

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

**ATIK LASTİK PARÇALARININ GEOPOLİMER HARÇ
ÜRETİMİNDE AGREGA OLARAK KULLANIMININ ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emre BULŞU

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN

Doç.Dr. Mehrzad MOHABBI

BİNGÖL-2025

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmaları aşamaların da destek olan ve yönlendiren değerli danışmanım sayın Doç. Dr. Mehrzad MOHABBI hocama sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım da gerekli laboratuvar araç ve gereçlerini kullanmamda değerli meslektaşım inşaat mühendisi Sayın Alihan BENGÜ teşekkür ederim.

Bingöl Üniveristesi merkezi laboratuvar uygulama ve araştırma merkezinde görev yapan Dr. Öğr. Üyesi SERHAT KOÇYİĞİT hocama laboratuvar çalışmalarında desteklerinden dolayı kendilerine çok teşekkür ederim .

Bizlere gerekli olan çalışma ve araştırma ortamını hazırlayan, emeği geçen Bingöl Üniversitesi hocalarına ve çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Emre BULŞU

Bingöl 2025

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ	viii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	3
3. MATERYAL VE YÖNTEM	11
3.1. Materyal	11
3.1.1. Elâzığ Ferrokróm Cürufu (EFC) ve Özellikleri	11
3.1.2. Uçucu Kül ve Özellikleri	11
3.1.3. Aktivatörler	13
3.1.4. Karma Suyu.....	13
3.1.5. Atık Araç Lastik Parçacıkları.....	14
3.1.6. Çimento	14
3.2. Karışımların Hazırlanması	14
3.3. Kullanılan Cihazlar ve Yapılan Testler	16
3.3.1. Eğilme Dayanım Testleri	17
3.3.2. Basınç Dayanım Testleri	18
3.3.3. Ultrases Geçiş Hızı Testleri	19
3.3.4. Taramalı Elektron Mikroskobu Analizi	20
3.3.5. EDX Analizi.....	21
3.3.6. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Analizi	21
3.3.7. X-Işını Difraksiyonu Analizi	22
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	24
4.1. Jeopolimer Harç Numunelerin Karışım Oranları	24
4.2. Jeopolimer Harç Numunelerin Basınç Dayanım Testi Sonuçları	25

4.3. Jeopolimer Harç Numunelerin Eğilme Dayanımı Testi Sonuçları	30
4.4. Jeopolimer Harç Numunelerin Ultra Ses Geçiş Testi Sonuçları	36
4.5. Jeopolimer Harç Numunelerin SEM incelemeleri	40
4.6. Jeopolimer Harç Numunelerin EDX incelemeleri	44
4.7. Jeopolimer Harç Numunelerin XRD incelemeleri	49
4.8. Jeopolimer Harç Numunelerin FTIR İncelemeleri	52
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	54
KAYNAKLAR	57

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

CO ₂	: Karbondioksit
%	: Yüzde
°C	: Derece
A	: Numune yüzey alanı (mm ²)
Al ₂ O ₃	: Alümina
GEAAL	: Atık lastik parçacıkları
CEM	: Çimento
cm ³	: santimetre küp
D	: Numunenin kesitinin genişliği (mm)
EDX	: Enerji dağılımlı X-ışını
FTIR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Analizi
GEAAL	: Granüle edilmiş atık araç lastiği
Gr	: Gram
h ²	: Numunenin yükleme yönündeki kesit yüksekliği (mm)
Kg	: Kilogram
Kn	: Kilo Newton
L _m	: Mesnetlerin arası uzaklık (mm)
Mm	: Milimetre
mm ²	: Milimetre kare
MPa	: Mega paskal
N	: Newton
OPC	: Standart Portland Çimentosu
P _b	: Basınç Kırılma yükü (N)
P _e	: Eğilmede kırılma anındaki yük (N)
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
SH	: Sodyum hidroksit
SiO ₂	: Silika
SS	: Sodyum silikat

T	: Ses dalgalarının numune içerisinde geçiş süresi (μs)
TEM	: Geçirimli Elektron Mikroskobu
V_s	: Ultra ses geçiş cihazı ile ölçülen hız (m/s)
XRD	: X-ışını difraksiyonu
σ_b	: Basınç mukavemeti (N/mm^2)
σ_e	: Polimer harç eğilme dayanımı (N/mm^2)

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1.	Uçucu kül ve cüruf granülometri eğrisi	12
Şekil 3.2.	Polimer harç numunelerinin üretimine ait çalışmalar	16
Şekil 3.3.	Jeopolimer harç numuneleri üzerinde yapılan eğilme dayanım testi görüntüsü	17
Şekil 3.4.	Jeopolimer harç numuneleri basınç dayanım testi cihazı	18
Şekil 3.5.	. Jeopolimer harç numunelerinde ultra ses geçiş hızının testi	19
Şekil 3.6.	SEM görüntüleme analizi ve deney cihazı	20
Şekil 3.7.	Sputter coater kaplama cihazı	21
Şekil 3.8.	FT-IR spektrometre cihazı	22
Şekil 3.9.	XRD cihazı	23
Şekil 4.1.	Basınç dayanımına tabi tutulan jeopolimer harç numuneleri	25
Şekil 4.2.	Cüruf ile üretilen jeopolimer harç numunelerin basınç dayanım testi sonuçları	28
Şekil 4.3.	Uçucu kül ile üretilen jeopolimer harç numunelerin basınç dayanım testi sonuçları	29
Şekil 4.4.	Cüruf ile üretilen jeopolimer harç numunelerin eğilme dayanım testi sonuçları	31
Şekil 4.5.	Uçucu kül ile üretilen jeopolimer harç numunelerin eğilme dayanım testi sonuçları	33
Şekil 4.6.	Üretilen jeopolimer harç numunelerin eğilme dayanım testi sonuçları .	37
Şekil 4.7.	Jeopolimer harç numunelerin basınç dayanımı ve UPV ilişkisi a) 3-gün, b)7-gün, c)28-gün ve d)180-gün	39
Şekil 4.8.	Üretilen jeopolimer harç numunelerinden alınan SEM görüntüleri	41
Şekil 4.9.	Uçucu kül ile üretilen jeopolimer harç numunelerinden alınan SEM görüntüleri	43
Şekil 4.10.	Cüruf ile üretilen jeopolimer harç numunelerinden alınan EDX görüntüsü 1. nokta	45

Şekil 4.11. Cüruf ile üretilen jeopolimer harç numunelerinden alınan EDX görüntüsü 2. nokta	45
Şekil 4.12. Cüruf ile üretilen jeopolimer harç numunelerinden alınan EDX görüntüsü tüm yapı.....	46
Şekil 4.13. Uçucu küllerden alınan EDX görüntüsü tüm yapı	48
Şekil 4.14. Uçucu kül ile üretilen jeopolimer harç numunelerinden alınan EDX görüntüsü	48
Şekil 4.15. Uçucu kül ve çimento ile üretilen jeopolimer harç numunelerinden alınan EDX görüntüsü	49
Şekil 4.16. Cüruf ile üretilen jeopolimer harç numunelerinden alınan XRD sonucu	50
Şekil 4.17. Uçucu kül ile üretilen jeopolimer harç numunelerinden alınan XRD sonucu	51
Şekil 4.18. Cüruf ile üretilen jeopolimer harç numunelerinden alınan FTIR sonucu	53
Şekil 4.19. Uçucu kül ile üretilen jeopolimer harç numunelerinden alınan FTIR sonucu	53

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1.	Elâzığ ferrokrom cürufu ve uçucu kül kimyasal içeriği	12
Tablo 3.2.	Jeopolimer karışımlara ait karışım içerikleri (kg/m ³).....	14
Tablo 4.1.	Jeopolimer karışımlara ait karışım içerikleri	24

ATIK LASTİK PARÇALARININ GEOPOLİMER HARÇ ÜRETİMİNDE AGREGA OLARAK KULLANIMININ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında, çimento içerikli harç üretimine alternatif ve çevresel etkisi daha az olan jeopolimer harçlarda granüle edilmiş atık araç lastiğinin (GEAAL) inşaat malzemelerinde alternatif üretimde hammadde olarak kullanım potansiyeli değerlendirilmiştir. Farklı oranlarda granüle edilmiş atık araç lastiği (hurda araç lastiklerinden öğütülerek temin edilen parçacıklar) ve cüruf (Ferrokrom tesislerinden atık olarak temin edilen), uçucu kül (termik santrallerden atık olarak temin edilen) gibi endüstriyel atıklar içeren jeopolimer bazlı karışımların birlikte kullanımı incelenmiştir. Çalışmanın amacı hem çevresel açıdan sürdürülebilir hem de performans açısından teknik olarak yeterli kompozit jeopolimer tabanlı malzemelerin üretimini sağlamaktır.

Deneyssel çalışmada karışımlarda temelde jeopolimer tabanlı üretim temel alınmakla birlikte, matraste dolgu olarak agrega yerine GEAAL hacimce 1/4, 1/3 ve 1/2 oranlarında farklı bağlayıcı hamurları ile (sadece çimento, jeopolimer ile yalnız cüruf ve yalnız uçucu kül ve bunların kendi içlerinde çimento ile ikamelerinden elde edilen) bağlayıcı malzeme ile karıştırılmasıyla toplam 22 farklı karışım hazırlanmıştır. Karışımların 3, 7, 28 ve 180 günlük basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve ultra ses geçiş hızı (UPV) değerleri belirlenerek, mekanik ve fiziksel performansları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Numunelerden alınan örnekler üzerinde SEM, EDX, FTIR ve XRD analizleri yapılarak mikro yapıları değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlardan GEAAL içeriğine sahip çimento matrisinde kullanımı çimento matrisinin mekanik özellikleri önemli ölçüde düşürmektedir. Diğer taraftan üretilen jeopolimer harçlarda yer alan cüruf veya uçucu kül gibi puzolanik malzemeler ile birlikte belirli oranlarda çimento ilavesiyle üretime gidildiğinde bu olumsuz etki büyük oranda azaltılabileceği görülmüştür. Özellikle hacimce 1/4 GEAAL içeren jeopolimer harçlarda, %90 – 95 oranında cüruf ya da uçucu kül ve bunların yansıra %5 – 10 çimento içeren karışımlar (M6, M7, M15, M16), hem dayanım hem de sürdürülebilirlik açısından en başarılı sonuçları vermiştir. GEAAL karışıma dahil edildiğinde, özellikle %1/2 oranında, hem basınç hem de eğilme dayanımında belirgin düşüşler gözlenmiştir.

Bu kapsamda çalışma, yapı malzemelerinde özellikle çevre dostu jeopolimer harç uygulamalarında GEAAL kullanımının mümkün olduğunu ve uygun bağlayıcı sistemleri ile desteklendiğinde çevresel atıkların değerlendirilmesi başta olmak üzere çimento üretimi ile ekosisteme verilecek zararın minimize edilebileceğine yönelik önemli bir alternatif sunduğumuzu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Jeopolimer harç, atık araç lastiği parçacıkları, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, mikro yapı analizleri.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF USING WASTE TIRE PIECES AS AGGREGATE IN GEOPOLYMER MORTAR PRODUCTION

ABSTRACT

In this thesis study, the potential for using plastic waste as raw material in the alternative production of construction materials in geopolymer mortars, which are an alternative to cement-based concrete production and have less environmental impact, was evaluated. The combined use of geopolymer-based mixtures containing industrial waste materials such as plastic waste (particles obtained from ground scrap vehicle tires) and slag (obtained as waste from ferrochrome plants), as well as fly ash (obtained as waste from thermal power plants), at different ratios has been investigated. The aim of the study is to produce composite geopolymer-based materials that are both environmentally sustainable and technically sufficient in terms of performance.

In the experimental study, although the production was based on geopolymers in the mixtures, waste rubber particles (WRP) were used as filler in the matrix instead of aggregate in volumes of 1/4 . 1/3 and 1/2 by volume, with different binder mortars (cement alone, geopolymer alone, slag alone, fly ash alone, and their substitutes with cement) to prepare a total of 22 different mixtures. The compressive strength, flexural strength, and ultrasonic pulse velocity (UPV) values of the mixtures at 3. 7. 28 and 180 days were determined, and their mechanical and physical performances were compared and evaluated. SEM, EDX, FTIR, and XRD analyses were performed on samples taken from the specimens to evaluate their microstructures. The results indicate that the use of GEAAL in the cement matrix significantly reduces the mechanical properties of the cement matrix. On the other hand, it was observed that this negative effect could be significantly reduced by producing geopolymer mortars with certain proportions of cement added along with pozzolanic materials such as slag or fly ash. In particular, geopolymer mortars containing 1/4 GEAAL by volume, mixtures containing 90–95% slag or fly ash and 5–10% cement (M6. M7. M15. M16) have yielded the most successful results in terms of both strength and sustainability. When GEAAL is included in the mixture, particularly at a ratio of 1/2 . significant decreases in both compressive and flexural strength have been observed.

In this context, the study demonstrates that it is possible to use plastic waste in construction materials, particularly in environmentally friendly geopolymer mortar applications, and that when supported by appropriate binding systems, it offers an important alternative for minimizing the damage to the ecosystem caused by cement production, primarily through the utilization of environmental waste.

Keywords: Geopolymer mortar, waste vehicle tire particles, compressive strength, flexural strength, microstructural analyses.

1. GİRİŞ

Portland çimentosu, inşaat kompozitleri için mükemmel ve hayati bir bağlayıcı olmasına rağmen, mevcut üretim süreci oldukça enerji yoğun [1,2] ve ayrıca, üretilen her ton Portland çimentosu için yaklaşık bir ton CO₂ salınımı gerçekleşmektedir [3]. Bununla kalmayıp, bu süreç aynı zamanda kireçtaşı gibi sınırlı doğal kaynakları hammadde olarak kullanmakta ve kalsinasyon için gerekli yüksek sıcaklıkları elde etmek için kömüre bağımlıdır [4]. Tüm bu zorluklar, dünya çapındaki araştırmacıları, enerji ve karbon ayak izi düşük, çeşitli atık türleriyle entegre edilebilen, sıradan Portland çimentosuna eşit veya daha yüksek performans sağlayan, kullanıcı ve çevre dostu yeni alternatif inşaat malzemeleri aramaya zorlamıştır [5]. Günümüzde, yenilikçi yeşil jeopolimer teknolojisi, dokuz kat daha az CO₂ emisyonu ve altı kat daha az enerji tüketimi ile [3], doğal sınırlı kaynakların bozulmasını önler ve jeopolimer yapısal kompozitlerin olağanüstü performansı sayesinde küresel ısınmanın etkilerini hafifletir [2,6].

Bu açıdan bakıldığında Jeopolimer teknolojisi, inşaat sektöründe çimento kullanımının neden olduğu çevresel zararı ortadan kaldırmak amacıyla geliştirilmekte olan yeni bir küresel trenddir [7,8]. Çimento tüketimine bakıldığında, enerji tüketiminden sonra en önemli ikinci kaynak olarak yer almaktadır [8,9]. Çimento üretiminde yer alan büyük miktarda enerji kullanımı ve bunun yansısı doğal kaynakların üretim amaçlı kullanımından kaynaklanan artış ile birleştirilince bu da doğal kaynakların tükenmesi ile çevre kirliliğine yol açtı. Çimento kullanımına sunulacak olan bu alternatif, bir çözüm, aynı zamanda sera gazı emisyonlarını azaltmak amacını taşımaktaydı. Bu nedenle, çimentoyu atık yan ürünlerinden üretilebilecek olan jeopolimer ile değiştirmek uygun bir alternatif haline gelmiştir [8].

Bu tez çalışması kapsamında değerlendirme konusu olan diğer bir çevresel kirleticisi olan kullanım ömrünü dolmuş lastiklerin artan endüstriyel talebe karşın olan hızlı artışı, ciddi bir çevresel sorun olmaya devam etmektedir. Küresel olarak değerlendirildiğinde her yıl 1.5 milyardan fazla lastik endüstriyerl ihtiyaçlara binaen özellikle karasal ulaştırma

sistemlerinde kullanım ömrünü hızla tamamlamaktadır. Kullanım atığı ürünü olan bu atıkların çöp sahalarında gömülmesi yada imha amaçlı yakılması gibi çeşitli uygun olmayan yöntemlerin kullanılması ile bertarafı, zehirli emisyonlardan kaynaklı ve atmosfer döngüsünden kaynaklı yeraltı sularına karışarak oluşturduğu kirliliği sonucunda ciddi çevresel tehditler olarak ortaya çıkmaktadır [10]. Bu durum, araştırmacıları, döngüsel ekonomik kazanım ilkeleriyle uyumlu olacak şekilde atık lastik malzemelerini ile üretilebilecek olan inşaat kompozitlerine ve bu atıkları çevreden uzun süre uzaklaştıracak olan özellikle çimento bazlı matrisler sayesinde hapsedilmesini sağlayabilecek sürdürülebilir alternatifler aramaya teşvik etmiştir [11,12].

Bu tez çalışması kapsamında ferrokrom tesislerinden elde edilen cüruf, termik santrallerden elde edilen uçucu külü CEM I 42.5R çimentosu ve jeopolimer yapısal bileşenleri ile granüle edilmiş atık araç lastiğinin (GEAAL) kullanılması ile elde edilen parçacıkların birlikte kullanılması ile elde edilen çevre dostu jeopolimer içeriklerden üretilebilecek elemanlarda sağlanabilecek dayanım ile ilgili olarak eğilme ve basınç dayanımları değerleri incelenmiştir. İlgili standart değerlerin öngördüğü yeterli mekanik değerleri sağlayarak yapısal bağlamda kullanılması amacıyla bir yapı malzemesi üretilmesinde değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. Bu sayede atık malzemeler değerlendirilerek hem ülkemize enerji anlamında olduğu gibi hem de depolama, çevre kirliliğinin önüne geçileceği düşünülmektedir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Son yıllarda çevresel sürdürülebilirlik, yapı malzemeleri sektöründe önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Özellikle, endüstriyel atıkların ve geri dönüştürülmüş malzemelerin yapı sektöründe değerlendirilmesi hem atık miktarını azaltmak hem de doğal kaynakların kullanımını minimize etmek açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, jeopolimer bağlayıcılı harçlar, Portland çimentosuna alternatif olarak çevre dostu ve düşük karbon salımlı bir yapı malzemesi olarak dikkat çekmektedir.

Jeopolimer harçlar, genellikle yüksek miktarda silika (SiO_2) ve alümina (Al_2O_3) içeren atık malzemelerin (uçucu kül, cüruf, metakaolin vb.) alkali aktivasyonu ile elde edilmektedir. Bu sistemlerde agrega olarak kullanılan malzeme türü, harcın mekanik özellikleri, dayanıklılığı ve mikro yapısı üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Literatürde, doğal agregaların yanı sıra geri dönüştürülmüş cam, GEAAL ve kauçuk gibi alternatif malzemelerin kullanımıyla ilgili çok sayıda çalışma yer almaktadır.

Atık lastik parçalarının agrega olarak kullanımı, hem lastik atıklarının çevresel etkilerini azaltmak hem de hafif ve elastik bir yapı malzemesi elde etmek amacıyla son yıllarda yoğun olarak araştırılmaktadır. Lastik agregalar, düşük yoğunlukları sayesinde jeopolimer harçların birim hacim ağırlığını azaltmakta; ayrıca elastomerik yapıları sayesinde darbe emme kapasitesi ve enerji sönmeme özelliklerinde iyileşmeler sağlamaktadır. Ancak bu malzemelerin bağlayıcı ile yeterli aderans sağlayamaması, mekanik dayanımlarda belirli oranda azalmaya yol açabilmektedir.

Jeopolimer malzemeler, 1930'larda ilk kez araştırılan alümin silikat kimyasının en son gelişmesini temsil eder [13]. O tarihten itibaren ve sonraki yirmi yıl boyunca, araştırmalar alümin silikatın alkali hidroksitlerle reaksiyonu yoluyla zeolitlerin ve alkali ile aktive edilen malzemelerin geliştirilmesine odaklandı [13,14]. Daha sonra, 1970'lerde, jeopolimer kimyasının temellerini atan ilk kaolinit bazlı çalışmasıyla jeopolimer kimyasını tanımladı. Jeokimyasal ilkeler kullanılarak yanmaz ve tutuşmaz polimerik taş benzeri malzemeler

geliştirmek için mineral polimerler üretildi ve bunlar o zamandan beri jeopolimerler olarak anılmaktadır. Metakaolin ve çözünür alkali silikattan oluşan ilk mineral yangına dayanıklı reçine 1975 yılında patentlendi, ilk jeopolimer çimento ise 1984 yılında “Erken Yüksek Mukavemetli Mineral Polimer” olarak ABD’de geliştirildi ve patentlendi. O zamandan beri, jeopolimer yapı malzemeleri sürdürülebilir altyapı alanında önemli bir yer edinmiştir [13].

Pham ve ark. tarafından yapılan çalışmada [15], kaba ve ince agregaların bir kısmını kısmen ikame eden farklı oranlarda kırıntı kauçuğun (yani hacimce %0, %15 ve %30) jeopolimer harçun dinamik özellikleri üzerindeki etkisini deneysel olarak araştırmıştır [15]. Kırıntı kauçuk içeren jeopolimer harcın dinamik basınç özellikleri, 136 s⁻¹’e kadar gerilme hızında Split Hopkinson Basınç Çubuğu testleri ile incelenmiştir. Deney sonuçları, kauçuklu jeopolimer harcın, çatlak oluşumu ve yayılması, kırılma modu ve normalleştirilmiş enerji emilimi ile kanıtlandığı üzere, normal jeopolimer harca kıyasla tutarlı bir şekilde daha iyi darbe direnci sergilediğini göstermiştir. Kauçuklu jeopolimer harcın dinamik basınç mukavemeti, gerinim hızına karşı belirgin bir duyarlılık göstermiş ve gerinim hızına duyarlılık, kauçuk içeriği arttıkça artmıştır. Son olarak, çeşitli kauçuk ikame seviyelerinde jeopolimer harç basınç mukavemetinin dinamik artış faktörlerini tahmin etmek için ampirik formüller türetilmiştir [15].

Luhar ve ark. [16] tarafından yapılan çalışmada, atık lastik lastik lifleri ince agregaların kısmi ikamesi olarak kullanılmaktadır. Çalışma, kumun yerine atık lastik liflerinin kullanılmasının sadece maliyet açısından avantajlı olmakla kalmayıp, aynı zamanda kauçuklu jeopolimer harcın sürdürülebilirliğinden ödün vermeden geliştirilmesi için kullanıcı ve çevre dostu uygun bir yol olduğunu ortaya koymaktadır. Yapılan çalışmada, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, çekme dayanımı, elastikiyet modülü gibi mukavemet çalışmalarının performans değerlendirmesini yapmak için bilimsel bir yaklaşımdır. Çekme mukavemeti ve dayanıklılık parametreleri gibi aşınma direnci gibi parametreleri değerlendirmek için bilimsel bir yaklaşımdır ve sonuçları OPC lastik harç ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları, Lastik Geopolimer Harcın yukarıdaki tüm parametreler açısından muadili Lastik Harç’a göre üstünlüğü olduğunu ortaya koymuştur [16].

Kuang ve ark. [17] tarafından yapılan çalışmada, nehir kumunun %5'i yerine ince agrega yerine kauçuk kullanılarak yeni bir tür kauçuk modifiye jeopolimer harç incelenmiştir. Dört tür kauçuk parçacık boyutu sırasıyla 4 mm, 1,7 mm, 0,83 mm ve 0,27 mm'dir. Bu modifiye jeopolimer harçların akışkanlığı, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve mikro yapısı kapsamlı bir şekilde test edilmiş ve analiz edilmiştir. Sonuçlar, kauçuk parçacıklarının eklenmesinin ilgili jeopolimer harçların akışkanlığını hafifçe azalttığını (yani 22,4 cm) ve incelenen modifiye jeopolimer harçların akışkanlığının 17,6 ila 21,5 cm arasında değiştiğini göstermektedir. Modifiye jeopolimer harçların basınç ve eğilme mukavemeti de kauçuk parçacık boyutu arttıkça azalmaktadır. Bununla birlikte, modifiye jeopolimer harçlar nispeten yüksek erken mukavemete sahiptir ve en yüksek 1 günlük basınç ve eğilme mukavemetleri, sırasıyla 25 °C ve 80 °C'lik kürleme sıcaklıklarında 47,2 MPa ve 7,2 MPa ile 51,3 MPa ve 8,2 MPa'ya ulaşabilmektedir, bu da yüksek sıcaklıklarda kürlemenin erken mukavemetleri artırabileceğini göstermektedir. Ek olarak, modifiye jeopolimer harçların basınç ve eğilme mukavemetlerinin, nispeten yüksek sıcaklıklarda uzun süre kürlendiğinde azaldığı bulunmuştur.

Lazorenko ve ark. [18] tarafından yapılan çalışmada, sürdürülebilir bir kauçuk atık bertaraf stratejisi, bunları çevre dostu jeopolimer matrislerinde ezilmiş halde sabitlenmesi temel strateji olarak değerlendirilmiştir. Kauçuk bazlı jeopolimer kompozitlerin mukavemet kaybı nedeniyle bu yaklaşımın uygulanması sınırlıdır. Bu sorunu çözmek için, bu makale kırıntı kauçuğunun NaOH, H₂SO₄, (CH₃)₂CO ve KMnO₄ çözeltileriyle ve ayrıca ultraviyole radyasyonla çeşitli fiziksel ve kimyasal ön işlemlerden geçirilmesinin, kauçuk bazlı uçucu kül çevre dostu jeopolimer kompozitlerinin mekanik performansı ve mikro yapısı üzerindeki etkilerini önermektedir. En iyi etkilerin potasyum permanganat sulu çözeltisi ile elde edildiği bulunmuştur; çözelti ile oksidatif reaksiyonlar, kauçuk üzerinde yüzey aktif fonksiyonel grupların oluşumuna yol açmaktadır. Sonuç olarak, adsorbe edilen su buharının kütlelerinden tahmin edilen kırıntı kauçuk parçacıklarının hidrofilikliği iki katından fazla artmıştır (1.5'ten 3.3 ağırlık %'ye). Bu, dolgu maddesi ile jeopolimer matrisi arasında güçlü bir yapışkan temas sağlar ve bu da kompozitlerin mekanik özelliklerindeki değişimi olumlu yönde etkiler. Bu durumda, basınç dayanımı, ağırlıkça %10,0 KMnO₄ ile işlenmiş kırıntı kauçuğunun ilavesiyle 12,8 MPa'dan (çevre dostu jeopolimer /modifiye edilmemiş kırıntı kauçuk kompozit) 15,5 MPa'ya yükselmiştir. Jeopolimer bağlayıcının

bileşiminin ve kürleme modunun daha da optimize edilmesi, bu konuda ek bir olumlu etki sağlayabileceği gözlemlenmiştir [18].

Zhang ve ark. [19] tarafından yapılan çalışmada, uçucu kül, öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu ve atık kauçuk, dünya çapında yaygın olarak bulunan katı atıkları olarak dikkate alınmış ve çevre koruma amacıyla geri dönüştürülmeleri gerekliliği üzerine bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada, uçucu kül ve öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu çimento hammaddesi olarak, kırıntı kauçuk ise ince agrega olarak kullanılarak kauçuk modifiye jeopolimer harç hazırlanmıştır. Kırıntı kauçuğun nehir kumu ile ikame oranlarının ve jeopolimerin sıradan Portland çimentosu (OPC) ile ikame oranlarının kauçuk modifiye jeopolimer harcın mekanik özellikleri ve donma-çözülme direnci üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sonuçlar, kırıntı kauçuk ikame oranının %0'dan %10'a çıktıkça basınç ve çekme mukavemetinin hafifçe arttığını, ancak ikame oranı %20'ye ulaştığında azaldığını göstermektedir. Ayrıca, kırıntı kauçuk ilavesi, ikame oranından bağımsız olarak jeopolimer harçların sertliğini ve donma-çözülme direncini iyileştirmiştir. %10 kırıntı kauçuk içeren harç, diğer harçlara kıyasla daha küçük boyutlara ve daha az çatlağa sahiptir. Ayrıca, kırıntı kauçuk iyi bir enerji dağıtma kabiliyetine sahiptir ve bu da donma-çözülme döngülerinin neden olduğu hasarı azaltabilir. Ancak, OPC'nin jeopolimer ile değiştirilmesi, kauçukla modifiye edilmiş harcın mekanik özellikleri ve donma-çözülme direnci üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. Bu sonuçlar, orta düzeyde kırıntı kauçuk ilavesinin jeopolimer harcın özelliklerini olumlu yönde etkilediğini ve optimal %10 ikame oranının yüksek mukavemet ve iyi donma-çözülme direnci sağladığını göstermektedir [19].

Wongsa ve ark. [20] tarafından yapılan çalışmada, geri dönüştürülmüş lastiklerden elde edilen %100 kırıntı kauçuk ince agrega kullanılan hafif jeopolimer harçların mekanik ve termal özellikleri rapor edilmiştir. Sodyum hidroksit (SH) ve sodyum silikat (SS) çözeltileri ile aktive edilmiş yüksek kalsiyumlu uçucu kül, jeopolimer bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Jeopolimer harcın yoğunluğunu ve termal iletkenliğini azaltmak için nehir kumu yerine tamamen kırılmış kauçuk kullanılmıştır. Alkali çözelti/uçucu kül oranı, SH çözelti konsantrasyonu, SS/SH oranı ve kürleme sıcaklığının %100 ezilmiş kauçuk içeren jeopolimerin mekanik ve termal özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Karışımların işlenebilirliği, basınç ve eğilme mukavemeti, yoğunluğu, gözenekliliği, su emme oranı, ultrasonik darbe hızı ve termal iletkenliği ölçülmüştür. Karşılaştırma amacıyla nehir kumu

kullanılan bir kontrol jeopolimer harcı da hazırlanmıştır. Sonuçlar, nehir kumunun kırıntı kauçuk ile değiştirilmesinin jeopolimer harçların basınç dayanımını önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Ancak, %100 kırıntı kauçuk içeren jeopolimer harçların yoğunluğu ve termal iletkenliği, kontrol jeopolimer harçlara göre sırasıyla ortalama %42 ve %79 daha düşüktü. Geliştirilen %100 kırıntı kauçuk içeren jeopolimer harç, geleneksel tuğla/bloklara kıyasla daha iyi ısı yalıtımı sağlayan çevre dostu, daha hafif tuğla/blokların üretiminde kullanılabilir [20].

dos Reis Ferreira ve ark. [21] tarafından yapılan çalışmada, jeopolimer harç numunelerinde ince agrega yerine işlenmemiş kaba ve parçalanmış kauçuk atıklarının kullanılmasının değerlendirilmesi amacıyla yapılmıştır. Basınç mukavemeti, su emme, boşluk indeksi ve özgül ağırlık için optimize olabilecek değerleri belirlemek üzere merkezi kompozit tasarım ile yanıt yüzeyi metodolojisi birleştirilmiştir. Jeopolimer harç numunelerinin karakterizasyonunda X-ışını difraksiyonu ve SEM analizleri kullanılmıştır. En iyi sonuçlar için optimize edilmiş parametrelerden yola çıkarak, ince agrega yerine %1 kauçuk atığı, %0 kaba kauçuk ve yaklaşık 6 günlük kürlenme süresi tespiti yapılmıştır. Bu kombinasyonda üretilen numunelerde basınç dayanımı için 17,75 MPa, su emilimi için %10,48, boşluk indeksi için %18,58 ve özgül ağırlık için 1,77 g/cm³ gibi optimal değerler elde edilmiştir. Modellerin deneysel doğrulaması ise hata oranı %10'dan daha azdır.

Mermerdaş ve ark. [22] tarafından yapılan bir çalışmada, ömrünü tamamlamış lastiklerin uçucu kül bazlı jeopolimer kompozitlerin üretiminde ince agrega olarak geri dönüştürülmesidir. Ayrıca, bu tür kompozitlerin kırıntı kauçuk olarak adlandırılan geri dönüştürülmüş ince agregasının neden olduğu bazı olumsuz özelliklerin, kompozit karışımın bağlayıcı içeriğini değiştirerek iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu bağlamda, kauçuklaştırılmış jeopolimer kompozitlerin üretiminde %10, %20, %30 ve %40 olmak üzere dört kırıntı kauçuk ikame seviyesi belirlenmiştir. Ana karışımlar 600 kg/m³ bağlayıcı içeriğinde tasarlanmıştır. Burada, mevcut çalışmada bağlayıcı içeriği teriminin öncül (alüminosilikat bakımından zengin hammadde) ve alkali aktivatörün toplamı olarak kabul edildiği belirtilmelidir. Jeopolimer kompozitlerin performansına göre bağlayıcı içeriği önce 700 kg/m³'e daha sonra 800 kg/m³'e çıkarılmıştır. Bu kompozitlerin performansı taze ve sertleşmiş durum özellikleri açısından değerlendirilmiştir. Sonuçlar, nehir kumunun kırıntı kauçuk ile değiştirilmesinin jeopolimer kompozitlerin özelliklerini önemli ölçüde

etkilediğini ortaya koymuştur. Jeopolimer kompozitlerin akışkanlığı, birim ağırlıkları, mukavemet performansı ve termal iletkenliği azalırken emme kapasitesi artmıştır. Bağlayıcı içeriğinin artırılması kompozitlerin bazı özellikleri için bir çare olmuştur. Sonuç olarak, bu atık malzemenin bu tür kompozitlerin üretiminde kontrollü bir şekilde kullanılabileceği gösterilmiştir.

Mabrouk ve ark. [23] tarafından yapılan bir çalışmada, kürlenme sıcaklığının (80 °C ve 100 °C), atık lastik kauçuk agregalarının ve silika dumanının hafif jeopolimer kompozitinin özellikleri üzerindeki potansiyel etkisini araştırmıştır. Hafif jeopolimerde, silika dumanının öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu miktarının %20'sini, atık lastik kauçuk agregalarının ise pomza agregasının çeşitli oranlarda (hacimce %15, %30 ve %45) yerini almıştır. Hafif jeopolimer kompozitin fiziksel özellikleri, görünür gözeneklilik, su emme ve sertleşme yoğunluğu ile değerlendirilmiştir. Mekanik özellikler, basınç dayanımı ve eğilme dayanımı testleri ile incelenmiştir. Yüksek sıcaklığın (300 °C ve 600 °C) hafif jeopolimer kompozitin basınç dayanımı ve kütle kaybı üzerindeki etkisi incelendi. Hafif jeopolimer kompozitin dayanıklılığı, cıva girme porozimetrisi, kapiler su emilimi, donma-çözülme ve termal iletkenlik kullanılarak analiz edilmiştir. Kompozitin malzeme karakterizasyonu, taramalı elektron mikroskobu, X-ışını difraksiyonu (XRD), termogravimetrik analiz ve diferansiyel termogravimetri eğrileri kullanılarak yapıldı. 28 gün sonra, hafif jeopolimer kompozitler atık lastik kauçuk agregalarının ve silika dumanının artmasıyla birlikte gözeneklilik ve su emiliminin arttığını göstermiştir ve 100 °C'de daha yüksek değerler elde edilmiştir. Basınç ve eğilme mukavemetleri, özellikle yüksek sıcaklıklarda atık lastik kauçuk agregalarının ve silika dumanının artmasıyla birlikte azaldı. Termogravimetrik analiz- diferansiyel termogravimetri eğrileri, LG-0–80 karışımının en düşük kütle kaybına sahip olduğunu (400 °C'de %15,25 ve 600 °C'de sırasıyla 19,36 %) en düşük kütle kaybına sahipken, LG-SF-45–100 karışımı en yüksek kütle kaybına (sırasıyla %22,22 ve %24,53) sahipti. XRD ve termogravimetrik analiz- diferansiyel termogravimetrik analizleri, silika dumanı kullanmanın Ca(OH)_2 piklerini artırdığını ve jeopolimer bileşimini değiştirdiğini, LG-SF-0–80 karışımının mekanik performansını iyileştirdiğini ve kompozitlerin termal stabilitesini artırdığını ortaya koymuştur.

Yadollahi ve ark. [24] tarafından yapılan bir çalışmada, ferrokrom cürufu kullanılarak elde edilen jeopolimerlerin basınç dayanımı performansının araştırılması için üç kritik karışım

tasarım parametresi incelenerek sistematik olarak değerlendirilmiştir. Na_2O konsantrasyon değerleri, silika modülü ve su-bağlayıcı oranlarına ait değerler bu parametrelerdir. Toplam dokuz jeopolimer harç formülasyonu hazırlanmıştır. Bu parametrelerin kontrollü optimizasyonlarının sağlanması durumunda önemli ölçüde yüksek basınç dayanımı sağlanabileceği gösterilmiştir. Sonuçlar, ferrokrom cürufu gibi kullanılabilecek tarımsal endüstriyel atık pozisyonundaki materyallerden yapısal sınıf jeopolimerlere dönüştürülebileceği vurgulanmıştır. Dahası bu tür materyaller ile bağlayıcı tasarımında sürdürülebilirliğin artırılabilceğini ortaya koymuştur. Bu çalışma temelinde cüruf bazlı jeopolimer sistemlerinde karışım tasarımında kullanılabilmesi için nicel bir temel oluşturmuştur.

Yadollahi ve ark. [25] tarafından yapılan bir çalışmada, polipropilen (PP) mikrofiberler kullanılarak üretilen perlit bazlı jeopolimer matrisleri içerisindeki entegrasyonuna dair gelişimi araştırdılar. Bu araştırma temelinde geleneksel çimento üretiminden kaynaklı oluşan karbon yoğunluğunun azaltılmasıyla doğru orantılı olan daha çevreci alternatiflere gereklilik yansın üretimlerde oluşabilecek ihtiyaçtan kaynaklandığını vurgulamışlardır. Jeopolimerlerin matrisine gömülen PP fiberler sayesinde elde edilen güçlendirilmiş matris ile hem eğilme hem de basınç dayanımının artırılmasını amaçladılar. Çalışmada kapsamında PP fiber ilavesi sayesinde mekanik dayanıklılığın önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak elyafla güçlendirilmiş perlit jeopolimerleri umut verici olmasıyla birlikte eko-verimli yapısal bağlayıcılar olarak sınıflandırmıştır

Yadollahi [26] tarafından yapılan bir çalışmada, Elâzığ ferrokrom cürufu ile aktive edilen jeopolimer matrislerde mekanik performansın değişimi üzerine farklı incelikte olan silika katkı maddeleri araştırılmıştır. Bu materyaller özellik olarak nano ve mikro ölçekteki silika dumanının eklentisinin etkilerini araştırmıştır. Katkı maddelerinin matristeki kullanım oranları bağlayıcı ağırlığının %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında katkıda ilave edilmiştir. Sonuçlardan elde edilen verilerle çeşitli nano-silika partikül boyutları için (15, 30 ve 45 nm), özellikle de %6'lık optimal dozaj için mikroyapısal homojenlikte meydana gelen matris gelişimi sayesinde basınç dayanımı için statik elastik modül ve çekme dayanımı sonuçlarında iyileşmeler olduğunu göstermiştir. SEM analizleri ile bu dozajda daha yoğun, daha homojen jeopolimerlerin matrisleri ile daha gelişmiş ve iyileştirilmiş bağlanma özelliklerinin oluşabileceği ortaya koymuştur. Çalışma kapsamında nano ölçekli silikanın

cüruf bazlı üretilen jeopolimerlerde mikro yapısal iyileştirme açısından ve mukavemet artırma miktarında önemli bir potansiyel sağlayabileceği kapasiteye sahip olduğunu göstermektedir.

Yadollahi ve ark. [27] tarafından yapılan bir çalışmada, geri dönüştürülemeyen mineral yün atıklarının kullanımına üretilebilecek bir çevre sorununun ele aldı. Çalışmada kapsamında cam yünü ve taş yününün toz haline getirilmesi sağlanmıştır. Alkali olarak Na_2SiO_3 ve NaOH kullanılması ile jeopolimer matris aktive edilmiştir. Karışımlarda silika modül oranları 2,0, 2,5 ve 3,0 olarak test edilmiştir. Elde edilebilecek optimal modülün 2.5 olduğu belirlenmiştir. Farklı kürleme sıcaklıklarında (25 °C, 50 °C, 75 °C, 100 °C) yapılan mekanik testler ile cam yünü bazlı jeopolimerlerin, özellikle 75 °C’de sertleştirildikten sonra 59,2 MPa’lık maksimum basınç dayanımına ulaştığını deneysel olarak kanıtlanmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, yaptığımız tez çalışmasında yer alan jeopolimer harç numunelerin üretimi için teorik ve laboratuvar çalışmalarına ait izlediğimiz yöntemlerin ve jeopolimer harç üretimi için kullandığımız malzemelerin kısaca açıklayıp, deneyler için gerekli olan ortam, makine, teçhizat ve aletleri tanıtılması, jeopolimer harç numunelerinde üretim aşamalarında hangi adımları takip ettiğimizi açıklayacağız.

3.1. Materyal

3.1.1. Elâzığ Ferrochrom Cürufu (EFC) ve Özellikleri

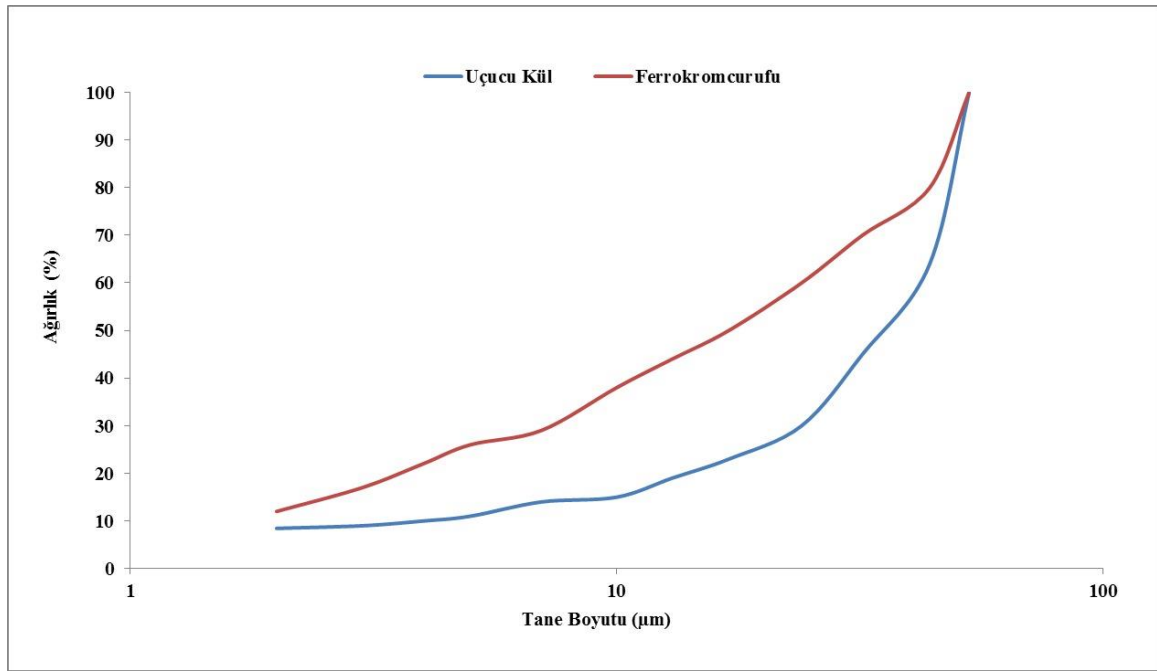
Elazığ'daki ferrochrom tesislerinden cüruf elde edilmiştir. Elde edilen ferrochrom cürufu büyük ve küçük parçacıklar içermektedir. Ancak, parçacıkların çapı 0,1 mm'den küçüktür. Elazığ'daki ferrochrom cürufunun alkali aktivatörlerle reaktivitesini artırmak için, Elazığ'daki ferrochrom cürufu, sıradan Portland çimentosunun parçacık boyutuna ulaşmak amacıyla 45 µm gözenek boyutuna sahip bir elekten geçecek şekilde öğütülmüştür. Kullanılan EFC kimyasal içeriğine ilişkin bilgiler Tablo 3.1 de verilmiştir.

3.1.2. Uçucu Kül ve Özellikleri

Uçucu kül, Türkiye'nin güneyinde, Adana ilinin Yumurtalık ilçesine bağlı Sugozy köyünde bulunan İskenderun Enerji Üretim Tesisinden elde edilmiştir. Kullanılan F sınıfı uçucu külün kimyasal bileşimi Tablo 1'de sunulmuştur. $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplam değeri %70'in üzerinde ve CaO içeriği %10'un altında olduğundan, uçucu kül ASTM C618 [28] spesifikasyonuna göre F sınıfı ve düşük kireçli uçucu kül olarak sınıflandırılmıştır. Kullanılan uçucu kül kimyasal içeriğine ilişkin bilgiler Tablo 3.1 de verilmiştir.

Uçucu kül ve ferrochrom cürufu numuneleri üzerinde yapılan tane boyutu dağılımı deneyi ile elde edilen verilere göre değişim yüzdesini karşılaştırmalı olarak Şekil 3.1. de gösterilmektedir. Logaritmik ölçekli olarak yatay eksen tane boyutu (µm), dikey eksen

ise kümülatif ağırlık yüzdesi yer almaktadır. Her iki malzemenin de tane boyutu dağılımında 1 μm ile 100 μm arasında değişmekte olup, ferrokrom cürufu uçucu küle kıyasla daha yüksek kümülatif dane değişim değerlerine sahiptir. Özellikle 10 μm üzerindeki bölgede ferrokrom cürufunda kümülatif ağırlığı belirgin şekilde daha yüksektir. Ferrokrom cürufunda elde edilen bu eğri daha kaba taneli yapı ve daha geniş bir dane boyut dağılım değişimine sahip olduğunu göstermektedir. Uçucu küle ise daha ince ve daha homojen bir partikül dağılımının sergilendiği grafikten anlaşılmaktadır.



Şekil 3.1. Uçucu kül ve cüruf granülometri eğrisi

Tablo 3.1. Elâzığ ferrokrom cürufu ve uçucu kül kimyasal içeriği (%)

Kimyasal Bileşenler	Cüruf [34]	Uçucu Kül
CaO	1,1	4,81
SiO ₂	33,80	44,23
Al ₂ O ₃	25,48	19,60
Fe ₂ O ₃	0,61	7,79
MgO	35,88	2,00
SO ₃	----	0,14
K ₂ O	----	1,7
Na ₂ O	----	1,17
Cr ₂ O ₃	2,12	-----

3.1.3. Aktivatörler

Sodyum hidroksit ve sodyum silikat, karışımların hazırlanmasında alkali aktivatörler olarak kullanılmıştır.

Jeopolimerde matrisi aktive etmek için kullanılan alkalilerden biri olan NaOH, %99 saflıkta özellikle olarak Merck şirketinden satın alınmıştır. Sodyum hidroksit (NaOH) temel olarak laboratuvar deneylerinde kullanımı yaygın olan bir kimyasal bileşiktir. Bu bileşikte sulu çözeltide bulunan hidroksil iyonlarının varlığı oldukça bazik bir ortamdan oluşan malzeme meydana getirir. Kimyasal formül olarak $\text{NaOH} \times \text{H}_2\text{O}$ olan sodyum hidroksitte, %32-33 oranında sodyum hidroksit ve %67-68 oranında su bileşimi içerir. Genellikle kıvamı jel olarak bulunan sodyum hidroksit, özgül ağırlığı ise 1.35 olan bir bileşiktir.

Jeopolimerde matrisi aktive etmek için cam suyu olarak da bilinen sodyum silikat kullanılmıştır. Başta seramik sektörü olmak üzere birçok sektörde kullanılmaktadır. Deneylerde kullanılan sodyum silikatın formülü $\text{Na}_2\text{O} \times \text{SiO}_2$ 'dir. Bu bileşik sodyum oksit ve silika ile kimyasal olarak elde edilmiş bir bileşiktir. SiO_2 yüzdesi %22-24 arasında iken, Na_2O yüzdesi %11-12 arasında ve H_2O yüzdesi %64-67 arasındadır. Bu bileşik kıvam olarak jel formunda ve renksiz bir görünümündedir. Özgül ağırlık değerleri 1.380-1.397 arasında değişmektedir. Bu bileşik genellikle katalizörlerde ve endüstriyel süreçlerde kullanılan bir malzeme olarak bilinir. Sulu çözeltilerindeki özellikleri nedeniyle çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılan önemli bir bileşiktir.

3.1.4. Karma Suyu

Harç üretiminde kullanılan su temiz olmalı ve harç üzerinde herhangi bir olumsuz etkiye sahip olmamalıdır. Bu çalışmada, bu yaklaşımı takip etmek amacıyla çalışmada harç üretiminde karıştırma suyu olarak damıtılmış saf su kullanılmıştır.

3.1.5. Atık Araç Lastik Parçacıkları

Jeopolimer harç üretiminde agrega olarak sadece atık lastik parçacıkları kullanılmıştır. Kullanılan parçacıklar bir geri dönüşüm firmasından ömrünü tamamlamış araç lastiklerinden elde edilmiş olarak hazır alındıktan sonra 2mm elek aralığından geçirilerek kullanılmıştır. Sadece çimento içeriği ile üretilen harçlarda ise Bingöl Üniversitesi'ne ait içilebilir nitelikteki musluk suyu karışımlarda kullanılmıştır.

3.1.6. Çimento

Jeopolimer harç üretimine ait karışım içeriklerinde yer alan çimento CEM-I 42.5 R olarak temin edilmiş ve karışımlarda kullanılmıştır.

3.2. Karışımların Hazırlanması

Jeopolimer harç üretiminde esas bağlayıcı malzeme 2 grupta incelenmiştir. İlk grupta Elâzığ ferrokrom tesislerinden elde edilen cüruf öğütülerek elendikten sonra ikinci grupta ise termik santralden elde edilen uçucu kül kullanılmıştır. Bazı karışımlarda ise CEM-I 42.5 R çimento ikamesi de yer almaktadır. Uçucu kül ve cüruf içerikleri karışımlarda hacimce %100, %95 ve %90 olarak kullanılmıştır. Diğer taraftan çimento miktarları karışımlarda cüruf ve uçucu kül içeriklerini %100'e tamamlayacak şekilde hacimce %5 ve %10 olarak eklenmiştir. Karışımlarda yer alan GEAL karışımlara hacimce eklenmiş olup karışım hacminin 1/2, 1/3 ve 1/4 oranında kullanılmıştır. Toplamda 22 adet karışım elde edilmiştir. Jeopolimer üretimine ait bu çalışmada yer alan karışım oranları Tablo 3.2'de sunulmuştur.

Tablo 3.2. Jeopolimer karışımlara ait karışım içerikleri (kg/m³)

Karışım Kodu	GEAL	Cüruf	Uçucu Kül	Çimento	Na ₂ SiO ₃	NaOH	Su
M1	0,0	0,0	0,0	600,0	0,0	0,0	270,0
M2	275,0	0,0	0,0	1420,0	0,0	0,0	416,7
M3	366,7	0,0	0,0	1255,1	0,0	0,0	370,3
M4	550,0	0,0	0,0	175,7	0,0	0,0	277,9
M5	275,0	1251,0	0,0	0,0	277,8	139,0	0,0

Tablo 3.2. Devamı Jeopolimer karışımlara ait karışım içerikleri devamı

M6	275,0	1193,3	0,0	62,6	277,8	139,0	0,0
M7	275,0	1140,9	0,0	125,1	277,8	139,0	0,0
M8	366,7	1112,2	0,0	0,0	247,0	123,3	0,0
M9	366,7	1056,6	0,0	55,6	247,0	123,3	0,0
M10	366,7	1014,1	0,0	112,7	247,0	123,3	0,0
M11	550,0	834,1	0,0	0,0	185,2	92,6	0,0
M12	550,0	796,7	0,0	42,0	185,2	92,6	0,0
M13	550,0	760,6	0,0	84,5	185,2	92,6	0,0
M14	275,0	0,0	968,5	0,0	277,8	139,0	0,0
M15	275,0	0,0	923,9	48,4	277,8	139,0	0,0
M16	275,0	0,0	883,3	96,9	277,8	139,0	0,0
M17	366,7	0,0	861,0	0,0	247,0	123,3	0,0
M18	366,7	0,0	818,0	55,6	247,0	123,3	0,0
M19	366,7	0,0	785,1	112,7	247,0	123,3	0,0
M20	550,0	0,0	645,8	0,0	185,2	92,6	0,0
M21	550,0	0,0	616,8	42,0	185,2	92,6	0,0
M22	550,0	0,0	588,9	84,5	185,2	92,6	0,0

Jeopolimer sistemlerinin 75 °C'de 24 saat boyunca kürlenmesi, jeopolimerizasyon reaksiyonlarını hızlandırmak ve erken yaş mekanik performansını iyileştirmek için yaygın olarak tercih edilir. Uçucu kül bazlı jeopolimerler de üretim esnasında yüksek kürlenme koşulları sağlandığında elde edilen sonuçlar ortam sıcaklığında kürlenmeye kıyasla önemli ölçüde daha yüksek basınç dayanımı sağlar [29]. Benzer çalışmalara bakılırsa yüksek mukavemetli metakaolin içerikli jeopolimerler de 60-90 °C sıcaklıklarda bir gün boyunca kürlenme yapılırsa 80 MPa 'ya kadar basınç dayanımı sağlamıştır diğer taraftan aşırı sıcaklık veya yapılacak olan uzun süreli kürlenme işlemleri mikro çatlaklara neden olabilir ve performansı düşürebilir [30–32]. Ek olarak, klinker agrega bazlı sistemlerde, 75 °C'de 151 kürlemesi, küresel C–S–H benzeri morfolojilerin oluşumunu kolaylaştırarak daha yoğun ve daha homojen bir mikro yapıya yol açar [33]. Bunu destekleyen Yadollahi ve Dener [34] tarafından Hasankale'den elde edilen volkanik tüf jeopolimerlerinde mekanik mukavemet gelişimi için optimal kürlenme sıcaklığının 65 °C olduğunu göstermiştir. 75 °C'nin de etkili bir aralık olduğunu, ancak ideal kürlenme sıcaklığının matris içerisinde yer alan temel malzemenin mineralojik ve kimyasal bileşiminden yola çıkılması gerekliliği vurgulamıştır. Bu nedenle, 75 °C'de 24 saat kürlenme için pratik ve yaygın olarak etkili bir

koşul sağlanabileceği ancak belirli mineralojik kökenli jeopolimer sistemleri için performansın optimizasyonunu sağlamak amacıyla küçük ayarlamalar yapılabilir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, F tipi uçucu kül ve Ferro Krom Cürufu kullanılarak hazırlanmış ve 75 °C’de 24 saat boyunca kürlenmiş numunelere dayanmaktadır. Sodyum silikat (cam suyu) ve sodyum hidroksit çözeltileri karıştırıcı içine yerleştirilmiş ve 3 dakika süreyle karıştırılmıştır. Sonrasında ilgili karışımda yer alan materyallere göre F tipi uçucu kül ve Ferro Krom Cürufu ve GEEAL ile elde edilen aktivatör sıvılar ile 1 dakika düşük hızda sonrasında ise 1 dakika yüksek hızda karıştırılmıştır. Elde edilen harç, deney desenine göre ihtiyaç olan deneyin için numune kalıplarına yerleştirilerek 1 dakika sarsma tablasında vibrasyona tabi tutulmuştur. Numuneler streç film ile sarılıp kür ortamının olarak seçilen sıcaklıktaki fırına yerleştirilmiştir. Tüm deneylerde modül oranı sabit tutulmuş ve sodyum silikatın modülü 3 olarak belirlenmiştir. Numuneler, bir gün süreyle sıcak kürde tutulduktan sonra laboratuvar ortamında istenilen yaşa ulaşınca kadar bekletilmiştir. Çalışma kapsamında üretilen karışımlardan elde edilen ürünler 4×4×16 cm lik numune kalıplarına yerleştirilerek deneyler için eleman üretimleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Polimer harç numunelerinin üretimine ait çalışmalar

3.3. Kullanılan Cihazlar ve Yapılan Testler

Yapılan bu tez çalışması neticesinde jeopolimer harç numuneleri üretilmiş olup ve bu numuneler üretildikten sonra deneysel ortamda test cihazları kullanılarak jeopolimer harç numuneleri üzerinde bazı deneysel çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

3.3.1. Eğilme Dayanım Testleri

Her karışıma ait gruptan 3'er adet 4x4x16 cm boyutlarında prizma olarak üretilen jeopolimer harç numuneleri üzerinde eğilme dayanım testleri yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışma esas olarak ASTM 348'a [35] uygun olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Jeopolimer harç numunelerinin eğilme dayanımı formülü denklem 3.1'de belirtildiği şekilde yapılmıştır. Eğilme dayanımının testi Şekil 3.3'de gösterilen universal yükleme test cihazının iki üniteli basınç/eğilme deney cihazı ile yapılmıştır. Bu cihaz kullanılarak numunelere 3 noktalı eğilme deneyi uygulanmıştır.



Şekil 3.3. Jeopolimer harç numuneleri üzerinde yapılan eğilme dayanım testi görüntüsü

$$\sigma_e = (3 \times P \times L_m) / (2 \times d \times h^2) \quad (3.1)$$

σ_e : Polimer harç eğilme dayanımı (N/mm²)

L_m : Mesnetlerin arası uzaklık (mm)

d : Numunenin kesitinin genişliği (mm)

h^2 : Numunenin yükleme yönündeki kesit yüksekliği (mm)

P : Kırılma anındaki yük (N)

3.3.2. Basınç Dayanım Testleri

Her seriden öncelikli olarak eğilme yükü altında test edilen numunelerden kırılma sonrası elde edilen prizma parçaları toplamda her seri için 6'şar adet 4×4×4 cm boyutlarında numuneye basınç dayanım testleri yapılmıştır. Her bir karışımda bu numuneler için bu deneyler ASTM C349'a [36] uygun şekilde yapılmıştır. Basınç dayanım testleri denklem 3.2'de belirtildiği şekilde yapılmıştır. Basınç dayanım testi Şekil 3.4'de gösterilen üniversal yükleme cihazı (3000 kN'luk tam otomatik basınç dayanım deney cihazı) ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.4. Jeopolimer harç numuneleri basınç dayanım testi cihazı

$$\sigma_b = P_b/A \quad (3.2)$$

σ_b : Basınç mukavemeti (N/mm²)

P_b : Kırılma yükü (N)

A : Numune yüzey alanı (mm²)

3.3.3. Ultra Ses Geçiş Hızı Testleri

Ultra ses geçiş hızının tespiti amacıyla üretilen jeopolimer harç karışımlarından 5x5x5 cm boyutunda numuneler üretilmiştir. Üretilen bu numuneler üzerinde ASTM C 597 [37]' ye uygun olarak ultra ses geçiş hızının tespiti yapılmıştır. Ultra ses geçiş hızı testlerinde yapılan hesaplamalarda denklem 3.3'te belirtilen formülasyonlar kullanılmıştır. Ultra ses geçiş hızı ile hesaplanan parametreler sayesinde jeopolimer harç numunesi içerisinde cihaz vasıtası ile yollanan ses dalgasına ait hız tespit edilmiştir. Ses dalgasından elde edilen geçiş hızı ile numunelerde basınç dayanımı testi arasındaki ilişki incelenmiştir. Ultra ses geçiş hızı testi için Şekil 3.5'te gösterilen ultrasonik dalga hızı ölçmeye yarayan test cihazı kullanılmıştır. Kullanılan ultra ses geçiş cihazı sayesinde geçiş süresine ait değerler mikro saniye(μs) olarak ölçülmüştür. Çalışmada kullanılan ultra ses geçiş hızı m/s'ye çevrilerek kullanılmıştır.



Şekil 3.5. Jeopolimer harç numunelerinde ultra ses geçiş hızının testi

$$V_s = (L_n/t) \times 10^6 \quad (3.3)$$

V_s : Ultra ses geçiş cihazı ile ölçülen hız (m/s)

L_n : Numune uzunluğu (m)

t : Ses dalgalarının numune içerisinde geçiş süresi (μs)

3.3.4. Taramalı Elektron Mikroskobu Analizi

SEM görüntüleme işlemi için $5 \times 5 \times 5$ cm boyutlarındaki numunelerden elde edilen bazı örnekler Bingöl Üniversitesi Merkezi Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde incelenmiştir. İlgili merkezde Şekil 3.6'te gösterilen JOEL marka ve JSM 6510 model cihazı kullanılmıştır. Numunelerden alınan küçük parçacıklar SEM cihazında test amacı ile görüntülemeye alınmadan Şekil 3.7'de gösterilmiş olan sputter coater adında kaplama cihazı kullanılarak altın-paladyum karışımı vasıtasıyla homojen şekilde kaplanmaktadır. Elde edilen bu kaplama görüntüleme işleminde önemli bir rol oynamakla beraber işlem sonrasında SEM görüntüleme cihazında deneysel işlemler gerçekleştirilmiştir. Cihaz, belirli ışın fotogrametrisindeki elektronları kullanarak numune üzerinden yüksek derinlikte ve çözünürlükte üç boyutlu görüntüleri alma prensibi ile çalışmaktadır.



Şekil 3.6. SEM görüntüleme analizi ve deney cihazı



Şekil 3.7. Sputter coater kaplama cihazı

3.3.5. EDX Analizi

Enerji dağılımlı X-ışını (EDX) analizi, atom numarası > 3 olan bir numunenin elementel bileşiminin ve kimyasal yapısına ait analizini karakterize etmek için kullanılan bir analitik tekniktir. Genellikle SEM ve TEM (Geçirimli Elektron Mikroskobu) ile birlikte kullanılır. Analitik süreç, numuneye yüksek enerjili elektron ışını bombardımanı yapılarak gerçekleştirilir. Elektron bombardımanı, numune yüzeyindeki atomlardan X-ışınlarının fırlamasına neden olur. Etkileşimden kaynaklanan X-ışını emisyonu iki kategoriye ayrılabilir: Sürekli X-ışınları olarak da bilinen Bremsstrahlung X-ışınları ve karakteristik X-ışınları. Bremsstrahlung X-ışınları, gelen elektron ile numunenin atom çekirdekleri arasındaki etkileşim nedeniyle oluşur. Yüksek ve düşük enerji durumları arasındaki enerji farkı, yayılan X-ışınlarının enerjisine karşılık gelir ve numunenin özelliklerine bağlıdır. Karakteristik X ışınlarının enerjisi, numuneye katkıda bulunan elementleri ortaya çıkarmak için kalitatif analiz yapılmasına olanak sağlarken, karşılık gelen yoğunluk, mevcut elementlerin konsantrasyonunu ortaya çıkarmak için kantitatif analiz yapılmasına olanak sağlar.

3.3.6. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Analizi

FTIR (Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Analizi) spektrometresi için üretilen $5 \times 5 \times 5$ cm boyutlarında üretilen jeopolimer harç numuneleri üzerinden alınan örneklemeler üzerinden gerçekleştirilmiştir. FTIR spektrometresi analizlerinin yapılması amacıyla Bingöl

Üniversitesi Merkezi Laboratuvar Uygulama ve Araştırma Merkezi olanakları kullanılmıştır.



Şekil 3.8. FT-IR spektrometre cihazı

Bu merkezde yer alan ve Şekil 3.8’de gösterilen Perkin Elmer markasının Spektrum 100 FT-IR Spektrometer adlı cihazı kullanılarak ilgili analizler yapılmıştır. Numunelerden FTIR testi için alınan küçük parçalar cihazda bünyesinde yer alan optik sistemlerin sayesinde ile $4500-400\text{ cm}^{-1}$ aralığında örneklemeler ile alakalı veri temini gerçekleştirmektedir. FTIR işlemleri genellikle polimer maddelerde kimyasal içerik analizlerinde tercih edilmektedir.

3.3.7. X-Işını Difraksiyonu Analizi

XRD (X-Işını Difraksiyonu) analizi için üretilen $5\times 5\times 5\text{ cm}$ boyutlarında üretilen jeopolimer harç numuneleri üzerinden alınan örneklemeler ile gerçekleştirilmiştir. XRD spektrometresi analizlerinin yapılması amacıyla Bingöl Üniversitesi Merkezi Laboratuvar Uygulama ve Araştırma Merkezi olanakları kullanılmıştır. Bu merkezde yer alan ve Şekil 3.9’da gösterilen Perkin Rigaku adlı cihaz kullanılarak ilgili analizler yapılmıştır. Numunelerden yani jeopolimerin mikroyapısını daha derinlemesine incelemek ve anlamak için SEM (Tarayıcı Elektron Mikroskobu) ve XRD (X-Işını Difraksiyonu) gibi gelişmiş analitik teknikler kullanmıştır.



Şekil 3.9. XRD cihazı

X-ışını difraksiyonu (XRD), farklı malzemelerdeki kristal fazları tanımlanması ve bu fazların kantitatif analizlerinin yapılması için kullanılan bir tekniktir. XRD, özellikle malzemelerin özelliklerini ve karakteristiklerinin doğrudan etkilendiği üç boyutlu atom yapısını üstün bir şekilde vurguladığı için kullanılır. Elde edilen jeopolimerlerin mineralojik bileşimini analiz etmek için, ordinat eksenindeki X-ışını yoğunluğu ile absis eksenindeki Bragg açısı θ arasındaki difraktogramlar, 5° ile 90° arasındaki $\theta-2\theta$ açı aralığında, her 60 saniyede bir 0.013° adım boyutu ile sürekli tarama yapılarak, $0.054 (^\circ/\text{s})$ tarama hızında, 45 KV voltaj ve 40 mA akım yoğunluğunda gerçekleştirilmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yapılan çalışmanın bu bölümünde deneysel işlemler için üretilen 5×5×5 cm ve 4×4×16 cm boyutlarında numuneler üretilmiştir. Üretilen jeopolimer harç numunelerine ait ağırlıkça karışım oranları, eğilme ve basınç dayanım testleri, ultra ses geçiş hızı deneyi, SEM, EDX FTIR ve XRD analizi deneyleri yapılarak sonuçlarına yer verilmiştir.

4.1. Jeopolimer Harç Numunelerin Karışım Oranları

Üretilen jeopolimer harç numunelerin hacimce karışım oranlarının karışımlarına ait oranların tanımlarını içeren veriler Tablo 4.1’de gösterilmiştir. Karışım hesaplamalarında örnek olarak M6 karışımına bakıldığında: önce toplam hacmin $\frac{1}{4}$ ü kadar hacmin GEAAL ile kaplandığı sonra geriye kalan hacmin $\frac{2}{3}$ ’lük kısmı ise pasta (cüruf + çimento) ve geriye kalan $\frac{1}{3}$ ’ü de bağlayıcı olarak yani $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH}$ olacak şekilde toplamını seçtik. Geri kalan karışımlarda da benzer uygulamalar Tablo 4.1’de verildiği şekilde seçilerek kullanılmıştır.

Tablo 4.1. Jeopolimer karışımlara ait karışım içerikleri

Karışım Kodu	Karışım İçeriği
M1	%100 çimento pastası
M2	$\frac{1}{4}$ GEAAL oranı %100 çimento
M3	$\frac{1}{3}$ GEAAL oranı %100 çimento
M4	$\frac{1}{2}$ GEAAL oranı %100 çimento
M5	$\frac{1}{4}$ GEAAL oranı %100 cüruf
M6	$\frac{1}{4}$ GEAAL oranı %95 cüruf %5 çimento
M7	$\frac{1}{4}$ GEAAL oranı %90 cüruf %10 çimento
M8	$\frac{1}{3}$ GEAAL oranı %100 cüruf
M9	$\frac{1}{3}$ GEAAL oranı %95 cüruf %5 çimento
M10	$\frac{1}{3}$ GEAALGEAAL oranı %90 cüruf %10 çimento
M11	$\frac{1}{2}$ GEAAL oranı %100 cüruf
M12	$\frac{1}{2}$ GEAAL oranı %95 cüruf %5 çimento
M13	$\frac{1}{2}$ GEAAL oranı %90 cüruf %10 çimento
M14	$\frac{1}{4}$ GEAAL oranı %100 uçucu kül
M15	$\frac{1}{4}$ GEAAL oranı %95 uçucu kül %5 çimento

Tablo 4.1 Jeopolimer karışımlara ait karışım içerikleri devamı

M16	1/4 GEAAL oranı %90 uçucu kül %10 çimento
M17	1/3 GEAAL oranı %100 uçucu kül
M18	1/3 GEAAL oranı %95 uçucu kül %5 çimento
M19	1/3 GEAAL oranı %90 uçucu kül %10 çimento
M20	1/2 GEAAL oranı %100 uçucu kül
M21	1/2 GEAAL oranı %95 uçucu kül %5 çimento
M22	1/2 GEAAL oranı %90 uçucu kül %10 çimento

4.2. Jeopolimer Harç Numunelerin Basınç Dayanım Testi Sonuçları

Üretimi yapılarak 75 °C’de 24 saat boyunca kürlenmiş numuneler deney günleri gelene kadar laboratuvar ortamında 25 seri 4×4×16 cm boyutlarında numuneler öncelikle her yaş grubundan ve karışımdan 3’er adet olmak üzere eğilme testine tabi tutulmuş ve sonrasında ise kırılan parçalar üzerinden basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Dolayısıyla her seriden Şekil 4.1’de gösterildiği gibi 6 adet numune basınç dayanım testine tabi tutulmuştur. Karışımların basınç dayanımı değerleri deneye tabi tutulan numunelerin basınç dayanımlarının ortalamaları hesaplanarak dikkate alınmıştır. Deney günleri ise numune yaşı 3, 7, 28 ve 180 gün olarak dikkate alınmıştır.



Şekil 4.1. Basınç dayanımına tabi tutulan jeopolimer harç numuneleri

Karışım sayısının fazla olması nedeni ile çalışma cürufu (Şekil 4.2) ve uçucu kül (Şekil 4.3) içeren jeopolimer karışımları olmak üzere 2 kısma ayrılmıştır. Şekil 4.2’de en yüksek dayanım referans karışım olan M1 (%100 çimento pastası) her deney yaşı dikkate alındığında en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu ve 3-gün yaşında 28,7 MPa ve 180-gün yaşında ise 50,06 MPa olarak deney sonuçları elde edilmiştir. Kontrol karışımlarında yani sadece çimento içeriği ve GEAAL içeriği olan karışımlarda GEAAL oranı arttıkça basınç dayanımının düştüğü görülmektedir. Özellikle %100 çimento içeren bu karışımlarda (M2–M4), GEAAL oranı arttıkça dayanım düşmektedir. İleri yaş değerleri olan 180-gün yaşında yapılan deneylerde M2 (1/4 GEAAL): 31,12 MPa, M3 (1/3 GEAAL): 22,67 MPa ve M4 (1/2 GEAAL): 15,4 MPa olarak hesaplanmıştır. Diğer taraftan cüruf kullanımı ile dayanım düşse de belirli cüruf içerikli kombinasyonlarda karışımlardan elde edilen basınç dayanımları kabul edilebilir seviyelerde görülmektedir. Bu karışımlardan M7 oldukça iyi performans göstermektedir. Bu karışımda 28-günde 26,4 MPa ve 180-gün için 28 MPa. M6 karışımında da benzer başarılı değerler elde edilmiş olmakla birlikte 28-günde 24,2 MPa ve 180-günde ise 24,1 MPa olarak hesaplanmıştır. Ayrıca cüruf ve GEAAL oranı arttıkça dayanımında daha da hızlı bir azalma oluşmaktadır. Bu karışımlar M11–M13 gibi 1/2 GEAAL içeriğine sahip karışımlardır. 180-gün için basınç dayanımı değerleri 4–5 MPa civarındadır (Şekil 4.2).

3-günlük basınç Dayanımına ait değerlerde M1 (%100 çimento pastası) en yüksek dayanımı (28.7 MPa) göstermiştir (Şekil 4.2). Bu, çimentodan kaynaklanan erken yaşlarda hızlı priz alarak yüksek dayanım sağlamanın beklenen bir sonucudur. M7 karışımında ise elde edilen basınç dayanımı 3-gün yaşı için 2. sırada olmakla birlikte 15,2 MPa değerindedir. Bu durumun temelinde düşük çimento oranına rağmen içeriğindeki katkı maddeleriyle iyi bir erken dayanım sağlandığının göstergesi olabilir. M6 (%95 cüruf + %5 çimento + 1/4 GEAAL) ve M5 (%100 cüruf + 1/4 GEAAL) de erken yaşta 10 MPa üzerinde dayanım göstermiştir. Bu, cürufun katkılarla birlikte hızlıca katkı sunduğunu gösteriyor. 1/2 GEAAL oranlı karışımlar (M4, M11, M12, M13) genel olarak düşük dayanım göstermiştir ve dayanımları 2–3 MPa aralığındadır. GEAAL oranı arttıkça erken dayanımda ciddi şekilde düşüşler gözlemlenmektedir (Şekil 4.2).

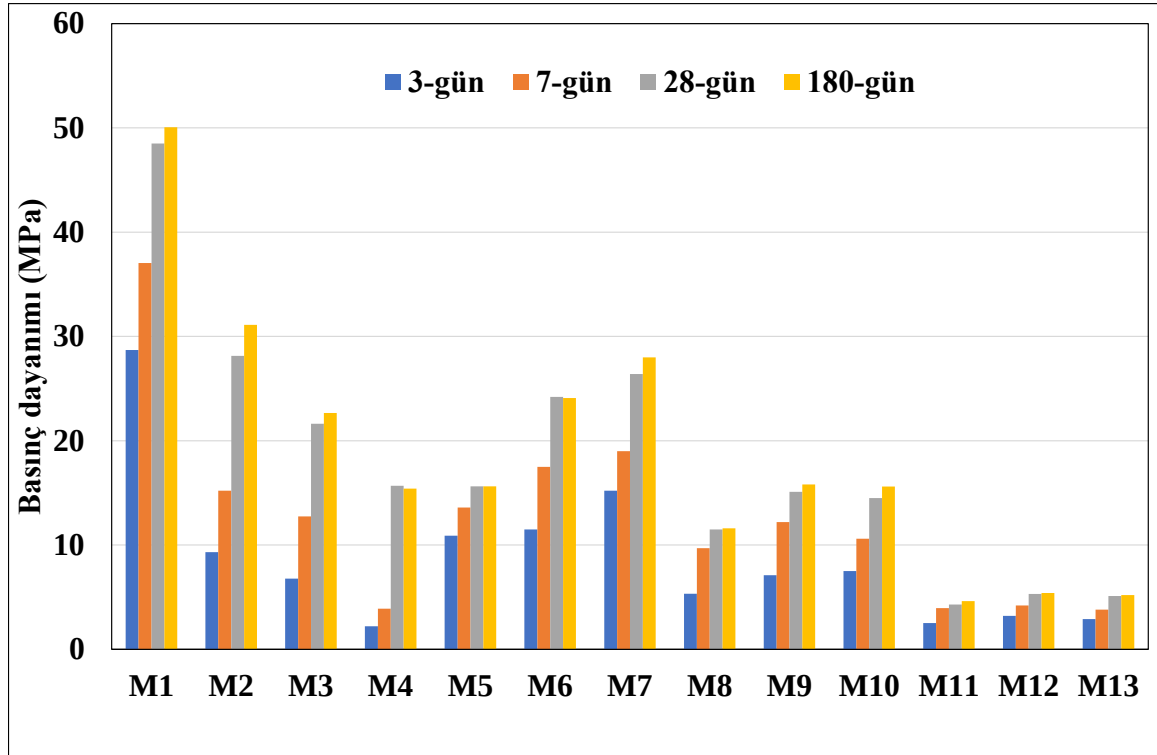
7-günlük basınç dayanımında, M1 karışımı en 37,05 MPa basınç dayanımı ile en yüksek değere sahiptir (Şekil 4.2). Çimentonun priz alma ve sonrasında dayanım kazanma

sürecinde de etkisi devam ettiği anlaşılmaktadır. M7 ve M6 da ise, çimento oranının çok düşük değerlerde olsa da basınç dayanımı olarak elde edilen 17–19 MPa aralığındaki değerler 7 günden sonra cürufun katkısının basınç dayanımındaki etkisinin daha belirginleştiğini gösteriyor olabileceği düşünülmektedir. M3 ise sadece çimento ve GEAAAL içeriğine rağmen 12,75 MPa ile GEAAAL arttıkça çimentonun azalan etkisini göstermektedir. M11–M13 aralığındaki karışımlarda yer alan 1/2 GEAAAL oranı çok düşük basınç dayanım değerine sahip olmaktadır (Şekil 4.2).

28-günlük basınç dayanımlarında, karışımlar arasında M1 için 48,51 MPa elde edilmiştir. M2 ve M7 basınç dayanımı olarak 24 ve 26,4 MPa olarak yakın değerler elde edilmiştir (Şekil 4.2). M7’de çimento oranı oldukça az olmasına rağmen elde edilen basınç dayanımı M2 ile aynı seviyededir. M4, M5, M9 ve M10 gibi karışımlarda ise basınç dayanımı değerleri 14 – 16 MPa civarındadır. 1/2 GEAAAL oranı içeren karışımlar (M11–M13) çok düşük basınç dayanımlarına (4–5 MPa) sahip olmakla birlikte yapısal anlamda taşıyıcı yapılarda uygun değildir (Şekil 4.2).

180-günlük basınç dayanımı incelendiğinde (Şekil 4.2)., M1 karışımına ait basınç dayanımı 50,06 MPa olarak hesaplanmıştır. M2 ve M7 karışımlarında 30 MPa olarak hesaplanan basınç dayanımı özellikle M7’nin %10 çimento ile bu kadar yüksek dayanıma ulaşmasının cürufun geç hidratasyona etki kabiliyetiyle ilgilidir (Şekil 4.2).

M1 en yüksek basınç dayanımına sahipken, M7 (1/4 GEAAAL + %90 cüruf + %10 çimento) ise düşük çimento kullanımıyla yüksek uzun vadeli dayanım olası yansırı ekolojik ve ekonomik olarak ortaya çıkmaktadır. M6 (1/4 GEAAAL + %95 cüruf + %5 çimento) ise yapısal bağlamda kabul edilebilir kabul edilebilir dayanım ve daha düşük çimento oranı. Diğer taraftan M2 (1/4 GEAAAL + %100 çimento) karışımında GEAAAL katkısına rağmen yüksek dayanım elde edilmiştir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Cüruf ile üretilen jeopolimer harç numunelerin basınç dayanım testi sonuçları

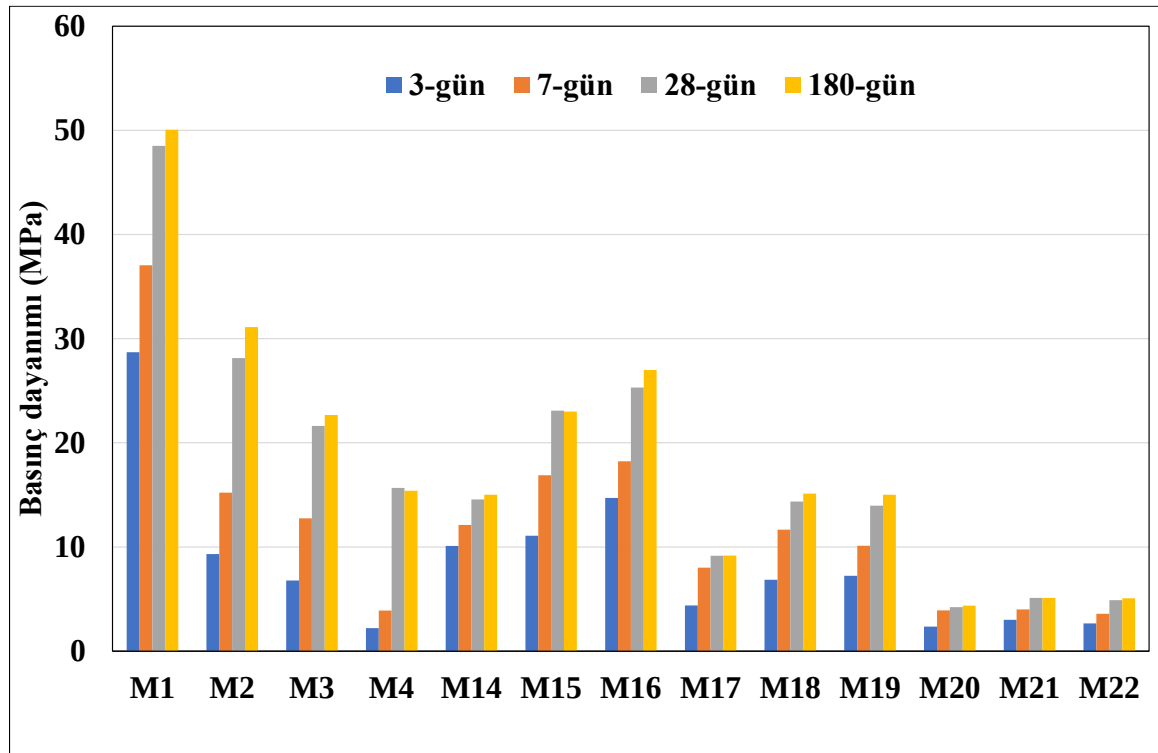
Genel olarak Şekil 4.3’de verilen sonuçlar değerlendirildiğinde uçucu kül kullanımı dayanımı düşürse de düşük oranlı GEAAL katkısı ve çimento katkısı ile dayanım iyileşmesi gözlemlenmiştir. M14 (%25 GEAAL, %100 uçucu kül) karışımında 180-gün için basınç dayanımı 15,02 MPa, M15 (%25 GEAAL, %95 uçucu kül, %5 çimento) için 23 MPa ve M16 (%25 GEAAL, %90 uçucu kül, %10 çimento) için ise 27 MPa’dır. GEAAL oranı %50’ye çıktığında, uçucu kül oranı ne olursa olsun basınç dayanımında ciddi düşüşler yaşanmıştır (Şekil 4.3).

3-gün yaşında basınç dayanımı değerlerinde uçucu kül katkılı karışımlar (M14–M16) düşük çimento oranlarına rağmen erken dayanım sağlanmasında önemli katkı sunduğu görülmektedir (Şekil 4.3). %50 GEAAL katkısı olan karışımlar olan M4 ve M20–M22 ise basınç dayanımı açısından çok zayıf olmakla birlikte erken yaşta yapısal kullanılması uygun görülmemiştir (Şekil 4.3).

7-gün yaşında yapılan basınç dayanımı testlerinde M16 ve M15 gibi %25 GEAAL içeren uçucu kül + çimento karışımlarında orta yaşta yüksek dayanım geliştirme potansiyeli

göstermektedir. Diğer taraftan %33 GEAAL içeriğine sahip karışımlar (M17–M19) daha yavaş gelişiyor (Şekil 4.3).

28-gün yaşındaki numunelerde M16 (%90 uçucu kül + %10 çimento + %25 GEAAL) içerik bakımından değerlendirildiğinde elde edilen basınç dayanımı özellikleri ile M2'ye yakın performans sergilemektedir (Şekil 4.3). Bu durum sürdürülebilirlik açısından bu karışıma alternatif olarak seçilebileceğini göstermektedir. %33 GEAAL katkılı karışımlardan özellikler uçucu kül karışımı olanlar M18ve M19 ise yaklaşık 14 MPa değerinde bir basınç dayanımına ulaşmaktadır. %50 GEAAL katkılı olan jeopolimer üretimleri bu yaş grubunda da 4–5 MPa civarındaki dayanımları ile oldukça düşük dayanımlar sergilemektedir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Uçucu kül ile üretilen jeopolimer harç numunelerin basınç dayanım testi sonuçları

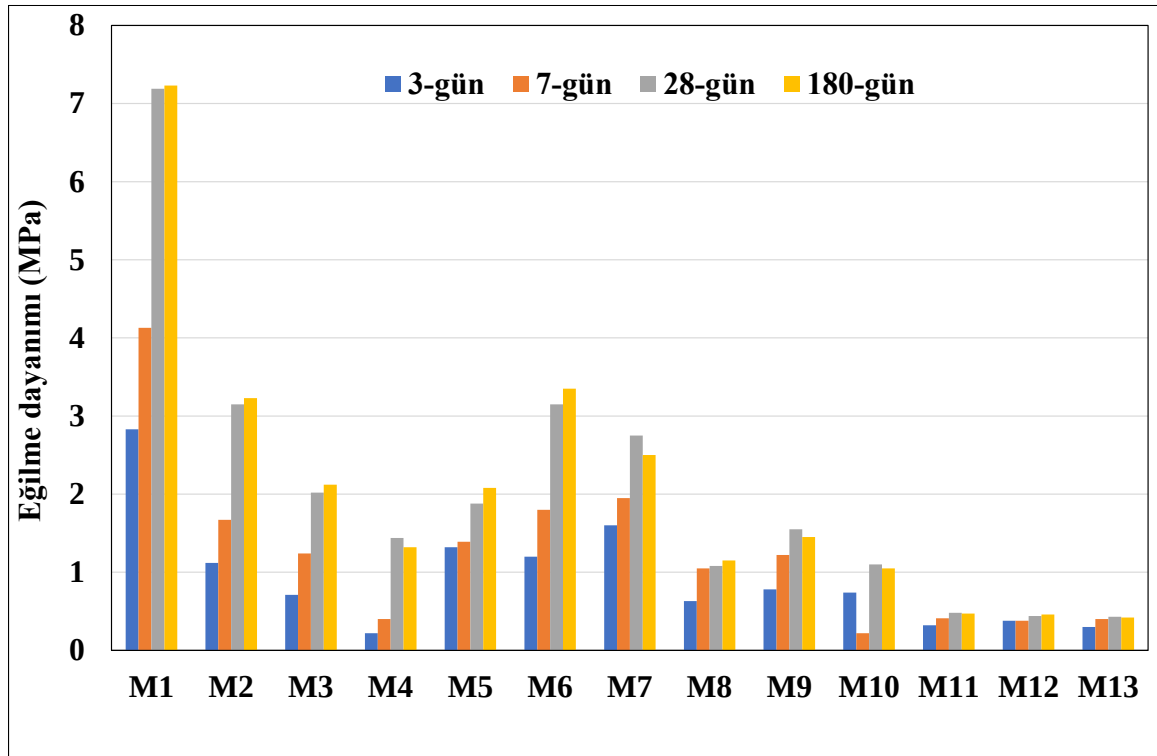
180 günlük basınç dayanımı değerleri uzun vadeli performans olarak değerlendirilebilmektedir. M16 karışımının basınç dayanımı 180 günde 27 MPa ile yüksek bir dayanım kazanımına ulaşmakla birlikte bu durum uçucu külün geç puzolanik reaksiyonu olarak gelişimde işe yaradığı düşünülmektedir. %33 GEAAL içerikli

jeopolimerler de uçucu kül karışımların basınç dayanımları 15 MPa civarına ulaşabiliyor (M18 ve M19 karışımları gibi) (Şekil 4.3). Diğer taraftan %50 GEAAL içeren karışımlar (M20–M22) ise <6 MPa’lık basınç dayanımı değerleri ile yapısal olarak kullanılamaz niteliktedir (Şekil 4.3).

4.3. Jeopolimer Harç Numunelerin Eğilme Dayanımı Testi Sonuçları

Bu çalışmada kapsamında içeriğinde farklı tür atıklar yer alan jeopolimer harçlar değerlendirilmiştir. İçeriğinde farklı oranlarda GEAAL, cüruf ve çimento yer alan jeopolimer tabanlı üretilen karışımlarının zamanla kazandığı eğilme dayanımları değerlendirilmiştir (Şekil 4.4). Elde edilen sayısal veriler doğrultusunda, özellikle kullanılan bağlayıcı türünden ve GEAAL oranının değişiminden kaynaklı olarak eğilme dayanımının etkilenmesinin üzerinde belirleyici etkilere sahip olduğu tespit edilmiştir. %100 çimento içeren referans karışımı olan M1 baz alındığında, tüm yaşlarda en yüksek eğilme dayanımı değerlerine ulaşmıştır. M1 karışımının verilerine ait 3, 7, 28 ve 180 günlük eğilme dayanımı değerleri sırasıyla 2,83 MPa, 4,13 MPa, 7,19 MPa ve 7,23 MPa olarak deneysel çalışmalarda ölçülmüştür (Şekil 4.4). Bu durum, çimentonun temel olarak yüksek erken yaş reaktivitesinden kaynaklandığı ve bilindiği gibi çimento içeriğinin dayanım kazanımı açısından önemli bir bağlayıcı içerik olduğunu ortaya koymaktadır. GEAAL oranında gerçekleştirilen içerik artması durumunda ise eğilme dayanımı değerlerinde önemli düşüşler tespit edilmiştir. Örnek olarak %100 çimento içeriğine sahip karışımlardan GEAAL oranı 1/4 olan M2 karışımında eğilme dayanımı değerleri 180 günlük iken 3,23 MPa, GEAAL oranı değeri 1/2’ye çıkarıldığında üretilen M4 karışımında ise eğilme dayanımı değeri 1,32 MPa olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.4). Bu edinim göstermektedir ki, GEAAL atık katkısından kaynaklı olarak jeopolimer harç matrisinde bağlayıcılık ve mikro yapı içeriğinde mevcut sürekliliğin olumsuz etkilenmesi sonucunu göstermektedir. Cüruf içeren karışımlarda ise, tek başına cüruf içeriği kullanımının (örneğin M5, M8, M11 karışımlarındaki gibi) eğilme dayanımının da gelişimi sınırlı ölçüde arttığı, ancak bu karışımlara olası küçük oranlarda yapılacak olan çimento ilavesinin jeopolimer harç eğilme dayanımını dayanımı önemli ölçüde iyileştirebileceği gözlemlenmiştir (Şekil 4.4). Özellikle %95 cüruf + %5 çimento içeriğine sahip olan M6 karışımında 180 günlük sürede yapılan eğilme dayanımı değeri 3,35 MPa gibi optimum bir değer ile performans sergilemiştir. Dahası, %90 cüruf ve %10 çimento içeriği ile üretilen

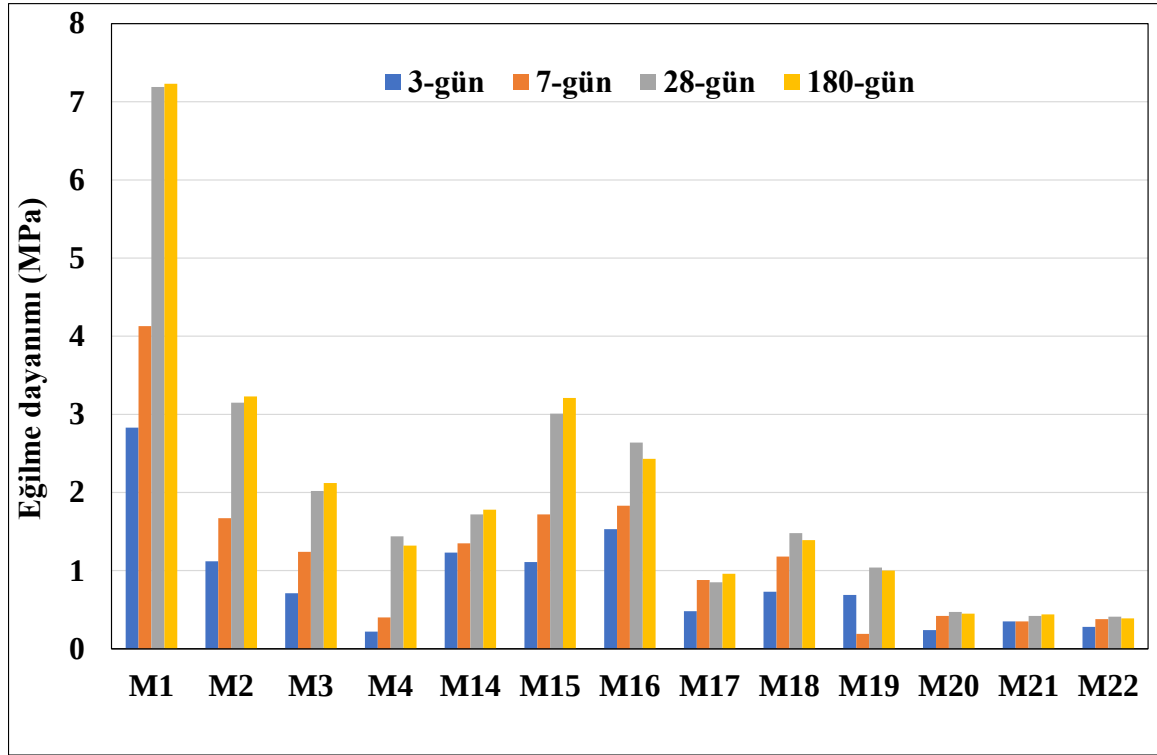
M7 karışımı da M6'ya göre değerlendirildiğinde eğilme dayanımı açısından daha düşük bir değer olan 2.5 MPa değerinin vermiştir (Şekil 4.4). Bu durumunun ise bağlayıcı içeriğine sahip matris sistemlerinde sadece çimento miktarından değil, cüruf ile çimento etkileşiminin neden olduğu matris içinde gelişen mikro yapı değişiminden de kaynaklı olabileceğinin göstergesi olarak değerlendirilebilir. Yüksek GEAAAL içeriği ile üretilmiş olan jeopolimer harçlarda özellikle 1/2 oranında ve daha düşük çimento katkılı (veya katkısız) olarak üretilen cüruf karışımlarının eğilme dayanımı değerlerinin ise oldukça düşük değerlerde olduğu saptanmıştır (Şekil 4.4). M11, M12 ve M13 karışımlarında ise eğilme dayanımlarında 180 günlük sonuçlar ise sırasıyla 0,47 MPa, 0,46 MPa ve 0,42 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu değerlerde üretimlerin jeopolimer harç olarak mekanik performans açısından yapısal uygulamalar içeriğinde kullanımının ciddi sorunlara sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.4. Cüruf ile üretilen jeopolimer harç numunelerin eğilme dayanım testi sonuçları

İkinci grup karışımlarda yer alan veriler ise uçucu kül ile üretilen jeopolimer karışımlara ait olarak sunulmuştur. Bu karışımlar için sunulan veriler Şekil 4.5 sunulmaktadır. GEAAAL oranına ve bağlayıcı türüne ait veriler (çimento ve/veya uçucu kül) ve bağlayıcıda yer alan

içeriklerin oranlarının, karışımların eğilme dayanımındaki değişimleri üzerindeki etkilerini açıkça ortaya koyulmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre, GEAAAL oranında yapılan artış eğilme dayanımında olumsuz sonuçlar göstermektedir. Özellikle %100 çimento içeren karışımlardan GEAAAL içeriğine ait oranının %25'ten %50'ye çıkarılması durumunda 28 günlük eğilme dayanımı değeri M2'de 3,15 MPa'dan M4'te 1,44 MPa'ya kadar düşüş göstermiştir (Şekil 4.5). Bu duruma ait eğilme dayanımında oluşan değişim değerlendirilirse GEAAAL ilavesinin matrisin içeriğindeki sürekliliği zayıflatarak mukavemet kayıplarının arttığı düşündürmektedir. Tamamen uçucu kül kullanıldığı jeopolimer harç karışımlarında ise dayanımlar genel durum itibari ile düşük değerlerde bulunmuştur. Kanıt olarak değerlendirilirse M14 (1/4 GEAAAL, %100 uçucu kül) 28. günde yalnızca 1,72 MPa dayanım göstermiştir (Şekil 4.5). Ancak uçucu kül karışımlarında ikame olarak belirli oranlarda çimento katkısı eğilme dayanımı değerlerini anlamlı derecede arttırabilmektedir. %5 çimento içeriğine sahip olan M15 karışımına ait eğilme dayanımı değerleri 28 günlük deneyler esnasında 3.01 MPa olarak ölçülmüştür. Eğilme dayanımında ölçülen bu değere M14'e kıyasla yapılan incelemede yaklaşık %75 oranında bir artış olarak hesaplanmıştır. Bu durum uçucu kül esaslı karışımların çimento ikamesi ile bağlayıcılık özelliğinde iyileştirme ile birlikte matriste oluşan bağları güçlendirerek eğilme dayanımı yükselttiği sonucuna ulaştırabilir (Şekil 4.5). Dahası %10 çimento katkılı karışımlarda oluşan örneğin M16 ve M19 gibi %5 çimento katkısı ile üretildiğinde daha düşük veya benzer dayanıma sahip eğilme dayanımı değerleri göstermiştir. Bu içerik değişiminin uçucu kül ve çimento arasındaki optimum oranına ait %5 çimento katkısı düzeyini işaret ettiği öngörülmektedir. Ayrıca çimento oranında meydana gelen artışla birlikte özellikle yüksek GEAAAL içeriğiyle oluşturulan jeopolimer harç içeriği malzeme matrisi bütünlüğünde beklenen ölçüde bir iyileştirme oluşturmamaktadır (Şekil 4.5). Genel olarak çalışmaya bakıldığında, en yüksek eğilme dayanımı değerleri her yaşta yapılan deneylerde %100 çimento pastasından oluşan M1 karışımı sahip olmuştur. Bu karışımın eğilme dayanımı değerleri 28. günde 7,19 MPa; 180. günde ise 7,23 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç ile çimento matrisinin yapısal dayanıma ait performansta kritik içerik olarak yer aldığını göstermektedir. Diğer taraftan, GEAAAL içeriği oranı ve uçucu külden oluşan jeopolimer harç matrisinde kullanımı, çevresel ve ekonomik açıdan önemli derecede avantaj sağlasa da mekanik performansla olan belirgin negatif etkileri de yanında getirdiği gözlemlenmektedir (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Uçucu kül ile üretilen jeopolimer harç numunelerin eğilme dayanım testi sonuçları

3-gün sonra yapılan deneysel çalışmaların sonuçlarında malzemeler jeopolimerizasyonun ve hidrasyonun erken aşamalarında olup hem basınç hem de eğilme mukavemetleri en düşük seviyededir (Şekil 4.2.- 4.5). Diğer taraftan, yüksek çimento içeriği sayesinde bazı karışımlar (M1 gibi) cüruf veya uçucu kül bazlı jeopolimer karışımlara göre önemli ölçüde daha yüksek mukavemet gösterdiği görülmektedir. M1 için elde edilen dayanımlar, basınç dayanımında 28,7 MPa ve eğilmede dayanımında ise 2,83 MPa değerlerdir. Arasında oransal olarak yaklaşık %9,9'luk bir eğilme/basınç oranı hesaplanmaktadır. Buna karşılık, M11 (1/2 GEAAL, %100 cüruf) için basınç dayanımı 2,52 MPa ve eğilme dayanımı ise 0,32 MPa olmakla birlikte eğilme/basınç oranı yaklaşık %12,7) değerlerindedir (Şekil 4.2.- 4.5). Sonuç olarak her iki değerde matematiksel olarak düşük olmakla birlikte, eğilme-basınç mukavemetinin oranı, zayıf matris gelişiminde olan karışımlar için özellikle yüksek GEAAL oranlarına sahip karışımlar için nispeten yüksektir. Bu yaş içindeki oluşan bu durum daha iyi eğilme performansı nedeniyle değil, mekanik performanstaki genel olarak zayıf davranış olması nedeniyledir. Bu aşamada, erken basınç mukavemetinin ilk matris sertliği tarafından belirlendiğinin ve eğilme mukavemetinin ise malzemenin

homojenliğindeki değişimin mikro çatlak direnci tarafından büyük ölçüde etkilendiğinin vurgulamasından kaynaklıdır.

7-gün yaşında yapılan deneylerde tüm karışımlarda mukavemet artışları gözlemlenmiştir. Ancak bakıldığında artış oranı büyük ölçüde karışım içeriklerindeki bağlayıcı bileşimine bağlıdır. Karışım grupları irdelenirse, M3 (1/3 GEAAL, %100 çimento) 6,78 MPa dan 12,75 MPa basınç dayanımına ve 0,71 MPa eğilme dayanımından 1,24 MPa eğilme dayanımına ulaşır. M6 (1/4 GEAAL, %95 cüruf + %5 çimento) ise basınç dayanımında 11,5 MPa dan 17,5 MPa'ya ve eğilme dayanımında ise 1.8 MPa'ya yükselir. M15 (1/4 GEAAL, %95 uçucu kül + %5 çimento) 11,09 MPa dan 16,89 MPa basınç dayanımına ve 1,11 MPa eğilme dayanımından 1,72 MPa eğilme dayanımına ulaşır. Bu durum eğilme mukavemetinin çoğu karışımda basınç mukavemetinin yaklaşık %10-13'ü kadar dayanım gösterdiğini işaret etmektedir. Diğer taraftan, her iki özelliğin de devam eden kimyasal reaksiyonlarla iyileşirken, eğilme mukavemetinin potansiyel olarak GEAAL içeriğindeki kapanımlar ve olgunlaşmamış olan arayüzey bölgelerinin etrafındaki gerilim yoğunlaşmalarından kaynaklı daha sınırlı kaldığını göstermektedir.

Deney verilerine bakıldığında, tüm jeopolimer karışımlarının içerikleri ve kürlenme süreleri için basınç dayanımı ile eğilme dayanımındaki ilişkinin genel olarak pozitif bir korelasyon değerinde olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak, bu ilişkinin tam olarak doğrusallığının irdelenmesi yeterli doğrulukta değildir. Ayrıca, eğilme mukavemeti ise basınç mukavemetine göre daha yavaş bir oranda artmaktadır. Bu davranış ise hem çimento esaslı malzemeler ve hem de jeopolimer malzemelerin gün bazlı gelişiminde karakteristik özelliğidir. Basınç mukavemetinde değişim esas olarak matriste oluşan yoğunluğu ve jeopolimerizasyon derecesini yansıtmaktadır. Eğilme mukavemetinde ise durum matris-agrega arayüzünün yapısındaki bütünlüğüne ve olası kusurların varlığı veya boşlukların gelişimine daha duyarlıdır.

Bu çalışmada kapsamında üretilen karışımlardan M1 (100% çimento) ve M6 (1/4 GEAAL, 95% cüruf, 5% çimento) gibi daha yüksek basınç dayanımı ile öne çıkan karışımlar da içerik olarak nispeten daha yüksek eğilme dayanımına sahiptir. M6 karışımı için 28 gün sonra 24,2 MPa basınç dayanımının elde edilmesi ve 3,15 MPa eğilme dayanımı elde edildiği görülmüştür. Diğer taraftan M1 için yine bu değerler sırasıyla 48,51 MPa ve 7,19

MPa elde edilmiştir. Bu eğilim, jeopolimer matrisin daha kompakt ve daha iyi bağlandıkça, sadece basınç altında daha yüksek yükleri desteklemekle kalmayıp, aynı zamanda eğilme altında çekme dayanımını da artırdığını göstermektedir.

28-gün için elde edilen deneysel sonuçlarda çoğu karışımın mekanik performans değerlerinde önemli kazanımların hesaplandığı bir değişimin elde edilmiştir. M1 karışımında 7-gün de 37,05 MPa basınç dayanımından 48,51 MPa dayanıma, 4,13 MPa dan 7,19 MPa eğilme dayanımına ulaşılmıştır. Bu karışım için 28-gün yaşında eğilme ve basınç dayanımı arasındaki oran %14,8 olarak hesaplanmıştır. M4 karışımında 7-gün de 3,9 MPa basınç dayanımından 15,68 MPa dayanıma, 0,4 MPa dan 1,44 MPa eğilme dayanımına ulaşılmıştır. Bu karışım için 28-gün yaşında eğilme ve basınç dayanımı arasındaki oran %9,2 olarak hesaplanmıştır. M15 karışımında 7-gün de 16,89 MPa basınç dayanımından 23,1 MPa dayanıma, 1,11 MPa dan 1,72 MPa eğilme dayanımına ulaşılmıştır. Bu karışım için 28-gün yaşında eğilme ve basınç dayanımı arasındaki oran %13 olarak hesaplanmıştır. Bu yaşta yapılan deneylerde, daha net bir model ortaya çıkmaktadır: orta düzeyde plastik içeriğine (≤ 25) ve harmanlanmış bağlayıcılara sahip karışımlar için basınç dayanımına göre daha iyi eğilme davranışı izlenmektedir. Daha yoğun mikro yapı ve puzolanik reaksiyonlardan (cüruf/uçucu kül + çimento) kaynaklanan daha iyi bağlanma, mikro çatlakların köprülenmesine yardımcı olarak eğilme gerilmelerine karşı direnci ürettiği söylenebilir.

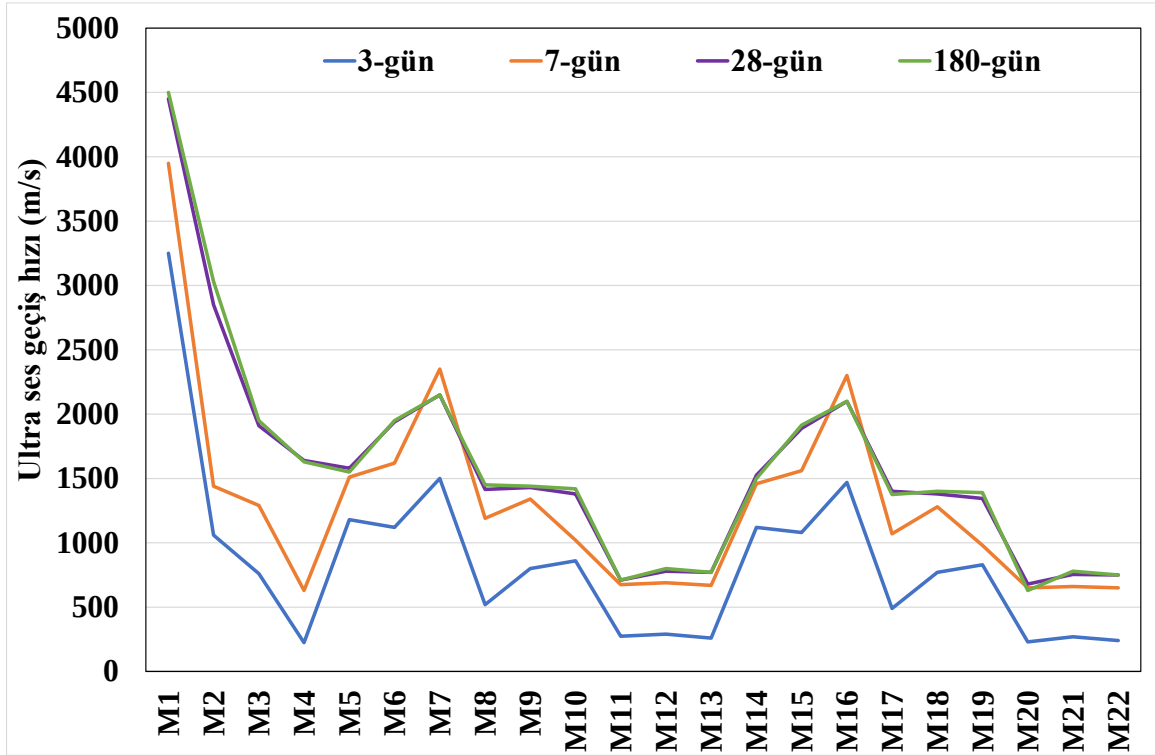
180-güne gelindiğinde, özellikle çimento içeriği bakımından zengin karışımlardan oluşan matrislerden kaynaklı basınç dayanımında ciddi değişimlerin olmadığı bir eğilimi gösterirken, eğilme dayanımında meydana gelen düşük orandaki artışlar görülmektedir. Bu da zaman içinde süneklik veya çatlak sonrası davranışta sınırlı iyileşmeler olduğunu göstermektedir. M7 (1/4 plastik, %90 cüruf + %10 çimento) karışımında basınç dayanımı değeri 28-gün için 26,4 MPa iken 28 MPa değerine, eğilme dayanımı ise 2,75'den 2,5 MPa değerine düşmüştür. Eğilme ve basınç dayanımı arasındaki oran %8,9 olarak hesaplanmıştır. M16 (1/4 plastik, %90 uçucu kül + %10 çimento) karışımında basınç dayanımı değeri 28-gün için 25,31 MPa iken 27 MPa değerine, eğilme dayanımı ise 2,64'den 2,43 MPa değerine düşmüştür. Eğilme ve basınç dayanımı arasındaki oran %9 olarak hesaplanmıştır. M20 (1/4 plastik, %90 uçucu kül + %10 çimento) karışımında basınç dayanımı değeri 28-gün için 4,23 MPa iken 4,36 MPa değerine, eğilme dayanımı ise

0,47'den 0,45 MPa değerine düşmüştür. Eğilme ve basınç dayanımı arasındaki oran %10 olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak değerler, eğilme-basınç dayanımı oranı için %8-14 aralığında kalmaktadır. Sonuç olarak daha yüksek plastik içerikli veya saf cüruf/uçucu kül bağlayıcılı karışımların uzun sürelerde bile sünek sistemlere dönüşemediğini göstermektedir. Bu durum, yetersiz enerji emme kapasitesi, zayıf çatlak köprüleme mekanizmaları ve zayıf GEAL-bağlayıcı arayüzleri nedeniyle gerilme veya eğilmede başarısız olan çoğu jeopolimer matrisin kırılğan yapısının altını çizmektedir.

4.4. Jeopolimer Harç Numunelerin Ultra Ses Geçiş Testi Sonuçları

Jeopolimer harç yapısal olarak diğer harç türevleri ve harçlarda da iç yapı bütünlüğünün ve yoğunluğun olabildiğince yüksek olarak değerlendirilmesi büyük önem arz etmektedir. Bu değerlendirme için ultra ses geçiş hızı (UPV) önemli bir tahribatsız test şekli yöntemidir. UPV, deneysel işlem esnasında malzeme içerisinden cihaz yardımı ile gönderilen elastik dalgaların geçiş anı hızını ölçerek, ölçülen eleman içerisindeki homojenlik, boşluk oranı ve bağlayıcı içeriğinde gerçekleşen reaksiyonlarının etkinliğine dair bilgi verir. Genellikle, yüksek UPV değerleri elde edilen elemanlarda iç yapıda yoğun ve sürekliliği olabildiğince iyi derecede sağlanmış iç yapının bir göstergesi olarak kabul edilir.

Bu çalışma kapsamında incelenen jeopolimer harçların, farklı bağlayıcı türleri ile (uçucu kül ve cüruf) değişen çimento katkı oranları ve kullanılan GEAL içeriğinin dikkate alınarak UPV sonuçları karşılıklı olarak değerlendirilmiştir (Şekil 4.6). Özellikle uçucu kül kullanılarak üretilen jeopolimer esaslı harçlara yapılan düşük oranlı çimento katkısı (%5–10), UPV performans değerini yani iç yapısal bütünlüğü belirgin ölçüde artırdığı görülmektedir (Şekil 4.6). Bu durum M14 karışımı (1/4 GEAL, %100 uçucu kül) için 28 gün yaşında numunelere yapılan UPV deneyinden elde edilen 1525 m/s değeri, %5 çimento katkılı M15 karışımı için ise 1890 m/s değerine ve %10 çimento katkılı olarak üretilen M16 karışımı için ise 2100 m/s değerine yükselmiştir. Sonuçlar çimentonun puzolanik bağlayıcıların arasındaki reaksiyonları hızlandırarak ve geliştirerek daha kompakt şekilde oluşmasına ve sonuç olarak geçirimsiz bir matris oluşumunu sağladığını işaret etmektedir (Şekil 4.6). Diğer taraftan jeopolimerler harçların içerisindeki GEAL oranında meydana gelen artış nedeni ile UPV üzerinde olumsuz etkilerin olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.6).



Şekil 4.6. Üretilen jeopolimer harç numunelerin eğilme dayanım testi sonuçları

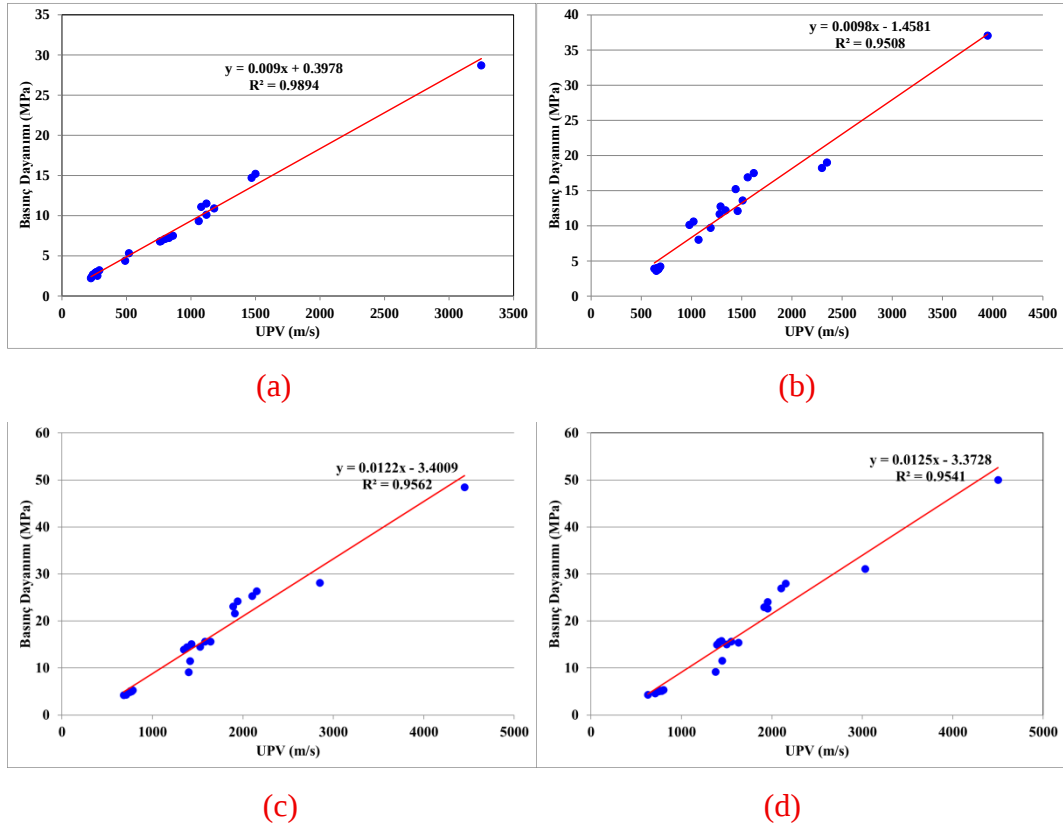
Matris içerisinde artan GEAAL içerik oranı ile birlikte jeopolimer harç matrisinin iç yapısında süreksizlik oluşturabildiği ve UPV cihazından gönderilen elastik dalga iletiminin engellenmesi sonucunda UPV değerlerinin düştüğünü göstermektedir. İçeriğinde 1/2 GEAAL oranına sahip olan M20, M21 ve M22 karışımlarının 28. günde sırasıyla 680 m/s, 755 m/s ve 750 m/s gibi düşük değerlerde UPV verileri elde edilmiştir. İlgili hipotezi desteklemektedir. Dahası bu karışımların içerik olarak daha gözenekli bir halde olduğu ve ayrıca homojenlik bakımından yetersiz ve düşük yoğunluğa sahip bir iç yapıda olduğunu göstermektedir.

Genel olarak 2000 m/s sınırı, yapı malzemelerinin tahribatsız yöntemlerle kalite kontrolü açısından önemli bir sınır değer olarak genel kabul edilmektedir. Bu eşik değerinin altında değerler ölçülen jeopolimer harç içerikleri yapısal uygulamalar esnasında sınırlı bir performans sergileyeceği düşünülmektedir. İlgili karışımlarda yapılan değerlendirmelerde M15 ve M16 gibi düşük GEAAL içeriği ile çimento katkısı yapılan bu karışımlar söz konusu sınır değerin üzerine çıkabilmiştir.

Jeopolimer tabanlı malzemelerde mekanik olarak gösterecekleri dayanımın belirlenmesi, sürdürülebilirlik açısından yapı malzemelerinin performans değerlendirmesinde kritik bir aşamadır. Geleneksel basınç dayanımı testlerinde üretilen elemanlarda tahribatlı yöntemler sonucunda elemanlarda hasar gerektirirken, tahribatsız olan ultrasonik darbe hızı (UPV) yöntemi elemanda hasarsız bir yaklaşım sunmaktadır. UPV sonuçları yorumlanırken, malzemenin yoğunluğu ve boşluk oranı ile doğrudan ilişkili halde sonuçlar olup, bu parametreler sayesinde mikro yapı hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır. Çalışmada, 3, 7, 28 ve 180. günlerde deneyleri yapılan 22 farklı içeriğe sahip karışım, tasarımı sonrası üretilen elemanlar üzerinde basınç dayanımı ve UPV ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlardan elde edilen veriler, karışım içeriğindeki değişim ve GEAAAL oranındaki değişim sonucunda hem basınç dayanımı hem de UPV için belirleyici etkilerinin olduğunu göstermiştir. Çimento bazlı karışımlar en yüksek basınç dayanımı (28–50 MPa) ve UPV (3250–4500 m/s) değerlerini elde etmiştir. Ancak GEAAAL oranına ait değerler arttıkça her iki parametrede gerçekleşen önemli düşüşler dikkat çekmektedir. Özellikle GEAAAL oranı 1/2'ye çıkarıldığında basınç dayanımı ve UPV değerleri önemli ölçüde azalmıştır. Cüruf ve uçucu kül içeren karışımlar saf çimentoya kıyasla daha düşük dayanım sergilemiştir; ancak %5–10 çimento ilavesi mekanik özelliklerde belirgin iyileşmeler sağlamıştır.

Jeopolimer tabanlı karışımlarda basınç dayanımı ile UPV arasındaki ilişki, kür süresi ve bağlayıcı içeriği gibi değişen faktörlere bağlı olarak bu çalışma kapsamında değerlendirilmiştir. Bu çalışmada, 3, 7, 28 ve 180 günlük kürlerde ölçülen basınç dayanımı ve UPV değerleri arasında güçlü doğrusal ilişkiler bulunmuştur. Hesaplanan regresyon analizleri ve elde edilen verilerin sunulduğu grafikler Şekil 4.7.'de sunulmaktadır.

Regresyon katsayılarının kür süresi artsa da 0,95'den büyük olduğu ve yeterli seviye yer aldığı görülmektedir. UPV değerlerinin 3 günlük kürde 225–3250 m/s arasında değişirken, 180. Günde yapılan deneylerde 4500 m/s seviyesine ulaşmıştır. Bu artış, boşluk oranının azalması ve malzemenin homojenliğinin artmasıyla doğrudan ilişkilidir. Diğer bir deyişle, ilerleyen yaşlarda depolimerizasyon reaksiyonlarının daha tamamlanmış olması ve bağlayıcı matrisin yoğunlaşması ile açıklanabilir.



Şekil 4.7. Jeopolimer harç numunelerin basınç dayanımı ve UPV ilişkisi a) 3-gün, b)7-gün, c)28-gün ve d)180-gün

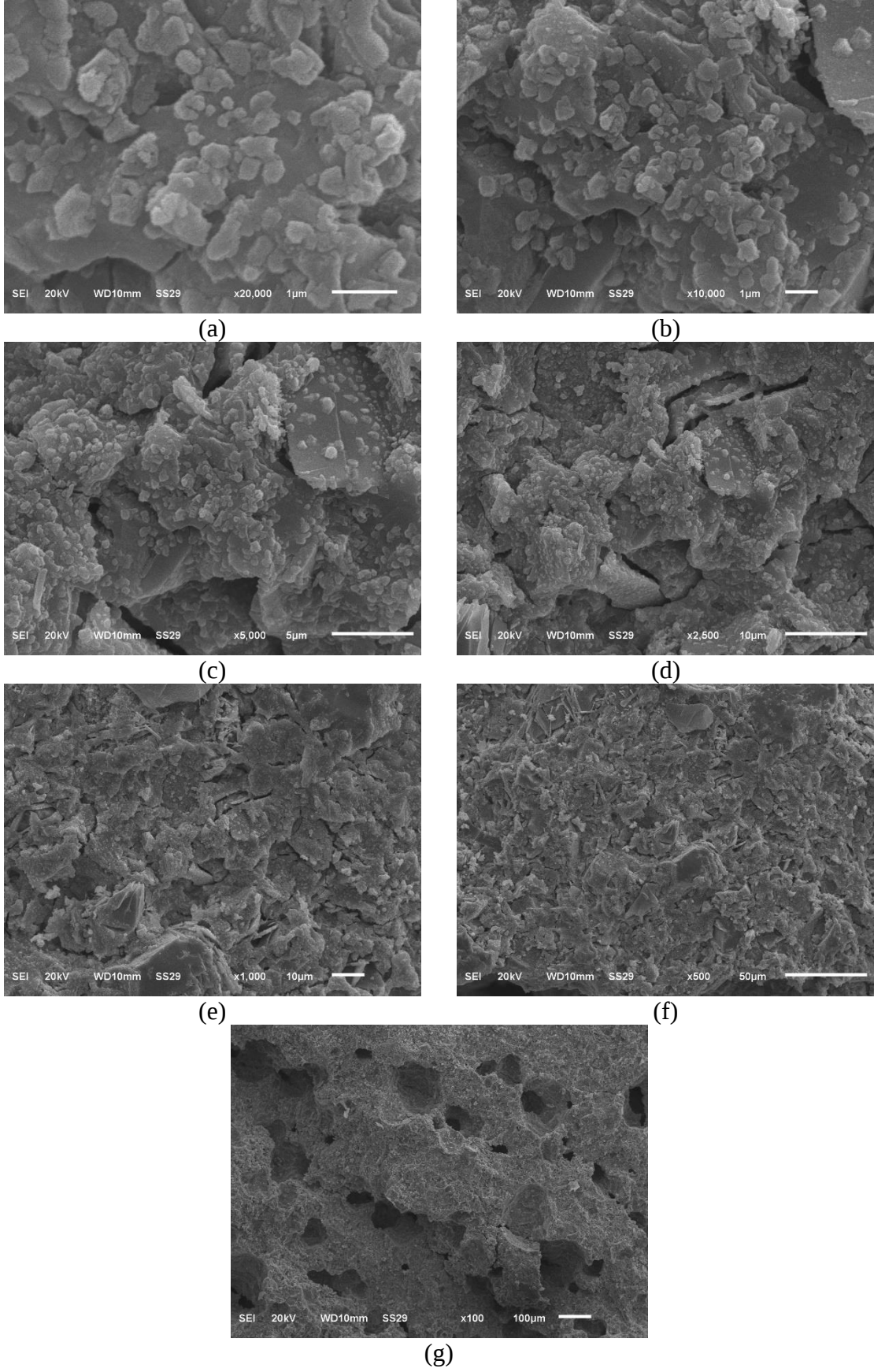
Karışım içeriği açısından değerlendirildiğinde ise, çimento içeriği yüksek olan karışımlar (M1, M2 ve M3) en yüksek UPV ve basınç dayanımı değerlerine sahiptir. %100 çimento içeren M1 karışımında 28 günlük basınç dayanımı 48,51 MPa ve UPV 4450 m/s iken, %100 uçucu kül içeren M17 karışımında aynı yaşta basınç dayanımı 9,16 MPa, UPV ise 1400 m/s civarında kalmıştır. Cüruf ve uçucu kül esaslı karışımlarda ise düşük erken yaş performansı göstermelerine rağmen, zamanla artan değerler sergilemiştir. Özellikle çimento katkısı (%5 veya %10) içeren karışımlarda hem UPV hem de basınç dayanımı belirgin şekilde yükselmiştir. Elde edilen yüksek korelasyon katsayıları ($R^2 > 0,95$), UPV'nin basınç dayanımı tahmininde güvenilir bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır.

4.5. Jeopolimer Harç Numunelerin SEM incelemeleri

Bu tez kapsamında incelenen bu bölümde, jeopolimer numunelerden elde edilen SEM görüntüleri ile mikroyapısal özellikleri incelenmiştir. SEM analizi esnasında numune yüzeyinde oluşan jel fazına ait durumlar, gözenek yapısının belirgin değişimi, reaksiyona girmemiş haldeki partiküllerin varlığı ve mikroyapısal içerikteki homojenlik hakkında bilgi verilebilmektedir. Elde edilen SEM görüntüleri aşağıda değerlendirilmiştir.

Cüruf ile üretilen karışımların SEM görüntülerinde:

- Şekil 4.8.a. da incelenen görüntüde erken yaşa ait numuneden alınan matris içerisinde düzensiz partiküller ve olası çözünmemiş ham maddelerden oluşan taneler gözlenmektedir. Jeopolimer jel fazının tam olarak oluşmama hali gözlemlenmektedir. Dolayısıyla reaksiyon derecesinin muhtemelen düşük olduğu anlaşılmaktadır.
- Şekil 4.8.b. de ise çimento içeriği ve 28 gün yaş için incelenen matrisin içerik olarak daha yoğun olduğu ve jel fazının dahada belirginleştiği bir iç yapı görülmektedir. Bununla birlikte, içerisinde çözünmemiş bazı parçacıkların varlığının da olması heterojen bir yapının oluşmasına neden olmakla birlikte çimento ikamesi ve ilerleyen yaşla alakalı bir görüntü çizmektedir.
- Şekil 4.8.c. de izlenen görüntüde ise cüruf içeriği yüksek olan karışımdan alınan örneğe ilişkin gözlemlenen belirgin çatlaklar ve oluşan düzensiz boşlukların varlığı olası aşırı NaOH veya Na_2SiO_3 kullanımı ile meydana gelen hızlı reaksiyon ve lokal jel oluşumuna nedeni ile oluşan heterojen yapıdan kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir.
- Şekil 4.8.d. de izlenen görüntüde ise daha düşük konsantrasyonda cüruf içeriğine sahip bir görüntü yer alıyor bu görüntüde daha kompakt bir yapı olması ve izlenen net jel fazı sayesinde gözenek oranı düşük olup, yapının mekanik dayanımı açısından avantaj sağlamayabileceği yorumu yapılabilmektedir.
- Şekil 4.8.e. de izlenen görüntüde ise yine yüksek konsantrasyonda cüruf içeriği nedeni ile görüntüde yüksek miktarda çözünmemiş halde yer alan partikül bulunmaktadır. Bu durum ise alkali aktivasyonuna ait yetersiz bir durumun olasılığını varlığını göstermektedir.



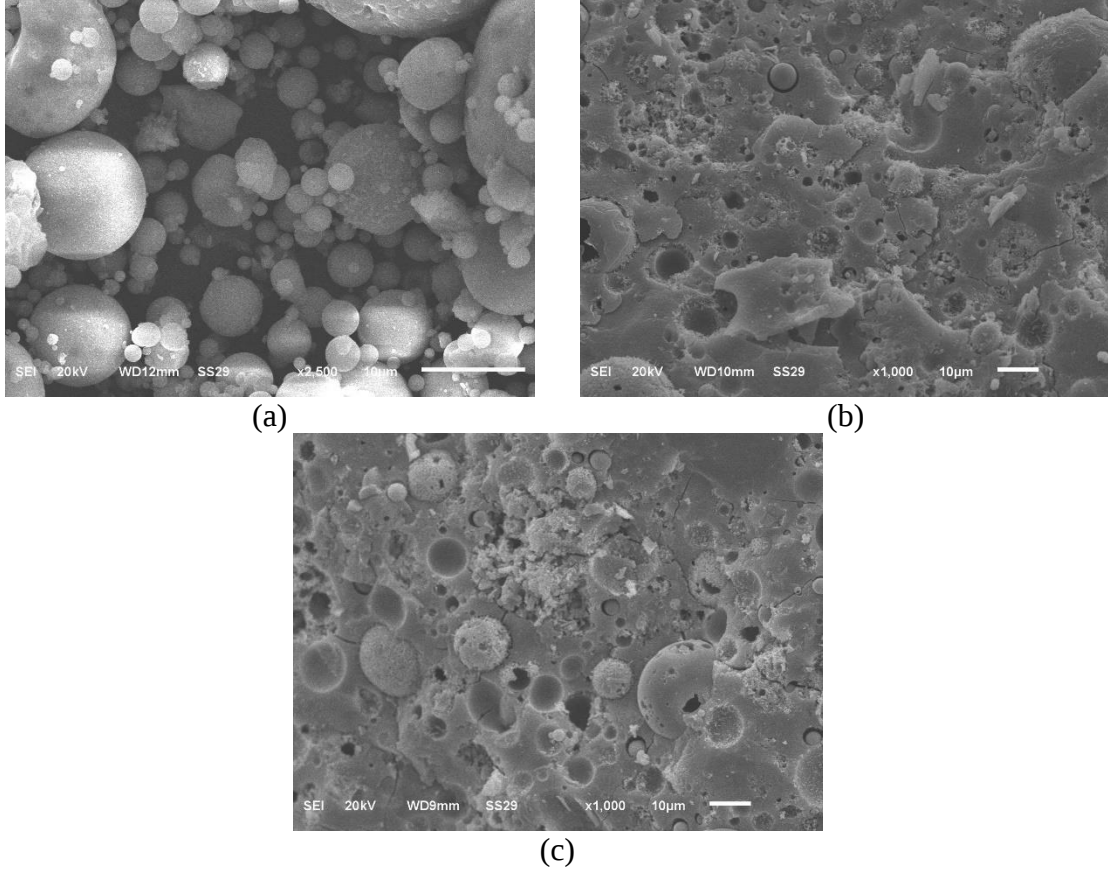
Şekil 4.8. Cüruf ile üretilen jeopolimer harç numunelerinden alınan SEM görüntüleri

- Şekil 4.8.f. de izlenen görüntüde cüruf içeriğinin olduğu elemandan alınan örnekte, homojen ve yoğun bir iç yapının varlığı belirgin durumdadır. Gözenek oranına ilişkin genel durum ise boşluk yapısının minimum düzeyde olduğunu göstermektedir ve jel oluşumu ileri seviyededir. Bu iç yapısal durum olası yüksek basınç dayanımı ile ilişkilendirilebilir.
- Şekil 4.8.g. de izlenen son görüntüde, bazı keskin kenarlı kristalin fazlar ve çatlaklar mevcuttur. Bu durum cüruf içeriği kaynaklı yüksek alkalite sebebiyle oluşan iç gerilmelerle açıklanabilir.

Uçucu kül ile üretilen karışımların SEM görüntülerinde:

- Şekil 4.9.a. da incelenen görüntüde uçucu küle ait SEM görüntüsü verilmiştir. Görüntüde bulunan farklı çaplarda birçok küresel partikülün varlığı belirgin haldedir. Bu partiküllerde tipik olarak uçucu küle ait amorf ve cam fazından oluşan ağırlıklı yapı belirgindir. Düzgün, küresel ve yoğun yüzey yapılarının varlığı ile uçucu külün alkali aktivatörlerle yapılan karışımlarda yüksek reaktiviteye sahip olmasının temel nedeni olarak sayılmaktadır. Geniş partikül boyutunun varlığının dağılımından kaynaklı olarak malzemenin daha sıkı bir paketlenme kapasitesine sahip olduğunun düşüncesiyle mekanik performansa katkının olumlu etkisi kaçınılmaz olarak sağlamaktadır.
- Şekil 4.9.b. de incelenen görüntüde uçucu kül kullanılarak sentezlenmesi sağlanan jeopolimer örneğine ait SEM görüntüsü verilmiştir. Bu yapıdan yola çıkılırsa jeopolimerleşme sürecinde reaktivite sonucunda amorf, gözenekli ve düzensiz bir morfolojinin oluştuğu gözlemlenmiştir. Jeopolimer matrisin içerisinde, kısmen çözünmüş halde ve tam olarak jeopolimerize reaksiyona girmemiş halde olan uçucu kül partiküllerine rastlanmaktadır. Bu durumda reaksiyonun homojenliğinin tam olarak sağlanamadığının ve bazı bölgelerde oluşan düşük aktivasyonun gerçekleştiğinin göstergesi olarak belirgin haldedir. Saf uçucu kül ile alınan SEM görüntüsü ile karşılaştırıldığında, partiküllerin görüntüdeki belirginliğinin büyük ölçüde azalmış durumu ve bağlayıcı faz içerisinde gömülü ya da çözünmüş halde olarak matris yapısı içerisinde bütünleşmiş olduğu görülmektedir. %5 çimento katkısı ile üretilen jeopolimer ile kıyaslandığında ise bu örnekteki matrisin durumu daha gözenekli ve düzensiz bir haldedir. Bu farklılıktan yola çıkarak çimento

katkısından kaynaklanan mikroyapısal sıklığın ve homojenliğin artırıcı etkisinin görüldüğü söylenebilir.



Şekil 4.9. Uçucu kül ile üretilen jeopolimer harç numunelerinden alınan SEM görüntüleri

- Şekil 4.9.c. de incelenen görüntüde %5 oranında çimento ilavesi yapılarak üretilen jeopolimer matrisli numuneye ait SEM görüntüsü sunulmuştur. Görüntüde, jeopolimer matriste daha kompakt, homojen ve düşük gözeneklilikte bir yapının oluşmuş olduğu gözlemlenmektedir. Çimento ilavesi ile birlikte meydana C-A-S-H (kalsiyum-alüminyum-silikat-hidrat) benzeri yapıdaki hidrat jellerin oluştuğuna dair reaksiyonların meydana geldiği düşünülmektedir. Bu yapılar, jeopolimer matriste bağlayıcı faz yoğunluğunu artırmakta, mikro yapısal bütünlüğün iyileşmesini sağlamakta ve sonuçta mekanik dayanımı artırıcı bir etki üretmektedir. Ayrıca, yüzeyde meydana gelen çökelmiş ince parçacıklardan oluşan görüntüler sayesinde ve hidrat fazlarının matris içinde yaygın şekilde dağıldığı görülmektedir. Sadece uçucu kül kullanılan jeopolimer ile üretilen SEM görüntüsü ile karşılaştırıldığında, çimentonun katkısı ile üretilen örnekte daha az gözenek, daha

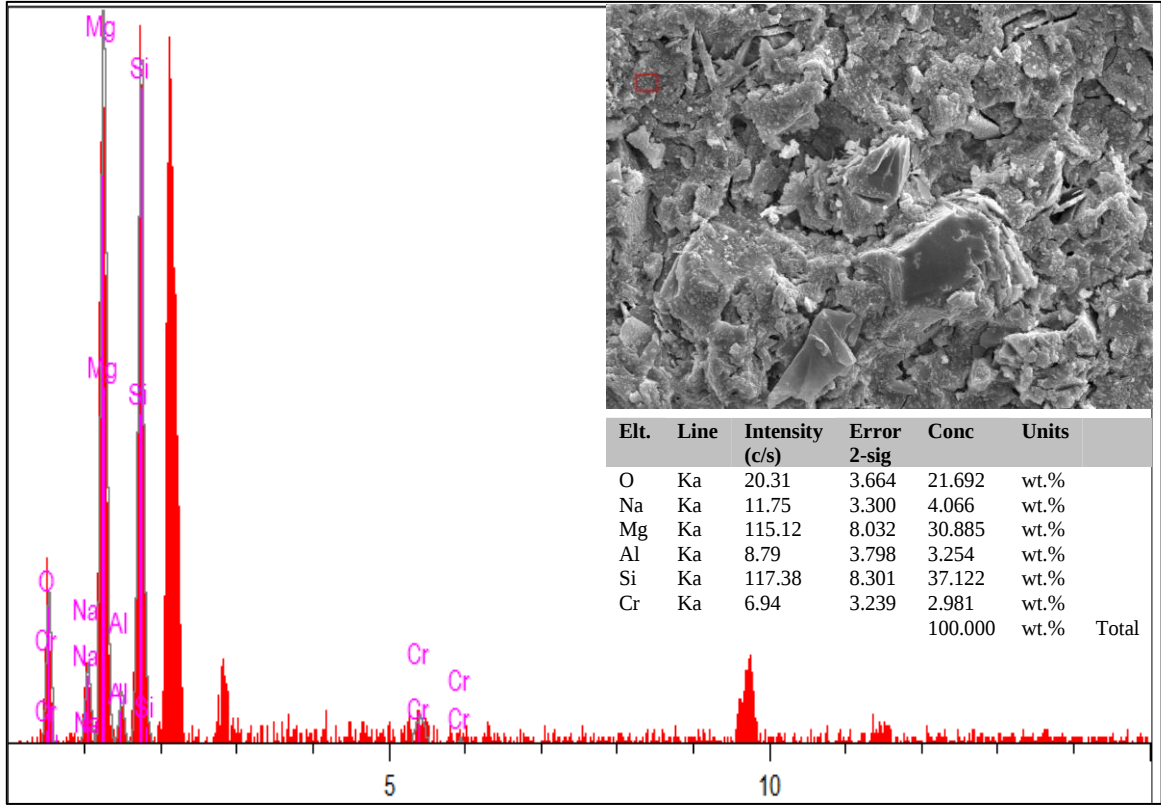
yoğun bağlayıcı faz ve daha homojen bir yapı elde edilmiştir. Bu durumdan çimento katkısı ile jeopolimerleşme reaksiyonlarının üzerindeki hızlandırıcı etkisi ve bağlayıcı fazın oluşumunu destekleyici etkisine ait kanıt olarak düşünülebilir.

4.6. Jeopolimer Harç Numunelerin EDX incelemeleri

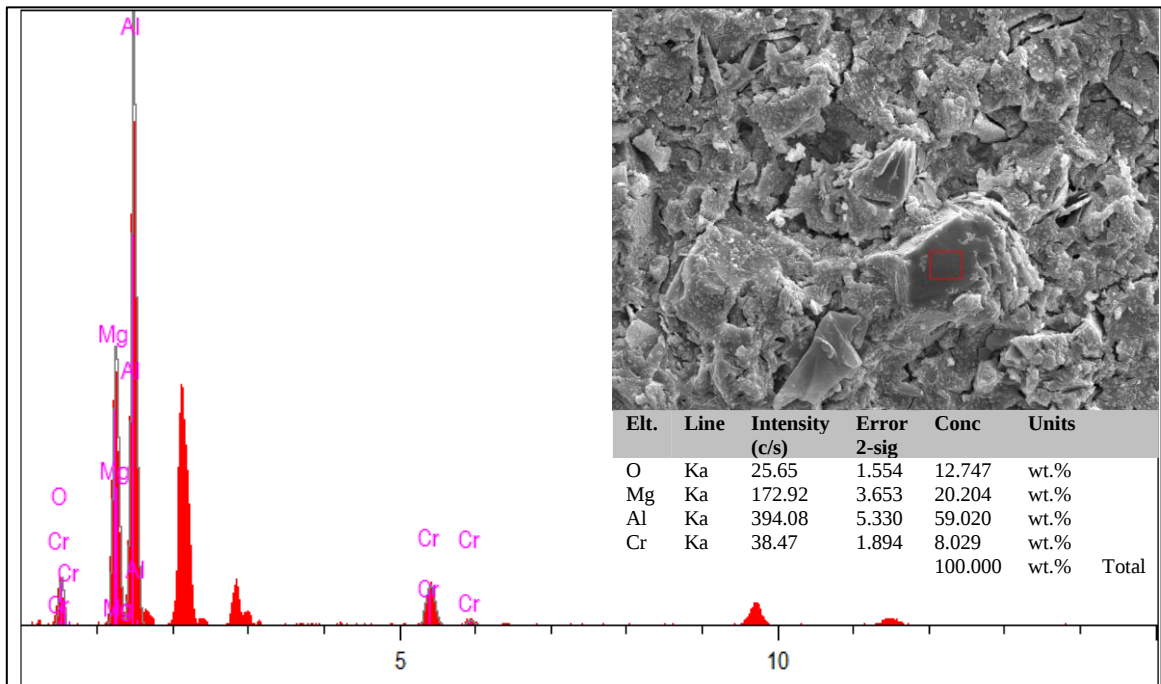
Çimento ikameli uçucu kül ve yüksek fırın cürufu bazlı jeopolimerlerin üretimine ilişkin üretilen bu tezde cüruf içerikli hibrit jeopolimerize harçtan alınan örnek EDX analizinde değerlendirilmiştir. EDX analizleri, jeopolimerize harç matrisi sistemindeki kimyasal heterojenliğin ve oluşan jel fazlarının ortaya çıkarılmasında kullanılmıştır.

Cüruf ile üretilen jeopolimerlerden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde;

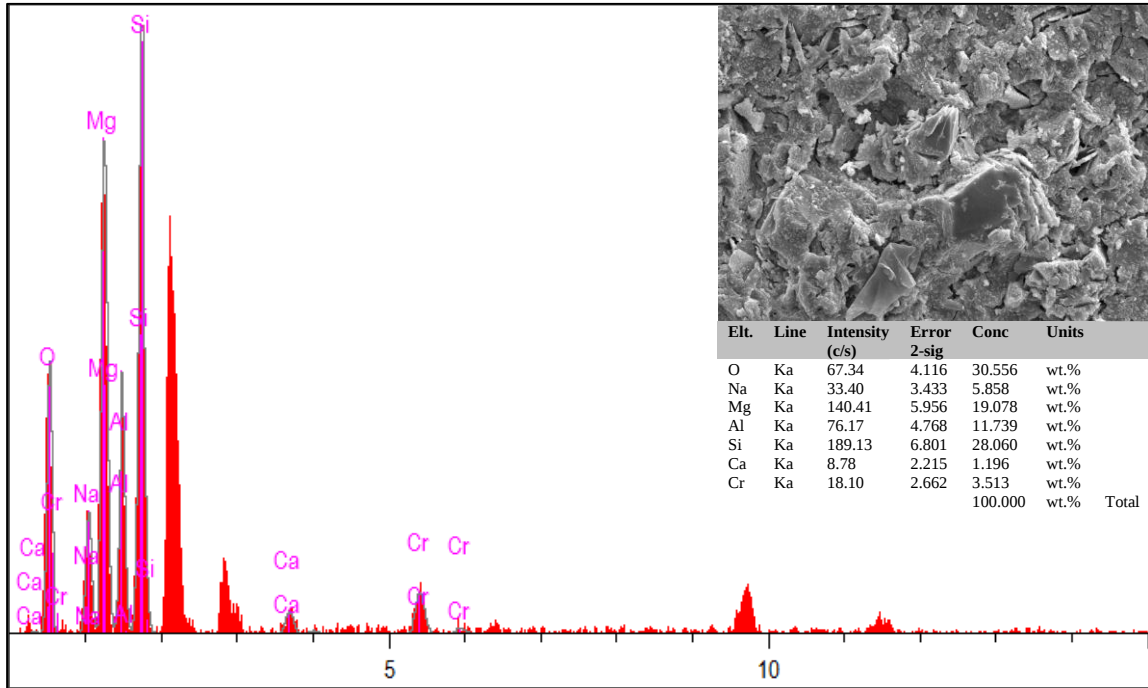
- Şekil 4.10. de EDX analizinde görüntü kesiti Mg ve Si açısından zengin bir alan yapısındadır. EDX analizinde verilen değerler Si (%37) ve Mg (%31) elementlerine ait sayısal oranlarının oldukça yüksek olmasından kaynaklı olarak yüksek fırın cürufu içerikli bu numunede jeopolimerizasyon sürecine ait yapıların oluşmasında baskın rol oynadığı söylenebilir. Diğer taraftan düşük Al içeriği oranı (%3) olması klasik N-A-S-H jeline göre sınırlı düzeydedir. Mg içeriğine ait zenginliğin bulunması M-A-S-H fazlarının oluşumunun varlığını işaret eder. Bu fazda cüruf ve dolomit gibi içeriğinde magnezyum kaynaklarını barındıran yapıların varlığıyla oluşur. Dolayısıyla, jeopolimerlerin kimyasal dayanıklılığının arttırılmasında baskın rol oynar.
- Şekil 4.11. de EDX analizinde görüntü kesiti Al zengin alanda, Al içeriği %59 ile Mg oranı %20 olarak tespit edilmiştir. Bu durum, jeopolimerizasyon sırasında reaksiyonda bulunmayan yani reaksiyona girmemiş ya da büyük olasılıkla yoğunlaşmış Al-hidroksit fazı ($Al(OH)_3$) varlığı ile ilişkilidir. Si tespitinin olmaması bu noktanın N-A-S-H jeli değil daha çok aluminaca zengin bir faz içeriği veya olası ham maddeden kalan kalıntı birikimi olduğunu gösterir.
- Şekil 4.12. de EDX analizinde görüntü kesiti içeriği tüm kesiti hedef almakla birlikte hibrit bir yapıyı yani Si (%28), Al (%11,7), Mg (%19) ve düşük oranda Ca (%1,2) tespit edildiğini göstermektedir. Bu elementel değerlerin tipik bir jeopolimer faza ait dağılımının olduğu aşıkardır.



Şekil 4.10. Cüruf ile üretilen jeopolimer harç numunelerinden alınan EDX görüntüsü 1. nokta



Şekil 4.11. Cüruf ile üretilen jeopolimer harç numunelerinden alınan EDX görüntüsü 2. nokta



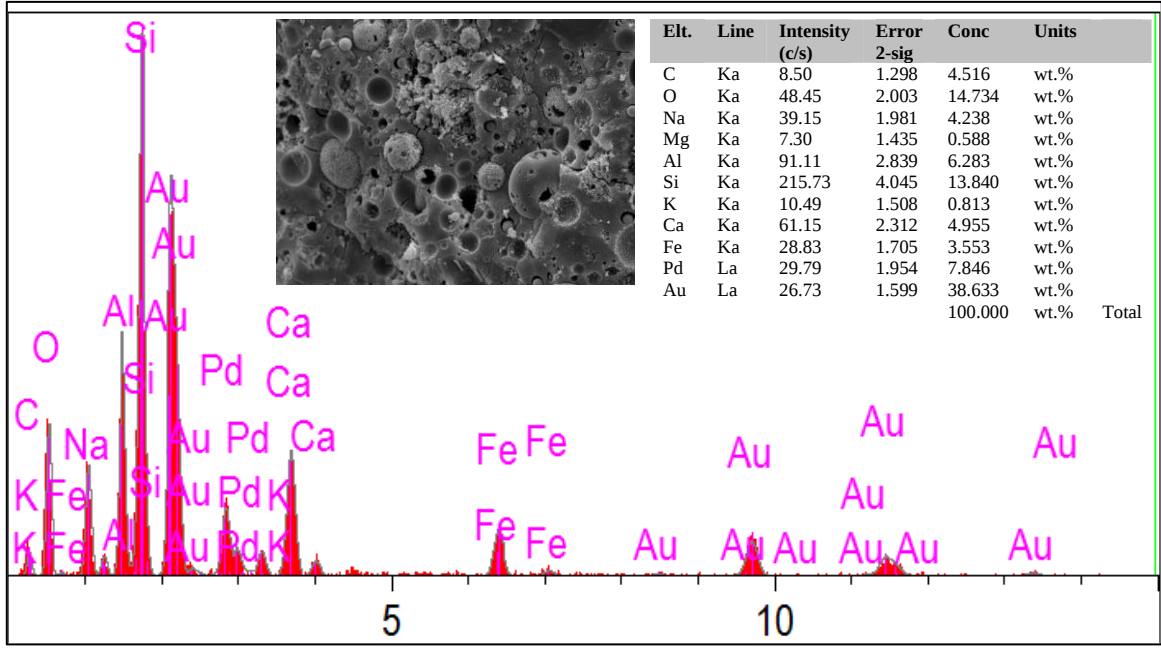
Şekil 4.12. Cüruf ile üretilen jeopolimer harç numunelerinden alınan EDX görüntüsü tüm yapı

Uçucu kül ile üretilen jeopolimerlerden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde;

- Şekil 4.13. de EDX analizinde görüntü kesitinde ana pikler, Si (Silisyum), Al (Alüminyum), Fe (Demir), K (Potasyum), Ca (Kalsiyum) gibi elementlerin pikleriyle ilişkilidir. Silisyum ve Alüminyum'a karşılık gelen grafik tepe noktalarının yoğunlukları oldukça yüksektir. Bu verilerde uçucu kül içinde yer alan bu elementlerin baskın olduğunu gösterir. Demir, Potasyum ve Kalsiyum için diğer tepe noktaları Si ve Al den daha az yoğunudur, bu durum bu elementlerin daha düşük değerlerde olsa da yine de önemli miktarlarda bulunduğunun göstergesidir. Si ve Al yüksek seviyelerde bulunması uçucu kül için tipiktir, çünkü bunlar genellikle bu malzemede önemli bir bileşen olan alüminosilikat minerallerine ait ana bileşenleridir. Bu EDX analizi uçucu külün silika ve alümina açısından zengin olduğu yönündeki yaygın kanıyı desteklemektedir.
- Şekil 4.14. de EDX analizinde görüntü kesitinde uçucu kül jeopolimer numunesi matrisinde de benzer şekilde Si, Al, K, Fe ve Ca elementleri için pikler yer bulunmaktadır. Ancak bu grafikte Si ve Al piklerine ait yoğunlukta bir artış gözlemlenmektedir. Uçucu kül jeopolimeri EDX analizinde Si ve Al elementlerinin tepe yoğunluk değerlerinin değişiminde önemli bir artış vardır. Bu artışa dair olarak

uçucu külde jeopolimerizasyon sürecinin bir sonucu olarak bu elementler ile daha yoğun bir ağ yapısının oluşumuna dair kimyasal süreçlerin varlığını göstermektedir. Ayrıca yapısal içerikte Ca elementinde artış miktarı, jeopolimerizasyon sırasında karışımda kullanılan alkali aktivatörlerin etkisinin bulunduğunu göstermektedir. Uçucu külün jeopolimerizasyonun Si ve Al içeriğinde meydana gelen yapısal değişikliklerle ortaya çıkması ve bu değişikliklerin malzemenin mekaniksel ve kimyasal özelliklerinin iyileştirebilir etkisi gözlemlenmiştir. Bu süreç sayesinde uçucu külün alüminosilikatın ağ yapısının güçlenmesine etkisi gözlemlenmiştir.

- Şekil 4.15. de EDX analizinde görüntü kesitinde %5 çimento ikameli uçucu küllü jeopolimer yer almaktadır. Si, Al, Fe, K, Ca elementlerinin yanı sıra, Rb (Rubidyum), Th (Torium) ve Fr (Fransiyum) gibi daha az yaygın elementlerin de pikleri de analiz sonuçlarında görülmektedir. Bu elementlerin varlığı matris yapılan çimento katkısının etkisini işaret etmektedir. Çimento ikamesi ile uçucu küllü jeopolimerin matrisine elementel olarak yeni elementler katmış ve özellikle Ca (Kalsiyum) yoğunluğunda artışa neden olmuştur. Ayrıca, Rb, Th ve Fr gibi elementlerin çimento katkısından kaynaklı olarak uçucu kül bileşimine dahil olduğu ve bu elementlerin de çimentodan kaynaklandığı düşünülmektedir. %5 çimento ikamesi sonucunda jeopolimerin kimyasal bileşiminin de değiştiği ve daha fazla Ca içeriği ile yeni elementlerin (Rb, Th, Fr) ortaya çıktığı görülmektedir. Bu durum, çimento bileşenlerinde jeopolimerin fiziksel ve kimyasal özelliklerine etkisi olabileceği anlaşılmaktadır.



Şekil 4.15. Uçucu kül ve çimento ile üretilen jeopolimer harç numunelerinden alınan EDX görüntüsü

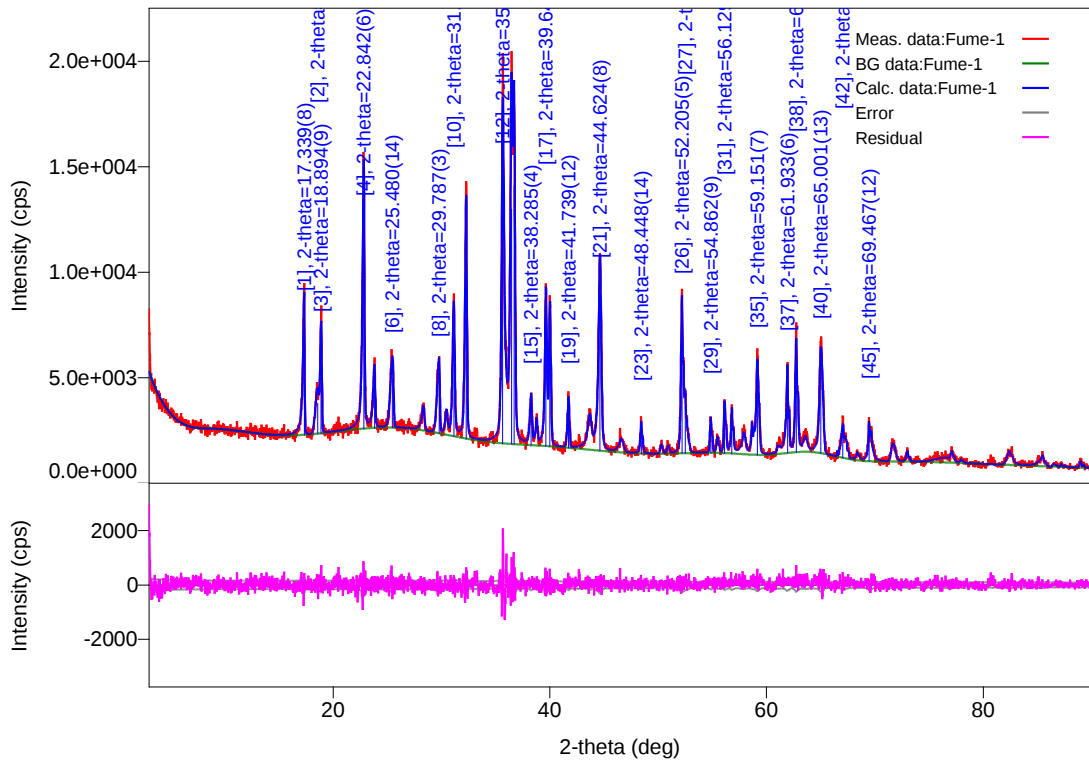
4.7. Jeopolimer Harç Numunelerin XRD incelemeleri

Yapılan tez kapsamında üretilen cüruf içerikli jeopolimerler harçlardan alınan örnekler ile XRD analizi yapılmıştır. Elde edilen XRD sonucu Şekil 4.11’de sunulmaktadır. Jeopolimerize üretimlerde cüruf katkısının varlığından kaynaklı olarak jeopolimer numunesinde amorf yapının yanı sıra belirgin halde bulunan kristalin fazların varlığı Şekil 4.11’de görülmektedir. Analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde numunenin ana yapısı jeopolimerizasyon ile oluşan amorf fazlardan N-A-S-H ve M-A-S-H jelleri yapılarından oluşmaktadır. Bu amorf fazların belirginliği 2θ açısı ile belirtilen 20° – 35° aralığında yer alan geniş bir kubbe halinde analiz sonuçlarında görülmektedir. Bu yapılar

- $22,8^{\circ}$ (Forsterit): Mg içeriğince zengin fazlar
- 31 – 36° aralığı (Forsterit + Spinel): Cürufdan kaynaklanan elementlerin Mg ve Al içeriğine sahip kristalin fazlar.
- $52,2^{\circ}$ (Forsterit): Ham madde kalıntısından kaynaklı ya da yeniden kristalizasyondan kaynaklı olarak oluşmaktadır.

Cüruf içerikli jeopolimere ait XRD analizi grafiği Şekil 4.16’da forsterit (Mg_2SiO_4) ve spinel fazlarının baskın olduğunu göstermektedir. Forsterit içeriği bilgisi XRD’de 2θ değerlerinin yaklaşık $21,5^{\circ}$, $29,0^{\circ}$ ve $43,2^{\circ}$ ’de görülen net pik değerleri ile belirgindir.

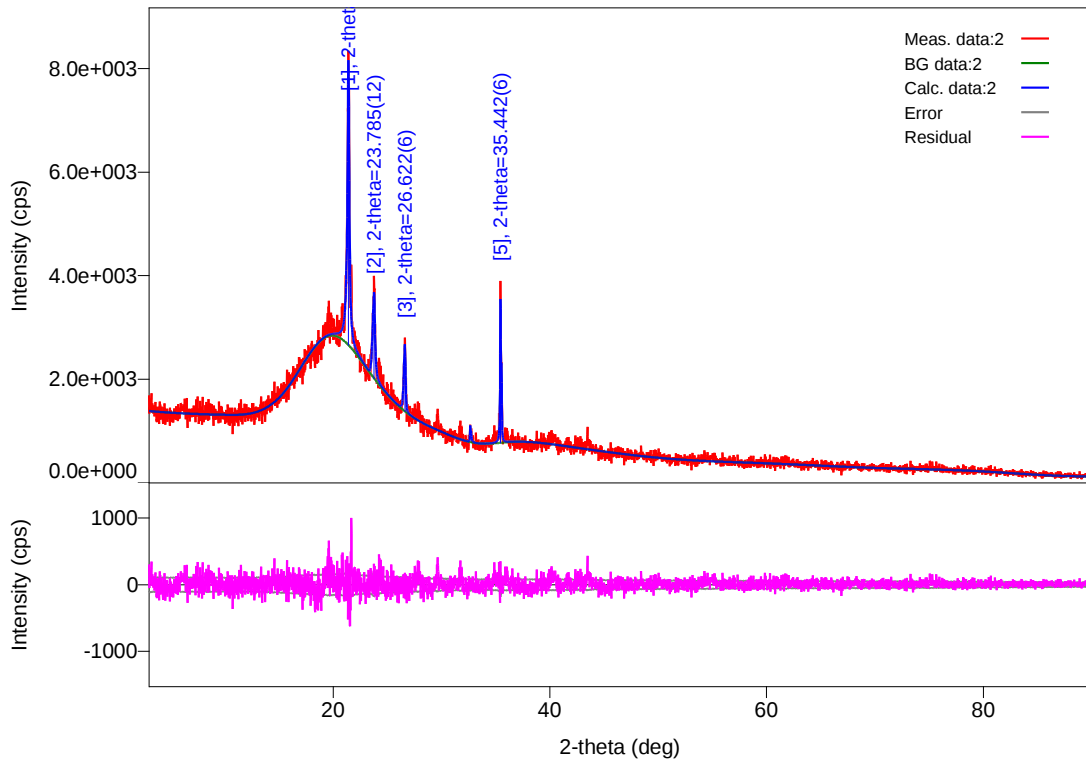
Spinel fazına ait $31,9^\circ$, $37,2^\circ$, $44,7^\circ$ ve $65,0^\circ$ 'deki pik değerleri belirginleşmektedir. Cüruf içerisinde yer alan özellikle magnezyum, alüminyum ve silisyum bazlı bileşikler nedeni ile bu minerallerin jeopolimer matrisinde önemli bir yer kapladığı gözlemlenmektedir. Bu jeopolimerin XRD spektrumuna ait grafiğin daha keskin ve belirgin zirveler sergileyerek daha yüksek kristallik düzeyine işaret etmektedir. Spinel ve forsterit fazlarının yüksek yoğunluklarından cüruf bazlı jeopolimerin daha kristalin bir yapıya sahip olduğu söylenebilir. Dolayısıyla fiziksel dayanımda daha yüksek olabileceği sonucuna işaret ettiği düşünülmektedir. Diğer taraftan XRD de yer alan entegre yoğunluk grafiği ile cüruf içerikli jeopolimerin çok daha belirgin kristalin fazlardan oluştuğu ve bu fazların daha düzenli bir şekilde dağıldığı söylenebilir (Şekil 4.16).



Şekil 4.16. Cüruf ile üretilen jeopolimer harç numunelerinden alınan XRD sonucu

Uçucu kül içerikli jeopolimerin XRD analizine ait grafikte kristobalit (SiO_2) ve grafit (C) gibi belirgin fazların varlığı grafikte işlemsel olarak ortaya koyulmaktadır. Kristobalit, genellikle 2θ değeri yaklaşık $20,6^\circ$, $26,7^\circ$, $35,0^\circ$ ve $50,6^\circ$ olan pik değerlerinde görünmektedir (Şekil 4.17). Bu piklerde uçucu külün sıcaklık etkisi ile içeriğinde reaksiyona girerek kristobalit fazını oluşturduğunu göstermektedir. Grafit fazı da belirgin

şekilde ilgili XRD grafiklerinde yer almaktadır. Bu fazın XRD'deki tepe noktalarının yaklaşık kırınım açıları $26,6^\circ$ ve $44,4^\circ$ 'de gözlemlenmektedir. Grafitin temelini uçucu kül matrisinde yer alan karbon tabakalarından oluştuğu düşünülmektedir. Bu tür yapılar da jeopolimerin belirli fiziksel özellikleri üzerinde etkin olabileceği düşünülmektedir. Bu jeopolimer örneğine ait kristal yapıları belirgin olmasına rağmen, gözlemlenen pik değerleri genellikle geniş ve daha düşük yoğunlukta olarak grafiğe yansımıştır. Bu durum incelenen jeopolimer matris maddesi içerisinde amorf yapılarca oluşturulan dizilimlerin varlığını ve kristalin yapılaşmaların sınırlı düzeyde kalmış olduğunu işaret etmektedir. XRD grafiğinde yoğunluğun gösterimleri belirli fazların yoğunluğuyla birlikte kristalleşme derecesinin daha düşük seviyelerde olduğunu gösteren bir eğilim şeklinde ortaya çıkmıştır (Şekil 4.17). Diğer taraftan alt grafikte yer verilen entegre yoğunluk ise analiz edilen tüm 2θ aralığı boyunca sürekli bir artışın oluştuğunu göstermektedir, bu da fazların dağılımının geniş bir yayılıma sahip olduğunu işaret etmektedir.

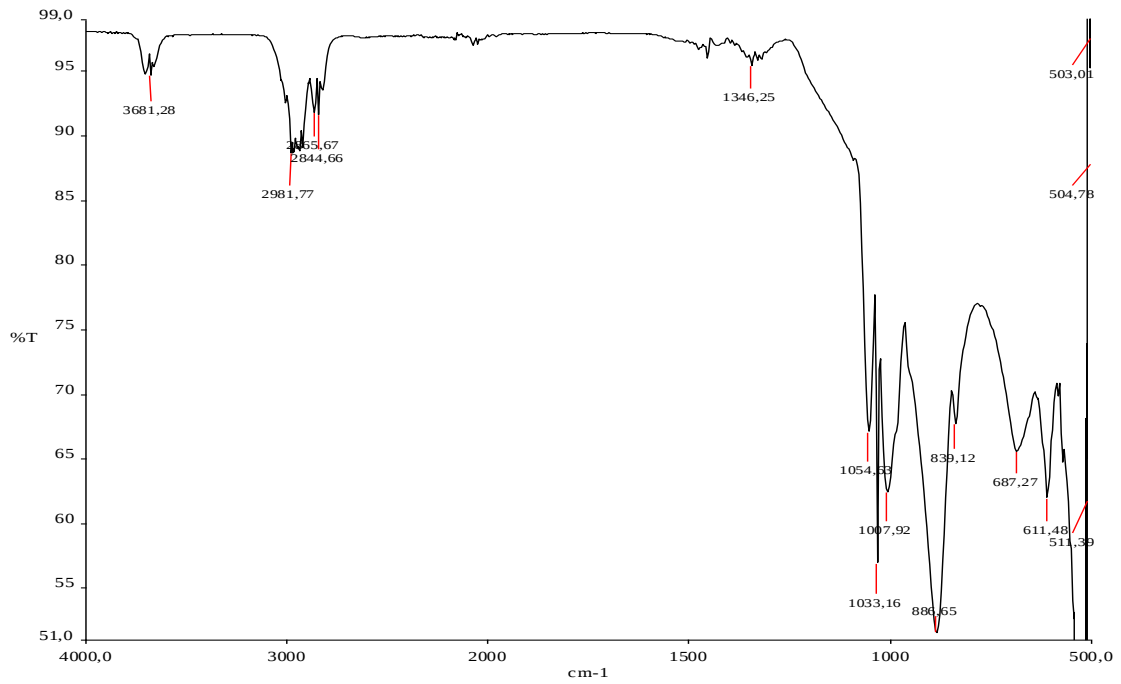


Şekil 4.17. Uçucu kül ile üretilen jeopolimer harç numunelerinden alınan XRD sonucu

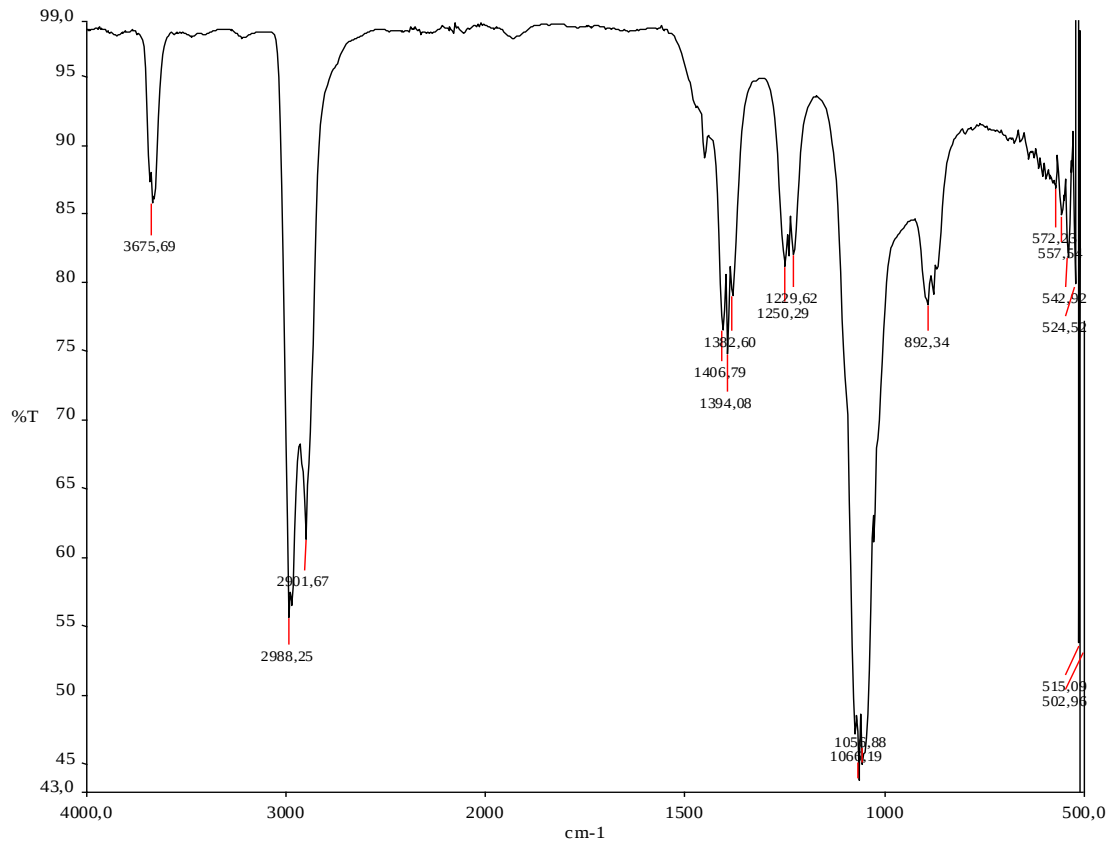
4.8. Jeopolimer Harç Numunelerin FTIR İncelemeleri

Yapılan tez kapsamında üretilen jeopolimerler harçlardan alınan örnekler ile FTIR analizi yapılmıştır. Elde edilen cüruf içerikli jeopolimere ait FTIR sonucu Şekil 4.18’de sunulmaktadır. Uçucu kül içerikli jeopolimere ait FTIR sonucu ise Şekil 4.19’da sunulmuştur.

Jeopolimerlerin kimyasal yapılarının temel analizlerinde FTIR (Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi) yöntemi sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntem, özellikle Si–O ve Al–O bağlarının titreşim modlarını belirleyerek, jeopolimerizasyonun başarı düzeyine ve ürün yapısına dair önemli ipuçları sunmaktadır. Uçucu kül (UK) ve granüle yüksek fırın curufu (GGBFS) kullanılarak sentezlenen jeopolimerlerin FTIR spektrumları karşılaştırmalı olarak incelendiğinde, her iki malzemenin de jeopolimerik reaksiyonlara girdiği ancak oluşan yapının belirgin şekilde farklılaştığı gözlemlenmektedir (Şekil 4.18 ve 4.19.). 450–500 cm^{-1} aralığında gözlenen pikler ise Si–O–Si bükülme titreşimlerinden kaynaklanmaktadır [38,39]. Uçucu kül bazlı jeopolimer örneğinde, yaklaşık 1000–1100 cm^{-1} aralığında geniş bir Si–O–T (T = Si veya Al) asimetric gerilme bandı izlenmiştir. Bu bant, jeopolimer ağ yapısının oluştuğunu ve amorf alüminosilikat fazların varlığını göstermektedir. Ayrıca, 3400 cm^{-1} civarında geniş bir bant ile 1650 cm^{-1} ’de görülen daha dar bir bant, sırasıyla –OH gruplarına ve yapıya fiziksel olarak bağlı su moleküllerine karşılık gelmektedir [3]. Bu durum, uçucu kül bazlı jeopolimerlerde hidrasyon sonrası yapıda belirli oranda serbest suyun kaldığını göstermektedir. Curuf bazlı jeopolimer örneğinde ise, Si–O–T bandının daha düşük dalga sayılarında (~950–1000 cm^{-1}) ve daha keskin bir biçimde yer aldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, cürufun yüksek CaO içeriği nedeniyle farklı bir reaksiyon mekanizmasıyla ilerlediğini ve C–A–S–H benzeri (kalsiyum-alüminosilikat-hidrat) fazların oluşabileceğini düşündürmektedir. Ek olarak, 1400–1450 cm^{-1} aralığında gözlenen bantlar, karbonat iyonlarına (CO_3^{2-}) işaret etmekte olup, cürufun ortamda bulunan CO_2 ile reaksiyona girerek kalsiyum karbonat oluşturduğunu göstermektedir [40,41]. Curuf içeren jeopolimerlerde 870 cm^{-1} civarında Al–O titreşimleri ve 450–500 cm^{-1} aralığında Si–O/Al–O bükülme modları da belirgin şekilde tespit edilmiştir. Bu durum,



Şekil 4.18. Curuf ile üretilen jeopolimer harç numunelerinden alınan FTIR sonucu



Şekil 4.19. Uçucu kül ile üretilen jeopolimer harç numunelerinden alınan FTIR sonucu

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, çimento pastasına belirli oranlarda GEAAL atık ilave edilerek ve farklı bağlayıcı alternatifleri (yüksek fırın cürufu ve uçucu kül) kullanılarak hazırlanan karışımların kısa ve uzun vadeli mekanik ve fiziksel performansları değerlendirilmiştir. Elde edilen deneysel veriler, çevresel sürdürülebilirliği artırmaya yönelik alternatif bağlayıcı malzeme kullanımlarının performansa etkisini açıklayıcı niteliktedir.

Yapılan çalışmanın bu bölümünde üretilen jeopolimer harç numunelerine ait ağırlıkça karışım oranları, eğilme ve basınç dayanım testleri, ultra ses geçiş hızı deneyi, SEM, EDX FTIR ve XRD analizi deneyleri yapılarak aşağıdaki çalışma sonuçlarına yer verilmiştir:

- GEAAL ilavesi, özellikle çimento bazlı karışımlarda bağlayıcılık özelliği göstermediğinden dolayı hem basınç hem de eğilme dayanımında düşüşe sebep olmuştur. UPV değerlerinde ise oluşturduğu ortam süreksizliği nedeni ile ciddi düşüşlere neden olmuştur.
- Hacimce 1/2 oranında GEAAL içeren çimento esaslı karışım (M4), 28 günlük basınç dayanımında 15,68 MPa seviyesinde değere sahipken, %100 çimento içeren referans karışım (M1) aynı yaşta yapılan deneylerde 48,51 MPa basınç dayanımına ulaşmıştır. Bu durum, GEAAL'nin agregaya benzer bir görev üstlense de yapısal bütünlüğü zayıflatıcı bir etkisi olduğunu göstermektedir.
- Cüruf ve uçucu kül gibi puzolanik malzemelerin jeopolimer matrisinde kullanılması, GEAAL ile birlikte kullanıldığında GEAAL kaynaklı dayanım kayıplarını kısmen telafi edebileceğini göstermektedir. Özellikle bu malzemelerin jeopolimer matraste %5 – 10 oranında çimento katkısı ile kullanılmasında dayanımda gerçekleşebilecek reaksiyon kabiliyetini artırabildiği ve bu sayede hem erken hem de geç yaş dayanımlarında olası belirgin iyileşmelere yol açabileceği gözlemlenmiştir.
- M6 (1/4 GEAAL oranı %95 cüruf %5 çimento), M7 (1/4 GEAAL oranı %90 cüruf %10 çimento), M15 (1/4 GEAAL oranı %95 uçucu kül %5 çimento) ve M16 (1/4 GEAAL oranı %90 uçucu kül %10 çimento) karışımlarının deneysel

çalışmalarından elde edilen sonuçları göstermektedir ki hem teknik hem de çevresel etkilerin bertarafı açılardan uygulanabilir alternatifler olarak öne çıkmaktadır.

- Özellikle 1/4 oranında GEAAL içeren ve bağlayıcı içeriği optimize edilmiş halde üretilen karışımların dayanım açısından dengeli sonuçlar verebileceği görülmektedir.
- 180 günlük mekanik testlerden elde edilen performans verilerinden uygun bağlayıcı oranlarında katkılar içeren jeopolimer karışımların (özellikle ileri yaş için) zamanla artan bir dayanım kazandığı belirlenmiştir.
- Özellikle uçucu kül içeren jeopolimer tabanlı karışımların matrislerinde geç reaksiyon gösterme eğilimleri bu çalışma koşullarında doğrulanmıştır. Düşük erken yaş dayanımları gözlemlenmesine rağmen uçucu kül içerikli karışımların ilerleyen yaşlarda dayanım gelişimi devam etmiştir. Bu durum puzolanik reaksiyonlar sayesinde jeopolimer matrisinde zamanla gelişen bağ yapıları ile mekanik özelliklere katkı sağladığını göstermektedir.
- Ultra ses geçiş hızı (UPV) değerleri ile basınç dayanımı arasında genel olarak doğru orantılı grafik davranışları gözlenmiştir.
- Düşük UPV değerlerinde iç yapıda oluşan boşluklar devam edemeyen reaksiyonlar nedeni ile ya da kür koşulları nedeni ile oluşan çatlaklar veya zayıf bağ yapısı ile ilişkili olarak daha düşük mekanik dayanımlara ait değerlerin oluştuğu çalışma kapsamında gözlemlenmiştir. Dolayısıyla UPV sonuçları sadece mukavemet değerleri değil, aynı zamanda karışımların matris yapılarında oluşan mikro yapısal bütünlük ya da bozukluklar hakkında da önemli bilgiler sunabildiği çalışma kapsamında gözlemlenmiştir.
- Cüruf bazlı jeopolimerlerin daha yoğun, kalsiyum ve alüminyum zengini bir yapıya sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Buna karşın, uçucu kül bazlı jeopolimerler daha amorf, silis yönünden zengin ve su tutma kapasitesi daha yüksek malzemelerdir. Bu veriler doğrultusunda, her iki malzeme de jeopolimer üretiminde başarıyla kullanılabilmekte olup, yapısal özellikler ve uygulama alanları bakımından önemli farklılıklar göstermektedir. FTIR analizleri, bu farkların spektral düzeyde açık bir şekilde gözlemlenmesini sağlamıştır.

Sonuç olarak: çalışmanın genel bulgularından yola çıkarak GEAAL için yapı malzemelerinde iç yapıda bağlayıcı özellik göstermediği ve tek başına matriste

kullanıldığında mekanik dayanımlarında ciddi oranda olumsuz etkiler oluşturduğu ortaya konulmuştur. Ancak, GEAL jeopolimer matriste yüksek fırın cürufu veya uçucu kül gibi endüstriyel atıklarla birlikte belirli oranlarda çimento ikamesi ile birlikte kullanılmasıyla, çevre dostu ve kabul edilebilir mekanik özelliklere sahip çevreci alternatif malzemelerin üretilebileceği anlaşılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Luhar, S., Cheng, TW., Nicolaidis, D., Luhar, I., Panias, D., and Sakkas, K. Valorisation of glass wastes for the development of geopolymer composites – Durability, thermal and microstructural properties: A review. *Construction and Building Materials*, (2019); 222, 673 - 687.
- [2] Luhar, I. and Luhar, S. Rubberized Geopolymer Composites: Value-Added Applications. *Journal of Composites Science*, (2021); 5(12), 312.
- [3] Davidovits, J. 2nd ed. Geopolymer chemistry and applications. Saint-Quentin: Geopolymer Institute; 2008.
- [4] Aly, AM., El-Feky, MS., Kohail, M., and Nasr, ESAR. Performance of geopolymer concrete containing recycled rubber. *Construction and Building Materials*, (2019); 207, 136 - 144.
- [5] Pacheco-Torgal, F., Labrincha, J., Leonelli, C., Palomo, A., and Chindaprasit, P. (2014). Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes. Woodhead Publishing. Elsevier; 2014.
- [6] Chen, R., Li, Q., Zhang, Y., Xu, X., and Zhang, D. Pyrolysis kinetics and mechanism of typical industrial non-tyre rubber wastes by peak-differentiating analysis and multi kinetics methods. *Fuel*, (2019); 235, 1224 - 1237.
- [7] Flower, DJM. and Sanjayan, JG. Green house gas emissions due to concrete manufacture. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, (2007); 12(5), 282 - 288.
- [8] Arunkumar, K., Muthukannan, M., Suresh kumar, A., and Chithambar Ganesh, A. Mitigation of waste rubber tire and waste wood ash by the production of rubberized low calcium waste wood ash based geopolymer concrete and influence of waste rubber fibre in setting properties and mechanical behavior. *Environmental Research*, (2021); 194, 110661.
- [9] Kajaste, R. and Hurme, M. Cement industry greenhouse gas emissions – management options and abatement cost. *Journal of Cleaner Production*, (2016); 112, 4041 - 4052.
- [10] Siddique, R. and Naik, TR. Properties of concrete containing scrap-tire rubber – an overview. *Waste Management*, (2004); 24(6), 563 - 569.

- [11] Medine, M., Trouzine, H., Barroso De Aguiar, J., and Djadouni, H. Life cycle assessment of concrete incorporating scrap tire rubber: Comparative study. *Revue Nature et Technologie*, (2020); 12(2), 1 - 11.
- [12] Saad, AG., Sakr, MA., Khalifa, TM., and Darwish, EA. Structural Performance of Concrete Reinforced with Crumb Rubber: A Review of Current Research. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, (2025); 49(4), 3211 - 3254.
- [13] Ralli, ZG. and Pantazopoulou, SJ. State of the art on geopolymer concrete. *International Journal of Structural Integrity*, (2021); 12(4), 511 - 533.
- [14] Glukhovskiy, V. Soil silicates. Their properties, technology and manufacturing and fields of application, Doct. Tech. Sc. Degree Thesis; 1965.
- [15] Pham, TM., Liu, J., Tran, P., Pang, VL., Shi, F., Chen, W., Hao H., Tran TM. Dynamic compressive properties of lightweight rubberized geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, (2020); 265, 120753.
- [16] Luhar, S., Chaudhary, S., and Luhar, I. Development of rubberized geopolymer concrete: Strength and durability studies. *Construction and Building Materials*, (2019); 204, 740 - 753.
- [17] Kuang, F., Long, Z., Kuang, D., Guo, R., and Sun, J. Experimental study on preparation and properties of low content rubberized geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, (2022); 352, 128980.
- [18] Lazorenko, G., Kasprzhitskii, A., and Mischinenko, V. Rubberized geopolymer composites: Effect of filler surface treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, (2021); 9(4), 105601.
- [19] Zhang, B., Feng, Y., Xie, J., Lai, D., Yu, T., and Huang, D. Rubberized geopolymer concrete: Dependence of mechanical properties and freeze-thaw resistance on replacement ratio of crumb rubber. *Construction and Building Materials*, (2021); 310, 125248.
- [20] Wongsu, A., Sata, V., Nematollahi, B., Sanjayan, J., and Chindaprasirt, P. Mechanical and thermal properties of lightweight geopolymer mortar incorporating crumb rubber. *Journal of Cleaner Production*, (2018); 195, 1069 - 1080.
- [21] dos Reis Ferreira, RA., Gratão, LS., and de Castro Motta, LA. Evaluation and Optimization of the Replacement of Fine Aggregate by Waste Tire Rubber in Geopolymer Mortar with Metakaolin. *Mechanics of Composite Materials*, (2024); 59(6), 1223 - 1238.
- [22] Mermerdaş, K., İpek, S., Işiker, Y., and Rasool, H. Effect of Waste Tire Aggregate on Thermal and Strength Characteristics of Fly Ash-Based Geopolymer Composites

Produced at Various Binder Contents. Journal of Materials in Civil Engineering, (2023); 35(10).

[23] Mabrouk, A., Raza, A., Elhadi, KM., Ahmed, B., Kubica, J., and Chen, W. Effect of curing temperature, silica fume, and waste tire rubber aggregate on material characterization of lightweight geopolymer composite. Construction and Building Materials, (2024); 453, 139063.

[24] Yadollahi, MM., Varolgüneş, S., and İşsever, F. Na₂O, silika modülü, su/bağlayıcı oranı ve yaşlanmanın cüruf tabanlı geopolimerlerin basınç mukavemetinde olan etkileri. Türk Doğa ve Fen Dergisi, (2017); 6(2), 26 - 31.

[25] Mohabbi Yadollahi, M. and Varolgüneş, S. Polipropilen Liflerin Perlit Esaslı Geopolimerlerin Mekanik Davranışına Etkisi. Türk Doğa ve Fen Dergisi, (2018); 7(2), 36 - 41.

[26] Mohabbi, M. Nano Silica and Micro Silica Effect on Mechanical Attributes of Ferrochrome Slag Based Geopolymer. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, (2020); 8(1), 347 - 362.

[27] Mohabbi, M. and Kolak, MN. Investigation of Waste Mineral Wool in Geopolymer Production. Türk Doğa ve Fen Dergisi, (2024); 13(4), 192 - 198.

[28] Pourkhorshidi, AR., Najimi, M., Parhizkar, T., Jafarpour, F., and Hillemeier, B. Applicability of the standard specifications of ASTM C618 for evaluation of natural pozzolans. Cement and Concrete Composites, (2010); 32(10), 794 - 800.

[29] Parveen, Singhal, D., Junaid, MT., Jindal, BB., and Mehta, A. Mechanical and microstructural properties of fly ash based geopolymer concrete incorporating alccofine at ambient curing. Construction and Building Materials, (2018); 180, 298 - 307.

[30] Matsimbe, J., Dinka, M., Olukanni, D., and Musonda, I. Geopolymer: A Systematic Review of Methodologies. Materials, (2022); 15(19), 6852.

[31] Tchakouté, HK. and Rüschler, CH. Mechanical and microstructural properties of metakaolin-based geopolymer cements from sodium waterglass and phosphoric acid solution as hardeners: A comparative study. Applied Clay Science, (2017); 140, 81 - 87.

[32] Mehrzad Mohabbi Yadollahi Hasankale pomzasından alkali aktivasyon yöntemiyle geopolimer çimentosunun üretilebilirliğinin araştırılması, PhD Thesis, (2013); Graduate School of Natural and Applied Sciences.

[33] Bayrak, B., İpek, S., Alcan, HG., Kaplan, G., Aydın, AC., and Güneyisi, E. Engineering and microstructural properties of environmentally friendly alkali-activated

composites containing clinker aggregate: heat-curing regime and elevated-temperature effect. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, (2024); 24(4), 200.

[34] Mohabbi Yadollahi, M. and Dener, M. Investigation of elevated temperature on compressive strength and microstructure of alkali activated slag based cements. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, (2021); 25(5), 924 - 938.

[35] ASTM C348. Standard test method for flexural strength of hydraulic-cement mortars. American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken, Pennsylvania, United States, (2008).

[36] ASTM C349. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortars (Using Portions of Prisms Broken in Flexure). American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken, Pennsylvania, United States, (2013).

[37] ASTM C597. Standard Test Method for Ultrasonic Pulse Velocity Through Concrete. American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken, Pennsylvania, United States, (2022).

[38] Duxson, P., Provis, J.L., Lukey, G.C., and van Deventer, J.S.J. The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete.' *Cement and Concrete Research*, (2007); 37(12), 1590 - 1597.

[39] Bernal, S.A., Provis, J.L., Rose, V., and Mejía de Gutierrez, R. Evolution of binder structure in sodium silicate-activated slag-metakaolin blends. *Cement and Concrete Composites*, (2011); 33(1), 46–54.

[40] van Deventer, J.S.J., San Nicolas, R., Ismail, I., Bernal, S.A., Brice, D.G., and Provis, J.L. Microstructure and durability of alkali-activated materials as key parameters for standardization. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, (2015); 4(2), 116 - 128.

[41] Provis, J.L. Alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research*, (2018); 114, 40 - 48.