda açığa çıkan atık malzemelerin değerlendirilmesi veya doğal kaynakların kullanılması yoluyla çimentosuz bir üretim gerçekleştirilerek düşük maliyet sağlanmaktadır. Ayrıca atık malzemelerin depolanma sorunlarının önüne geçilebilmektedir (Yurt ve Emiroğlu, 2020). “Geo” kavramı fabrikalardan temin edilen atık malzemeleri veya jeolojik olarak elde edilen ürünleri simgelerken, “polimer” kavramı aynı birimden elde edilen molekül zincir durumunu belirtir (Eryılmaz ve diğ., 2023).

Çimento esaslı üretimlerde dayanım kazanma mekanizması C₃S ve C₂S bileşenlerinin su ile reaksiyonu sonucu açığa çıkan C-S-H jellerinden meydana gelirken, geopolimer üretimlerde dayanım kazanma mekanizması Si-Al atomları üzerinde alkali ortamlar içerisinde hızlı bir kimyasal reaksiyon sürecini kapsar ve oluşan bağ yapısı Si-O-Al-O şeklinde üç boyutlu polimerik zincir yapıdadır (Van Chanh ve diğ., 2008).

Geopolimer kompozitlerde kimyasal reaksiyonların başlaması için NaOH ve KOH gibi güçlü alkali çözeltiler kullanılmaktadır. Ayrıca Na₂SiO₃ gibi çözünen silikatlar ile alkali çözeltiler bir arada kullanılarak kimyasal reaksiyonlar desteklenebilmektedir (Eryılmaz ve diğ., 2023).

Geopolimer kompozitler sahip olduğu özellikler sayesinde nükleer enerji santralleri, fiber takviyeli kompozitler, kaplama malzemeleri ve dekorasyon ürünleri gibi geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu durumlar nezdinde günümüzde geopolimer üretim, hem atık malzemelerin değerlendirilmesi sayesinde hem de çevreci olması nedeniyle hızla ilerleme kaydetmektedir (Eryılmaz ve diğ., 2023).

2.2.1. Geopolimer üretimlerde kullanılan puzolanik malzemeler

2.2.1.1. Yüksek fırın cürufu (YFC)

Yapay puzolan olarak sınıflandırılan yüksek fırın cürufu, yaklaşık 1500°C sıcaklığa sahip olan yüksek fırınlardan elde edilen atık malzemelerin soğutulmasıyla kullanılabilir duruma gelmektedir. Genellikle bol su ile soğutulma işlemine tabi tutulan cüruflar kum taneleri gibi küçük parçacıklar oluşturduklarından granüle yüksek fırın cürufu olarak adlandırılırlar. Hızlı bir şekilde soğutulma işlemi yüksek fırın cürufunu camsı amorf bir hale getirirken, öğütülme işlemi sonrasında tane boyutunun küçültülmesiyle kimyasal reaksiyonlar için elverişli bir oluşum sağlanır. Yüksek fırın cürufunun kimyasal yapısı temel olarak $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ gibi oksitlerden oluşmaktadır (Dorum ve diğ., 2009; Bilim ve Atış, 2011).



Şekil 2.1 : Granüle yüksek fırın cürufu (URL 7)

Yüksek fırın cürufunun alkali aktivatörler kullanılarak bağlayıcı özelliğın sağlanması için 20°C sıcaklık yeterli olabilmektedir. Kür sıcaklıklarının yükselmesi halinde 60-100°C arası değerlere getirilecek olursa birkaç saat içerisinde kalıp alınabilecek olgunluğa gelebilecektir. Bu sayede uygulama açısından düşünülecek olursa kalıp sökme süresinin

kısalmasıyla birlikte zaman açısından önemli bir tasarruf sağlayacaktır. (Binici ve diğ., 2012).

Yüksek fırın cürufu geopolimer beton üretiminde en sık tercih edilen atık malzemelerden biridir. İçeriğinde yüksek CaO oranı bulundurmasından dolayı aktivatör olarak alkali çözeltilerle birlikte Na_2SiO_3 kullanılacak olursa Si-O-Al-O bağ yapısının yanı sıra tobermorit oluşumuna izin vererek oldukça yüksek dayanımların elde edilebilmesi mümkün olabilmektedir (Aziz ve diğ., 2020).

2.2.1.2. Uçucu kül

Elektrik enerjisi üretiminin gerçekleştirildiği termik santrallerde kullanılan taş ve linyit kömürleri sırasıyla yaklaşık olarak %15 ve %50 oranlarında kül olarak açığa çıkmaktadır. Ortaya çıkan bu küller baca gazlarıyla birlikte uçuşma eğilimi göstermesinden dolayı “uçucu kül” olarak adlandırılırlar. Uçucu küllerin tutulması amacı ile genellikle elektrofiltreler tercih edilmektedir. Uçucu küllerin özellikleri üretim esnasında kullanılan kömürün cinsine, kömürün yakılmadan önceki incelik durumuna, yakılma sıcaklığına ve kömürle birlikte kullanılan katkı maddelerine göre değişiklik göstermektedir (Güler ve diğ., 2005). Uçucu külün bünyesindeki yüksek $SiO_2-Al_2O_3$ içeriği dolayısıyla geopolimer üretimlerde oluşacak bağ yapısı etkili bir şekilde meydana gelecektir (Yazıcı ve Karagöl, 2022).



Şekil 2.2 : Uçucu kül (URL 8)

Uçucu kül kullanılarak gerçekleştirilen üretimleri daha etkin bir hale getirebilmek adına farklı puzolanik malzemeler ile optimize ederek bir arada kullanabilmek mümkündür. Böylece alkali aktivasyon desteklenerek, bağ yapısı etkin jellerin oluşmasıyla daha yüksek dayanımlara ulaşmak mümkün olabilmektedir (Yazıcı ve Karagöl, 2022).

2.2.1.3. Silis dumanı

Silisyum metali ve silisyum içeren metal alaşımların üretilmesi esnasında yüksek saflık durumundaki kuvarsın 2000°C sıcaklıktaki elektrik fırınlarında işleme tabi tutulmasıyla elde edilen, portland çimentosuna kıyasla 100 kat daha ince tane yapısına sahip olan bir malzemedir. Fırınlarda yüksek sıcaklıklarda işlem yapılması dolayısıyla çoğunlukla SiO oluşan gazlar açığa çıkar. Açığa çıkan bu gazlar fırının soğuk bölümlerine temas ederek hızlı bir şekilde yoğunlaşır ve içerisinde %85 ile %98 oranında silis içeren amorf yapıya sahip oldukça ince taneli bir oluşum gösterir. Ortaya çıkan bu malzeme yoğunlaştırılmış silis dumanı, silika füme, mikrosilis, silis tozu gibi isimlerle adlandırılır (URL 9).



Şekil 2.3 : Silis dumanı (URL 10)

Silis dumanı ilavesiyle beton üretiminin erken yaşta yüksek dayanım kazanması nedeniyle zorlu çevre koşullarında sıkça tercih edilmektedir. Geopolimer üretiminde kullanılan atık malzemelerin içerisinde silis ve alümin bulunması önem taşımaktadır (Khater, 2013). Dolayısıyla silis dumanı içeriğinde bulundurduğu yüksek silis oranı sayesinde geopolimer üretimlerde yüksek performans açısından etkili olabilmektedir.

2.2.1.4 Metakaolin

Saf haldeki kaolin kilinin yaklaşık 650-800°C arasındaki sıcaklıklara tabi tutulup kalsine edilmesi yoluyla elde edilen beyaz renkli puzolanik bir malzemedir. Bu işlem sayesinde metakaolinin içerisindeki alümin ve silisin kristal formlarında bozulmalar oluşur. Dolayısıyla metakaolin amorf yapılı ve yüksek puzolanik performans sergileyen bir ürün haline gelir (Yazıcı ve diğ., 2010).



Şekil 2.4 : Metakaolin (URL 11)

Metakaolin endüstriyel kaynaklardan elde edilen alüminosilikat esaslı atık malzemelere kıyasla daha pahalıdır. Çünkü üretimi için yüksek sıcaklıklarla bir işlem gerektirmektedir (Pouhet ve Cyr, 2016).

NaOH ve Na_2SiO_3 aktivatörleri kullanılarak uygun kürlenme koşulları altında metakaolin esaslı geopolimerlerin yüksek dayanımlı betonların basınç dayanıma yakın bir performans sergilediği görülmüştür (Chen ve diğ., 2016).



3. METERYAL VE METOD

3.1. Meteryal

Bu tez çalışmasında bağlayıcı malzeme olarak sönmüş kireç, tuğla tozu ve yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Sönmüş kireç CaO katısının su ile reaksiyonu sonucu elde edilir. Çalışmamızda kullanmış olduğumuz sönmüş kireç Sarsılmaz firmasından (Malatya) elde edilmiştir.

Yüksek fırın cürufu Karçimsa Fabrikasından elde edilmiş olup, öğütülme işlemine tabi tutulmuştur. Spesifik yüzeyi $3996 \text{ cm}^2/\text{g}$ ve özgül ağırlık değeri 2,86'dır.

Çalışmada kullanılan atık tuğla tozu Ceylan Tuğla Fabrikasından temin edilmiş olup, geri dönüştürülmüş kil tuğladan elde edilmiştir. Kullanılan bağlayıcı malzemelerin kimyasal yapısı Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Aktivatör olarak kıvam ölçütleri referans alınacak şekilde NaOH, KOH çözeltileri ve Na_2SiO_3 sıvısı kullanılmıştır. Hazırlanan %98 saflıktaki NaOH ve KOH alkali çözeltileri farklı konsantrasyonlarda kullanılarak optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca aktivatör olarak NaOH içeren çözeltilere ağırlıkça Na_2SiO_3 sıvısı takviyesi sayesinde kimyasal aktivite desteklenmiştir. Na_2SiO_3 sıvısı Detsan firması tarafından temin edilmiştir.

Bütün karışımlarda 0-2 mm tane çapına sahip dere agregası kullanılmıştır. Agreganın özgül ağırlığı 2,80'dir. Kullanılan agregalar hava kurusu durumdadır.

Çizelge 3.1 : Bağlayıcı malzemelerin kimyasal yapısı

	Sönmüş Kireç (%)	Tuğla Tozu (%)	YFC (%)
SiO_2	-	66.91	32.47
Al_2O_3	-	14.59	9.94
CaO	84.66	3.63	32.45
Fe_2O_3	0.87	6.52	1.25
MgO	4.04	2.41	9.31
SO_3	1.50	-	0.82
K_2O	-	2.85	0.85
TiO_2	-	0.89	1.16
Mn_2O_3	-	0.09	3.51
Na_2O	-	0.79	0.31
R_2O_3	0.49	-	-
CO_2	3.84	-	-
Kızdırma kaybı	21.52	0.82	3.60

3.2. Metod

3.2.1. Restorasyon harcının hazırlanışı

Bu çalışmada bağlayıcı malzeme olarak sönmüş kireç, tuğla tozu ve yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Sönmüş kireç miktarı her karışım için sabit tutularak toplam bağlayıcı malzeme miktarının ağırlıkça %48 oranı kadar kullanılmıştır. Karışımın içerisindeki yüksek fırın cürufu bağlayıcı malzemenin yaklaşık olarak ağırlıkça %29, %33, %38 ve %43 oranlarında kullanılırken, tuğla tozu ise bağlayıcı malzemenin yaklaşık olarak ağırlıkça %10, %14, %19 ve %24'ü oranlarında kullanılmıştır.

Agrega olarak toplam bağlayıcı malzemenin ağırlıkça iki katı kadar 0-2 mm tane çapına sahip dere kumu kullanılmıştır.

Alkali çözeltilerden KOH çözeltisi 6, 8, 10, 12, 14 M olarak, NaOH çözeltisi ise 8, 10, 12 M olarak hazırlanmıştır. Kimyasal aktivasyonun desteklenmesi adına NaOH çözeltisi kullanarak hazırlanan karışımlara alkali çözelti miktarının ağırlıkça 1.0 ve 1.5 katı kadar Na_2SiO_3 sıvısı ilave edilmiştir. NaOH çözeltisi ve Na_2SiO_3 sıvısı karıştırılıp bekletildiği zaman çökelek oluşumu gerçekleştiğinden viskozitenin artışına neden olmuştur. Bu yüzden Na_2SiO_3 ve NaOH aktivatörleri kullanılarak hazırlanan karışımlarda önce Na_2SiO_3 sıvısı ilave edilmiş karıştırılmış, daha sonra NaOH çözeltisi katılarak karıştırılmaya devam edilmiştir. Aktivatörler karışım içerisine normal kıvam sağlanıncaya kadar eklenmiş olup, 5 dakika kadar karıştırılma işlemi uygulanmıştır. Karıştırma işlemi sonunda elde edilen harç, 50x50x50 mm ebatlarında küp kalıplara her bir karışımdan 6 adet numune çıkacak şekilde dökülmüştür.

Üretmiş olduğumuz harçların özelliklerini kıyaslamak açısından standart tarihi yapı harç parametrelerine uygun olarak referans numuneler 6 adet olarak üretilmiştir. Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3 üzerinde hazırlanan geopolimer tarihi yapı harçlarının karışımların oranları gösterilmiştir. Çizelge 3.4’de ise kıyas açısından hazırlanan standart tarihi yapı harcının karışım oranları gösterilmiştir.

Çizelge 3.2 : Geopolimer tarihi yapı harçlarının karışım oranları

Karışım no	Kireç (g)	Tuğla Tozu (g)	YFC (g)	Agrega (g)	Molarite	KOH çöz. (g)	NaOH çöz. (g)	SS/SH=1.0 (g)	SS/SH=1.5 (g)	Aktivatör/Bağlayıcı
K1	400	200	240	1680	6	445				0,530
K2	400	160	280	1680	6	433				0,515
K3	400	120	320	1680	6	422				0,502
K4	400	80	360	1680	6	444				0,529
K5	400	200	240	1680	8	617				0,735
K6	400	160	280	1680	8	633				0,754
K7	400	120	320	1680	8	547				0,651
K8	400	80	360	1680	8	603				0,718
K9	400	200	240	1680	10	559				0,665
K10	400	160	280	1680	10	567				0,675
K11	400	120	320	1680	10	586				0,498
K12	400	80	360	1680	10	580				0,690
K13	400	200	240	1680	12	593				0,706
K14	400	160	280	1680	12	594				0,707
K15	400	120	320	1680	12	574				0,683
K16	400	80	360	1680	12	553				0,658
K17	400	200	240	1680	14	583				0,694
K18	400	160	280	1680	14	588				0,700
K19	400	120	320	1680	14	561				0,668
K20	400	80	360	1680	14	574				0,683
K21	400	200	240	1680	8		661			0,787
K22	400	160	280	1680	8		530			0,631
K23	400	120	320	1680	8		521			0,620
K24	400	80	360	1680	8		492			0,586
K25	400	200	240	1680	10		578			0,688
K26	400	160	280	1680	10		595			0,708
K27	400	120	320	1680	10		595			0,708
K28	400	80	360	1680	10		545			0,649

Çizelge 3.3 : Geopolimer tarihi yapı harçlarının karışım oranları

Karışım no	Kireç (g)	Tuğla Tozu (g)	YFC (g)	Agrega (g)	Molarite	KOH çöz. (g)	NaOH çöz. (g)	SS/SH=1.0 (g)	SS/SH=1.5 (g)	Aktivatör/Bağlayıcı
K29	400	200	240	1680	12		593			0,706
K30	400	160	280	1680	12		597			0,711
K31	400	120	320	1680	12		563			0,670
K32	400	80	360	1680	12		600			0,714
K33	400	200	240	1680	8			630		0,752
K34	400	160	280	1680	8			773		0,920
K35	400	120	320	1680	8			634		0,755
K36	400	80	360	1680	8			625		0,744
K37	400	200	240	1680	10			632		0,752
K38	400	160	280	1680	10			773		0,920
K39	400	120	320	1680	10			634		0,755
K40	400	80	360	1680	10			625		0,744
K41	400	200	240	1680	12			823		0,980
K42	400	160	280	1680	12			467		0,910
K43	400	120	320	1680	12			871		1,037
K44	400	80	360	1680	12			740		0,881
K45	400	200	240	1680	8				717	0,854
K46	400	160	280	1680	8				737	0,877
K47	400	120	320	1680	8				654	0,779
K48	400	80	360	1680	8				528	0,629
K49	400	200	240	1680	10				650	0,774
K50	400	160	280	1680	10				669	0,796
K51	400	120	320	1680	10				688	0,819
K52	400	80	360	1680	10				630	0,750
K53	400	200	240	1680	12				753	0,896
K54	400	160	280	1680	12				835	0,994
K55	400	120	320	1680	12				734	0,874
K56	400	80	360	1680	12				820	0,976

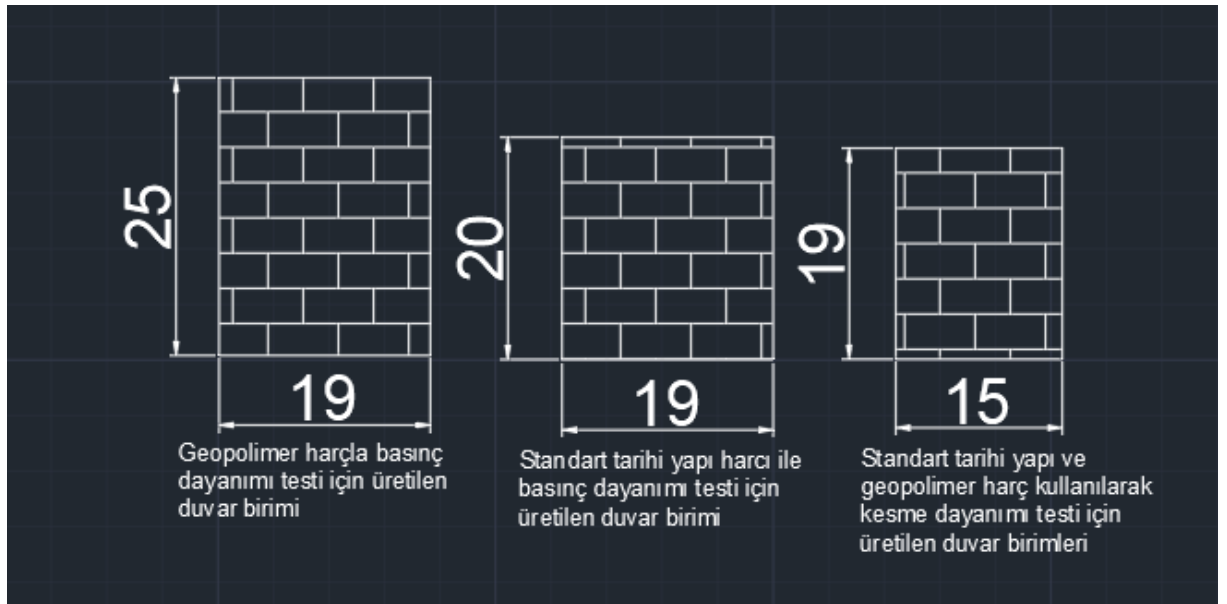
Çizelge 3.4 : Standart tarihi yapı harçlarının karışım oranları

Karışım no	Kireç (g)	Tuğla Tozu (g)	Agrega (g)	Su (g)	Su/Bağlayıcı
S1	400	80	960	440	0,921

3.2.2. Duvar birimlerinin hazırlanması

Boşluklu pres tuğla kullanılarak duvar birimleri üretilmiştir. Kullanılan boşluklu pres tuğla boyutları 19x9x5 cm ebatlarındadır. Geopolimer tarihi yapı harcı ve standart tarihi yapı harcı kullanılarak iki farklı duvar üretimi gerçekleştirilmiştir. Geopolimer tarihi yapı harcı ile örülen duvar elemanı boyutları basınç dayanımı testi için 19x19x25 cm, kesme dayanımı testi için 15x9x19cm ebatlarında üretilmiştir. Standart tarihi yapı harcı kullanılarak örülen duvar boyutları ise basınç dayanımı testi için 19x19x20 cm, kesme dayanımı testi için 15x9x19 cm ebatlarındadır. Kullanılacak geopolimer tarihi yapı harç türünün seçimi 50x50x50 mm'lik numuneler üzerinde uygulanan basınç dayanımı testi sonuçlarına göre belirlenmiştir.

Duvar birimi için kullanılan geopolimer tarihi yapı harcının karışım oranları Çizelge 3.3.'de K56 olarak adlandırılan karışımda verilmiştir. Standart tarihi yapı harcı için kullanılan karışım oranları ise Çizelge 3.4.'de S1 olarak adlandırılan karışımda verilmiştir. Duvar elemanları üretilirken harcın etkili bir aderans sağlaması için çekiç yardımıyla boşluklu pres tuğlalara hafifçe vurularak örme işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.1 : Üretilen duvar birimlerinin boyutları



Şekil 3.2 : Geopolimer harç kullanılarak basınç dayanımı testi için üretilen duvar birimi

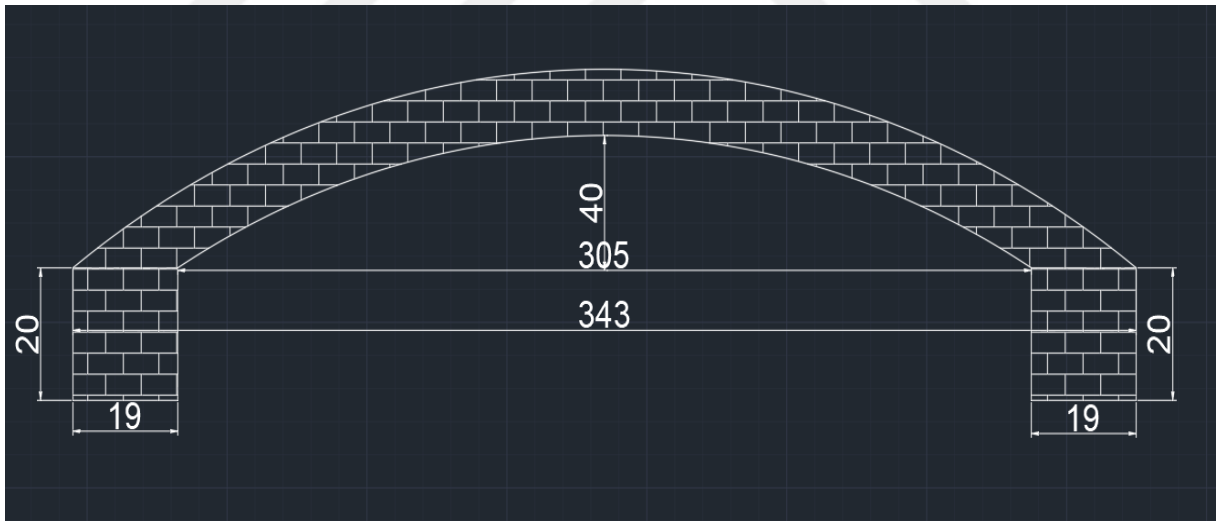


Şekil 3.3 : Standart tarihi yapı harcı kullanılarak basınç dayanımı için üretilen duvar birimi

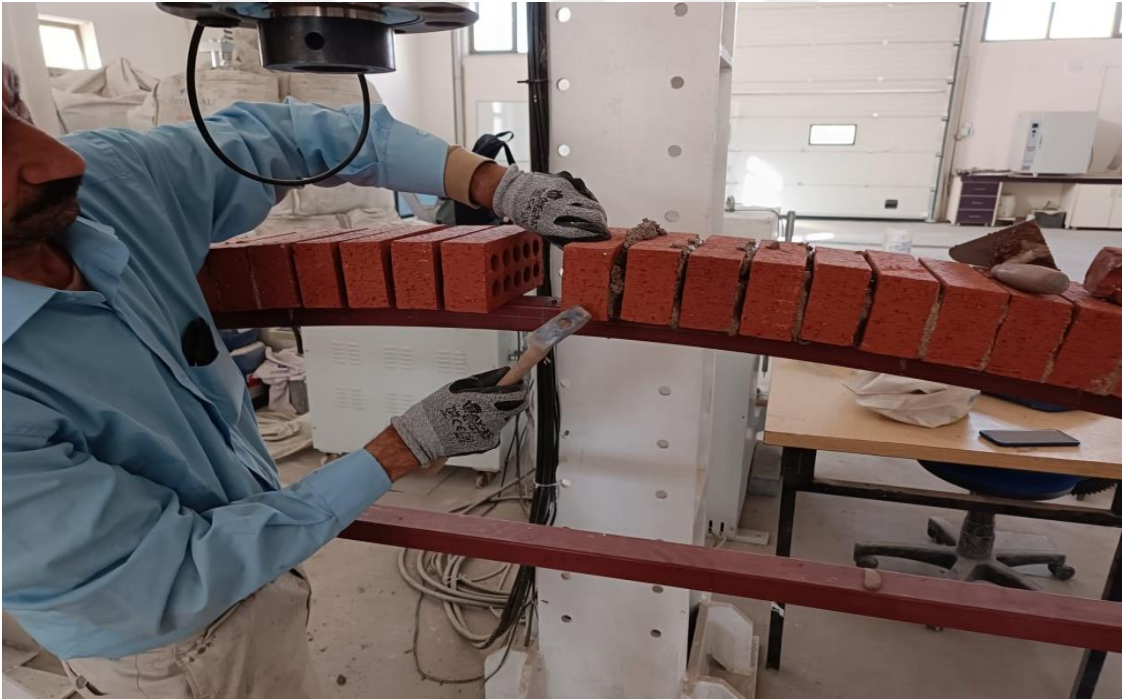
3.2.3. Kemer sistemlerinin üretimi

Kemer sistemlerinin üretimi için 19x9x5 cm ebatlarında boşluklu pres tuğlalar kullanılmıştır. Geopolimer tarihi yapı harcı ve standart tarihi yapı harcı kullanılarak toplamda iki adet kemer üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen kemer sistemlerinde açıklık 305 cm, yükseklik 40 cm, kemer ayak yüksekliği 20 cm ve kemer ayak genişliği 19 cm'dir. Kemer elemanının üretimi için kullanılacak geopolimer tarihi yapı harç türü 50x50x50 mm'lik numuneler üzerinde yapılan basınç dayanımı testi sonuçlarına göre seçilmiştir.

Üretim için seçilen geopolimer tarihi yapı harç karışım oranları Çizelge 3.3'de K56 olarak adlandırılan bölümde verilmiştir. Standard tarihi yapı harcı kullanılarak gerçekleştirilen üretimin malzeme karışım oranları Çizelge 3.4'de S1 olarak adlandırılan bölümde verilmiştir. Kemer üretimi gerçekleştirilirken kullanılan harçların tuğlalar arasına homojen bir şekilde dağılıp etkili aderans sağlamasına dikkat edilmiştir. Ayrıca aderansın desteklenmesi için örülen tuğlalara bir çekiç yardımıyla hafifçe vurulmuştur.



Şekil 3.4 : Üretilen kemer sistemlerinin ölçüleri



Şekil 3.5 : Kemer sistemlerinin üretimi

3.2.4. Harç numunelerinin basınç dayanımı testi

Alınan numuneler laboratuvar ortamında kürlleme koşullarına tabi tutulmuştur. Basınç dayanımı testleri İnönü Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarı'nda bulunan basınç cihazında, TS EN 12390-3 standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Basınç cihazında yükleme hızı standartlara uygun olarak 2400 N/s olarak seçilmiştir. Numuneler pres cihazına yerleştirilirken, cihazın yükleme bölgesinin ortasına gelecek şekilde konumlandırılmıştır. Yükleme sonrasında elde edilen kuvvet değeri, numune yüzey alanına bölünerek basınç dayanımı MPa cinsinden bulunmuştur. Numunelere uygulanan basınç dayanımı testleri 7 günlük, 28 günlük ve 56 günlük yaş aralıklarında gerçekleştirilmiştir. Her yaş aralığı için 2 numune üzerinde basınç dayanımı testi uygulanarak ortalaması alınmıştır.



Şekil 3.6 : Basınç dayanımı test cihazı

3.2.5. Duvar birimlerinin basınç dayanımı testi

Basınç dayanımı için üretilen duvar birimleri 56 gün boyunca laboratuvar ortamında bekletilip harcın dayanım kazanması sağlanmıştır. Duvar birimleri basınç dayanımı testi için 60 ton kapasiteli çerçeve yükleme sistemi içerisinde yerleştirilmiştir. Tüm duvar birimlerinin üzerine önce kauçuk konulup daha sonra çelik dairesel bir plak yerleştirilerek yüklemenin etkili bir şekilde aktarılması sağlanmıştır. Basınç dayanımı testi bir tane geopolimer tarihi yapı harcı kullanılarak örülen duvar birimi (GHB1) üzerinde, bir tane ise standart tarihi yapı harcı kullanılarak örülen duvar birimi (HB1) üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Deneyde yükleme hızı ASTM C1314-10, 2011, standartlarına göre 1 mm/dak olarak seçilmiştir. Basınç dayanımı testi sonucunda duvarlar birimlerinin taşıma kapasitesi ve deplasman değeri yükleme sisteminin bağlı olduğu bilgisayar tarafından okunmuş ve kaydedilmiştir.



Şekil 3.7 : GHB1 duvar biriminin basınç dayanımı testi

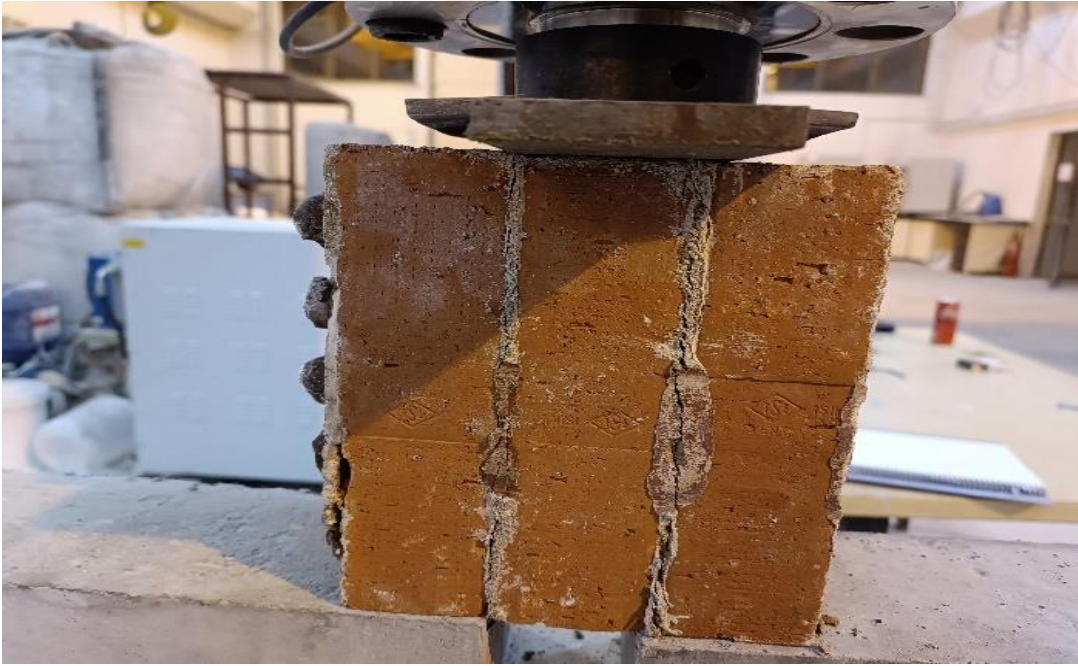


Şekil 3.8 : HB1 duvar biriminin basınç dayanımı testi

3.2.6. Duvar birimlerinin kesme dayanımı testi

Kesme dayanımı için üretilen duvar birimleri 56 gün laboratuvar ortamında bekletilip harcın dayanım kazanması sağlanmıştır. Kesme dayanımı testi için üretilen duvar birimleri 60 ton kapasiteli çerçeve yükleme sistemi içerisine yerleştirilmiştir. Duvar birimlerinin üzerine yükün etkin bir şekilde aktarılabilmesi açısından üzerine kauçuk ve daha sonra çelik dairesel bir plak yerleştirilmiştir. Kesme dayanımı testi bir tane geopolimer tarihi yapı harcı kullanılarak örülen duvar birimi (GHK1) ve bir tane de standart tarihi yapı harcı kullanılarak örülen duvar birimi (HK1) üzerinde uygulanmıştır.

Deneyde yükleme hızı verilerin detaylı bir şekilde elde edilebilmesi açısından 0,1 mm/dak olarak seçilmiştir. Kesme dayanımı testi sonrasında elde edilen veriler, çerçeve sistemin bağlı olduğu bilgisayar üzerinde okunmuş ve kaydedilmiştir.



Şekil 3.9 : GHK1 duvar biriminin kesme dayanımı testi

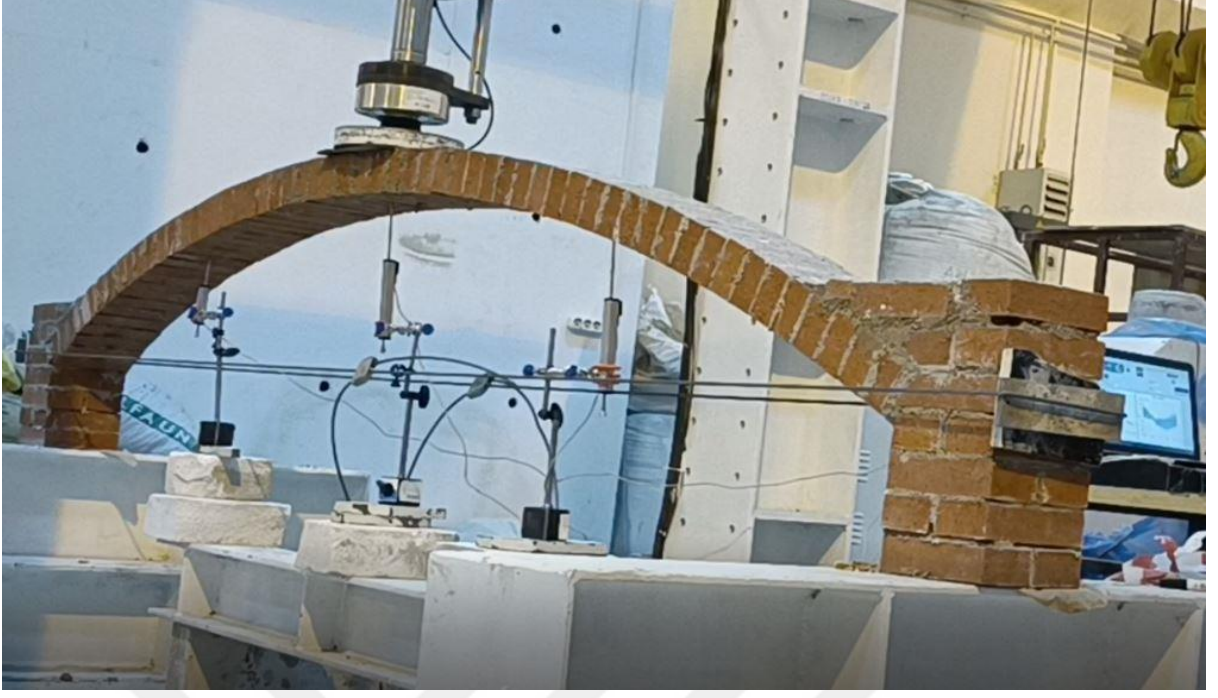


Şekil 3.10 : HK1 duvar biriminin kesme dayanımı testi

3.2.7. Kemer sistemlerinin eğilme dayanımı testi

Eğilme dayanımı testi için üretilen kemer elemanları 56 gün boyunca laboratuvar ortamında bekletilip harcın dayanım kazanması sağlanmıştır. Kemer elemanların eğilme dayanımı testi kapasitesi 60 ton olan çerçeve yükleme sistemi tarafından gerçekleştirilmiştir. Eğilme dayanımının tespiti açısından kemer sistemlerinin orta noktası bulunup, yükleme gerçekleştirilmiştir. Eğilme dayanımı testi bir tanesi geopolimer tarihi yapı harcından üretilen kemer sistemi (GHK) bir tanesi ise standart tarihi yapı harcından üretilen kemer sistemi (HK) olmak üzere toplam iki adet yapı elemanı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Oluşan deplasmanların tespit edilebilmesi açısından bir adet merkeze iki adet ise köşelerden merkeze kadar olan uzaklığın 3/4'ü mesafede elektronik deplasman ölçer (LDVT) cihazlar yerleştirilmiştir. Yükleme işleminin etkin bir şekilde gerçekleşebilmesi açısından kemer elemanlarının yükleme yapılacak kısmına kauçuk ve üzerine çelik dairesel bir plaka yerleştirilmiştir.

Deney sisteminde yükleme hızı 1 mm/dk olarak seçilmiştir ve sistemin bağlı olduğu bilgisayar tarafından veriler okunmuş ve kaydedilmiştir (Kanıt ve Işık, 2004).



Şekil 3.11 : GHK ve HK kemer sistemlerinin eğilme dayanımı testi

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE DEĞERLENDİRME

4.1. Geopolimer harcın optimizasyonu

4.1.1. Basınç dayanımı

Deneysel bulgular incelendiğinde en düşük 7 günlük basınç dayanımının K21 numaralı karışımda 5 MPa olarak bulunduğu görülmüştür. 28 ve 56 günlük basınç dayanımları incelenecek olursa en düşük dayanımlar K5 numaralı karışımda sırasıyla 11,1 ve 12,1 MPa olarak gözlenmiştir. En yüksek 7 günlük basınç dayanım değeri K52 numaralı karışımda 36 MPa olarak elde edilmiştir. Ayrıca 28 ve 56 günlük dayanımlara bakılacak olursa en yüksek basınç dayanım değerlerinin K56 numaralı karışımda sırasıyla 30,6 ve 36,1 MPa olduğu görülmüştür. S1 olarak adlandırılan standart tarihi yapı harcı ile üretilen karışımda ise 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımı değerleri sırasıyla 0,39, 0,46 ve 0,485 MPa olarak bulunmuştur.

Standart tarihi yapı harcı (S1) ile üretilen karışım ile 7, 28 ve 56 günlük optimum dayanım verileri elde edilen karışımlar kıyaslanmıştır. 7 günlük dayanım için S1 karışımına kıyasla, K52 karışımında yaklaşık olarak %9200 daha yüksek dayanım elde edilmiştir. Nihai dayanımlar olan 28 ve 56 günlük dayanımlar için K56 numaralı karışımda, S1 karışımına kıyasla, sırasıyla yaklaşık olarak %6600 ve %7300 kadar daha yüksek dayanımlar olduğu gözlenmiştir.

Yüksek fırın cürufunun alkali aktivatörler ile gerçekleştirdiği polimerizasyon tepkimeleri sonucunda Si-O-Al-O bağlarından oluşan üç boyutlu polimerik zincir halkasal yapı açığa çıkar. Geopolimer üretimlerin dayanım kazanma özelliklerinin bu kimyasal reaksiyonlara dayandığı düşünülmektedir (Van Chanh ve diğ., 2008).

Ayrıca yüksek fırın cürufunun bünyesinde bulundurduğu yüksek CaO içeriği dolayısıyla gerçekleşen polimerizasyon tepkimeleri sonrasında C-S-H jelleri (tobermorit) oluşmasıyla dayanım özelliklerinin desteklendiği söylenebilir (Aziz ve diğ., 2020).

Aktivatör olarak kullanılan Na_2SiO_3 sıvı formda iken etkili bağlanmayı teşvik eden ve basınç dayanımını destekleyen polimerizasyon reaksiyonlarının veriminin artmasını sağlar. Na_2SiO_3 sıvısı yüksek viskozite özelliği gösteren bir malzeme olup, karışımda fazla miktarda kullanılacak olursa aktivatör/bağlayıcı oranını yükseltip, polimerizasyon reaksiyonlarının verimini düşürmesi dolayısıyla dayanımı olumsuz etkileyecektir (Aziz ve diğ., 2020).

Hazırlanan geopolimer tarihi yapı harçları ile ilgili 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımı değerleri ayrıntılı olarak Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Standart tarihi yapı harcının 7, 28 ve 56 günlük dayanım değerleri Çizelge 4.3’de görülmektedir.

Ayrıca 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımı deney sonuçlarının daha iyi gözlenmesi açısından grafiğe dökülmüştür. Şekil 4.8’de standart tarihi yapı harcının basınç dayanımı verileri belirtilmiştir. Geliştirilen optimum geopolimer ve standart tarihi yapı harcının deneysel verilerinin kıyaslanması Şekil 4.9’da yapılmıştır.

Çizelge 4.1 : Geopolimer tarihi yapı harçlarının basınç dayanımları

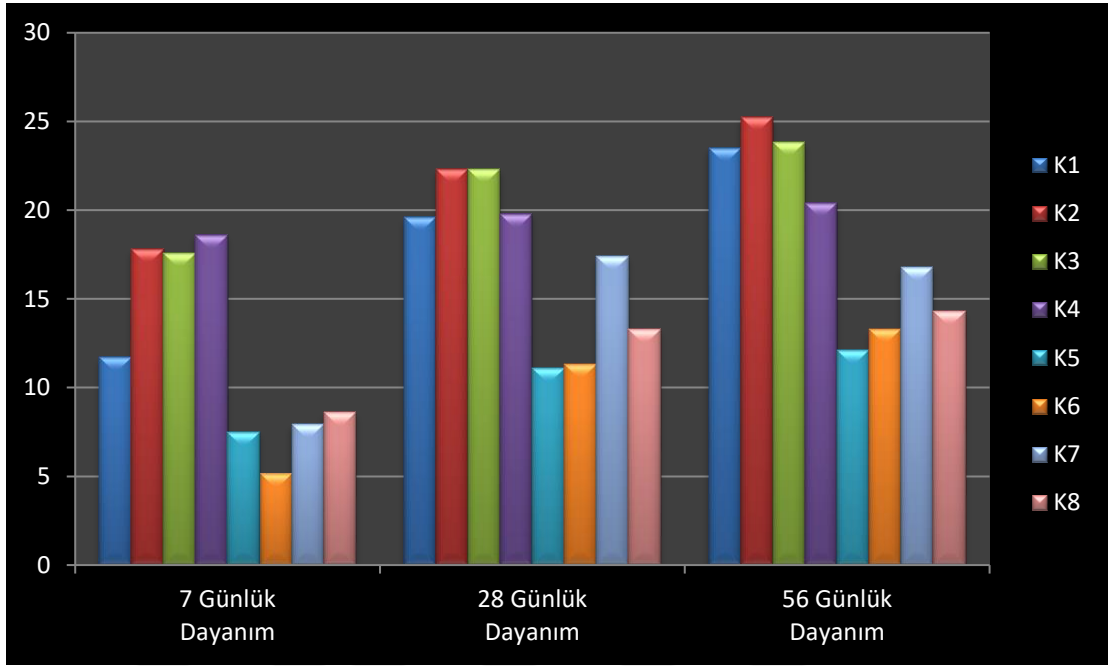
Karışım no	7 Günlük Dayanım (MPa)	28 Günlük Dayanım (MPa)	56 Günlük Dayanım (MPa)
K1	11,7	19,6	23,5
K2	17,8	22,3	25,2
K3	17,6	22,3	23,8
K4	18,6	19,8	20,4
K5	7,5	11,1	12,1
K6	5,2	11,3	13,3
K7	7,9	17,4	16,8
K8	8,6	13,3	14,3
K9	11	17,6	21,1
K10	11,2	19,3	19,5
K11	15,2	17,4	21,2
K12	12,8	20,6	23,7
K13	8,8	16	20,1
K14	10,2	20,7	21
K15	11,5	15	14,3
K16	15,5	23,8	22,2
K17	11	19	20,3
K18	10,5	21,4	19,1
K19	13,6	24	26,4
K20	15,7	27,1	27,6
K21	5	11,5	12,7
K22	11,8	22	23,6
K23	8,8	20,4	24,3
K24	14,3	26,2	29,2
K25	11,1	14,7	16,1
K26	9,5	17,1	19,2
K27	16,7	19,6	23,5
K28	15	20,1	25

Çizelge 4.2 : Geopolimer tarihi yapı harçlarının basınç dayanımları

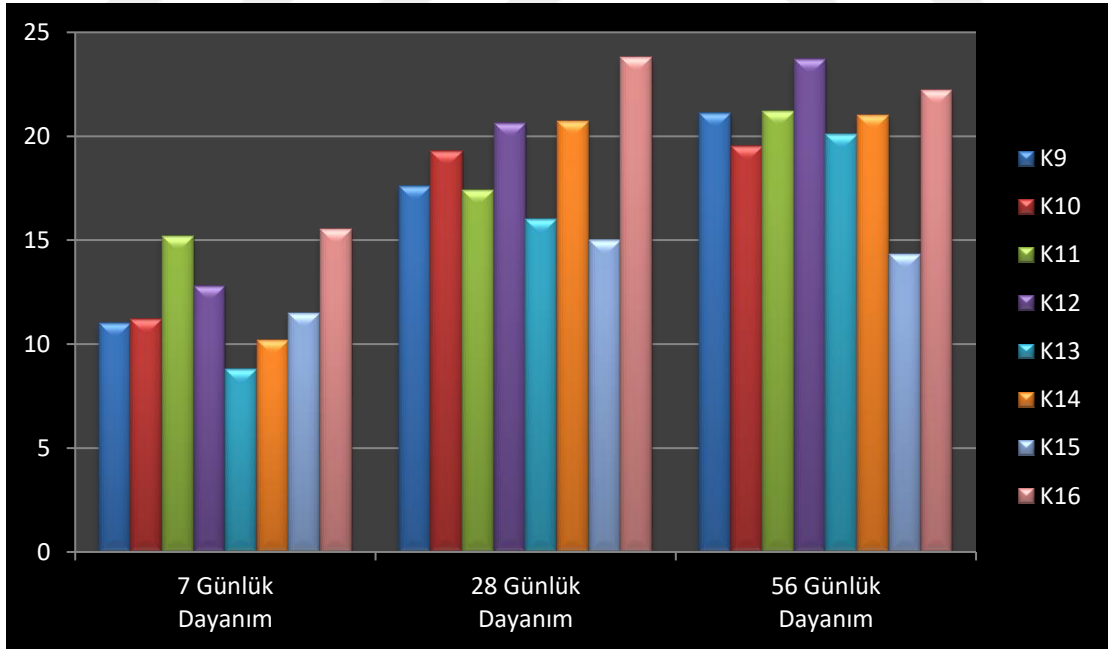
Karışım no	7 Günlük Dayanım (MPa)	28 Günlük Dayanım (MPa)	56 Günlük Dayanım (MPa)
K29	13,7	17,9	19,5
K30	13,5	17,7	22,6
K31	17,9	23,4	23,7
K32	18,1	18,4	25,8
K33	25,7	26	29,3
K34	20,7	19,3	20,6
K35	30,2	28,7	30,1
K36	30,5	29,2	31,3
K37	274,5	27,2	28,2
K38	30	28,1	32,1
K39	28,7	27,8	33,4
K40	31	30	32,8
K41	25,6	22,5	26,7
K42	29,8	24,8	28,3
K43	22,3	21,6	24,5
K44	29,2	25,1	28,8
K45	28	19	20,1
K46	31	20	25,2
K47	32	26	29,1
K48	35	27	32,6
K49	31	18,1	20,1
K50	32,5	22,3	23,2
K51	35,1	23,1	30,2
K52	36	25,4	26,7
K53	29,3	23,7	26,4
K54	28,5	21,4	28,6
K55	26	22,8	30,8
K56	30	30,6	36,1

Çizelge 4.3 : Standart tarihi yapı harcının basınç dayanımları

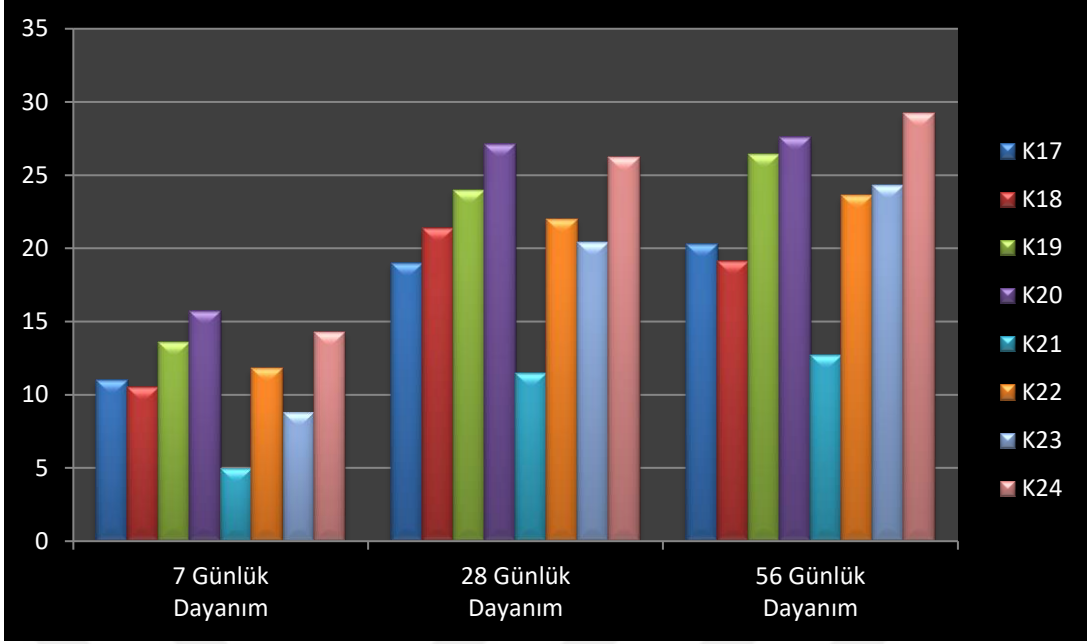
Karışım no	7 Günlük Dayanım (MPa)	28 Günlük Dayanım (MPa)	56 Günlük Dayanım (MPa)
S1	0,39	0,46	0,485



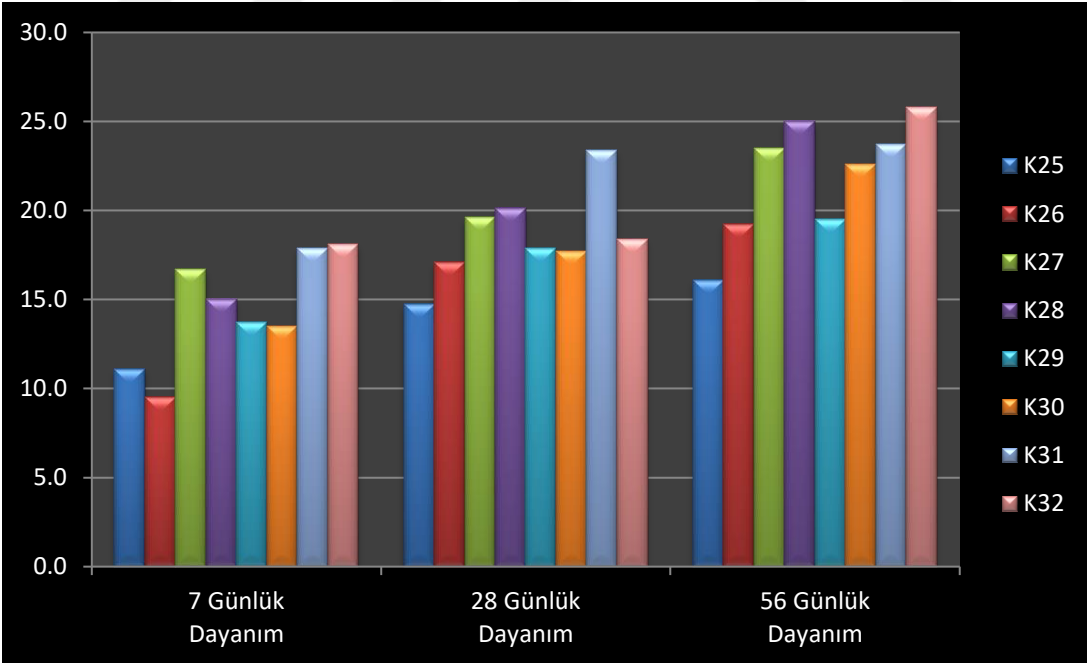
Şekil 4.1 : K1-K8 örneklerinin basınç dayanımları



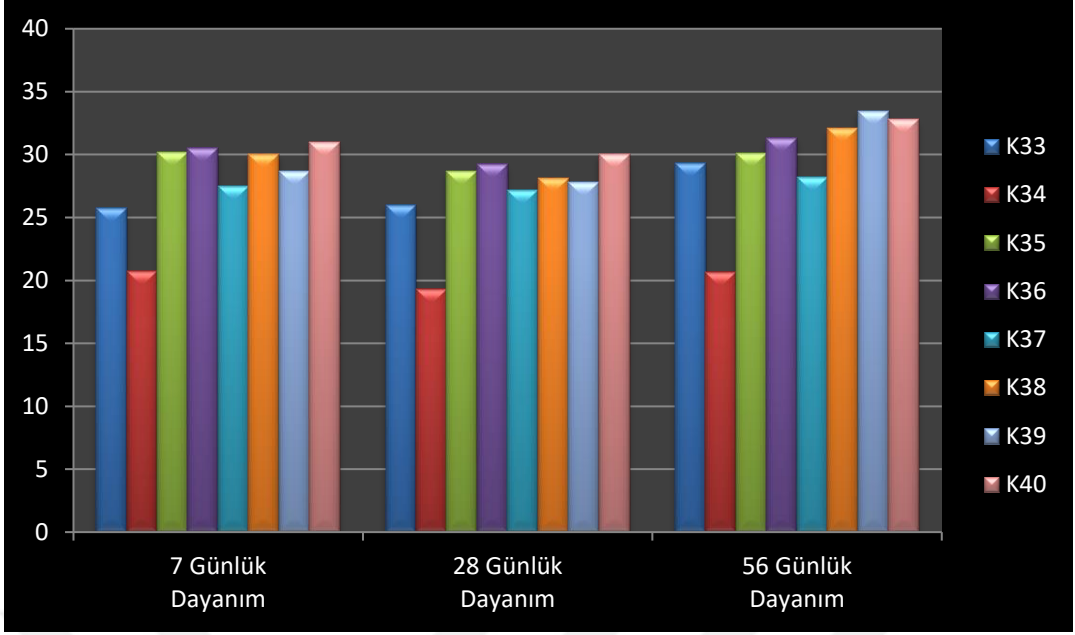
Şekil 4.2 : K9-K16 örneklerinin basınç dayanımları



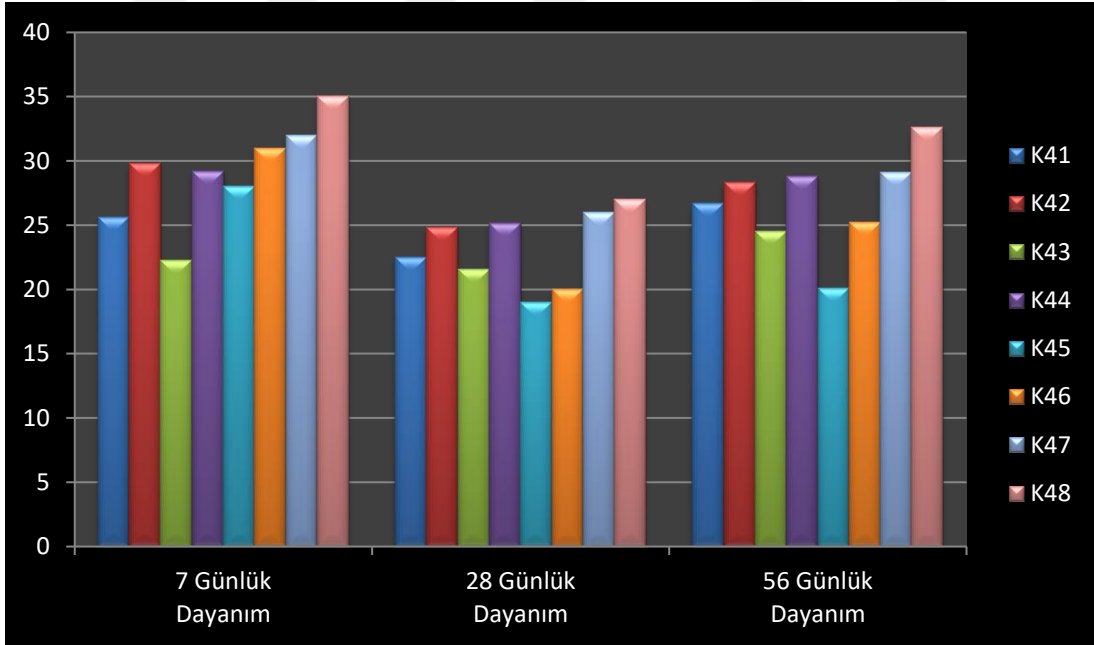
Şekil 4.3 : K17-K24 örneklerinin basınç dayanımları



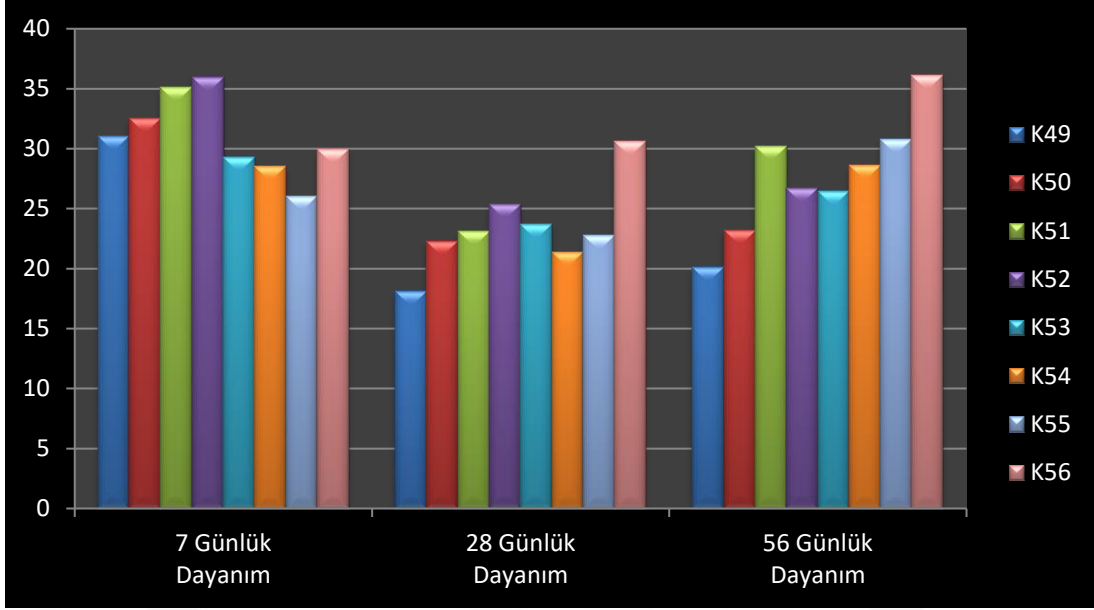
Şekil 4.4 : K25-K32 örneklerinin basınç dayanımları



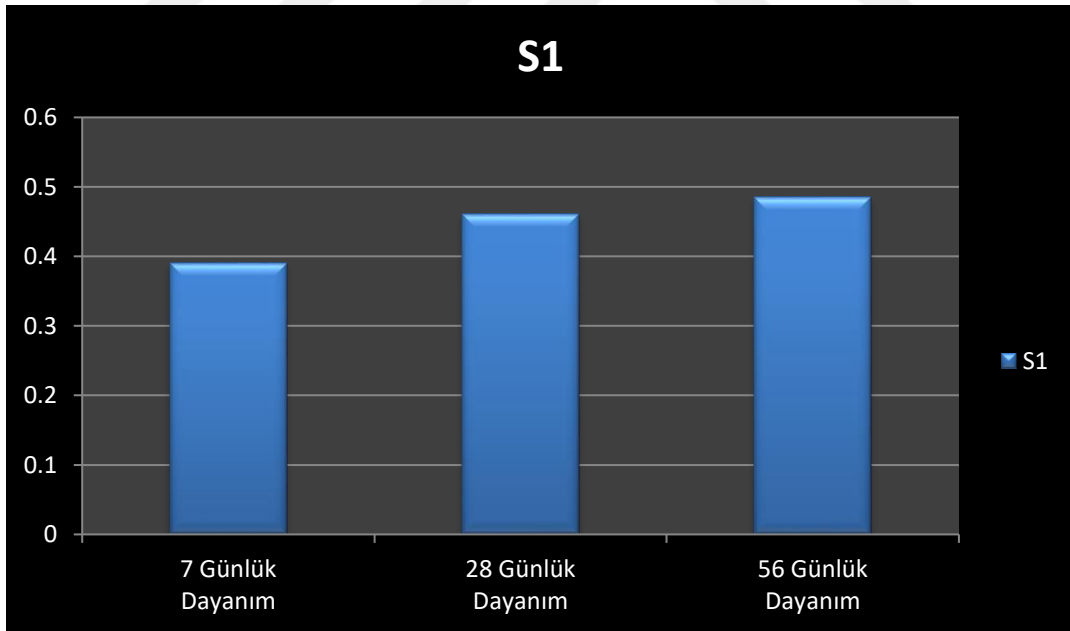
Şekil 4.5 : K33-K40 örneklerinin basınç dayanımları



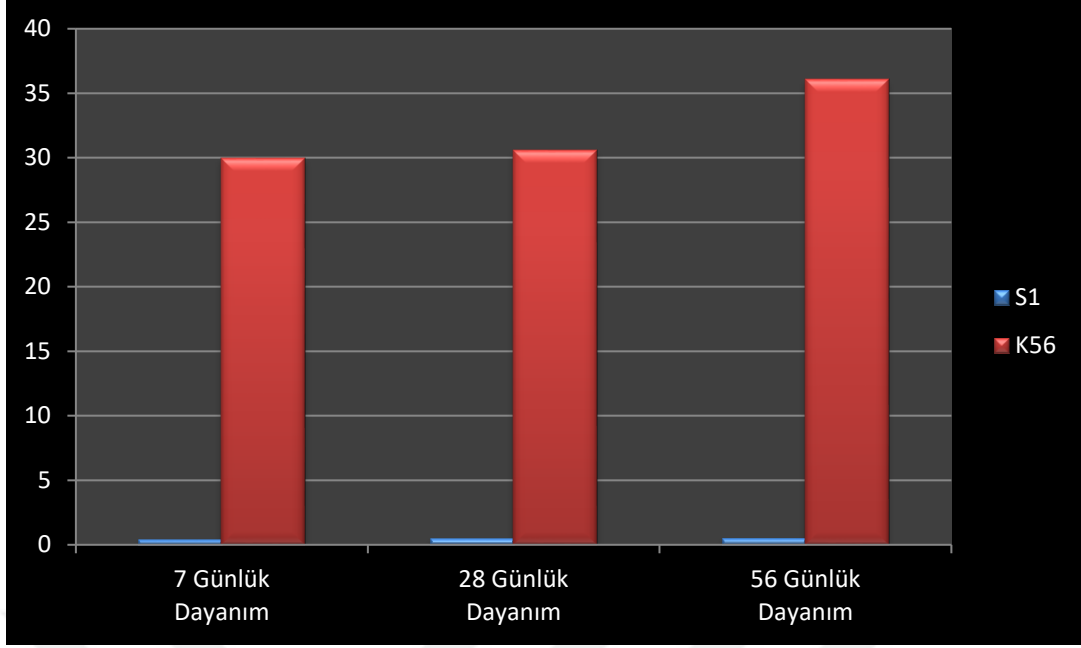
Şekil 4.6 : K41-K48 örneklerinin basınç dayanımları



Şekil 4.7 : K49-K56 örneklerinin basınç dayanımları



Şekil 4.8 : S1 örneğinin basınç dayanımı



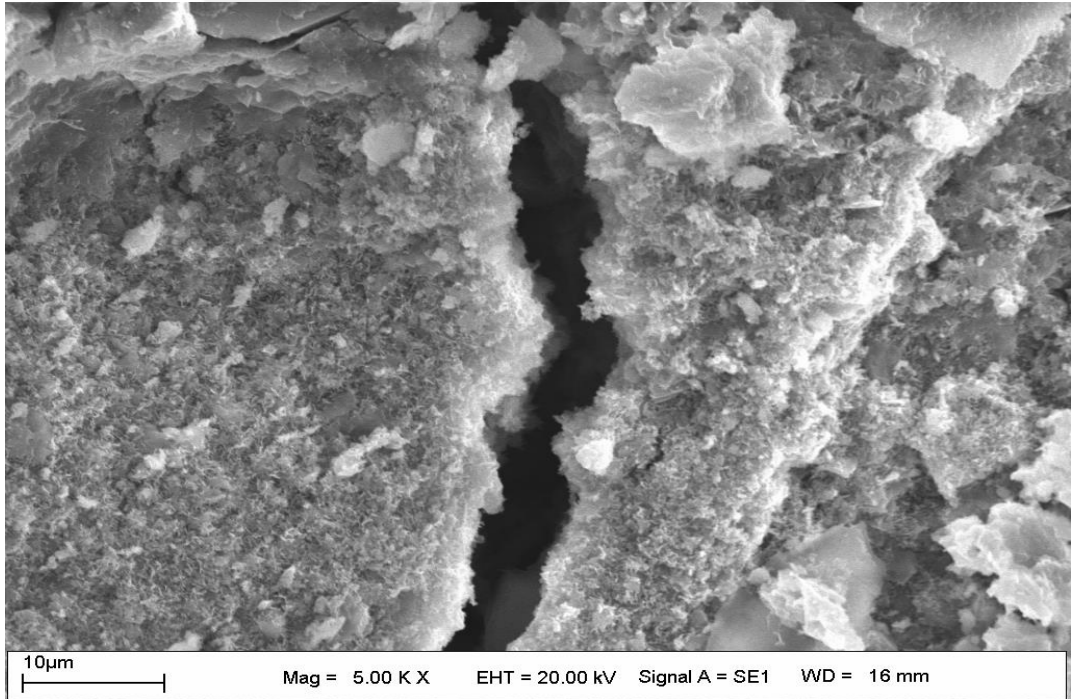
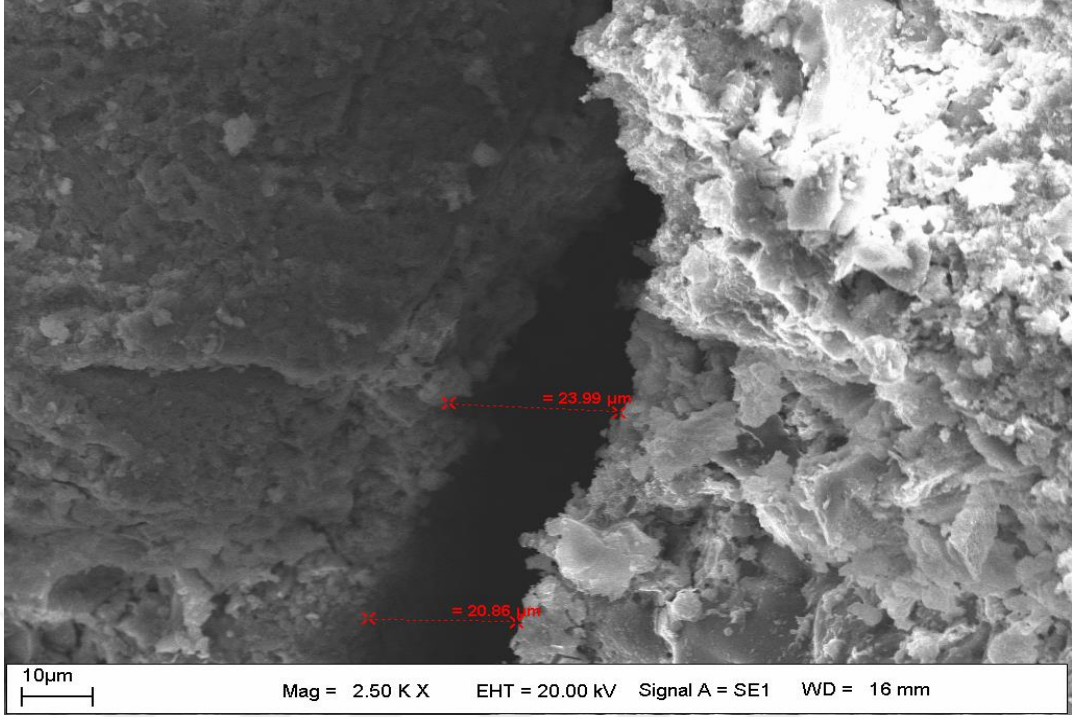
Şekil 4.9 : S1-K56 örneklerinin basınç dayanımları

4.1.2. Mikro yapı analizi

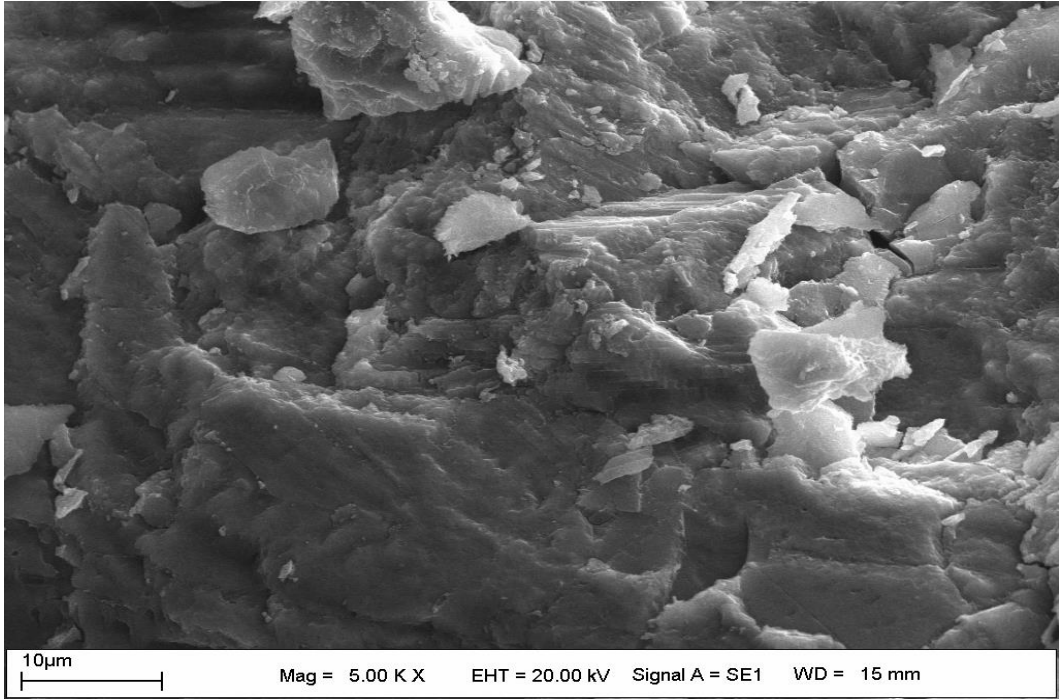
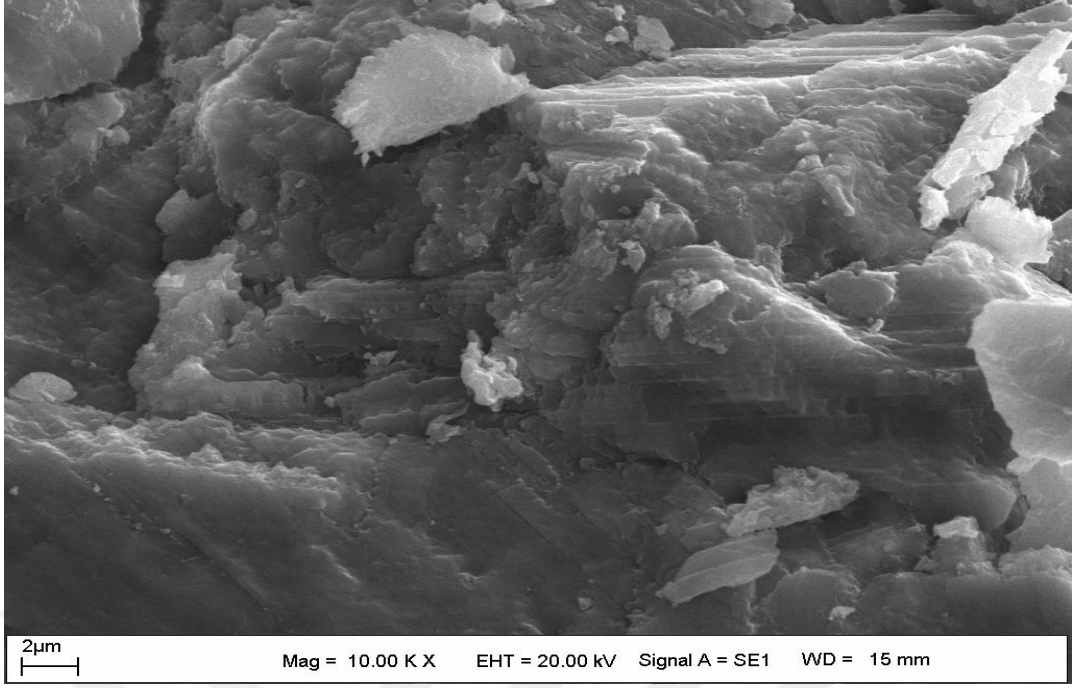
Hazırlanan karışımlardan nihai dayanımları en düşük ve en yüksek olanları seçilip mikroyapı analizi yapılmıştır. Bu sayede mikro yapı analizleri incelenerek dayanım verileri ile ilgili değerlendirme yapılmıştır. Şekil 4.10 nihai dayanımda en düşük basınç dayanımına sahip K5 karışımının mikroyapı incelemesi olup, Şekil 4.11 ise en yüksek nihai basınç dayanımına sahip K56 karışımının mikroyapı incelemesidir.

K5 karışımının mikro yapısı incelendiğinde 23,99 ve 20,86 μm çaplarında boşluk oluşumu gözlenmiş dolayısıyla boşluklu bir yapı ortaya çıktığı söylenebilmektedir. K56 karışımının mikro yapısı incelendiğinde ise kompakt yapı sağlanmıştır.

Elde edilen mikro yapısal gözlemler basınç dayanımı testlerinden elde edilen bulguları doğrulamıştır. Daha yoğun bir yapı gözlenmesi, mekanik özelliklerin yüksek parametrelere çıkmasının bir açıklaması olabilir (Yazıcı ve Karagöl, 2022).



Şekil 4.10 : K5 örneğinin mikro yapı analizi



Şekil 4.11 : K56 örneğinin mikro yapı analizi

4.2. Duvar birimleri

4.2.1. Duvar birimlerinin basınç dayanımı

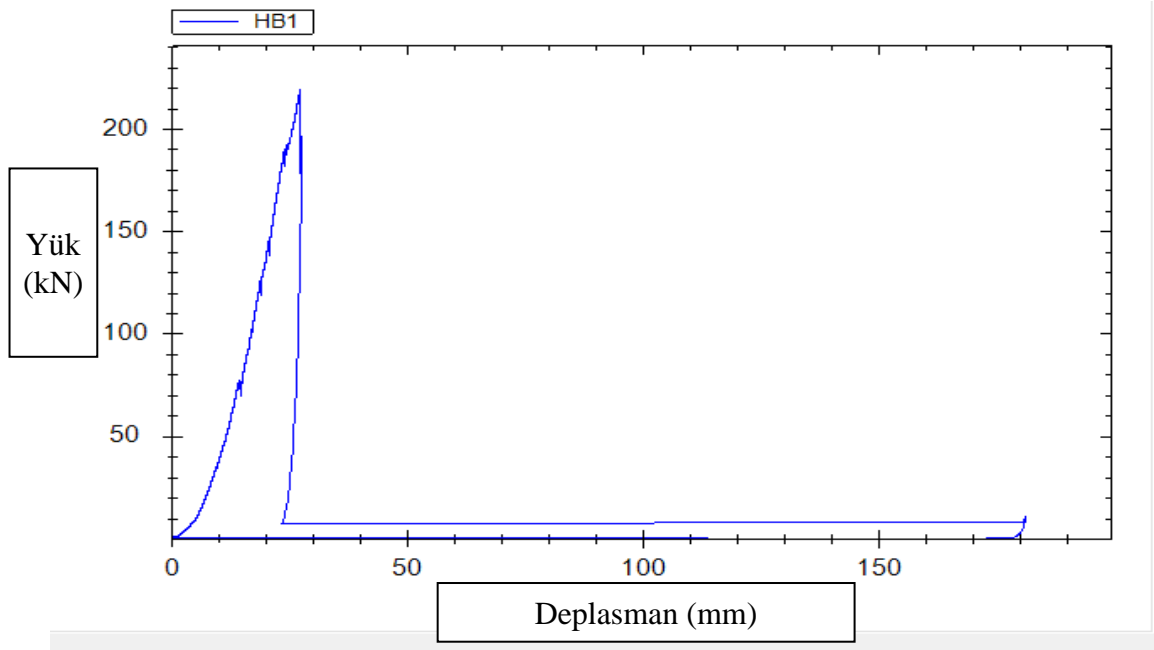
Duvar elemanları üzerinde basınç dayanımı deneyi optimum geopolimer tarihi yapı harcı (K56) ve standart tarihi yapı harcı (S1) kullanılarak örülen duvar birimleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu sayede optimum geopolimer harç ile üretilen duvar biriminin (GHB1) ve standart tarihi yapı harcı ile üretilen duvar biriminin (HB1) basınç dayanımları kıyaslaması yapılmıştır.

Standart tarihi yapı harcı kullanılarak üretilen duvar birimi (HB1) 56 günde, yaklaşık olarak 20 ton yük taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Geopolimer tarihi yapı harcı kullanılarak üretilen duvar birimi (GHB1) ise 56 günde, yaklaşık olarak 36 tonluk bir taşıma kapasitesi değerine ulaşmıştır. Basınç dayanımı test sonuçları kıyaslandığında geopolimer tarihi yapı harcı kullanılarak üretilen duvar biriminde (GHB1) standart tarihi yapı harcı ile üretilen duvar birimine (HB1) göre %80 daha yüksek bir dayanım gözlenmiştir. Elde edilen bulgulara benzer şekilde NaOH molaritesinin artması sayesinde farklı $Na_2SiO_3/NaOH$ oranında aktivatör içeriğine sahip cüruf bazlı geopolimer üretimlerin dayanımı artmaktadır (Elyamany ve diğ., 2018; Yedulla ve Karthiyaini, 2020).

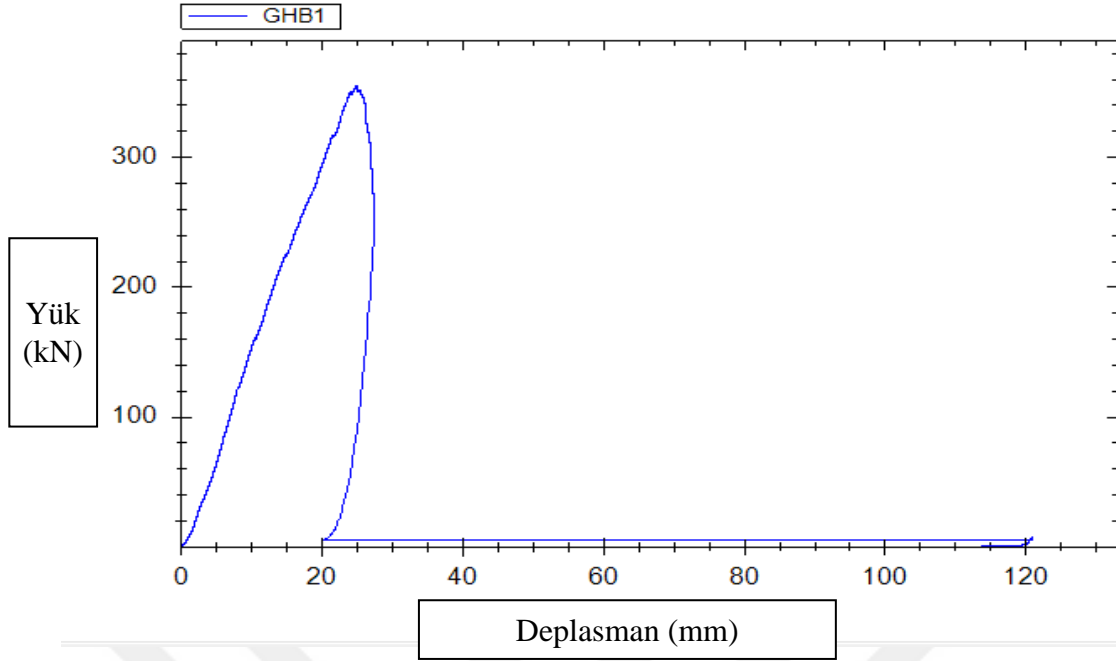
Standart tarihi yapı harcı kullanılarak üretilen duvar biriminin (HB1) basınç dayanımı Şekil 4.12’de geopolimer tarihi yapı harcı kullanılarak üretilen duvar biriminin (GHB1) basınç dayanımı test sonucu ise Şekil 4.13’de gösterilmektedir. İki farklı üretimin basınç dayanımı deney sonuçlarının kıyası açısından Şekil 4.14’de bir arada verilmiştir.

Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’da duvar birimlerinin basınç dayanımı yükleme sistemi tamamlandıktan sonra kırılma durumu gösterilmiştir. Görseller incelendiğinde geopolimer tarihi yapı harcı ile üretilen duvar biriminin (GHB1) bütünlüğünü büyük oranda muhafaza ettiği ve bu sayede olası hasar durumları için onarım çalışmalarına elverişli olduğu söylenebilmektedir. Standart tarihi yapı harcı kullanılarak üretilen duvar biriminin (HB1) bütünlüğünü büyük oranda kaybettiği dolayısıyla meydana gelebilecek hasar durumlarında onarım çalışmaları için elverişli olmayıp yeniden üretim gerektirdiği söylenebilir.

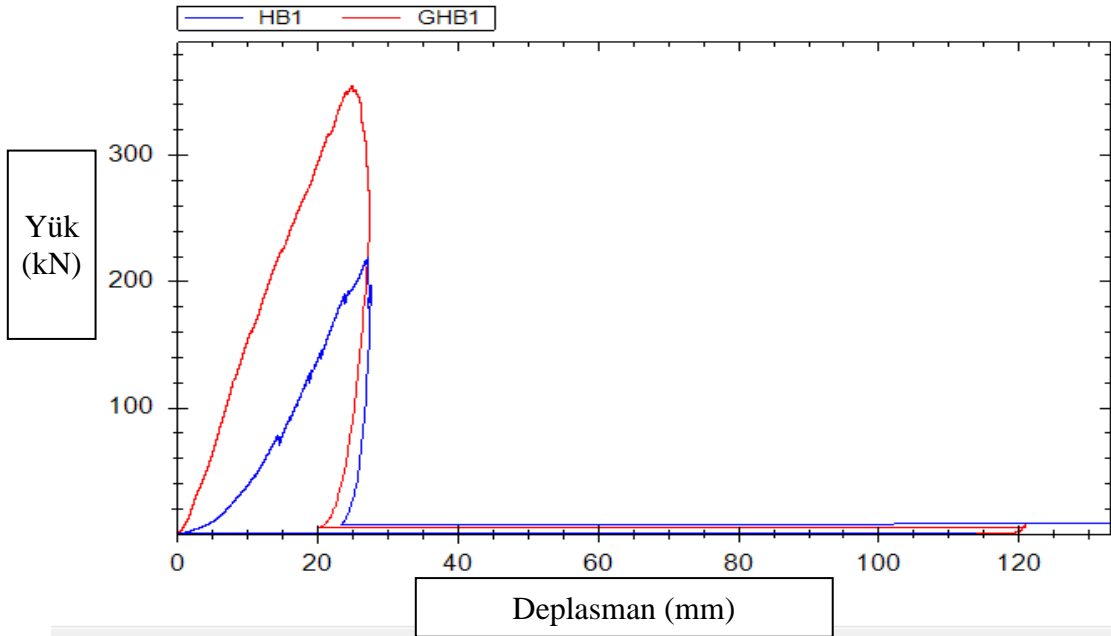
Geopolimer harçlarının kullanımı sayesinde nemli kürlenme koşullarının ortadan kaldırılması için çimento esaslı malzemelere kıyasla tuğla uygulamalarına özgü avantajlar sağladığı belirlenmiştir (Saba ve Assaad, 2021; Deng ve Zheng, 2023).



Şekil 4.12 : HB1 duvar biriminin basınç dayanımı (56 gün)



Şekil 4.13 : GHB1 duvar biriminin basınç dayanımı (56 gün)



Şekil 4.14 : GHB1 ve HB1 duvar birimlerinin basınç dayanımı (56 gün)



Şekil 4.15 : HB1 duvar biriminin kırılması



Şekil 4.16 : GHB1 duvar biriminin kırılması

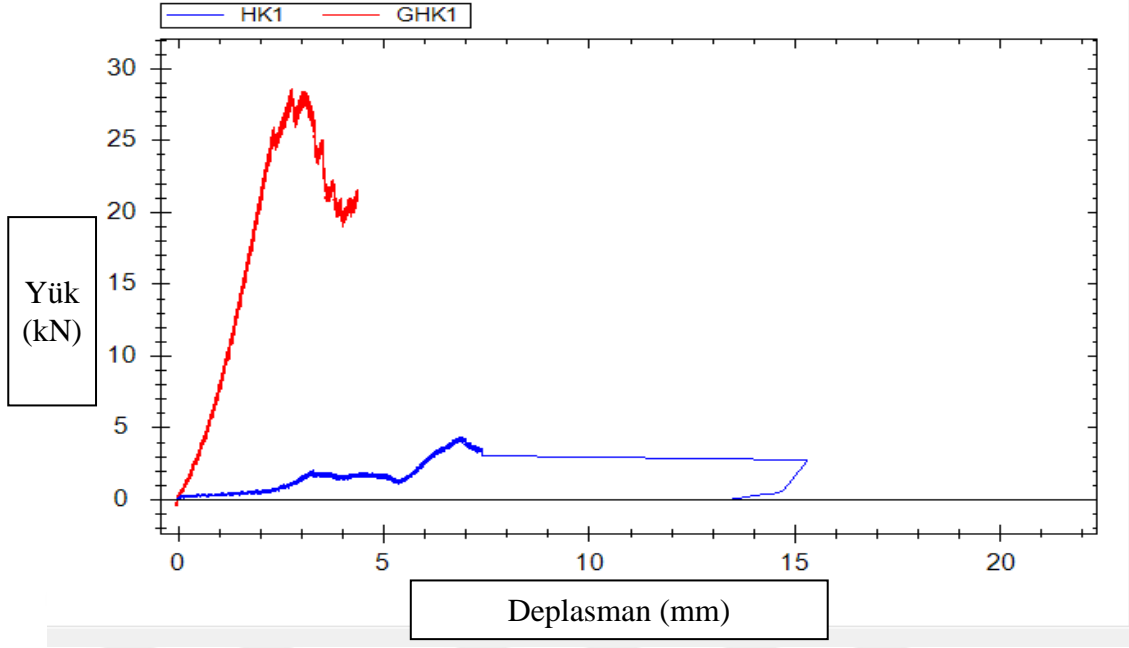
4.2.2. Duvar birimlerinin kesme dayanımı

Optimum geopolimer tarihi yapı harcı (K56) ve standart tarihi yapı harcı (S1) kullanılarak üretilen duvar birimleri üzerinde kesme dayanımı testleri gerçekleştirilmiştir. Kesme dayanımı deneyinin asıl amacı harcın duvar birimleri üzerindeki etkisini daha iyi analiz edebilmektir.

Kesme dayanımı deneyi sonucunda standart tarihi yapı harcı ile üretilen duvar birimi (HK1) 56 günde, yaklaşık 0,4 ton yük taşıma kapasitesine ulaşmasına karşın geopolimer tarihi yapı harcı ile üretilen duvar birimi (GHK1) 56 günde, yaklaşık olarak 2,8 ton yük taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Dolayısıyla geopolimer tarihi yapı harcı ile üretilen duvar birimi (GHK1) standart tarihi yapı harcı ile üretilen duvar birimine kıyasla (HK1) kesme dayanımı parametrelerinde, yaklaşık %600 daha fazla dayanım elde edilmiştir. Bu durum üretilen geopolimer tarihi yapı harcının (K56) standart tarihi yapı harcına (S1) göre oldukça iyi bir aderansa sahip olduğunun göstergesidir.

Gao ve diğ., (2022) tarafından yapılan bir araştırmada yapıların onarım ve güçlendirilmesi için çimento harcına alternatif olarak geopolimer harcın aderans özelliklerinin daha etkin olduğu bulunmuştur. Ayrıca Tan ve diğ., (2022) tarafından yapılan bir çalışmada çift ara yüz yapı elemanlarının geopolimer olarak üretilen harcın kesme dayanımı ve kesme tokluk değerleri üzerinde olumlu olarak etki gösterdiği elde edilmiştir.

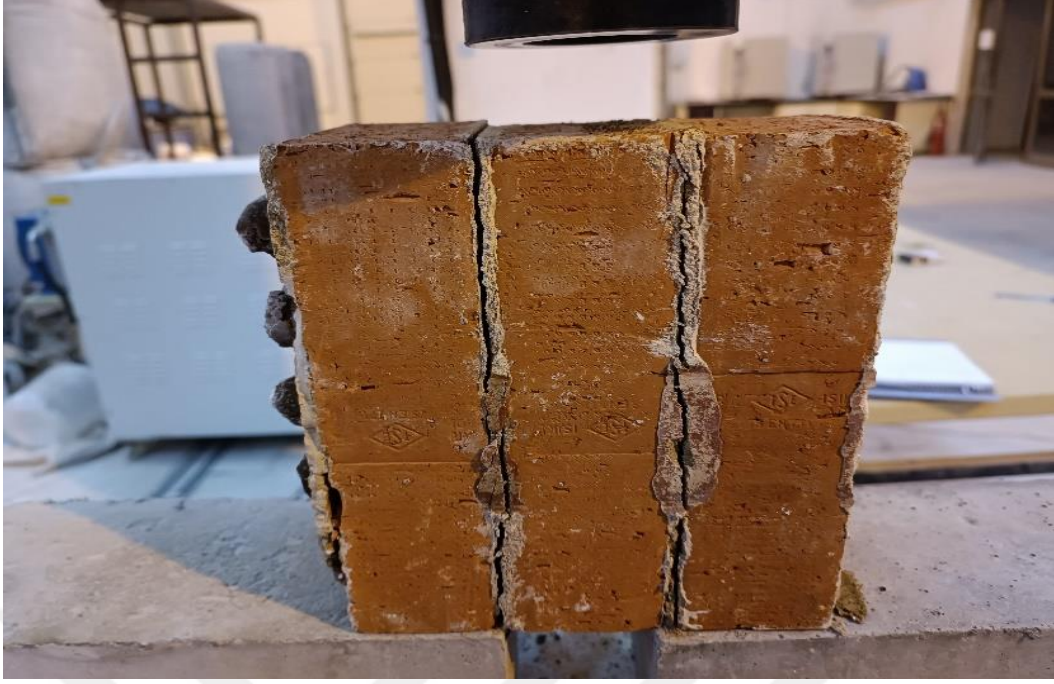
Şekil 4.17’de standart tarihi yapı harcı ile üretilen duvar birimi (HK1) ve geopolimer tarihi yapı harcı ile üretilen duvar biriminin (GHK1) kesme dayanımı test sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.17 : HK1 ve GHK1 duvar birimlerinin kesme dayanımı (56 gün)



Şekil 4.18 : HK1 duvar biriminin harcının ayrışması



Şekil 4.19 : GHK1 duvar biriminin harcının ayrışması

4.3. Kemer sistemleri

4.3.1. Kemer sistemlerinin eğilme dayanımı

Kemer sistemlerinde eğilme dayanımı deneyi optimum geopolimer tarihi yapı harcı (K56) ve standart tarihi yapı harcı (S1) kullanılarak örülen kemerler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde üretilen optimum tarihi yapı harcı ile standart tarihi yapı harcının kemer sistemleri üzerinde eğilme dayanımı testi altında davranışı kıyaslanmıştır.

Standart tarihi yapı harcı kullanılarak üretilen kemer sistemi (HK) 56 günde, eğilme altında yaklaşık 50 kg yük taşıma kapasitesi elde ederken, optimum geopolimer tarihi yapı harcı kullanılarak üretilen kemer sistemi (GHK) 56 günde, yaklaşık olarak 45 kg yük taşıma kapasitesine sahip olmuştur. Eğilme dayanımı deney sonuçları incelendiğinde, optimum geopolimer harçla üretilen kemer elemanının (GHK), standart tarihi yapı harcı ile üretilen kemer elemanına kıyasla yaklaşık olarak %10 gerisinde kaldığı gözlenmiştir. Geopolimer

ürünlerin basınç dayanımı optimum çözelti modülünde silisyum dioksit/ sodyum oksit oranıyla bağlantılıdır (Somna ve diğ., 2011; Temuujin ve diğ., 2009).

Süneklik davranışları değerlendirildiğinde, standart tarihi yapı harcı kullanılarak üretilen kemer sisteminin (HK) eğilme altında yaklaşık olarak 32,5 mm, optimum geopolimer tarihi yapı harcı kullanılarak üretilen kemer sisteminin (GHK) ise eğilme altında yaklaşık 38 mm deplasman yaptığı gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre optimum geopolimer tarihi yapı harcıyla üretilen kemer sisteminin (GHK), standart tarihi yapı harcı ile üretilen kemer sistemine (HK) göre yaklaşık olarak %17 daha fazla deplasman yapmasına bağlı olarak daha sünek bir davranış sergilediği söylenebilir. Sonuçlara göre geopolimer harçlarının süneklik özelliklerinin artmasına bağlı olarak dayanım kayıplarının azalma gösterdiği hatta yüksek süneklik performansına bağlı olarak dayanım ölçütlerinin iyileştiği tespit edilmiştir (Poon ve diğ., 2004; Kalifa ve diğ., 2001).

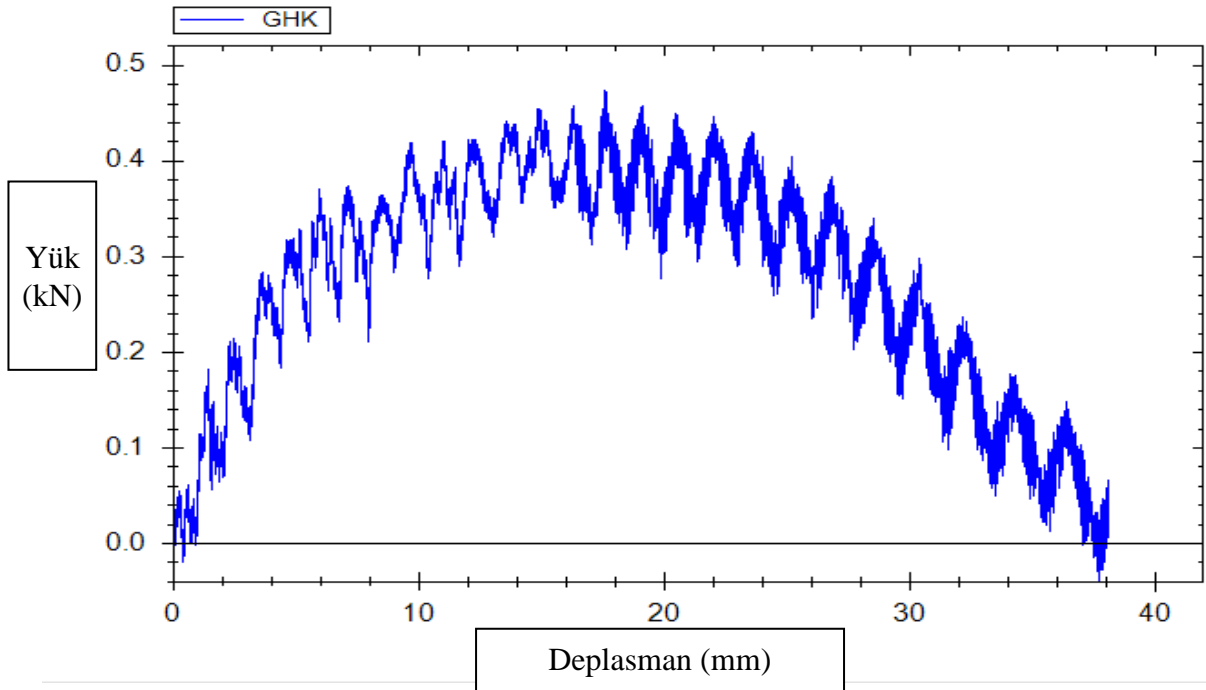
Optimum geopolimer harç ile üretilen kemer sisteminin (GHK) eğilme dayanımı ve deplasman değerleri Şekil 4.20'de gösterilmiştir. Standart tarihi yapı harcı kullanılarak üretilen kemer sisteminin (HK) eğilme dayanımı ve deplasman değerleri Şekil 4.21'de gösterilmiştir. Şekil 4.22'de ise hem optimum geopolimer tarihi yapı harcı kullanılarak üretilen kemer sisteminin (GHK) hem de standart tarihi yapı harcı kullanılarak üretilen kemer sisteminin (HK) eğilme dayanımı ve deplasman değerleri bir arada verilmiştir.

Eğilme dayanımı deneyi sonunda kemer sistemlerinin kırılma mekanizmaları incelendiğinde, standart tarihi yapı harcı ile üretilen kemer sisteminin (HK) üzerine gelen yükü yapı birimlerine dağıtamadığı ve bu duruma bağlı olarak kemer sisteminde bölgesel olarak bütünlük kayıplarıyla beraber deneyin sonlandığı görülmüştür. Optimum geopolimer tarihi yapı harcı ile üretilen kemer sisteminde (GHK) ise üzerine gelen yükü yapı birimlerine daha etkili bir şekilde aktarması sayesinde deneyin sonunda kemer sistemi geçerken yapı birimlerinden hala bağlantısını koruyan kısımlar olduğu gözlenmiştir.

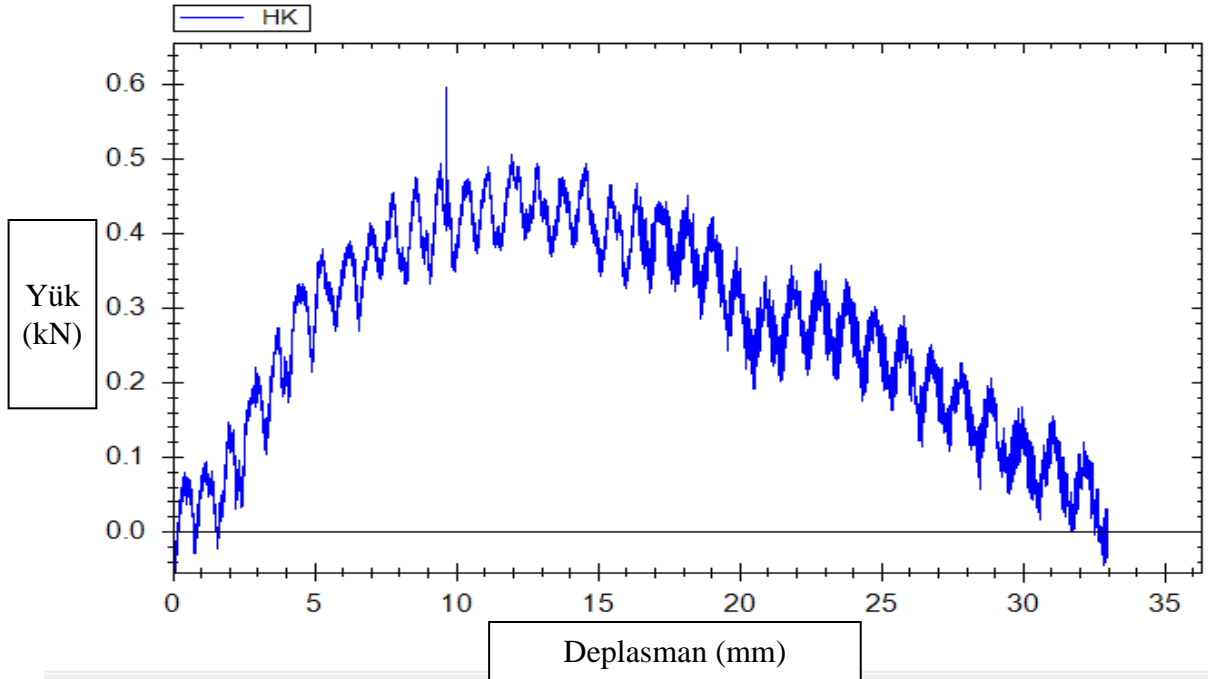
Geopolimer olarak üretimi gerçekleşen kemer sisteminde yükleme eksenine dik olarak kendini gösteren çatlak oluşumu gözlenmiştir. Bu tür çatlak oluşumları yük uygulama

noktasının altında bulunmakla beraber, maksimum yük değerinden önceki yük değerlerinde ortaya çıkmaya başlar (Simoncello ve diğ., 2019).

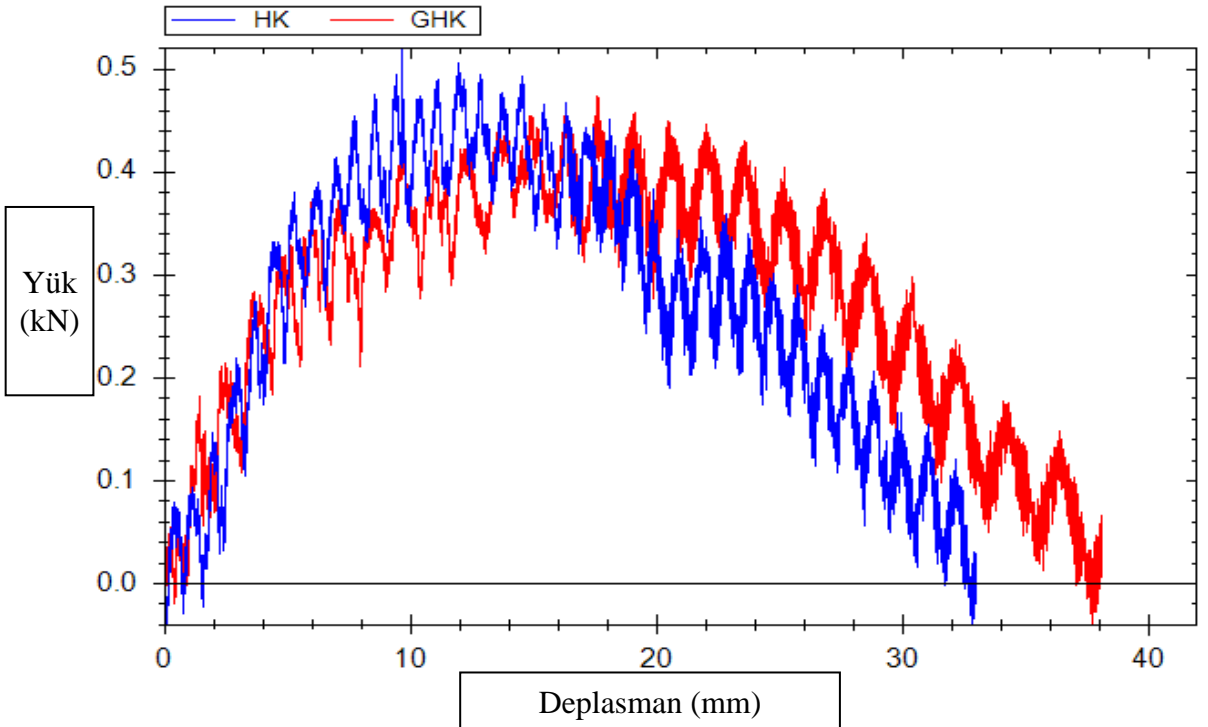
Deplasman özellikleri arttıkça önceki yük aşamalarında çatlak oluşumları artış göstererek bölgesel çöküş engellenir. Bazı araştırmacılar bu durumun nihai kırılma yükünün belirlenmesi ve başarısızlık ölçütlerinin anlaşılması için etkin bir seçenek olduğunu belirtmişlerdir (De Lorenzis ve diğ., 2007; Bićanić ve diğ., 2003)



Şekil 4.20 : GHK kemer sisteminin eğilme dayanımı (56 gün)



Şekil 4.21 : HK kemer sisteminin eğilme dayanımı (56 gün)



Şekil 4.22 : GHK ve HK kemer sistemlerinin eğilme dayanımları (56 gün)



Şekil 4.23 : HK kemer sisteminin dağılması



Şekil 4.24 : GHK kemer sisteminin dağılması

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında, tarihi yapıların onarım ve güçlendirilmesi için geliştirilen geopolimer harcın dayanım değerleri numuneler, duvar birimleri ve kemer elemanı üzerinde detaylı bir şekilde incelenmiştir. Aynı üretimler standart tarihi yapı harcı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve böylece iki farklı üretim mekanizmasının kıyası değerlendirilmiştir. Tez çalışmasından elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özet halinde açıklanabilir:

- Numuneler üzerinde yapılan basınç dayanımı test sonuçları incelendiğinde en yüksek 7 günlük basınç dayanımı K52 (400 g kireç, 80 g tuğla tozu, 360 g YFC, 1680 g kum, SS/SH (10M) 630 g) numaralı karışımdan 36 MPa dayanım elde edilmiştir. 28 ve 56 günlük dayanım sonuçları incelendiğinde ise en yüksek dayanımı veren karışım K56 numaralı karışım olup elde edilen dayanımlar sırasıyla 30,6 ve 36,1 MPa değerleridir. Standart tarihi yapı harcı ile üretilen numuneler incelendiğinde 7, 28 ve 56 günlük dayanım değerleri sırasıyla 0,39 0,46 ve 0,485 MPa olarak tespit edilmiştir.
- Mikro yapı analizi sonuçlarına bakıldığında en düşük nihai dayanımı veren geopolimer üretimde 23,99 ve 20,86 μm çaplarında boşlukların mevcut olduğu, en yüksek nihai dayanımı veren geopolimer üretiminde ise daha kompakt bir yapının oluştuğu tespit edilmiştir.
- Standart tarihi yapı harcı ve optimum geopolimer tarihi yapı harcı kullanılarak üretilen duvar birimlerinde 56 gün yaşında yapılan basınç dayanımı test sonuçları incelendiğinde elde edilen yaklaşık yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 20 ve 36 ton olarak elde edilmiştir.
- Standart tarihi yapı harcı ve optimum geopolimer tarihi yapı harcı kullanılarak üretilen duvar birimlerinde 56 gün yaşında yapılan kesme dayanımı test sonuçları incelendiğinde elde edilen yaklaşık yük taşıma değerleri sırasıyla 0,4 ve 2,8 ton olarak elde edilmiştir.
- Standart tarihi yapı harcı ve geopolimer tarihi yapı harcı kullanılarak üretilen kemer sistemlerinin 56 gün yaşında eğilme dayanımı değerleri incelendiğinde yaklaşık yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 50 ve 45 kg olarak elde edilmiştir.

- Standart tarihi yapı harcı ve geopolimer tarihi yapı harcı kullanılarak üretilen kemer sistemlerinin 56 gün yaşında eğilme dayanımı test sonuçlarındaki deplasman verileri incelendiğinde ise yaklaşık olarak sırasıyla 32,5 ve 38 mm değerleri okunmuştur.

Yapılan araştırmalar neticesinde geopolimer tarihi yapı harcının numuneler üzerinde gerçekleştirilen basınç dayanımı test sonuçlarına göre standart tarihi yapı harcına kıyasla çok daha yüksek dayanıma sahip olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde, duvar birimlerinde gerçekleştirilen basınç ve kesme dayanımı test sonuçlarına göre geopolimer tarihi yapı harcının, standart tarihi yapı harcına kıyasla dayanım açısından daha etkin olduğu tespit edilmiştir. Kemer elemanlarında yapılan eğilme dayanımı test sonuçlarında ise dayanım değerleri açısından geopolimer tarihi yapı harcı ile gerçekleştirilen üretimin, standart tarihi yapı harcı ile gerçekleştirilen üretimin gerisinde kaldığı gözlenmiştir. Deplasman verileri incelendiğinde, geopolimer tarihi yapı harcı ile gerçekleştirilen üretimde, standart tarihi yapı harcı ile gerçekleştirilen üretime kıyasla daha yüksek deplasman değerine ulaşıldığı görülmüştür. Gelecekte gerçekleştirilecek çalışmalar için:

- Geniş açıklığa sahip olan kemer elemanları ile gerçekleştirilen üretimler için eğilme dayanım değerlerini iyileştirmenin yollarının araştırılması,
- Na_2SiO_3 ve NaOH kullanılarak aktive edilen geopolimer üretimi için daha iyi işlenebilir performansının elde edilme yollarının araştırılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Akman, M. S.** (2003). Yapı Malzemelerinin Tarihsel Gelişimi.
- ASTM** (2011) Standard Test Method for Compressive Strength of Masonry Prisms. ASTM C1314-11. Philadelphia, PA: ASTM International.
- Aziz, I. H., Abdullah, M. M. A. B., Salleh, M. M., Azimi, E. A., Chairapa, J., & Sandu, A. V.** (2020). Strength Development of Solely Ground Granulated Blast Furnace Slag Geopolymers. *Construction and Building Materials*, 250, 118720.
- Bićanić, N., Stirling, C., & Pearce, C. J.** (2003). Discontinuous modelling of masonry bridges. *Computational Mechanics*, 31, 60-68.
- Bilim, C., & Atış, C. D.** (2011). Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu İçeren Harçların Aşınma ve Mukavemet Özellikleri. *Politeknik Dergisi*, 14(2), 101-107.
- Bilim etiği.** (t.y.). Erişim: 04 Şubat 2023, <https://julesverne.com.tr/seyahat-blog/mutlakagorulmesi-gereken-dunyanin-en-etkileyici-10-tarihi-yeri/>
- Bilim etiği.** (t.y.). Erişim: 04 Şubat 2023, https://tr.wikipedia.org/wiki/S%C3%BCleymaniye_Camii
- Bilim etiği.** (t.y.). Erişim: 04 Şubat 2023, https://tr.wikipedia.org/wiki/Selimiye_Camii
- Bilim etiği.** (t.y.). Erişim: 04 Şubat 2023, <https://tr.wikipedia.org/wiki/Efes>
- Bilim etiği.** (t.y.). Erişim: 04 Şubat 2023, https://tr.wikipedia.org/wiki/S%C3%BCmela_Manast%C4%B1r%C4%B1
- Bilim etiği.** (t.y.). Erişim: 05 Şubat 2023, https://tr.wikipedia.org/wiki/Gize_Piramitleri#/media/Dosya:All_Gizah_Pyramids.jpg
- Bilim etiği.** (t.y.). Erişim: 06 Mart 2023, <http://www.cinerinsaat.com.tr/?sayfa=projedetay&p=26>
- Bilim etiği.** (t.y.). Erişim: 06 Mart 2023, <https://www.betonvecimento.com/beton-2/betonda-ucucu-kul-kullanimi>
- Bilim etiği.** (t.y.). Erişim: 07 Mart 2023, <https://santiyede.com/silis-dumani-ve-betonda-kullanimi/>
- Bilim etiği.** (t.y.). Erişim: 07 Mart 2023, <https://volkanatabey.com.tr/silis-dumani-icerigi-ve-beton-yapiminda-kullanimi/>
- Bilim etiği.** (t.y.). Erişim: 07 Mart 2023, <https://volkanatabey.com.tr/metakaolin-cevre-dostu-yapilar-icin-kullanilabilir-mi/>
- Binici, H., Eken, M., & Aksoğan, O.** (2012). Cüruf, Uçucu Kül, Silis Kumu ve Pomza Esaslı Geopolimerlerin Fiziksel, Mekanik ve Radyasyon Geçirgenlik Özellikleri. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 8(2), 12-25.
- Böke, H., Akkurt, S. ve İpekoğlu, B.,** (2004). Tarihi Yapılarda Kullanılan Horasan Harcı ve Sıvalarının Özellikleri, *Yapı Dergisi*.
- Chen, L., Wang, Z., Wang, Y., & Feng, J.** (2016). Preparation and Properties of Alkali Activated Metakaolin-Based Geopolymer. *Materials*, 9(9), 767.
- De Lorenzis, L., DeJong, M., & Ochsendorf, J.** (2007). Failure of Masonry Arches Under Impulse Base Motion. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 36(14), 2119-2136.

- Deng, P., & Zheng, Z.** (2023). Mechanical Properties of One-Part Geopolymer Masonry Mortar Using Alkali-Fused Lead–Zinc Tailings. *Construction and Building Materials*, 369, 130522.
- Dorum, A., Koçak, Y., Yılmaz, B., & Uçar, A.** (2009). Yüksek Fırın Cürufunun Çimento Yüzey Özelliklerine ve Hidratasyona Etkileri. *Journal Of Science And Technology Of Dumlupınar University*, (019), 47-58.
- Döndüren, M. S., Şişik, Ö., & Demiröz, A.** (2017). Tarihi Yapılarda Görülen Hasar Türleri. *Selçuk Üniversitesi Sosyal ve Teknik Araştırmalar Dergisi*, (13), 45-58.
- Durak, U., & Şimşek, A. A.** (2022). Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Temelli Geopolimer Sistemlerde Atık Demir Tozunun Agregaya Yerine Kullanımının Araştırılması. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5(2), 812-828.
- Elyamany, H. E., Abd Elmoaty, M., & Elshaboury, A. M.** (2018). Setting Time and 7-Day Strength of Geopolymer Mortar with Various Binders. *Construction and Building Materials*, 187, 974-983.
- En, T.** (2009). 12390-3. *Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm, 3*, 1-12.
- Eryılmaz, K., Polat, R., Turhan, D., & Karagöl, F.** (2023) Geopolimer Beton Atıklarından Elde Edilen Agregaların Geopolimer Betonda Kullanılabilirliğinin Araştırılması. *Journal Of The Institute Of Science And Technology*, 13(1), 419-431.
- Fang, S., Zhang, K., Zhang, H., & Zhang, B.** (2015). A Study of Traditional Blood Lime Mortar for Restoration of Ancient Buildings. *Cement and Concrete Research*, 76, 232-241.
- Gao, Z., Zhang, P., Wang, J., Wang, K., & Zhang, T.** (2022). Interfacial Properties of Geopolymer Mortar and Concrete Substrate: Effect of Polyvinyl Alcohol Fiber and Nano-Sio2 Contents. *Construction and Building Materials*, 315, 125735.
- Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü., & Mordoğan, H.** (2005). Uçucu Küllerin Özellikleri ve Kullanım Alanları. *Türkiye*, 19, 419-423.
- Işıkdağ, B., & Bekir Topçu, İ.** (2014). Improvement of Khorasan Mortar with Fly Ash for Restoration of Historical Buildings. *Science And Engineering Of Composite Materials*, 21(3), 359-367.
- İsafça, T., Karakuzu, K., Özen, S., Doğanün, A., & Mardani-Aghabaglou, A.** (2021). Effects of Material Properties on The Mechanical and Durability Behaviors of Khorasan Mortar Mixtures: A Review. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 35(23), 2507-2528.
- Kalifa, P., Chene, G., & Galle, C.** (2001). High-Temperature Behaviour of HPC with Polypropylene Fibres: From Spalling to Microstructure. *Cement and Concrete Research*, 31(10), 1487-1499.
- Kanıt, R., & Işık, N. S.** (2004). Horosan Harcı Kullanılarak Yapılan Model Kemerin Performansının Deneysel ve Sayısal Olarak Belirlenmesi. *Politeknik Dergisi*, 7(2), 179-183.

- Khater, H. M.** (2013). Effect of silica fume on the characterization of the geopolymer materials. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 5, 1-10.
- Kılıç, İ.** (2021) Horasan Harcında Yumurta Akı Kullanımının İncelenmesi. *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 7(1), 122-134.
- Örmecioglu, H. T.** (2010). Tarihi Yapıların Yapısal Güçlendirilmesinde Ana İlkeler ve Yaklaşımlar. *Politeknik Dergisi*, 13(3), 233-237.
- Poon, C. S., Shui, Z. H., & Lam, L.** (2004). Compressive Behavior of Fiber Reinforced High-Performance Concrete Subjected to Elevated Temperatures. *Cement and Concrete Research*, 34(12), 2215-2222.
- Pouhet, R., & Cyr, M.** (2016). Formulation and Performance of Flash Metakaolin Geopolymer Concretes. *Construction and Building Materials*, 120, 150-160.
- Saba, M., & Assaad, J. J.** (2021). Effect of Recycled Fine Aggregates on Performance of Geopolymer Masonry Mortars. *Construction and Building Materials*, 279, 122461.
- Simoncello, N., Zampieri, P., Gonzalez-Libreros, J., & Pellegrino, C.** (2019). Experimental Behaviour of Damaged Masonry Arches Strengthened with Steel Fiber Reinforced Mortar (SFRM). *Composites Part B: Engineering*, 177, 107386.
- Somna, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P., & Chindapasirt, P.** (2011). NaOH-Activated Ground Fly Ash Geopolymer Cured at Ambient Temperature. *Fuel*, 90(6), 2118-2124.
- Şimşek, N., & Kılıç, İ.** (2021). Keçi Kılının Lif Olarak Horasan Harcında Kullanılması. *Journal of Innovations in Civil Engineering and Technology*, 3(2), 115-131.
- Tan, J., Dan, H., & Ma, Z.** (2022). Metakaolin Based Geopolymer Mortar as Concrete Repairs: Bond Strength and Degradation when Subjected to Aggressive Environments. *Ceramics International*, 48(16), 23559-23570.
- Temuujin, J., Williams, R. P., & Van Riessen, A.** (2009). Effect of Mechanical Activation of Fly Ash on The Properties of Geopolymer Cured at Ambient Temperature. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(12-13), 5276-5280.
- Van Chanh, N., Trung, B. D., & Van Tuan, D.** (2008, November). Recent research geopolymer concrete. In *The 3rd ACF international conference-ACF/VCA, Vietnam* (Vol. 18, pp. 235-241).
- Yazıcı, N., & Karagöl, F.** (2022). Uçucu Kül Esaslı ve Cüruf Katkılı Geopolimer Betonların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması. *Journal of The Institute of Science and Technology*, 12(3), 1592-1606.
- Yazıcı, Ş., Anuk, D., & Arel, H. Ş.** (2010). Metakaolin Kullanımının Harçların Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 25(2), 13-24.
- Yeddula, B. S. R., & Karthiyaini, S.** (2020). Experimental Investigations and GEP Modelling of Compressive Strength of Ferrosialate Based Geopolymer Mortars. *Construction and Building Materials*, 236, 117602.

Yurt, Ü., & Emiroğlu, M. (2020). Zeolit İkameli Geopolimer Betonlarda Kür Őartlarının Etkileri. *Academic Platform-Journal Of Engineering And Science*, 8(2), 396-402.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Erkay KUTLUSOY

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** :2021, İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM:

- 06.02.2023 Kahramanmaraş Pazarcık bölgesinde meydana gelen deprem dolayısıyla Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nda gönüllü olarak hasar tespit çalışmalarında bulunmuştur.

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN ÇALIŞMALAR (Makaleler, Bildiriler, Patentler v.b.)

- **Kutlusoy, E., Maras, M. M., Ekinci, E., & Rihawi, B.** (2023). Production Parameters of Novel Geopolymer Masonry Mortar in Heritage Buildings: Application in Masonry Building Elements. *Journal of Building Engineering*, 107038.