

**PERLİTLİ GEOPOLİMER HARÇLARIN DONMA-ÇÖZÜLME
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Selen ŞANALDI

Danışman
Doç. Dr. Gökhan KÜRKLÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

Ocak 2022

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PERLİTLİ GEOPOLİMER HARÇLARIN DONMA-ÇÖZÜLME
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Selen ŞANALDI

Danışman

Doç. Dr. Gökhan KÜRKLÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

Ocak 2022

TEZ ONAY SAYFASI

Selen ŞANALDI tarafından hazırlanan “PERLİTLİ GEOPOLİMER HARÇLARIN DONMA-ÇÖZÜLME DAVRANIŞININ İNCELENMESİ” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 07 / 01 / 2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Gökhan KÜRKLÜ

Başkan : Doç. Dr. Gökhan GÖRHAN
Afyon Kocatepe Üniversitesi , Mühendislik Fakültesi

Üye : Doç. Dr. Gökhan KÜRKLÜ
Afyon Kocatepe Üniversitesi , Mühendislik Fakültesi

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Kadir GÜÇLÜER
Adıyaman Üniversitesi, Teknik Bilimler M.Y.O.

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. İbrahim EROL
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

07 / 01 / 2022

Selen ŞANALDI

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

PERLİTLİ GEOPOLİMER HARÇLARIN DONMA-ÇÖZÜLME DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Selen ŞANALDI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Gökhan KÜRKLÜ

Yapılan bu çalışmada çimento üretiminden kaynaklı CO₂ salınımını azaltmak için geopolimer harç kullanılması amaçlanmıştır. Harç numunelerinin hazırlanmasında hammadde olarak kullanılan; perlit, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve kum malzemeleri farklı oranlarda karıştırılmıştır. Geopolimer harçlarda alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit çözeltisi ve sodyum silikat solüsyonu kullanılmıştır. Bunlara ek olarak numuneler hava sürükleyici katkılı ve hava sürükleyici katkısız olmak üzere iki farklı şekilde üretilmiştir. Hazırlanan karışımlar 50 mm çapında ve 50 mm yüksekliğinde silindir metal kalıplara 50 bar basınç uygulanarak yerleştirilmiştir. Kum hacimce %25, %50 ve %75 oranlarında perlitle yer değiştirilmiş ve perlit ikameli harçlar hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler 24 saat 85 °C de etüvde kür edilmiştir. 7, 28 ve 56 günlük numuneler sırayla donma-çözülme döngülerine girmiştir. Donma-çözülme döngülerini tamamlayan numunelerin fiziksel özellikleri incelenmiştir. Ardından numunelerin basınç dayanım testleri (7, 28 ve 56 günlük) yapılmıştır. Ayrıca üretilen harçların donma-çözülme olan etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmada donma-çözülme sonrası numunelerin sadece ağırlık kayıplarına değil fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisine bakılmıştır. Harç yapımında kullanılan malzemelere kimyasal, mineralojik ve SEM analizleri yapılmıştır. Malzemelerin mineralojik analizi XRD yöntemiyle, kimyasal analizleri ise XRF yöntemi ile yapılmıştır. Sonuç olarak perlitli geopolimer harçlarda perlit oranının %25 olduğu serilerde fiziksel ve mekanik özelliklerde olumlu yönde artış olmuştur.

2022, xiv + 102 sayfa

Anahtar Kelimeler: Geopolimer, perlit, harç, uçucu kül,yüksek fırın cürufu.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF FREEZING-THAWING BEHAVIOUR OF GEOPOLYMER MORTARS WITH PERLITE

Selen ŞANALDI

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Gökhan KÜRKLÜ

In this thesis, it is aimed to use geopolymer mortar to reduce the CO₂ emission from cement production. Used as raw material in the preparation of mortar samples; perlite, fly ash, blast furnace slag and sand materials were mixed in different proportions. Sodium hydroxide solution and sodium silicate solution were used as alkali activators in geopolymer mortars. In addition to these, the samples were produced in two different ways, with and without air-entraining additives. The prepared mixtures were placed in cylindrical metal molds with a diameter of 50 mm and a height of 50 mm by applying 50 bar pressure. Sand was replaced with perlite at 25%, 50% and 75% volume by volume and perlite substituted mortars were prepared. The prepared samples were cured in an oven at 85 °C for 24 hours. Samples of 7, 28, and 56 days entered freeze-thaw cycles, respectively. The physical properties of the samples that completed the freeze-thaw cycles were investigated. Then the compressive strength tests (7, 28 and 56 days) of the samples were carried out. In addition, the effects of the produced mortars on freeze-thaw were investigated. In this study, the effects of not only the weight loss but also the physical and mechanical properties of the samples after freezing-thawing were examined. Chemical, mineralogical and SEM analyzes were performed on the materials used in mortar production. The mineralogical analysis of the materials was made with the XRD method, and the chemical analyzes were made with the XRF method. As a result, there was a positive increase in physical and mechanical properties in the series where the perlite ratio was 25% in perlite geopolymer mortars.

2022, xiv + 102 pages

Keywords: Geopolymer, perlite, mortar, fly ash, blast furnace slag.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarında dolay tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Gökhan KÜRKLÜ'ye, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolay aileme ve eşim İnaaat Mühendisi Yiğit ŞANALDI'ya teşekkür ederim.

Selen ŞANALDI
Afyonkarahisar 2022

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
RESİMLER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ.....	3
2.1 Geopolimer	4
2.2 Uçucu Kül (UK).....	6
2.2.1 Uçucu Küllerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	7
2.2.2 Uçucu Külün Sınıflandırılması	8
2.3 Yüksek Fırın Cürufu (YFC).....	8
2.3.1 Yüksek Fırın Cürufunun (YFC) Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	9
2.3.2 Yüksek Fırın Cürufunun (YFC) Kullanım Alanları.....	10
2.4 Perlit.....	10
2.4.1 Perlitin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	12
2.4.2 Perlitin Kullanım Alanları.....	14
2.4.2.1 Ham Perlitin Kullanım Alanları	14
2.4.2.2 Genleştirilmiş Perlitin Kullanım Alanları	14
2.5 Hava Sürükleyici Kimyasal Katkı	15
3. MATERYAL ve METOT	17
3.1 Kullanılan Malzemeler	17
3.1.1 Uçucu Kül (UK).....	17
3.1.2 Yüksek Fırın Cürufu (YFC)	18
3.1.3 Ham Perlit (HP)	19
3.1.4 Genleştirilmiş Perlit (GP).....	22
3.1.5 Kum.....	23
3.1.6 Alkali Aktivatörler	23
3.1.7 Hava Sürükleyici Kimyasal Katkı.....	24

3.2 Hammaddelere Uygulanan Analizler.....	25
3.3 Harçların Hazırlanması	26
3.4 Fiziksel ve Mekanik Deneyler	30
3.4.1 Donma-Çözülme Deneyi.....	30
3.4.2 Basınç Mukavemeti Deneyi	32
3.4.3 Ultrases Geçiş Hızı Deneyi	33
3.4.4 Birim Hacim Ağırlık Deneyi.....	35
3.4.5 Su Emme Deneyi.....	35
3.4.6 Görünen Porozite	36
3.4.7 Görünür Yoğunluk	36
3.5 SEM Analizleri	38
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	39
4.1 Geopolimer Harçlarda Deneme Dökümü	39
4.2 Geopolimer Harçların Fiziksel Özellikleri.....	40
4.2.1 Görünen Porozite (%)	40
4.2.2 Su Emme (%)	46
4.2.3 Birim Hacim Ağırlık	51
4.2.4 Görünür Yoğunluk	56
4.3 Geopolimer Harçların Mekanik Özellikleri	61
4.3.1 Basınç Dayanımı	61
4.3.2 Donma Çözülme Etkisi	66
4.4 SEM ve EDS Analizleri	78
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	90
6. KAYNAKLAR.....	94
ÖZGEÇMİŞ.....	102

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

NaOH	Sodyum hidroksit
Na ₂ SiO ₃	Sodyum silikat solüsyonu

Kisaltmalar

ASTM	American Society Testing for Materials
DPT	Devlet Planlama Teşkilatı
EIE	Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü
GP	Genleştirilmiş perlit
GP ₁	Genleştirilmiş ince perlit
GP ₂	Genleştirilmiş iri perlit
HP	Ham perlit
SEM	Taramalı elektron mikroskop
SH	Sodyum hidroksit
SS	Sodyum silikat solüsyonu
TS	Türk Standardı
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
UK	Uçucu kül
YFC	Yüksek fırın cürufu
XRD	X ışını difraktogramı
XRF	X-ışını floresans spektrometresi

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Hava kabarcıklarının birbirini itmesi mekanizması	16
Şekil 3.1 Uçucu kül XRD difraktogramı	18
Şekil 3.2 Yüksek fırın cürufu XRD difraktogramı	19
Şekil 3.3 Ham perlit XRD difraktogramı	20
Şekil 3.4 Geopolimer harçlarda kullanılan binderlerin elek analizi	21
Şekil 3.5 Donma-çözülme çevrimlerinde sıcaklık zaman grafiği	31
Şekil 3.6 Ultrases cihazı çalışma mekanizması	34
Şekil 4.1 Perlit oranına göre görünen porozite (%) değişimi	41
Şekil 4.2 10 M Katkısız geopolimer harçların görünen porozite oranları	42
Şekil 4.3 15 M Katkısız geopolimer harçların görünen porozite oranları	42
Şekil 4.4 10 M Katkılı geopolimer harçların görünen porozite oranları	43
Şekil 4.5 15 M Katkılı geopolimer harçların görünen porozite oranları	43
Şekil 4.6 Harç yaşının katkısız ve katkılı serilerde görünen porozite (%) etkisi	44
Şekil 4.7 Harç yaşının ve bağlayıcı/agrega oranının katkısız ve katkılı serilerde görünen porozite (%) etkisi.	45
Şekil 4.8 Donma-çözülme sonrası harç yaşının ve bağlayıcı/agrega oranının katkısız ve katkılı serilerde görünen porozite (%) etkisi	45
Şekil 4.9 Perlit oranına göre su emme (%) değişimi	47
Şekil 4.10 10 M Katkısız geopolimer harçların su emme oranları	47
Şekil 4.11 15 M Katkısız geopolimer harçların su emme oranları	48
Şekil 4.12 10 M Katkılı geopolimer harçların su emme oranları	48
Şekil 4.13 15 M Katkılı geopolimer harçların su emme oranları	49
Şekil 4.14 Harç yaşının katkısız ve katkılı serilerde su emme (%) etkisi	49
Şekil 4.15 Harç yaşının ve bağlayıcı/agrega oranının katkısız ve katkılı serilerde su emme (%) etkisi	50
Şekil 4.16 Donma-çözülme sonrası harç yaşının ve bağlayıcı/agrega oranının katkısız ve katkılı serilerde su emme (%) etkisi	50
Şekil 4.17 Perlit oranına göre birim hacim ağırlık değişimi	52
Şekil 4.18 10 M Katkısız geopolimer harçların birim hacim ağırlığı	52
Şekil 4.19 15 M Katkısız geopolimer harçların birim hacim ağırlığı	53
Şekil 4.20 10 M Katkılı geopolimer harçların birim hacim ağırlığı	53
Şekil 4.21 15 M Katkılı geopolimer harçların birim hacim ağırlığı	54
Şekil 4.22 Harç yaşının katkısız ve katkılı serilerde birim hacim ağırlığa etkisi	54

Şekil 4.23	Harç yaşının ve bağlayıcı/agrega oranının katkısız ve katkılı serilerde birim hacim ağırlığa etkisi.....	55
Şekil 4.24	Donma-çözülme sonrası harç yaşının ve bağlayıcı/agrega oranının katkısız ve katkılı serilerde birim hacim ağırlığa etkisi.....	55
Şekil 4.25	Perlit oranına göre görünür yoğunluk değişimi	57
Şekil 4.26	10 M Katkısız geopolimer harçların görünür yoğunluğu.....	57
Şekil 4.27	15 M Katkısız geopolimer harçların görünür yoğunluğu.....	58
Şekil 4.28	10 M Katkılı geopolimer harçların görünür yoğunluğu.....	58
Şekil 4.29	15 M Katkılı geopolimer harçların görünür yoğunluğu.....	59
Şekil 4.30	Harç yaşının katkısız ve katkılı serilerde görünür yoğunluğa etkisi	59
Şekil 4.31	Harç yaşının ve bağlayıcı/agrega oranının katkısız ve katkılı serilerde görünür yoğunluğa etkisi	60
Şekil 4.32	Donma-çözülme sonrası harç yaşının ve bağlayıcı/agrega oranının katkısız ve katkılı serilerde görünür yoğunluğa etkisi	60
Şekil 4.33	Perlit oranına göre basınç dayanımı değişimi	62
Şekil 4.34	10 M Katkısız geopolimer harçların basınç dayanımı	62
Şekil 4.35	15 M Katkısız geopolimer harçların basınç dayanımı	63
Şekil 4.36	10 M Katkılı geopolimer harçların basınç dayanımı	63
Şekil 4.37	15 M Katkılı geopolimer harçların basınç dayanımı	64
Şekil 4.38	Harç yaşının katkısız ve katkılı serilerde basınç dayanımına etkisi.....	64
Şekil 4.39	Harç yaşının ve bağlayıcı/agrega oranının katkısız ve katkılı serilerde basınç dayanımına etkisi.....	65
Şekil 4.40	Donma-çözülme sonrası harç yaşının ve bağlayıcı/agrega oranının katkısız ve katkılı serilerde basınç dayanımına etkisi.....	65
Şekil 4.41	10M Katkısız geopolimer harçların donma çözülme döngüsünü tamamlama oranı	66
Şekil 4.42	10M Katkılı geopolimer harçların donma çözülme döngüsünü tamamlama oranı	67
Şekil 4.43	15M Katkısız geopolimer harçların donma çözülme döngüsünü tamamlama oranı	67
Şekil 4.44	15M Katkılı geopolimer harçların donma çözülme döngüsünü tamamlama oranı	68
Şekil 4.45	Donma-çözülme öncesi ve sonrasında 10M ve 15M Katkısız ve katkılı seriler için ortalama birim hacim ağırlıkları	69
Şekil 4.46	Donma-çözülme öncesi ve sonrasında geopolimer harçların ortalama birim hacim ağırlıklarındaki % değişimi.....	69
Şekil 4.47	Donma-çözülme öncesi ve sonrasında 10M ve 15M Katkısız ve katkılı seriler için ortalama görünür yoğunlukları	70

Şekil 4.48 Donma-çözülme öncesi ve sonrasında geopolimer harçların ortalama görünür yoğunluklarındaki % değişimi.....	71
Şekil 4.49 Donma-çözülme öncesi ve sonrasında 10M ve 15M Katkısız ve katkılı seriler için su emme oranları	72
Şekil 4.50 Donma-çözülme öncesi ve sonrasında geopolimer harçların ortalama su emme oranlarındaki değişim	72
Şekil 4.51 Donma-çözülme öncesi ve sonrasında 10M ve 15M Katkısız ve katkılı seriler için görünen yoğunluk oranları.....	73
Şekil 4.52 Donma-çözülme öncesi ve sonrasında geopolimer harçların ortalama görünen yoğunluk oranlarındaki değişim	74
Şekil 4.53 Donma-çözülme öncesi ve sonrasında 10M ve 15M Katkısız ve katkılı seriler için ortalama basınç dayanımları	74
Şekil 4.54 Donma-çözülme öncesi ve sonrasında geopolimer harçların ortalama basınç dayanımlarındaki değişim	75
Şekil 4.55 Donma-çözülme öncesi ve sonrasında 10M ve 15M Katkısız ve katkılı seriler için ortalama ultrases geçiş hızı değerleri.....	76
Şekil 4.56 Donma-çözülme öncesi ve sonrasında geopolimer harçların ortalama ultrases geçiş hızı değerlerindeki değişim	76
Şekil 4.57 Harç yaşının ve bağlayıcı/agrega oranının katkısız ve katkılı serilerde ultrases geçiş hızı değerleri.....	77
Şekil 4.58 Donma-çözülme sonrası harç yaşının ve bağlayıcı/agrega oranının katkısız ve katkılı serilerde ultrases geçiş hızı değerleri.....	77
Şekil 4.59 EDS analizlerine göre harç numunelerdeki Ca/Si, Ca/Al, Al/Si ve Na/Si oranları.....	89

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Ham perlitin fiziksel özellikleri	13
Çizelge 2.2 Genleştirilmiş perlitin fiziksel özellikleri.....	13
Çizelge 2.3 Perlitin kimyasal özellikleri	13
Çizelge 3.1 Uçucu külünü kimyasal kompozisyonu.	17
Çizelge 3.2 Yüksek fırın cürufu kimyasal kompozisyonu.	19
Çizelge 3.3 Ham perlit kimyasal kompozisyonu.....	20
Çizelge 3.4 Genleştirilmiş iri ve ince perlitin kimyasal analizi.	22
Çizelge 3.5 Alkali aktivatörlerin kimyasal içerikleri.	24
Çizelge 3.6 Hava sürükleyici katkı özellikleri.	24
Çizelge 3.7 Hacimce geopolimer harç karışımlarındaki bağlayıcı ve agrega oranları (%).	29
Çizelge 3.8 1 m ³ harç için ağırlıkça malzeme miktarları.	30
Çizelge 4.1 10 M 25/25 harç numunesine ait EDS verileri.....	80
Çizelge 4.2 10 M 50/50 harç numunesine ait EDS verileri.....	82
Çizelge 4.3 10 M 75/75 harç numunesine ait EDS verileri.....	83
Çizelge 4.4 15 M 25/25 harç numunesine ait EDS verileri.....	85
Çizelge 4.5 15 M 50/50 harç numunesine ait EDS verileri.....	86
Çizelge 4.6 15 M 75/75 harç numunesine ait EDS verileri.....	88

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 3.1 Uçucu kül	18
Resim 3.2 Yüksek fırın cürufu	19
Resim 3.3 Ham perlitin öğütülmemiş ve öğütüldükten sonraki hali.....	20
Resim 3.4 Ham perlitin öğütüldüğü değirmen	21
Resim 3.5 Genleştirilmiş iri perlit	22
Resim 3.6 Genleştirilmiş ince perlit.....	22
Resim 3.7 Kum	23
Resim 3.8 Harç üretiminde kullanılan alkali aktivatörler	24
Resim 3.9 Harç üretiminde kullanılan hava sürükleyici kimyasal katkı.....	25
Resim 3.10 Bruker D8 Advance, Rigaku ZSX Primus, Malvern Mastersizer 2000.....	26
Resim 3.11 Karışımın yapıldığı mikser	27
Resim 3.12 Harç üretimi yapılan pres	28
Resim 3.13 Silindir numune kalıbı	28
Resim 3.14 Silindirik formda dökülen harç numunelerinden bir örnek.....	29
Resim 3.15 Donma-çözölmeye tabi tutulan silindir harç numuneleri.....	31
Resim 3.16 Donma-çözölmeye tabi tutulan suda bekleyen silindir harç numuneleri....	32
Resim 3.17 Basınç dayanım testine tabi tutulan silindir harç numuneleri	33
Resim 3.18 Ultrases geçiş hızı ölçüm cihazı.....	34
Resim 3.19 Silindir numunede ultrases deneyi	34
Resim 3.20 Yüzey kurusu suya doygun ağırlık	37
Resim 3.21 Etöv kurusu ağırlık için etövde bekletilen harç numuneleri	37
Resim 3.22 SEM cihazı.....	38
Resim 4.1 Dökümü yapılan harç numuneleri.....	39
Resim 4.2 Kalıptan çıkarılan ham perlit-YFC harç numuneleri	40
Resim 4.3 10M 25/25 harç numunesinin SEM görüntüsü	79
Resim 4.4 10M 25/25 harç numunesinin SEM, haritalandırma görüntüsü ve EDS grafiği	80
Resim 4.5 10M 50/50 harç numunesinin SEM görüntüsü	81
Resim 4.6 10M 50/50 harç numunesinin SEM, haritalandırma görüntüsü ve EDS grafiği	81
Resim 4.7 10M 75/75 harç numunesinin SEM görüntüsü	82
Resim 4.8 10M 75/75 harç numunesinin SEM, haritalandırma görüntüsü ve EDS grafiği	83

Resim 4.9 15M 25/25 harç numunesinin SEM görüntüsü	84
Resim 4.10 15M 25/25 harç numunesinin SEM, haritalandırma görüntüsü ve EDS grafiği.....	84
Resim 4.11 15M 50/50 harç numunesinin SEM görüntüsü	85
Resim 4.12 15M 50/50 harç numunesinin SEM, haritalandırma görüntüsü ve EDS grafiği.....	86
Resim 4.13 15M 75/75 harç numunesinin SEM görüntüsü	87
Resim 4.14 15M 75/75 harç numunesinin SEM, haritalandırma görüntüsü ve EDS grafiği.....	87

1. GİRİŞ

Portland çimentosu üretimi sonucunda ekonomik ve çevresel sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bu üretim şekline kaynaklı ortaya çıkan çevresel sorunlardan dolayı çevreye zarar vermeyen doğa dostu bağlayıcı kullanımı araştırmacılar tarafından teşvik edilmeye başlanmıştır (Çelikten ve Sarıdemir 2018).

Portland çimentosunun belirli oranlarda puzolanlarla ikame ettirilmesi ile betonun ya da harcın uzun vadeli performansında olumlu yönde artış olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, inşaat sektöründe en yaygın kullanılan puzolanlardan biri olan uçucu külün dünya çapında kömürle çalışan elektrik santrallerinin giderek azalması nedeniyle, alternatif puzolanların araştırılmasını zorunlu kılmıştır. Yapay (uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu) ve doğal puzolanlar (metakaolin, pomza, perlit) gibi geleneksel puzolanların performansını, camlar (yüksek alkali ve düşük alkali) ve öğütülmüş camlar dahil olmak üzere yeni puzolanlarla birlikte incelemek için deneysel araştırmalar yapılmaya başlanmıştır (Kasaniya vd. 2021).

Geopolimerler, geleneksel bağlayıcılara alternatif olarak çözeltilerin kullanılması ile çözünme-çökme reaksiyonları sonucunda oluşan alümina ve silika açısından zengin çevre dostu malzemelerdir. Çimentosuz bağlayıcı üretiminde farklı puzolan ve çözeltilerin etkileri üzerinde araştırmacılar tarafından farklı çalışmalar yapılmaktadır (Sarıdemir ve Çelikten 2017).

Geopolimerler üretiminde genel olarak kullanılan alkali aktivatörler sodyum hidroksit (NaOH), sodyum metasilikat (Na_2SiO_3), sodyum karbonat (Na_2CO_3) ve potasyum hidroksittir (KOH). Bu çözeltilerin harçların mekanik özellikleri üzerinde olumlu ve olumsuz etkileri vardır (Bernal vd. 2011). Bu olumlu yönler, gözenekli yapı oluşumu, düşük hidratasyon sıcaklığı, kimyasal saldırılara direnç, donma-çözülme direnci, güçlü agrega-bağlayıcı arayüzü ve düşük geçirgenliktir. Olumsuz etkileri ise hızlı priz alma, düşük işlenebilirlik, mikro çatlak oluşumu, yüksek büzülme ve çiçeklenmedir.

Alkali aktivatör ile doğal veya yapay puzolanları etkinleştirmek için birçok çalışma

yapılmıştır. Geopolimer veya alkali ile aktifleştirilmiş malzemelerin üretiminde kullanılan hammaddeler genellikle doğal puzolanlar (Bondar vd. 2011), yüksek fırın cürufu gibi amorf malzemelerdir. Geopolimerizasyon süreci, bu hammaddelerin kimyasal bileşimi ve yapısındaki Si ve Al'ın çözünürlüğü ile doğrudan ilişkilidir (Erdoğan 2015). Kaynakların giderek tükenmesi nedeniyle araştırmacılar geopolimer sentezi için alternatif materyal arayışına girmişlerdir.

Yukarıdaki verilere dayanarak perlitin bu çalışmada hem agrega olarak harca hafiflik ve ısı direnç kazandıracağı hem de bağlayıcı olarak ham perlitin geopolimerizasyon sürecinde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Perlitin hem agrega hem de bağlayıcı olarak kullanılmasının durabilite açısından önemli bir etki olan harcın donma-çözülme direncine fiziksel ve mekanik açıdan incelenmesi amaçlanmaktadır. Çalışmada farklı molarite ve farklı perlit oranları tercih edilmiş ve bunların sonuçları irdelenmiştir. Bu çalışmada öğütülmüş ham perlit bağlayıcı geliştirilmiş iri ve geliştirilmiş ince perlit ise kum ile beraber agrega olarak kullanılmış, öğütülmüş ham perlite ek olarak uçucu kül ve yüksek fırın cürufu bağlayıcı olarak; NaOH ve Na₂SiO₃ da alkali aktivatör olarak kullanılmıştır. Üretilen geopolimer harçlarda donma-çözülme deneyi yapılmış ve bunun sonucunda donma-çözülme maruz kalmayan numunelerle karşılaştırma yapılmıştır. Donma-çözülmeden dolayı oluşabilecek sıkıntıları gözlemlemek için numuneler hava sürükleyici katkı ve katkısız olarak hazırlanmıştır. Hava sürükleyici katkının dayanımı ne yönde değiştireceği incelenmiştir. Donma-çözülme sonrasında ağırlık kayıplarına bakılmıştır. Kür sonrası numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmış ve harçların iç yapı özellikleri incelenmiştir.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Günümüzde sürdürülebilir bir çevre yaklaşımı ve çevreye zarar vermeyen ürünlerin kullanımı teşvik edilmeye başlanmıştır (Hossain vd. 2018). Doğal kaynakların tüketilmesinden de sorumlu olan inşaat sektörü bu sıkıntıları gidermek için alternatif yöntemler bulmaya başlamış ve bunları kullanmaya yönelmiştir (UNEP 2018).

İnşaat sektöründe en çok kullanılan ürünlerden biri olan çimento üretimi sırasında % 8 CO₂ gazı açığa çıkmaktadır. Çok düşük CO₂ emisyonu ve kalsinasyon gerektirmemesinden dolayı geopolimer harçlar Portland çimentosuna alternatif bir bağlayıcı olmuştur. Portland çimentosuna alternatif olmasının yanı sıra çimentoya göre çevre dostu bir ürün olarak kabul edildiği yapılan çalışmalarda görülmektedir (Sumesh vd. 2017).

Portland çimentosu yerine aktif alkali çimentoların kullanılması uygun bir seçenek haline gelmiştir. Bunun nedeni bu malzemelerin Portland çimentosundan daha üstün mekanik özelliklere sahip olmasının yanı sıra bileşimlerinde atık veya endüstriyel yan ürünlerin kullanılması, çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunma olasılığı gibi avantajlarından kaynaklanmaktadır (Marvila vd. 2021).

Portland çimentosu yaygın olarak kullanılan bir yapı malzemesi olarak yaklaşık 200 yıllık uzun bir geçmişe sahiptir. Ancak son yıllarda artan Portland çimentosu üretimiyle bir dizi sorunla karşı karşıya kalınmıştır. Çimento üretimi için hammaddelerin 1450 °C'ye ısıtılması gerekmektedir. Bu olay sadece önemli miktarda enerji tüketmekle kalmaz, aynı zamanda hammaddeler kalsine edildiğinden büyük miktarda CO₂ salınmasıyla ciddi çevre kirliliğine neden olur (Zhai ve Kurumisawa 2021).

Günümüzün en önemli sorunlarından biri olan çevre kirliliği ve atık madde kullanımına dikkat çekmek için bu çalışmada geleneksel çimentolu üretime alternatif olan geopolimer harç üretim yöntemi tercih edilmiştir.

2.1 Geopolimer

Uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve metakaolin gibi inorganik malzemelerin sodyum silikat (Na_2SiO_3), sodyum hidroksit (NaOH) ve potasyum hidroksit (KOH) çözeltilerinin karışımından elde edilen malzemelere geopolimer denir (Aydın 2017).

Geopolimer kelimesi ilk olarak Davidovits tarafından literatürde kullanılmıştır. Geopolimer harçlar, bağlayıcı olarak kullanılmak üzere alkalilerle aktifleştirilmiş, zengin alüminyum içeren temel malzemelerden oluşan kum ve geopolimer ile üretilen harcı ifade eder. Seramik benzeri özelliklere sahip bir inorganik malzeme türü olan geopolimerik malzemeler, çevre dostu, yanmaz yapı malzemeleri olarak giderek artan bir ilgi görmektedir (Barbosa ve MacKenzie 2003).

Geopolimerler, silika ve alümina açısından zengin ve bir aktivatör çözeltilisinin yardımıyla kimyasal reaksiyonla sentezlenen çevre dostu bağlayıcı malzemelerdir (Wang vd. 2019, Amran vd. 2021).

Bunun yanı sıra geleneksel çimento ürününden daha yüksek mekanik mukavemete sahip olması sebebiyle geopolimer malzemelerin kullanılabilirliği artmaya başlamış olacaktır (Wang vd. 2005).

Geopolimer, kireç ve Portland çimentosuna alternatif ve çevre dostu bir ürün olarak kabul edilmektedir. Geopolimerler, CO₂ emisyonlarını azaltıp çevre dostu bir ürün olmasının yanı sıra uçucu kül (UK), yüksek fırın cürufu (YFC) vb. endüstriyel atıkların geri dönüşümünü sağlayarak ekonomiye kazandırılmasına katkıda bulunmaktadır (Neupane 2016).

Geopolimer malzemelerin basınç dayanımı malzeme seçimine, molarite ve uygulanan kür yöntemine göre değişkenlik göstermektedir (Kumar ve Revathi 2016).

Yapısında geopolimer bağlayıcı bulunan malzemelerin çimento bulunan malzemelere karşı bir diğer avantajı ise alüminosilikat içermesidir. Alüminosilikat içeren malzemenin

yapısındaki CaO miktarının düşük olması sebebiyle yüksek sıcaklık etkisi altında kararlı bir yapı davranışı gösterir (Lyon vd. 1997).

Geopolimerler erken yüksek basınç dayanımı, geçirgenlik, asitlere ve sülfata karşı yüksek direnç ve ağır iklim şartlarına gösterdiği dayanıklılık ile ilgi görmeye başlamıştır. Geopolimerler, yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren yerlerde, yangına dayanıklı malzeme üretimi için, gözenekli yalıtkan beton üretiminde, su arıtma sistemlerinde kullanılmaktadır.

Deb vd. (2014), tarafından yapılan çalışmada farklı oranlardaki alkali aktivatörler ile YFC ve UK ile ikame edilmiş, geopolimer betonun işlenebilirliği ve dayanım özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Karışımlarda yüksek YFC ve düşük SS/SH oranına sahip geopolimer betonlarında dayanımda önemli bir artış gözlenirken işlenebilirlikte bir miktar azalma olduğu görülmüştür

Wang vd. (2005), tarafından yapılan çalışmada metakaolin bazlı geopolimerler 20 °C sıcaklıkta, 4-12 mol/L NaOH çözeltisi ve sodyum metasilikat çözeltisi ile aktivasyon edilerek üretilmiştir. Geopolimer kalıp içerisinde 4 MPa basınç ile sıkıştırılmış ve daha sonra 10 saat boyunca fırında 65 °C'de kür yapılmıştır. Malzemenin eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve görünür yoğunluğu sistematik olarak ölçülerek, NaOH çözeltisinin konsantrasyonunun geopolimerin mekanik ve kimyasal özellikleri üzerindeki etkisi, X-ışını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskopisi (SEM) ve kızılötesi spektrometri (IR) yoluyla araştırılmıştır. Sonuçlar, 4-12 mol/L aralığında NaOH çözeltisi konsantrasyonunun artması ile birlikte, geopolimerin eğilme mukavemeti, basınç mukavemeti ve görünür yoğunluğunun arttığını göstermektedir.

Görhan ve Kürklü (2014), tarafından yapılan çalışmada geopolimer harçlar üzerine farklı NaOH konsantrasyonlarında, farklı sıcaklıklarda ve farklı kür sürelerinde kür uygulayarak, geopolimerizasyonun son ürünün özelliklerinde meydana getirdiği değişimleri araştırmışlardır. Amaçları bu şekilde alkali çözelti konsantrasyonu, kütleme sıcaklığı ve kür süresi arasındaki ilişkiyi belirlemektir. NaOH konsantrasyonunun 85 °C'deki kür sıcaklığında harcın özellikleri üzerinde net bir etkisi olduğunu

gözlemlemişlerdir. 6 M konsantrasyonda 65 °C’de 24 saat kürde kalan harçtan ve aynı harcın 85 °C’de kür sıcaklığındaki bir numuneden 21,3 MPa ve 22 MPa basınç dayanımı değerleri elde etmişlerdir. 85 °C’ de kür geopolimer harçların basınç dayanım değerleri, kür süresine ve NaOH konsantrasyonundaki artışa bağlı olarak arttığını gözlemlemişlerdir. Elde edilen mukavemet değerleri göz önüne alındığında en elverişli termal kür sıcaklığı ve NaOH konsantrasyonu sırasıyla 85 °C ve 6 M olduğu görülmüştür.

2.2 Uçucu Kül (UK)

Genel olarak elektrik enerjisi üreten termik santrallerde kullanılan taş kömürünün %10-15’i, linyit kömürünün ise %20-50’si kül olarak ortaya çıkmaktadır. Yanma sonucu ortaya çıkan külün %75-85’i baca gazları ile birlikte kazandan atılır ve bu atıklar uçucu kül olarak tanımlanır. Uçucu kül üretimini; santral tipi, işletim biçimi, yakılan kömürün cinsi, yanma biçimi gibi çeşitli faktörler etkilemektedir (Morrison 1970).

Uçucu külün fiziksel, kimyasal, mineralojik ve puzolanik özellikleri bölgesel olarak hatta aynı bölge içerisinde bile değişkenlik göstermektedir. Bu değişkenlik uçucu külün kaynağını oluşturan kömürün türüne, kömürün yakılmadan önceki öğütülme (pulvarizasyon) derecesine, kazan türüne, yanma sıcaklığı ve diğer işletme parametrelerine, kül toplama ve uzaklaştırma sistemlerinin özelliklerine ve işleyiş şekline bağlıdır (Hycnar 1983, Kefelioğlu 1998).

Uçucu kül, taban külü ve yüksek fırın cürufu gibi çoğu atık malzeme yeterli miktarda reaktif alümina ve silika içerir ve bu nedenle geopolimer bağlayıcı için kaynak malzeme olarak kullanılabilir. Uçucu kül hem alümina hem de silika içerdiğinden ve Dünyanın birçok yerinde bulunduğu için, geopolimer bağlayıcı yapımında kaynak malzeme olarak yaygın olarak kullanılmaktadır (Duxon vd. 2007).

Portland çimentoları kısmen puzolanlarla (uçucu kül veya silis dumanı) uygun ikame seviyelerinde değiştirildiğinde, betonun klorür iyonu (Cl) penetrasyonuna karşı direncinin önemli ölçüde arttığı görülmektedir (Moffatt vd. 2017, Moffatt ve Thomas 2018).

Daha yüksek konsantrasyonda alkali çözelti ile üretilen uçucu kül bazlı geopolimer harç karışımları, magnezyum sülfat çözeltisinde daha düşük konsantrasyondaki alkali ile üretilenlerden daha üstün performans göstermektedir (Reddy vd. 2010).

2.2.1 Uçucu Küllerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Uçucu kül, genellikle gri renge sahip olan ince taneli bir malzemedir. Renginin koyu ya da açık olması elde edildiği kömüre ve yanma şekline bağlı olarak değişkenlik gösterir. Yanmanın tam sağlanamadığı durumda içindeki yanmamış karbon uçucu küle siyah renk verir. İyi yanma sonucunda oluşan uçucu kül ise diğerlerine göre daha açık renge sahiptir.

Uçucu külün inceliği kazana atılan kömürün öğütülme derecesine bağlı olarak değişiklik gösterir. Boyutları genellikle 0,5 ile 200 mikron arasında değişen, camsı ve çoğunlukla küresel yapıya sahip parçacıklardır. Spesifik yüzeyleri 1800-5000 cm²/gr arasında değişmekle birlikte, ortalama 2800-3800 cm²/gr civarlarındadır. Uçucu külün yoğunluğu; inceliğine ve mineralojik yapısına bağlıdır. İçi dolu küresel tanelerden meydana gelen uçucu küllerin yoğunluğu 2,2-2,7 gr/cm³ arasındadır (EIE 1979 ve 1982).

Uçucu küller çimentodan daha düşük yoğunluğa sahiptirler. Yüksek demir içeren küller daha yoğunken, yüksek miktarlarda alüminat, silikat ve yanmamış karbon bulunan küllerin yoğunluğu daha düşüktür (Yazıcı 2004).

Tek başına bağlayıcı özelliği bulunmayan atık bir malzeme olan uçucu kül belirli şartlar sağlandığında bağlayıcı özellik kazanır. Örneğin; sulu ortamda kireç ile birlikte bağlayıcılık özelliği kazanır (Alkaya 2002).

Beton ve harç üretiminde UK kullanımı çevre duyarlılığına katkıda bulunma açısından önemlidir. Bu yüzden UK son yıllarda harç ve beton karışımlarında mineral katkı maddesi olarak kullanılmaya başlamıştır. Ayrıca geopolimer üretiminde UK alkalilerle aktive edilerek kullanılmaktadır. UK esaslı geopolimerlerin mekanik özellikleri yüksektir. 60-80 °C'de kür yapıldığında düşük kuruma rötresi, yüksek erken basınç ve eğilme dayanımları, kimyasal saldırılara karşı yüksek dayanıklılık gösterir (Çelikten ve

Sarıdemir 2018).

Geopolimer üretiminde genellikle düşük kalsiyum içeren UK tercih edilir çünkü yüksek kalsiyum miktarı polimerizasyon sürecini olumsuz etkileyebilmektedir. Geopolimerlerin sentezindeki sodyum hidroksit ve sodyum metasilikat çözeltilerinin konsantrasyonu basınç dayanımlarını önemli ölçüde etkilemektedir (Panias vd. 2007).

2.2.2 Uçucu Külün Sınıflandırılması

Uçucu külde bulunan başlıca bileşenler SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve CaO olup, bunların miktarları uçucu külün tipine göre değişiklik göstermektedir (Türker vd. 2003). Puzolanik özelliğe sahip olduğu bilinen SiO_2 ve Al_2O_3 'ü ana kimyasal bileşiminde içerir. Uçucu küldeki temel oksitlerden SiO_2 %25-60, Al_2O_3 %10-30, Fe_2O_3 %1-15 ve CaO , %1-40 oranlarında bulunmaktadır. Bileşenlerin farklı değerlerde olması uçucu külün hangi sınıfta olduğunu belirlemeye yardımcı olmaktadır (Türker vd. 2003). ASTM C 618 (2019) standardına göre uçucu küller F ve C sınıfı olmak üzere ikiye ayrılmıştır. F sınıfı uçucu küller bitümlü kömürün yakılması ile üretilmiş olup %10'dan daha az CaO içerir. Bu özelliği ile düşük kireçli küller olarak adlandırılmaktadırlar ve puzolanik özelliğe sahiptirler. F sınıfı uçucu küllerde toplam $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi %70'den fazladır. Diğer bir uçucu kül sınıfı olan C sınıfı uçucu küller ise linyit veya yarı-bitümlü kömürün yakılması ile üretilmektedir. Toplam $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı %50'den fazla olan küllerdir. C sınıfı uçucu küllerin içerdiği CaO %10'dan fazla olduğu için yüksek kireçli küller olarak da adlandırılmaktadır. C sınıfı uçucu küller ise puzolanik özelliğinin yanı sıra bağlayıcı özelliğini de içermektedir (Alkaya 2009).

2.3 Yüksek Fırın Cürufu (YFC)

Yüksek fırın cürufu, çimentoya ek olarak yaygın kullanılan malzemelerden biridir. Yüksek fırın sıcaklığı 1350-1550 °C'ye ulaştığında yüksek sıcaklık reaksiyonu ile üretilen, %95'ten fazla cam fazı içeren ve potansiyel hidrolik özelliklere sahip bir yan üründür (Taylor 1997).

Yüksek fırın cürufu kullanımının ise üretimi aşırı derecede kirletici bir malzeme olan Portland çimentosunun potansiyel bir ikamesi olan aktif alkali çimentoların üretimi için uygun bir alternatif olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Marvila vd. 2021).

2.3.1 Yüksek Fırın Cürufunun (YFC) Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Demir-çelik fabrikalarında ham demirin üretimi sırasında meydana gelen atık bir yan ürün olarak açığa çıkan yüksek fırın cürufu beton veya harç içerisinde mineral katkı malzemesi olarak kullanılan yapay bir puzolandır. Erimiş cüruf, suyla hızla söndürüldüğünde veya güçlü su jetleri ile soğutulduğunda granül cüruf olarak bilinen ince taneli camsı bir yapı oluşturur. Bir miktar kristalize yapıya sahip olmakla birlikte camsı yapıda olan yapay bir puzolandır (Pal vd. 2003).

Yüksek fırından eriyik halde atık malzeme olarak dışarı atılan cüruf yaklaşık 1500 °C sıcaklıkta olduğundan, cürufun yapı malzemesi olarak kullanımı, soğutulduktan sonra mümkündür. Yüksek fırın cürufunun yaklaşık %95'i veya daha fazlası silika, kalsiyum, magnezyum, alüminyum ve oksijenden oluşmaktadır (Escalante vd. 2001).

Yüksek oranda silis ve alümin içeren ve amorf yapıya sahip olan yüksek fırın cürufları bu özelliklerinden dolayı puzolanik özellik gösterirler ve uygulanan soğutma tekniğine göre değişik yapısal karakteristikler göstermektedirler (Erdoğan 1995). YFC'ye has bir özellik olarak, döküm işlemini takip eden sonraki iki veya dört gün içerisinde betonda yeşile yakın mavi bir rengin oluştuğu gözlemlenir. Bu renk değişimine cürufun içerdiği sülfitle bir araya gelen çimentonun tepkimesi neden olmaktadır. Zamanla meydana gelen bileşen oksitlenmesiyle bu renk ortadan kaybolur. Betonda geçici olarak oluşan bu renk değişiminin mekanik özelliklere olumsuz bir etkisi görülmemiştir (ACI 233R-95 2000).

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun uygun alkali aktivatörlerle birleştirildiğinde çözülmeye girip katılaşması sayesinde çimentosuz harç üretimi yapılabilir. Alkaliler ile aktive edilmiş cürufu harçlarda en yüksek dayanımlar sodyum silikat ile aktive edilmiş harçlarda elde edilmiştir (Bilim 2006).

Türkiye’de YFC vb. endüstriyel atıkların kullanımı yaygınlaştırılmalıdır. YFC kullanılması ile endüstriyel bir atık değerlendirildiği için bu tarz ürünlerin ekonomiye yeniden kazandırılması sağlanmış olacak ve çevreye etkilerinin azaltılıp çevre kirliliği önlenmiş olacaktır. (Topçu ve Canbaz 2007).

YFC’nin ilk kez bağlayıcı olarak kullanılması 1774 yılındadır. YFC, 1889 yılında Paris metrosu inşaatında kullanılmıştır. YFC ilk kez 1892’de Almanya’da, 1896 yılında ABD’de, çimento üretiminde katkı maddesi olarak kullanılmaya başlanmıştır. 1950’li yıllardan sonra betona katkı maddesi olarak eklenmeye başlanmıştır (Ünal ve Güçlüer 2016).

2.3.2 Yüksek Fırın Cürufunun (YFC) Kullanım Alanları

Endüstriyel atık olarak ortaya çıkan YFC inşaat sektöründe yaygın olarak tercih edilen bir malzemedir. YFC, beton veya harç karışımlarında çimento yerine kullanılabilir. YFC içeren ürünlerde erken yaşta düşük ve geç yaşta ise yüksek dayanım olduğu gözlenmiştir. Betonda priz süresini uzatıp su ihtiyacını ve hidrasyon ısısını azalttığı, işlenebilirlikte artışa sebep olduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra YFC’nin sertleşmiş betonda durabilite değerlerini kuvvetlendirdiği bilinmektedir. Ayrıca beton veya harçta puzolanik katkılardan uçucu kül, yüksek fırın cürufu çimento ile birlikte sülfat dayanıklılığını arttırmak için kullanılabilir.

Alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufu harçların, yüksek kuruma büzülmesine sahip olması inşaat malzemesi olarak kullanımını kısıtlayan bir özelliktir. Nano-TiO₂’yi alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufu harçların içerisine ilave ederek, mekanik özellikleri ve kuruma büzülmesini incelenmiş ve deneysel sonuçlar Nano-TiO₂ ilavesinin basınç dayanımını artırdığını, kuruma büzülmesini ise azalttığını göstermektedir (Yang vd. 2015).

2.4 Perlit

Silis esaslı volkanik bir kayaç olan perlit doğal olarak oluşur. Perlit bir mineral olmayıp

asidik özelliğe sahip volkanik camsı yapıda bir kayaç türüdür. Perlit türlerinden bazıları kırıldığı zaman inci parlaklığında küçük küreler elde edildiğinden; perlit ismi inci anlamına gelen "Perle" kelimesinden türetilmiştir (DPT 2001 a).

Perlit kelimesi hem ham perlit ve hem de bunun geliştirilmesiyle elde edilen geliştirilmiş perlit için kullanılmaktadır. Renk ve yapı bakımından perlit türleri farklılık gösterebilmektedir. Ham perlitin rengi saydam açık griden parlak siyaha kadar değişkenlik gösterir. Geliştirilmiş perlit haline geldiğinde ise renk tamamen beyaza döner (DPT 2001 b).

Genleştirilmiş perlit üretimindeki farklı aşamalar yapı endüstrisinde kullanılacak çeşitli atık yan ürünleri sağlayarak sürdürülebilir bir çevreyi destekler (El Mir vd. 2020). Isıyla genleşme özelliği olan genleştiğinde hafif ve gözenekli yapıya sahip bir kayaç türüdür. Perlit bu özelliği ile ısıtıldığında kendi hacminin 20 katına kadar genleşebilir (İnt.Kyn.1).

Hafif agregalar, harçlarda çimento yerine veya çimento ile birlikte kullanılır. Bu agregaları kullanarak ağırlık azaltma, ısı yalıtımı ve yangına dayanıklılık veya işlenebilirlik gibi çeşitli özellikler geliştirilebilmektedir. Bu nedenle, bu özellikleri geliştirmek için geliştirilmiş perlit, gibi birçok hafif malzeme çimento yerine kullanılmaktadır. Harçlarda kullanılan hafif agregalar arasında gözle görülür farklılıklar ve benzerlikler bulunmaktadır. Örneğin harçlardaki geliştirilmiş perlit yoğunluğu iyileştirmekle birlikte sıva kaplama kapasitesini de artırabilmektedir (Torres ve Ruiz 2009).

Perlit tozu veya geliştirilmiş perlit, yapı endüstrisindeki malzemelere ek veya ikame olarak agrega veya çimentolu malzemelerle birlikte kullanılabilir. Ham perlit, farklı tane boyutlarında üretildiğinden yüksek miktarda atık perlit tozu ortaya çıkar. Tane boyutu dağılımı nedeniyle bu tür atıklar dolgu malzemesi olarak kullanıma uygun görülmiştir. Bununla birlikte hem ham perlitin hem de geliştirilmiş perlitin alkali-silika reaksiyonunu baskılayabilen özelliklere sahip olduğunu göstermektedir (El Mir ve Nehme 2017).

Yüksek SiO₂ ve Al₂O₃ içerikleri nedeniyle perlit tozları doğal halde ya da yüksek sıcaklıkta kalsine edilmiş halde olsun beton karışımlarının mukavemetini ve dayanıklılığını artıran puzolanik malzemelerdir (Rashad 2016).

Yapılan çalışmalarda su ihtiyacını azaltmak ve puzolanik aktiviteyi arttırmak için perlitin öğütülmesi gerektiği görülmektedir. Bununla birlikte açık gözenekler ve birbirine bağlı kanallar ile elde edilen iri perlit parçacıklarının karışıma dahil edilmesi malzemenin su emme, geçirgenlik ve klorür göçüne karşı hassasiyetini arttırmaktadır (Jamei vd. 2011).

Perlitin yüksek ikame seviyelerinde karışıma dahil edilmesi, gözenekliliği ve ince gözenekli agregaya benzer şekilde olan su emme kabiliyeti sebebiyle su emme kapasitesini önemli ölçüde arttırmaktadır (Esfandiari ve Loghmani 2019).

Perlit ve uçucu kül içeren geopolimerlerin, sadece perlit içeren geopolimerden çok daha yüksek basınç dayanımı sergilediği gözlemlenmektedir (Taxiarchou vd. 2013). Perlit içeren geopolimerler potasyum bazlı aktivatörlere göre sodyum içeren alkali aktivatörlere duyarlılık göstermektedir (Kozhukhova vd. 2016).

2.4.1 Perlitin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Ham perlit ve genişletilmiş perlitin birbirinden farklı fiziksel özellikleri bulunmaktadır. Ham perlit ve genişletilmiş perlitin fiziksel özellikleri Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2’de verilmektedir (Çiçek 2002). Perlitlere ait genel kimyasal özellikler ise Çizelge 2.3’ de görüldüğü gibidir.

Çizelge 2.1 Ham perlitin fiziksel özellikleri (Çiçek 2002).

Özellikler	Değer
Renk	Siyah ve grinin tonları
Özgül Ağırlık	2,2-2,4
Birim Hacim Ağırlık	950-2700 kg/m ³
Yumuşama Noktası	800 °C-1100 °C
Erime Noktası	1315 °C-1390 °C
Sertlik	5,5-7,0 Mohs
Özgül Isı	0,20-0,23 kcal/kg°C
Su Emme	%20-%35

Çizelge 2.2 Genleştirilmiş perlitin fiziksel özellikleri (Çiçek 2002).

Özellikler	Değer
Renk	Beyaz
Özgül Ağırlık	2,2-2,4
Kaba Yoğunluk	30-190 kg/m ³
Gevşek Yoğunluk	32-400 kg/m ³
Erime Noktası	1300 °C
Isı İletkenlik	0,039-0,046 W/Mk
Özgül Isı	0,20-0,23 kcal/kg°C
Isıl Genleşme	0,004-0,011 mm/m°C

Çizelge 2.3 Perlitin kimyasal özellikleri (DPT 2001 b).

Kompozisyon	Miktar (%)
SiO ₂	71,0-75,0
Al ₂ O ₃	12,5-18,0
Na ₂ O	2,9-4,0
K ₂ O	0,5-5,0
CaO	0,5-2,0
Fe ₂ O ₃	0,1-1,5
MgO	0,02-0,5
TiO ₂	0,03-0,2
H ₂ O	2,0-5,0
MnO ₂ , FeO, Cr	0,0-0,1
Ba	0,0-0,05
PbO	0,0-0,03
NiO, Cu, B, Be	Eser
SO ₃ , Serbest Silis ve klorürler	0,0-0,2

2.4.2 Perlitin Kullanım Alanları

Perlitin yapı malzemesi olarak kullanımı yaygındır. Yapı malzemesi olarak tercih edilen perlit kendine alternatif olan madde ve karışımlara oranla %50 oranında daha hafiftir. Üstelik dayanıklılık bakımından da alternatif ürünlere göre 7 kat daha dayanıklıdır (İnt.Kyn.2).

Perlitin iç boşluğunun fazla olmasından dolayı ısı yalıtımı ve yangına karşı dayanım yönleriyle tercih edilen ve enerji etkinliğini arttırabilen bir malzemedir (Keskin ve Yıldırım 2016).

2.4.2.1 Ham Perlitin Kullanım Alanları

Ham perlitin kimyasal bileşiminde silisli ve alüminli bileşikler bulunur. Kalsiyum esaslı bağlayıcılar ile kimyasal reaksiyona girerek hidrolik aktivite göstermesini sağlar. Ham perlit çimentoya dayanıklılık kazandırdığı için inşaat sektöründe de tercih edilen bir yapı malzemesidir. Ham perlit kayacı kırma, öğütme, eleme işlemleri sonucu kullanılabilir. Ham perlitin, kırılmış öğütülmüş ve tane boyutlarına ayrılmış olarak kullanım alanları değişiklik göstermektedir. Ham perlit asit ve bazlara karşı dayanıklılığından dolayı kanalizasyon borularının üretiminde, dona karşı dayanıklılık gerektiren yerlerde, çatı ve teraslarda su yalıtımı amacıyla, yüzme havuzu yapımında, ısı yalıtımı için sıva olarak, briket gibi hafif yapı elemanı üretiminde, asfalt dolgu malzemesi olarak karayolları yapımında, patinaj kumu olarak demiryollarında, aşındırıcı sanayiinde, su arıtma tesislerinde, dökümhanelerde (metal temizleyici, atık koyulaştırıcı ve silis kaynağı) kullanılmaktadır (DPT 2001 a).

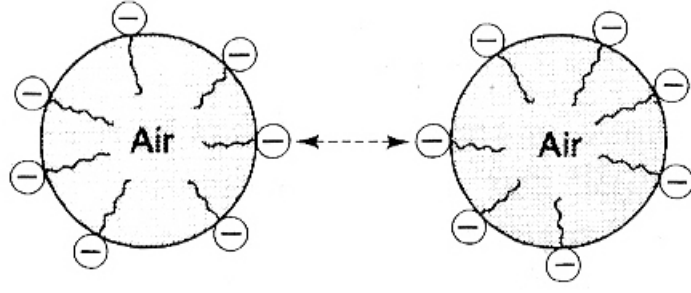
2.4.2.2 Genleştirilmiş Perlitin Kullanım Alanları

Genleştirilmiş perlitin yapı malzemesi olarak tercih edilmesindeki en önemli sebep fiziksel esnekliği, az hacimdeki düşük yoğunluğu, düşük ses geçirgenliği, kimyasal sabitliği ve ateşe karşı dayanıklı olmasıdır. Genleştirilmiş perlit çatı ve zemin yalıtımlarında, sıvalarda, hafif yapı elemanlarında (tavan kiremitleri, boru izolasyonları),

çimento veya alçı bağlayıcı olarak perlit agregalı hafif yalıtım betonu, ısı ve ses yalıtımı için yüzey döşemesi olarak, çimento ve alçı dışındaki bağlayıcılarla yapılan özel amaçlı perlit betonları şeklinde, gevşek dolgu malzemesi olarak, tarla ve seracılık faaliyetlerinde, gıda, ilaç ve kimya sanayiinde, gemi diplerini kaplama ve yalıtımında, ambalajlamada dolgu malzemesi olarak, denizlerdeki petrol ve diğer yağlı atıklardan kaynaklanan su kirliliğini temizlemede, buharlaşma sonucu oluşan su kaybını önlemek için baraj göllerinde, kentlerde, açık su rezervuarlarında, çimentolama işlemini kolaylaştırıcı katkı maddesi olarak, su, petrol ve jeotermal sondajlarda, plastik köpük ve plakalara dolgu ve katkı malzemesi olarak, ucuz ve hafif plastik mobilya yapımında dolgu maddesi olarak, çelik kontrüksiyonlarda yüksek sıcaklığa karşı yalıtım malzemesi olarak kullanılmaktadır (DPT 2001 a).

2.5 Hava Sürükleyici Kimyasal Katkı

Hava sürükleyici katkıları, karışımda, sertleşen betonun ya da harcın içinde bulunan mevcut hava kabarcıklarının eşit ve düzgün bir şekilde dağılmasını sağlamaktadır (Hewlett 2004). Karışım içindeki havanın yüzde miktarı hava sürükleme olarak tanımlanmıştır (Newman ve Choo 2003). Suyun yüzey gerilimini değiştiren yüzey aktif maddelerden biri de hava sürükleyici katkılarıdır. Harç içinde bulunan ve hava-su ara yüzeyine etki eden yüzey aktif maddeler, karıştırma süresi boyunca hava kabarcıklarını çok küçük ve ayrı kabarcıklar şeklinde hapsederler. Yapılarında bulunan hidrofilik yani suyu seven baş kısım suya tutunurken, hidrofobik yani suyu sevmeyen kuyruk kısmı ise hava kabarcıklarını yakalamaktadır. Bu durumda, hava kabarcığının içine kuyrukları ile etki etmeye başlayan yüzey aktif maddelerin yüklü olan kısmı kabarcığın dışında kalmaktadır. Şekil 2.1’de görüldüğü üzere her bir kabarcığın dış yüzeyinde aynı yüklü yapılar bulunur. Komşu kabarcıkların birleşerek daha büyük hale gelmesi aynı yüklerin birbirini itmesi prensibine bağlı olarak engellenmiş olmaktadır (Hewlett 2004).



Şekil 2.1 Hava kabarcıklarının birbirini itmesi mekanizması (Hewlett 2004).

3. MATERYAL ve METOT

3.1 Kullanılan Malzemeler

Harçların üretiminde uçucu kül (UK), yüksek fırın cürufu (YFC), geliştirilmiş perlit (GP), ham perlit (HP), kum, su, hava sürükleyici katkı, alkali çözeltiler sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan yüksek fırın cürufu Bolu Çimento firmasından, ham perlit ve geliştirilmiş perlit İstanbul'da faaliyet gösteren Persan Perlit A.Ş. hava sürükleyici katkı ise SAY Yapı İnşaat Taahhüt Nakliyat TİC. LTD. ŞTİ. firmasından bedelsiz olarak temin edilmiştir.

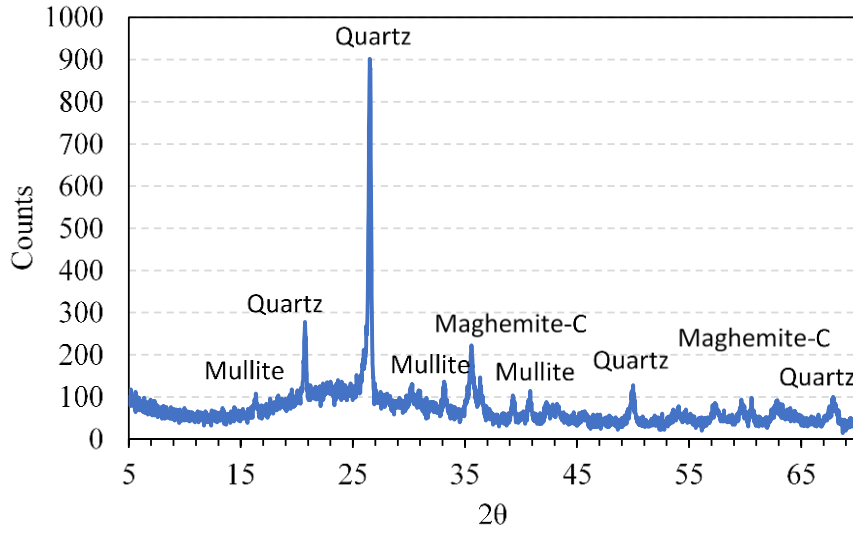
3.1.1 Uçucu Kül (UK)

Çalışmada kullanılan UK, Kütahya Tunçbilek Termik Santrali'ne ait uçucu küldür (Resim 3.1). Gelişen ülkelerde gün geçtikçe enerji tüketimi artmış buna bağlı olarak enerjiye olan ihtiyaç artmaya başlamıştır. Türkiye'deki enerji ihtiyacı ise katı fosil yakıt tüketimi yapılan termik santrallerden sağlanmaktadır. Enerji ihtiyacını karşılayan termik santrallerde yakılan katı fosil yakıtlar sonucu cüruf ve uçucu kül denilen yan ürünler atık olarak açığa çıkmaktadır (Kaplan ve Gültekin 2010). Uçucu küller ise termik santrallerde kömür yakma işleminden sonra ortaya çıkan atık bir yan üründür.

Çalışmada kullanılan uçucu külün Çizelge 3.1'de verilen XRF analizleri sonucuna göre $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ değeri %87'dir. ASTM C618'e (2019) göre $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ değerinin %70'den fazla olması, SO_3 'ün maksimum %5 ve kızdırma kaybının da %6'dan fazla olmaması külün F sınıfı uçucu kül olduğunu göstermektedir. Uçucu külden kütlece $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranı 2,6 dır. Şekil 3.1'de verilen uçucu küle ait XRD difraktogramında kimyasal içerikle örtüşen şekilde kuvars, müllit ve maghemit mineralleri gözlenmiştir.

Çizelge 3.1 Uçucu külünü kimyasal kompozisyonu (Kavasoğlu 2019).

Kompozisyon	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	CaO	Toplam
Ağırlıkça %	55,6	21,3	9,6	4,5	0,2	1,9	0,6	3,1	97,8



Şekil 3.1 Uçucu kül XRD difraktogramı.



Resim 3.1 Uçucu kül.

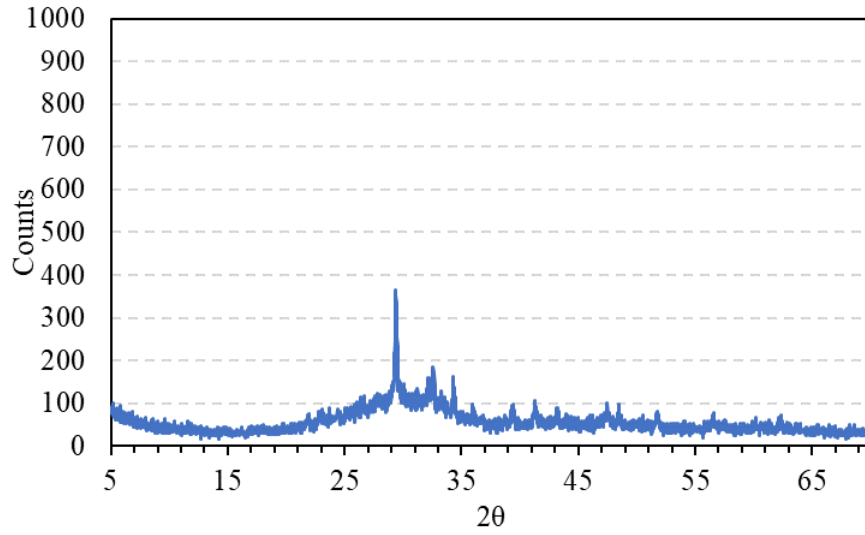
3.1.2 Yüksek Fırın Cürufu (YFC)

Çalışmada kullanılan YFC Resim 3.2’de verilmiştir. Çizelge 3.2’de yüksek fırın cürufuna ait kimyasal kompozisyon verilmiştir. YFC’de %39,8 gibi yüksek CaO’ın yanında %35,6 SiO₂ ve %11,7 Al₂O₃ bulunmaktadır. Yüksek fırın cürufu için kütlece SiO₂/Al₂O₃ oranı 3,0 dır. Şekil 3.2’de yüksek fırın cürufuna ait XRD analizinden elde edilen ana malzemenin fazları görülmektedir. 2θ değerinin 20° ile 40° arasında maksimum değerine

ulaşan yapının amorf yapıya sahip camsı fazda olduğunu göstermektedir.

Çizelge 3.2 Yüksek fırın cürufu kimyasal kompozisyonu.

Kompozisyon	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	CaO	Toplam
Ağırlıkça %	35,6	11,7	0,9	5,2	0,4	1,2	2,2	39,8	97,0



Şekil 3.2 Yüksek fırın cürufu XRD difraktogramı.



Resim 3.2 Yüksek fırın cürufu.

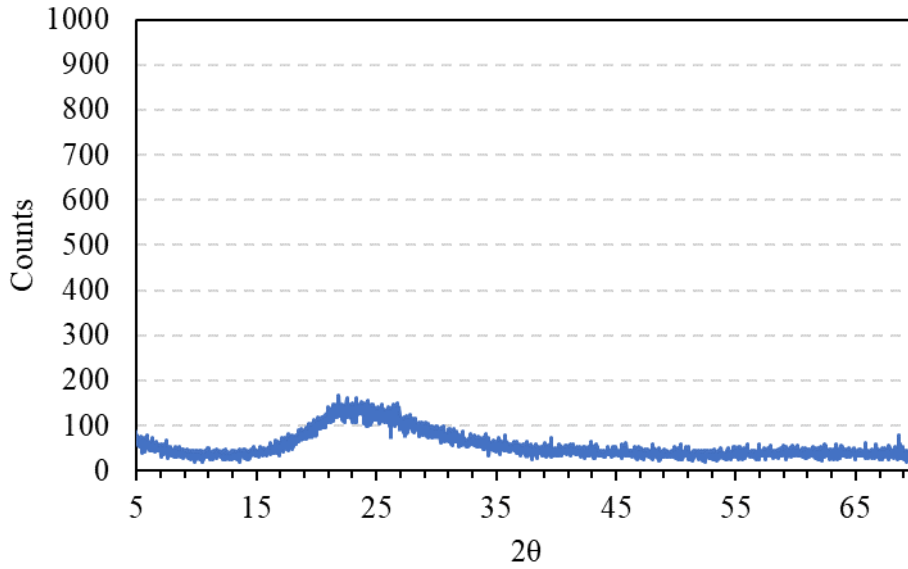
3.1.3 Ham Perlit (HP)

Ham halde olan perlit değirmende öğütölerek 250 µm elek altında kalan malzeme harç

numunelerinde kullanılmıştır (Resim 3.3 ve Resim 3.4). Çizelge 3.3’de öğütülmüş ham perlite ait kimyasal kompozisyon verilmiştir. Buna göre ağırlıkça %75 SiO₂ ve %13,2 de Al₂O₃ bulunmaktadır. CaO ise %0,1 gibi eser miktarda bulunmaktadır. Ham perlit için kütlece SiO₂/Al₂O₃ oranı 5,7 dir. Şekil 3.3’de ham perlite ait XRD difraktogramı incelendiğinde literatürde de belirtildiği gibi (Sadjadi ve Koohestani 2021) 2θ 15°-35° aralığında geniş bir pik sergilemesi perlitin amorf bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Çalışmada kullanılan binder malzemelere ait elek analizi Şekil 3.4’de verilmiştir.

Çizelge 3.3 Ham perlit kimyasal kompozisyonu.

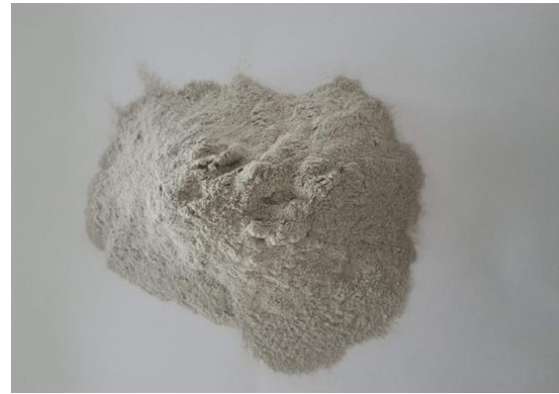
Kompozisyon	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	Toplam
Ağırlıkça %	75,0	13,2	0,2	4,7	2,8	0,1	99,3



Şekil 3.3 Ham perlit XRD difraktogramı.



a)

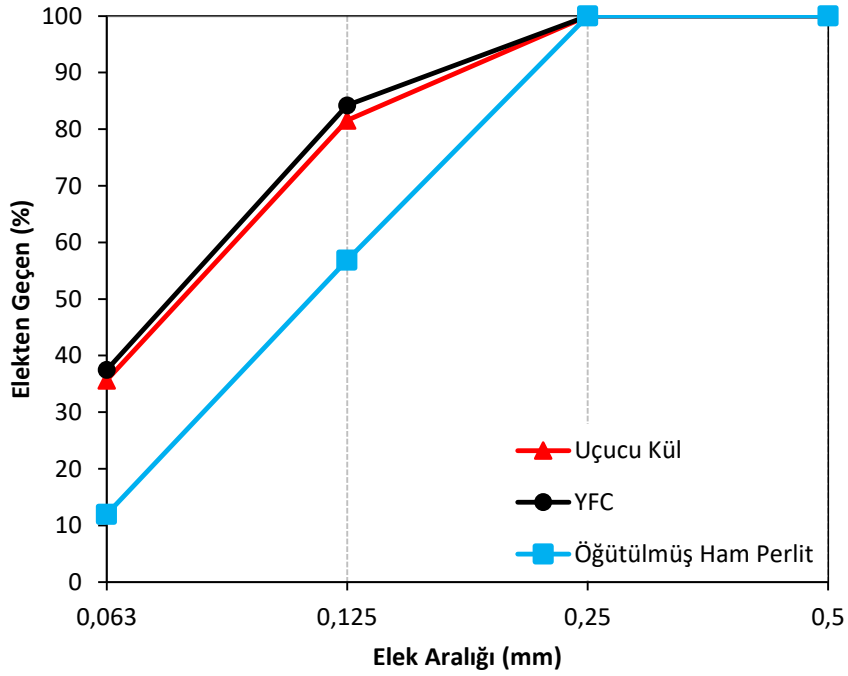


b)

Resim 3.3 Ham perlitin öğütülmemiş ve öğütüldükten sonraki hali.



Resim 3.4 Ham perlitin öğütüldüğü değirmen.



Şekil 3.4 Geopolimer harçlarda kullanılan binderlerin elek analizi.

3.1.4 Genleştirilmiş Perlit (GP)

İri ve ince perlit olarak iki farklı şekilde harç numunelerinde kullanılmıştır (Resim 3.5 ve Resim 3.6). Çizelge 3.4'te genleştirilmiş perlite ait kimyasal kompozisyon verilmiştir. Buna göre ağırlıkça %66,9 SiO₂ ve %14 Al₂O₃ bulunmaktadır.

Çizelge 3.4 Genleştirilmiş iri ve ince perlitin kimyasal analizi.

Kompozisyon	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Ca	MgO	TiO ₂
Ağırlıkça %	66,9	14,0	0,5	1,7	3,7	0,3	0,04	0,03



Resim 3.5 Genleştirilmiş iri perlit.



Resim 3.6 Genleştirilmiş ince perlit.

3.1.5 Kum

Bu çalışmada Resim 3.7’de verilen kırma kum kullanılmıştır. Kullanılan kum tane boyutu analizine göre göre 4 mm’lik elekten %100’ü geçmiş ve harçta kullanılmıştır.



Resim 3.7 Kum.

3.1.6 Alkali Aktivatörler

Geopolimer harç üretiminde alkali çözelti olarak tercih edilen malzemeler sodyum metasilikat ve sodyum hidroksittir (Resim 3.8). Bu çalışmada da geopolimer harçların aktivasyonu için alkali aktivatör olarak NaOH (SH) ve Na₂SiO₃ (SS) kullanılmıştır. Alkali aktivatörler 1:2 oranında kullanılmıştır. Sodyum silikat solüsyonu cam suyu olarak bilinir ve jel formunda kullanılır. Çizelge 3.5’de alkali aktivatörlerin kimyasal içerikleri verilmiştir.

Çizelge 3.5 Alkali aktivatörlerin kimyasal içerikleri.

Sodyum silikat solüsyonu (cam suyu)	Sodyum hidroksit çözeltisi (NaOH)
Na ₂ O: 7,5–8,5 %	10 M, 15 M
SiO ₂ : 25,5–28,5 %	M: 40 g/mol
Yoğunluk (20 °C) 1,296-1,396 g/ml	Yoğunluk (20 °C) 2,13 g/cm ³
Fe ≤ 0,05 %	NaOH ≥ %98,0
Ağır metaller: (as Pb) ≤ 0,005 %	Na ₂ CO ₃ < %0,5



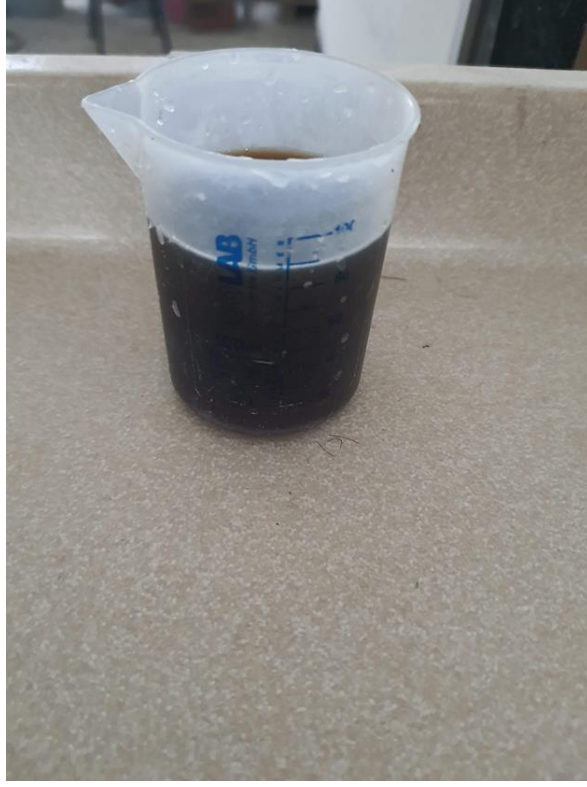
Resim 3.8 Harç üretiminde kullanılan alkali aktivatörler.

3.1.7 Hava Sürükleyici Kimyasal Katkı

TS EN 934-2'ye (2002) göre hava sürükleyici katkının özellikleri Çizelge 3.6'da verilmiştir (Resim 3.9).

Çizelge 3.6 Hava sürükleyici katkı özellikleri.

Özellikler	Ayrışma	Renk	Bağıl yoğunluk (g/cm ³)	Ph değeri	Klorür içeriği (%)
Analiz Sonuçları	Yok	Kahverengi	1,085±0,02	5,74	<0,1 (ağırlıkça)



Resim 3.9 Harç üretiminde kullanılan hava sürükleyici katkı.

3.2 Hammaddelere Uygulanan Analizler

Harç yapımında kullanılan malzemelere kimyasal, mineralojik ve tane boyut analizleri yapılmıştır. Malzemelerin mineralojik analizi Bruker Marka D8 Advance (a) Model cihazında XRD yöntemiyle yapılmıştır. Malzemelerin kimyasal analizleri Rigaku ZSX Primus (b) cihazında XRF yöntemi ile ve tane boyut analizleri ise Malvern Mastersizer 2000 (c) cihazında yapılmıştır.



a)



b)



(c)

Resim 3.10 Bruker D8 Advance (a), Rigaku ZSX Primus.(b), Malvern Mastersizer 2000 (c).

3.3 Harçların Hazırlanması

10 M ve 15 M hava sürükleyici katkı ve katkısız numunelerden toplam 36 seri üretilmiştir. Deneme üretimi yapılırken ilk olarak %100 perlit denenmiş ve geopolimerizasyon durumu değerlendirilmiştir. Harç karışımlarının bağlayıcı olarak ham perlit ve YFC'nin ikame edilerek hazırlanması tasarlanmıştır; fakat numuneler üzerinde

meydana gelen kontrolsüz çatlamaların önüne geçmek için sisteme UK da eklenmiştir. Hazırlanan harç karışımları 50 bar basınç ile 50 mm çap ve 50 mm yüksekliğe sahip silindir şeklinde üretilmiştir (Resim 3.11-3.14). Kalıptan çıkarılan numuneler 24 saat boyunca 85 °C’de etüvde kür edilmiştir. Etüv kürünün ardından numuneler 7, 28 ve 56 gün boyunca laboratuvar koşullarında bekletilmiştir. Donma-çözülmeden çıkan numuneler ve donma-çözülmeye hiç girmeyen numuneler gerekli testlere tabi tutulmuştur.



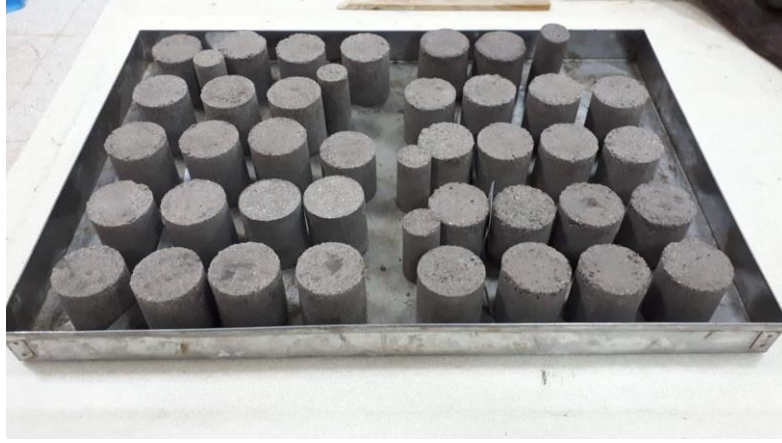
Resim 3.11 Karışımın yapıldığı mikser.



Resim 3.12 Harç üretimi yapılan pres.



Resim 3.13 Silindir numune kalıbı.



Resim 3.14 Silindirik formda dökülen harç numunelerinden bir örnek.

Çizelge 3.7 Hacimce geopolimer harç karışımlarındaki bağlayıcı ve agrega oranları (%).

Etiket	Bağlayıcı			Toplam Genleştirilmiş Perlit (GP ₁ +GP ₂)	Agrega		Kum
	Ham Perlit	UK	YFC		GP ₁	GP ₂	
75/75	75	12,5	12,5	75	37,5	37,5	25
50/75	50	25	25	75	37,5	37,5	25
25/75	25	37,5	37,5	75	37,5	37,5	25
75/50	75	12,5	12,5	50	25	25	50
50/50	50	25	25	50	25	25	50
25/50	25	37,5	37,5	50	25	25	50
75/25	75	12,5	12,5	25	12,5	12,5	75
50/25	50	25	25	25	12,5	12,5	75
25/25	25	37,5	37,5	25	12,5	12,5	75

Çizelge 3.7'ye göre karışım oranları verilen serilerden 10 M ve 15 M NaOH mol değerine göre, hava sürükleyici katkılı ve katkısız olarak üretilmiştir. Etiketlendirme % olarak bağlayıcı içindeki ham perlit oranı ve agregadaki toplam genleştirilmiş perlit oranları 75/75 (%75 bağlayıcıdaki ham perlit, %75 agregadaki genleştirilmiş perlit) şeklinde yazılmıştır. Bağlayıcı olarak farklı oranlarda ham perlit, ham perlitten kalan miktar % 100 e tamamlanacak şekilde eşit oranlarda UK ve YFC kullanılmıştır. Agregada olarak genleştirilmiş iri ve ince perlit, kum kullanılmıştır. Agregadaki toplam genleştirilmiş perlit miktarı%50 iri, %50 inceden oluşmakta kalan miktara %100 e tamamlanacak şekilde kum eklenmiştir.

Çizelge 3.8'deki 9 farklı karışım oranında 10M ve 15M için hava sürükleyici katkılı ve hava sürükleyici katkısız olarak toplam 36 seri halinde üretilmiş ve çalışmalar bu seriler üzerinde yürütülmüştür. Bağlayıcı olarak ham perlit ve eşit miktarlarda UK ve YFC kullanılmıştır. Agrega olarak kullanılan malzemelerden kumun yoğunluğu $2,6 \text{ gr/cm}^3$, genleştirilmiş ince perlitin $0,14 \text{ gr/cm}^3$, genleştirilmiş iri perlitin ise $0,78 \text{ gr/cm}^3$ 'tür. Hava sürükleyici katkı ağırlıkça % 0,45 olarak kullanılmıştır. Likit olarak SS ve SH kullanılmıştır. Karışımdaki SS/SH oranı 1:2'dir. Likit/bağlayıcı oranı ise 0,5'tir.

Çizelge 3.8 1 m^3 harç için ağırlıkça malzeme miktarları.

Seri	Ham Perlit (kg)	UK (kg)	YFC (kg)	İnce Perlit (kg)	Kaba Perlit (kg)	Kum (kg)	SS (l)	SH (l)	İlave Su (l)	Katkı (l)	
1	75/75	337,5	56,3	56,3	27	153	337	75	150	311,3	2,03
2	50/75	225	112,5	112,5	27	153	337	75	150	311,3	2,03
3	25/75	112,5	168,8	168,8	27	153	337	75	150	311,3	2,03
4	75/50	337,5	56,3	56,3	18	102	674	75	150	207,6	2,03
5	50/50	225	112,5	112,5	18	102	674	75	150	207,6	2,03
6	25/50	112,5	168,8	168,8	18	102	674	75	150	207,6	2,03
7	75/25	337,5	56,3	56,3	9	51	1011	75	150	103,8	2,03
8	50/25	225	112,5	112,5	9	51	1011	75	150	103,8	2,03
9	25/25	112,5	168,8	168,8	9	51	1011	75	150	103,8	2,03

Genleştirilmiş perlit agregası kuru olduğundan su emme durumu göz önüne alınarak ince ve kaba perlit, ilave su eklemek suretiyle yüzey kuru suya doymun hale getirilmiş ve bu haliyle harç karışımı içinde kullanılmıştır.

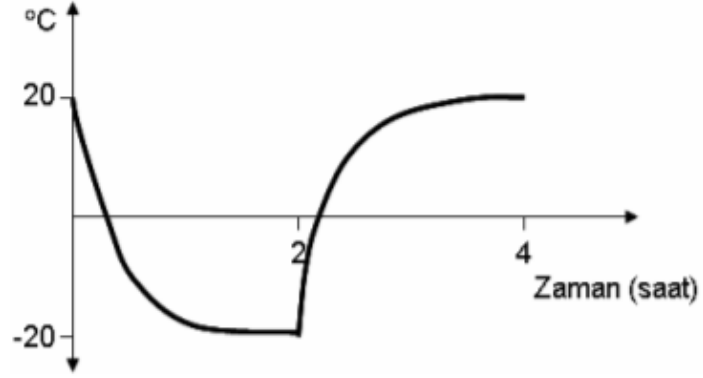
3.4 Fiziksel ve Mekanik Deneyler

Deneylerde 7, 28 ve 56 günlük harç numuneleri kullanılmıştır. Harçların mekanik özellikleri TS EN 196-1'e (2002) göre belirlenmiştir .

3.4.1 Donma-Çözülme Deneyi

Donma-çözülme deneyi 7, 28 ve 56 gün laboratuvar koşullarında bekleyen harç numunelerine uygulanmıştır. Bir döngü olarak $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 4 saat donma işleminden sonra numuneler 4 saat su içerisinde bekletilerek çözümleri sağlanmıştır. Bu şekilde 20 döngü

tamamlanmıştır. Her bir harç numunesine uygulanan donma-çözülme işlemleri sonrasında fiziksel ve mekanik değerler belirlenmiştir (Resim 3.15 ve Resim 3.16).



Şekil 3.5 Donma-çözülme çevrimlerinde sıcaklık zaman grafiği (Altındağ ve Güney 2006).



Resim 3.15 Donma-çözölmeye tabi tutulan silindir harç numuneleri.



Resim 3.16 Donma-çözölmeye tabi tutulan suda bekleyen silindir harç numuneleri.

3.4.2 Basınç Mukavemeti Deneyi

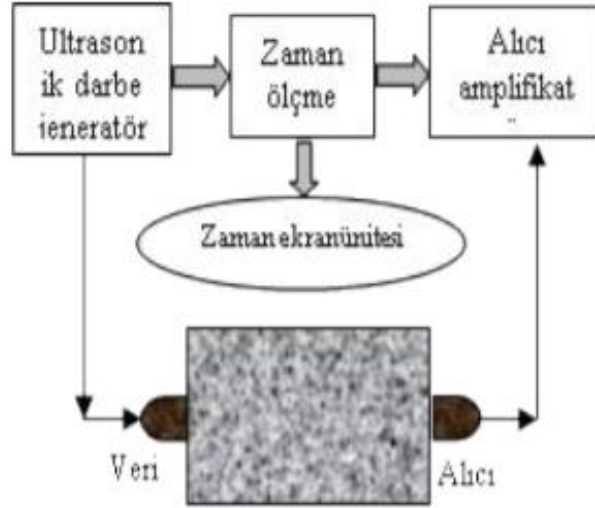
Donma-çözölmeden sağlam çıkan numuneler ve donma-çözölmeye hiç girmeyen numunelere basınç dayanım testi yapılmıştır (Resim 3.17). Basınç dayanımı deneyinde 50 mm çap ve 50 mm yükseklikteki silindirik harç numuneleri kullanılmıştır. Basınç dayanım testi yapılmadan önce numunelerin ağırlığı, en ve boyları tek tek ölçölmüştür. Gerilme artışı 0,5 MPa/sn olacak şekilde sabit bir hızda sürekli ve darbesiz olarak numune kırılıncaya kadar basınç uygulanmaya devam etmiştir. Basınç uygulanması sonucu kırılan numunelerin maksimum değerleri kaydedilmiştir.



Resim 3.17 Basınç dayanım testine tabi tutulan silindir harç numuneleri.

3.4.3 Ultrases Geçiş Hızı Deneyi

Ultrases geçiş hızı deneyinde, numuneye iletilen ses dalgalarının bir taraftan diğer bir tarafa geçiş süresi ölçülerek dalga hızı hesaplanmaktadır. Geopolimer harç numunelerinin ultrasonik ses geçiş hızı testleri ASTM C597'e (2003) göre yapılmıştır (Resim 3.18 ve Resim 3.19). Propların numune yüzeyine temasının tam olarak gerçekleşmesi için propların yüzeyine jel malzeme sürülmüştür. Proplar numune yüzeyine karşılıklı olarak hafifçe bastırılarak yerleştirilmiştir. Ekranda değer sabitlendikten sonra ses geçiş hızı μs olarak kaydedilmiştir. Şekil 3.6'da ultrases cihazının çalışma prensibi verilmiştir.



Şekil 3.6 Ultrases cihazı çalışma mekanizması (Abdullah vd. 2016).



Resim 3.18 Ultrases geçiş hızı ölçüm cihazı.



Resim 3.19 Silindir numunede ultrases deneyi.

3.4.4 Birim Hacim Ağırlık Deneyi

Bir cismin birim hacim ağırlığı, kuru numune kütesinin görünür hacmine oranı olarak ifade edilmektedir. Görünür hacim ise numunenin boşluklarının da dâhil olduğu dış yüzeyiyle sınırlı olan hacmi olarak tanımlanmıştır (TS EN 1936 2010). Numunelerin birim ağırlık özelliklerinin belirlenmesinde 50 mm çap ve 50 mm yükseklikteki silindir numuneler kullanılmıştır. Numuneler 105 °C sıcaklıkta bir gün boyunca etüvde kurutulduktan sonra ağırlıkları ölçülmüştür. Numunelerin etüv kurusu, suya doymun kuru yüzey ve Arşimet terazisi kullanılarak su içindeki ağırlıkları hassas terazi ile belirlenmiştir. Bulunan ağırlıklar numunelerin hacimlerine bölünerek birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir.

$$\text{Birim Ağırlık} = \frac{W_1}{W_1 - W_3} \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (3.1)$$

W_1 = Etüv kurusu ağırlık (g)

W_2 = Doymun kuru yüzey ağırlık (g)

W_3 = Su içindeki ağırlık (g)

3.4.5 Su Emme Deneyi

Su emme deneyinden önce numuneler 85 °C’de sabit kütleye ulaşınca kadar 24 saat etüvde kurutulur. Sabit kütleye ulaştığı kabul edilen numuneler soğuduktan sonra kuru ağırlıkları ölçülür. Numuneler oda sıcaklığında bulunan su dolu kaba yerleştirilir. Numunelerin bütün yüzeyleri su ile temas ettirilmelidir. Numuneler 24 saat suda bekledikten sonra tartılır. Daha sonra sudan çıkarılarak yüzeylerinde bulunan su bir havlu yardımıyla alınır. Suya doymun halde olan numuneler tartılır. Su emme kapasitesi malzemeye giren su miktarının, malzemenin kuru ağırlığına bölünmesiyle hesaplanmakta ve % olarak ifade edilmektedir.

$$A_b = \frac{W_2 - W_1}{W_1 - W_3} \times 100 \quad (3.2)$$

$$A_h = \frac{W_2 - W_1}{W_2 - W_3} \times 100 \quad (3.3)$$

A_b = Ağırlıkça su emme yüzdesi

A_h = Hacimce su emme yüzdesi

W_1 = Etüv kuru ağırlık (g)

W_2 = Doymun kuru yüzey ağırlık (g)

W_3 = Su içindeki ağırlık (g)

$W_2 - W_1$ = Açık gözeneklerin hacmi (g)

$W_2 - W_3$ = Görünür hacim (g)

3.4.6 Görünen Porozite

Malzemedeki gözenekliliğe porozite (P) denir. Kür süresi biten numuneler, kür havuzundan çıkarılarak TS EN 772-4'e (2000) uygun olarak porozite deneyine tabi tutulmuştur. Bu örneklerin kuru ağırlığı (W_1), doymun ağırlığı (W_2) ve su içindeki ağırlığı (W_3) şeklindedir.

$$P = \frac{W_2 - W_1}{W_2 - W_3} \times 100 \quad (3.4)$$

3.4.7 Görünür Yoğunluk

Numunelerin su içindeki ağırlıkları belirlenir (W_3). Sudan çıkarılan numunelerin yüzey ıslaklığı alınarak, suya doymun ağırlıkları (Resim 3.20) bulunur (W_2). Son olarak bir gün boyunca etüvde kurutulan numunelerin (Resim 3.21) ağırlıkları tamamlanır (W_1) ve aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$\text{Görünür Yoğunluk} = \frac{W_1}{W_1 - W_3} \quad (3.5)$$



Resim 3.20 Yüzev kuru suya dovgun ağırlık.



Resim 3.21 Etüv kuru ağırlık için etüvde bekletilen harç numuneleri.

3.5 SEM Analizleri

Çalışmada üretilen harç numunelerinden elde edilen örnekler, Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezine götürülerek Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizleri yapılmıştır. Numunelerin SEM analizleri için LEO marka 1430 VP model SEM cihazı kullanılmıştır (Resim 3.22).



Resim 3.22 SEM cihazı.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Çalışmada farklı karışım oranlarında üretilen numunelerin birim hacim ağırlık, görünür yoğunluk, su emme, görünen porozite, basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı gibi fiziksel ve mekanik özelliklerine ilişkin veriler ve mikro yapı incelemeleri bu bölümde sunulmuştur.

4.1 Geopolimer Harçlarda Deneme Dökümü

Ham perlitin bağlayıcı olarak kullanılabilirliğinin test edilmesi için 10 M, %100 ham perlit, kırma kum agregalı geopolimer harç numuneleri 50x50x50 mm ölçülerinde küp şeklinde üretilmiş ve ortalama 5,1 MPa basınç dayanımları elde edilmiştir. Deneme dökümlerinde ham perlit ile beraber YFC farklı oranlarda ikame edilerek 40x40x160 mm ölçülerinde prizmatik olarak üretilmiş ve 2,4 ile 23,5 MPa arasında basınç dayanımları, 0,7 ile 2,0 MPa arasında eğilme dayanımları gözlenmiştir (Resim 4.1 ve Resim 4.2). Ancak numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra direkt çatlamaya maruz kalmıştır. Deneme dökümleri istenen sonucu vermeyince perlit, YFC ve UK karışımlı harçlar hazırlanmıştır.



Resim 4.1 Dökümü yapılan harç numuneleri.



Resim 4.2 Kalıptan çıkarılan ham perlit-YFC harç numuneleri.

4.2 Geopolimer Harçların Fiziksel Özellikleri

4.2.1 Görünen Porozite (%)

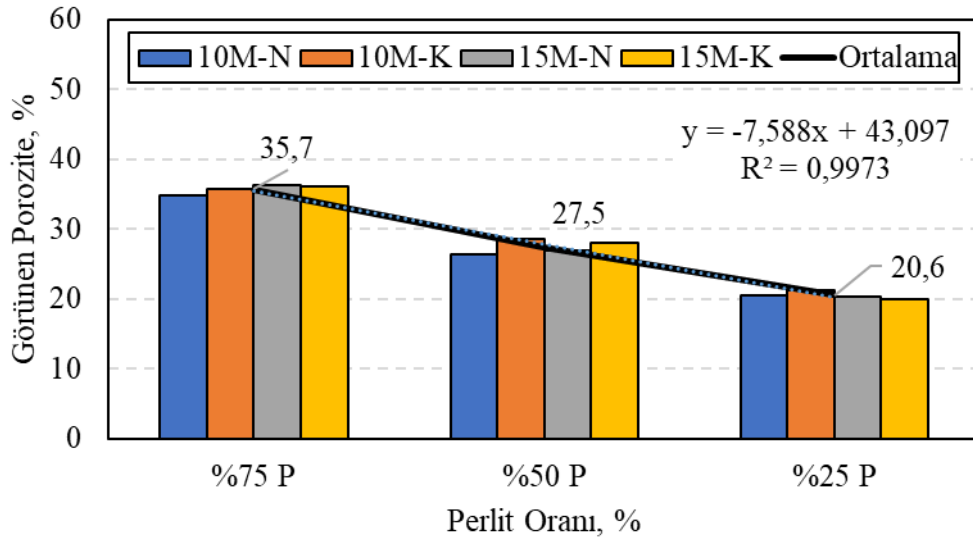
Üretilen harç numunelerinden elde edilen verilere göre görünen porozite (%) değerleri incelendiğinde perlit oranı azaldıkça azalmıştır (Duxon vd. 2007). Görünen porozite; %75 perlit içeren numunelerde ortalama %35,7, %50 perlit içeren numunelerde ortalama %27,5, %25 perlit içeren numunelerde ise ortalama %20,6 değerleri elde edilmiştir (Şekil 4.1).

Bağlayıcı/agrega perlit oranı değişen harç numunelerinde perlitin oranı azaldıkça, görünen porozite (%) değerleri azalma göstermiştir. 10 M katkısız harç numuneleri için maksimum değer 7 günlük 25/75 bağlayıcı/agrega perlit oranında %37,8 olarak elde edilmiştir (Şekil 4.2). 15 M katkısız harç numuneleri için maksimum değer ise 7 günlük 25/75 bağlayıcı/agrega perlit oranında %38,7 olarak elde edilmiştir (Şekil 4.3).

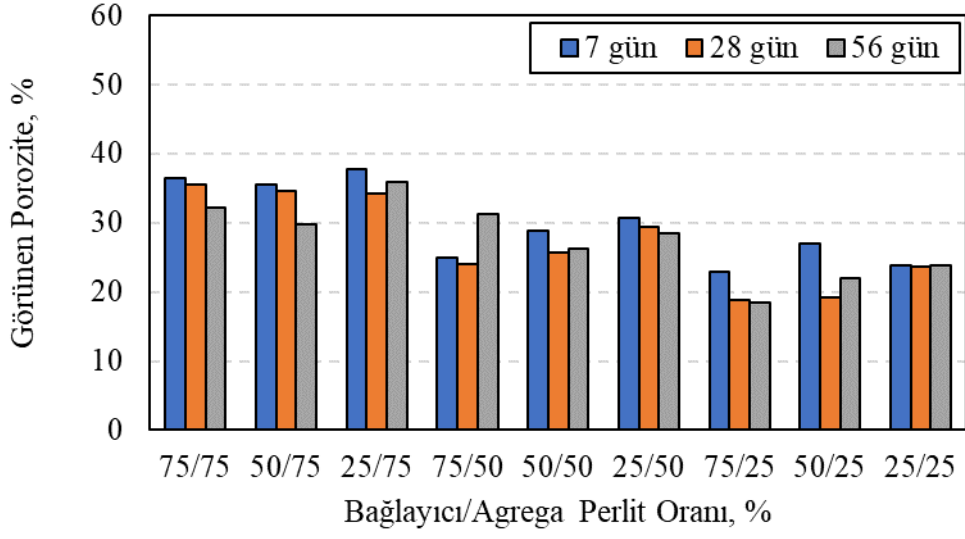
10 M katkılı harç numuneleri için maksimum değer 7 günlük 25/75 bağlayıcı/agrega perlit oranında %54,3 olarak elde edilmiştir (Şekil 4.4). 15 M katkılı harç numuneleri için maksimum değer ise 7 günlük 75/75 bağlayıcı/agrega perlit oranında %44,6 olarak elde

edilmiştir (Şekil 4.5).

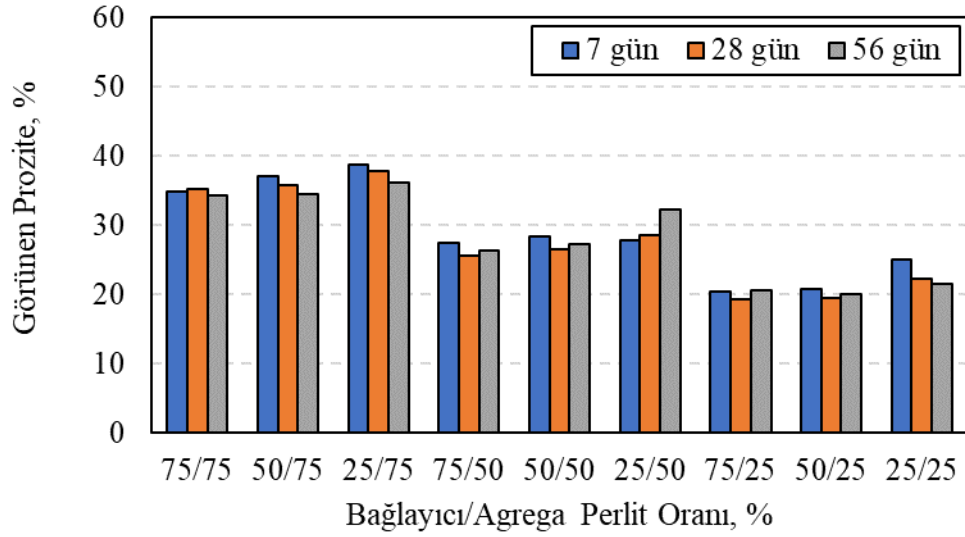
7 günlük katkısız numune örneklerinde görünen porozite (%) değerlerinde %75 perlit içeren numunelerde molarite artışı ile artış görülmüştür. Ancak %50 ve %25 perlit içeren numunelerde durum tam tersidir (Şekil 4.6). 7 günlük katkılı numune örneklerinde ise görünen porozite (%) değerlerinin molarite azaldıkça ve perlit oranının artmasına bağlı olarak artış gözlemlenmiştir. 28 günlük katkısız numune örneklerinde görünen porozite (%) değerlerinde %75 ve %50 oranında perlit içeren numunelerde molarite artışı ve perlit oranının artmasına bağlı olarak artış gözlemlenmiştir. Ancak %25 perlit içeren numunelerde ise molarite ve perlit oranının azalmasına bağlı azalma gözlemlenmiştir (Şekil 4.7) 28 günlük katkılı numune örneklerinde %75 perlit içeren numunelerde 15 M için görünen porozite (%) değeri daha yüksektir. %50 ve %25 perlit içeren numunelerde ise 10 M ve perlit oranı yüksek olan değerlerde görünen porozite (%) değeri daha yüksektir. 56 günlük katkısız numune örneklerinde %75 perlit içeren numunelerde 15 M için görünen porozite (%) değeri daha yüksektir. Ancak %50 ve %25 perlit içeren numunelerde 10 M için görünen porozite (%) değeri daha yüksektir (Şekil 4.7). 56 günlük katkılı numune örneklerinde ise 15 M için ve %75 oranında perlit içeren numunelerde görünen porozite (%) değeri daha yüksektir. Perlit oranı ve molarite artışı görünen porozite (%) değerini arttırmıştır.



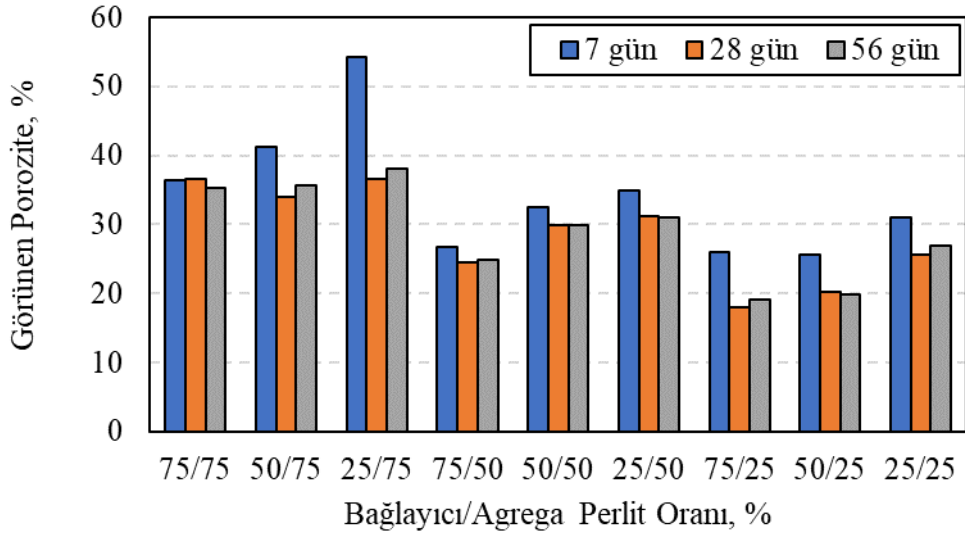
Şekil 4.1 Perlit oranına göre görünen porozite (%) değişimi.



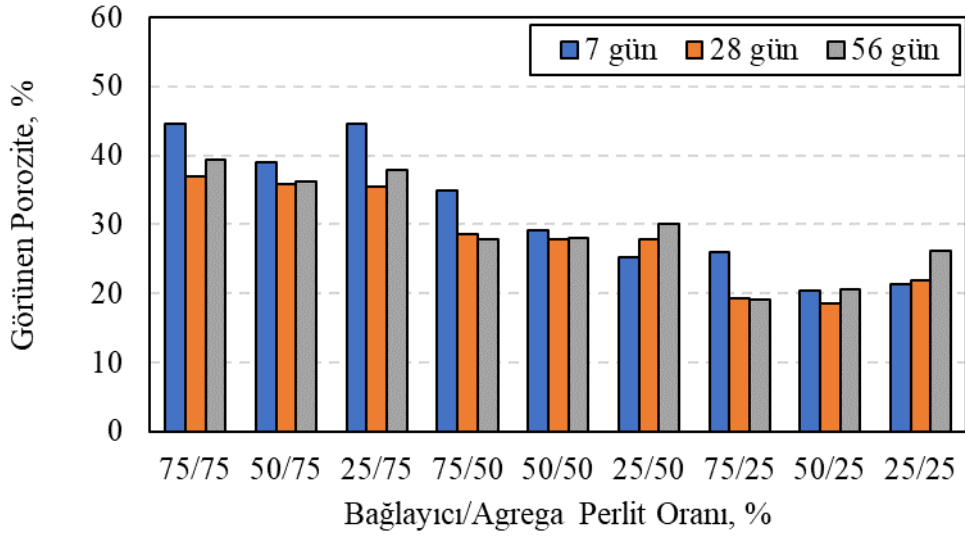
Şekil 4.2 10 M Katkısız geopolimer harçların görünen porozite oranları.



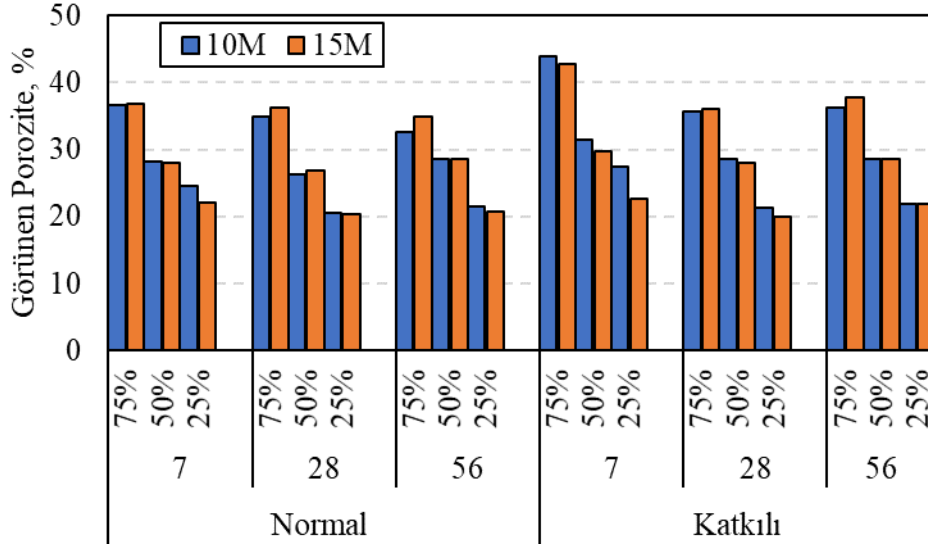
Şekil 4.3 15 M Katkısız geopolimer harçların görünen porozite oranları.



Şekil 4.4 10 M Katkılı geopolimer harçların görünen porozite oranları.

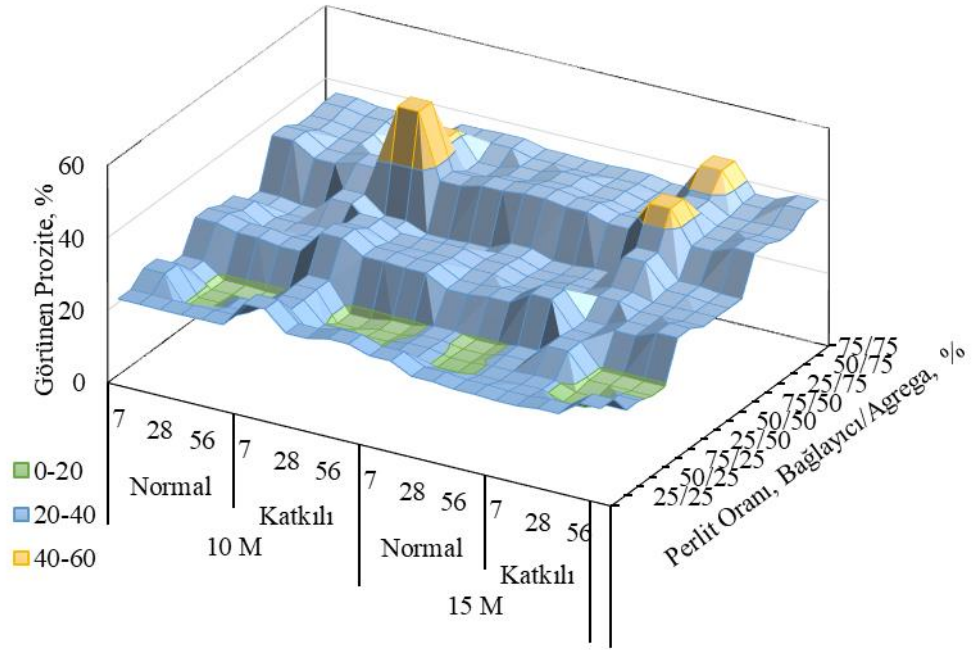


Şekil 4.5 15 M Katkılı geopolimer harçların görünen porozite oranları.

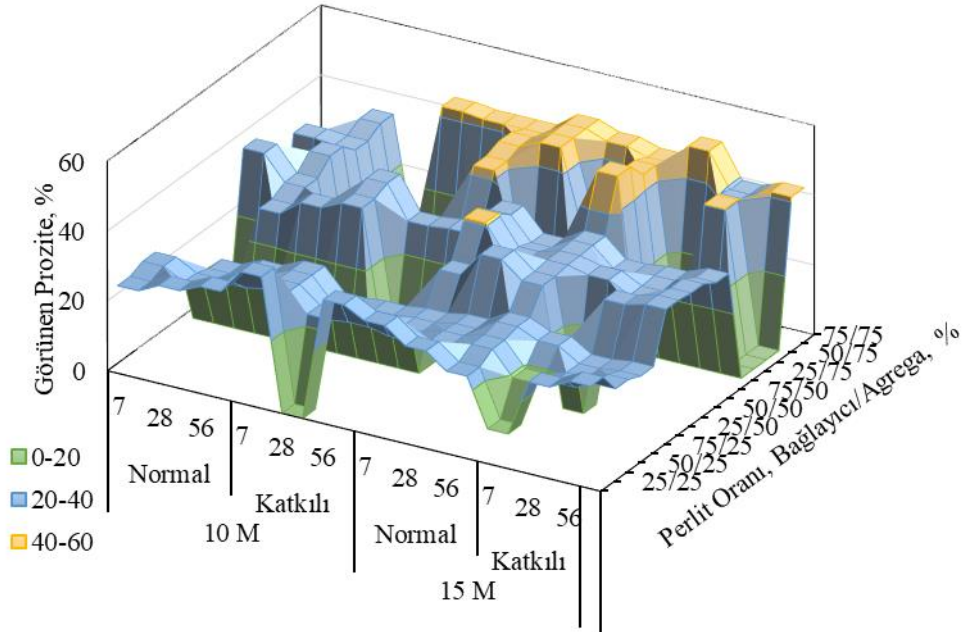


Şekil 4.6 Harç yaşının katkısız ve katkılı serilerde görünen porozite (%) etkisi.

Donma-çözülme öncesinde numunelerin görünen porozite (%) oranı perlit oranının azalmasına bağlı olarak azalma göstermiştir. 10 M katkısız ve katkılı seriler için 7 günlük numunelerde görünen porozite (%) oranı daha yüksektir. 15 M katkısız seriler için 28 günlük numunelerin görünen porozite (%) oranı düşükken 7 ve 56 günlük numunelerde görünen porozite (%) oranının daha yüksek değerlerde olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.7). Katkısız ve katkılı serilerde bariz bir farklılık olmamıştır. Donma-çözülme sonrasında ise bazı serilerin donma-çözülme döngüsünü tamamlayamadıkları görülmüştür. Donma-çözülme sonrasında numunelerin görünen porozite (%) oranı donma-çözülme öncesine göre azalma gözlenmiştir (Şekil 4.8).



Şekil 4.7 Harç yaşının ve bağlayıcı/agrega oranının katkısız ve katkılı serilerde görünen porozite (%) etkisi.



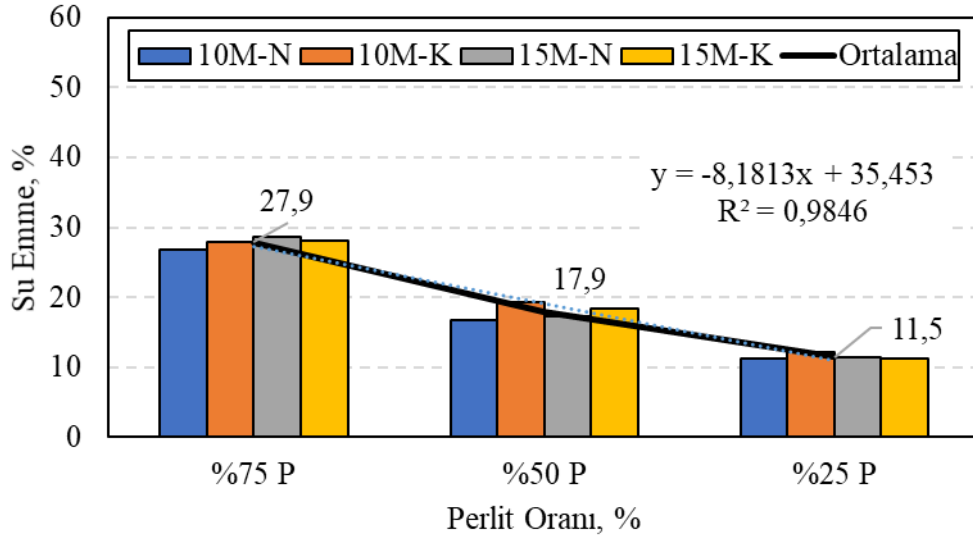
Şekil 4.8 Donma-çözülme sonrası harç yaşının ve bağlayıcı/agrega oranının katkısız ve katkılı serilerde görünen porozite (%) etkisi.

4.2.2 Su Emme (%)

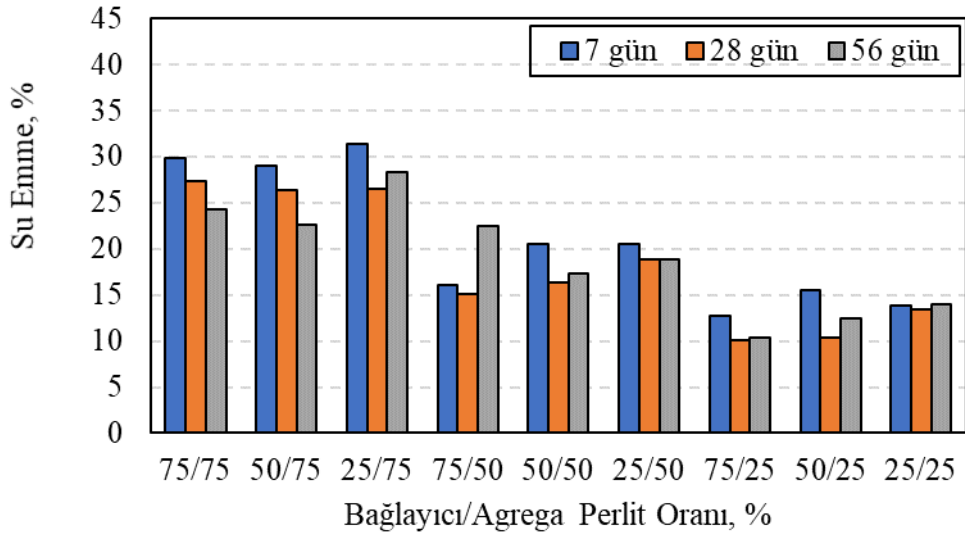
Üretilen harç numunelerinden elde edilen verilere göre su emme (%) değerleri incelendiğinde perlit oranı azaldıkça azalmıştır (Şengül vd. 2011), (Şanlıtürk 2019). Su emme; %75 perlit içeren numunelerde ortalama %27,9, %50 perlit içeren numunelerde ortalama %17,9, %25 perlit içeren numunelerde ise ortalama %11,5 değerleri elde edilmiştir (Şekil 4.9). Bağlayıcı/agrega perlit oranı değişen harç numunelerinde perlitin oranı azaldıkça, su emme (%) değerleri azalma göstermiştir. 10 M katkısız harç numuneleri için maksimum değer 7 günlük 25/75 bağlayıcı/agrega perlit oranında % 31,4 olarak elde edilmiştir (Şekil 4.10). 15 M katkısız harç numuneleri için maksimum değer ise 28 günlük 25/75 bağlayıcı/agrega perlit oranında % 30.8 olarak elde edilmiştir (Şekil 4.11).

10 M katkılı harç numuneleri için maksimum değer 7 günlük 25/75 bağlayıcı/agrega perlit oranında %42,1 olarak elde edilmiştir (Şekil 4.12). 15 M katkılı harç numuneleri için maksimum değer ise 56 günlük 75/75 bağlayıcı/agrega perlit oranında %34,9 olarak elde edilmiştir (Şekil 4.13).

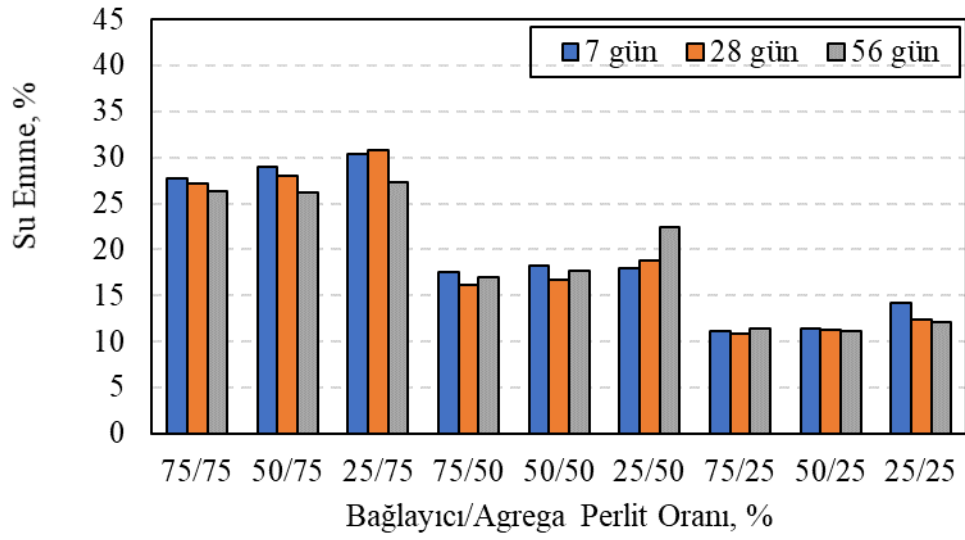
7 günlük katkısız numune örneklerinde su emme (%) değerlerinde molarite artışı ve perlit oranının azalmasına bağlı olarak azalma gözlemlenmiştir (Şekil 4.14). 7 günlük katkılı numune örneklerinde ise su emme (%) değerleri %75 perlit içeren numunelerde düşük molaritede daha yüksek iken %50 ve %25 perlit içeren numunelerde bu durumun tam tersi olduğu gözlemlenmiştir. 28 günlük katkısız numune örneklerinde su emme (%) değerlerinde molarite artışı ve perlit oranının azalmasına bağlı olarak artış gözlemlenmiştir (Şekil 4.14). 28 günlük katkılı numune örneklerinde su emme (%) değerlerinde %75 perlit içeren numunelerde yüksek molaritede su emme (%) daha yüksek iken %50 ve %25 perlit içeren numunede bu durum tam tersidir. 56 günlük katkısız numune örneklerinde su emme (%) değerlerinde %75 perlit içeren numunelerde yüksek molaritede su emme (%) daha yüksek iken %50 ve %25 perlit içeren numunede bu durum tam tersidir (Şekil 4.14). 56 günlük katkılı numune örneklerinde su emme (%) değerlerinde %75 ve %50 perlit içeren numunelerde yüksek molaritede su emme (%) daha yüksek iken %25 perlit içeren numunede bu durum tam tersidir (Gökçe vd. 2010).



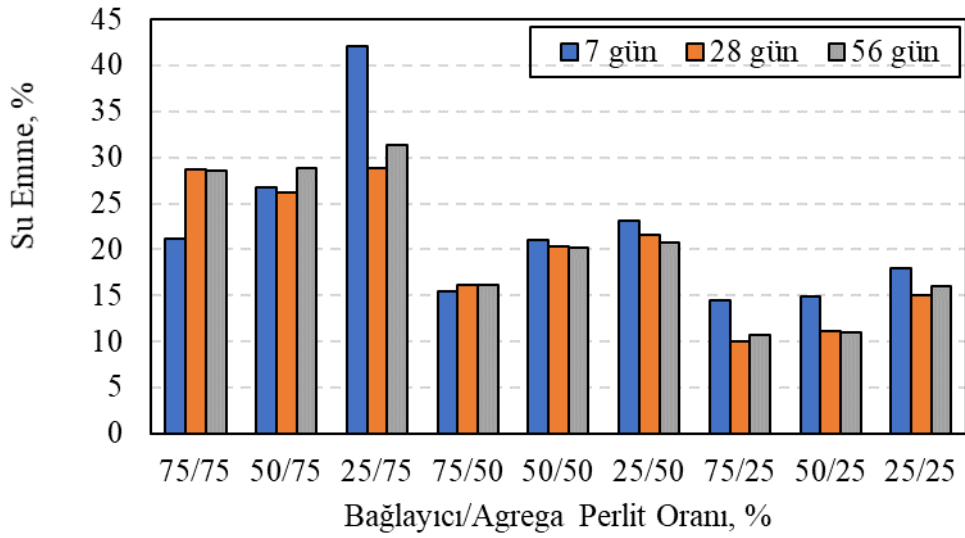
Şekil 4.9 Perlit oranına göre su emme (%) değişimi.



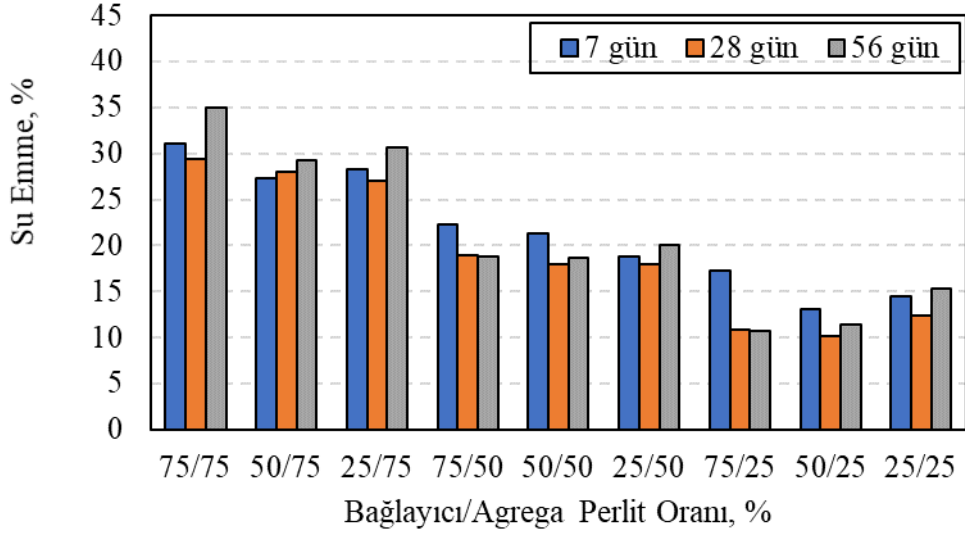
Şekil 4.10 10 M Katkısız geopolimer harçların su emme oranları.



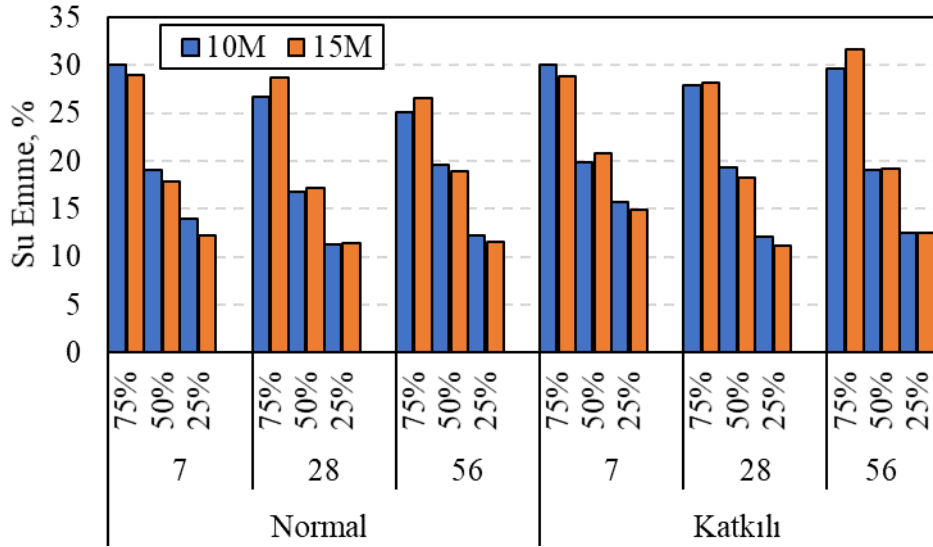
Şekil 4.11 15 M Katkısız geopolimer harçların su emme oranları.



Şekil 4.12 10 M Katkılı geopolimer harçların su emme oranları.

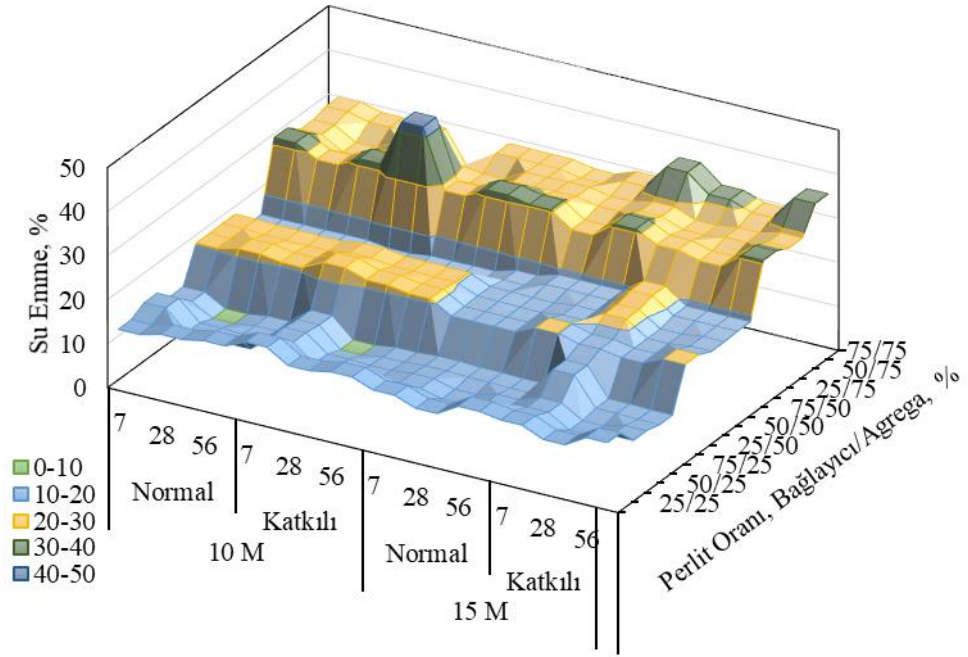


Şekil 4.13 15 M Katkılı geopolimer harçların su emme oranları.

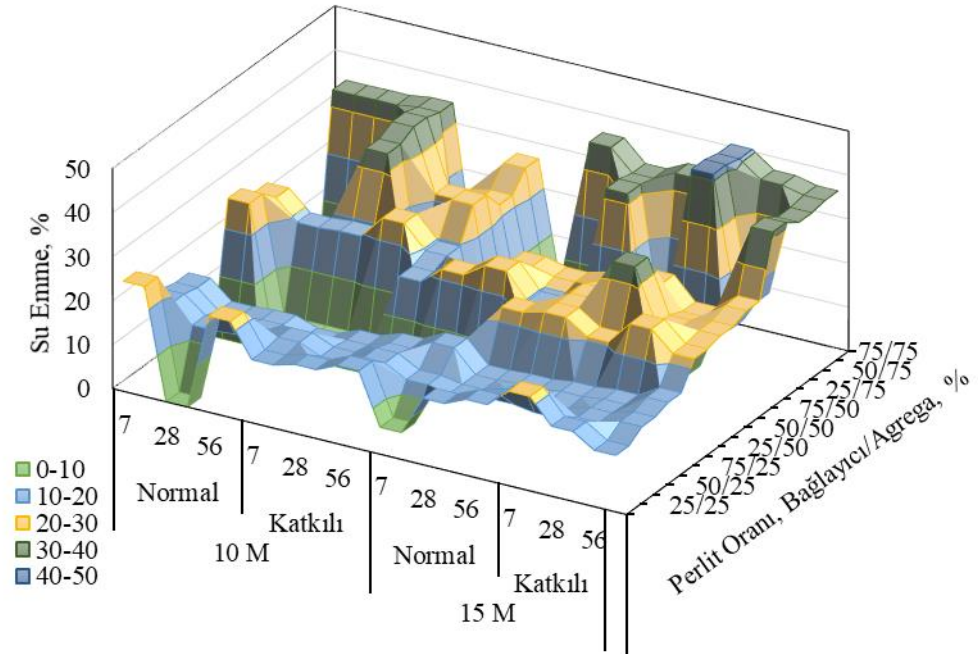


Şekil 4.14 Harç yaşının katkısız ve katkılı serilerde su emme (%) etkisi.

Donma-çözülme öncesinde numunelerin su emme (%) oranı perlit oranının azalmasına bağlı olarak azalma göstermiştir. 10 M katkısız ve katkılı seriler için su emme (%) oranı 15 M katkısız ve katkılı serilere göre daha yüksek değerlerde olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.15). Katkısız ve katkılı serilerde bariz bir farklılık olmamıştır. Donma-çözülme sonrasında ise bazı serilerin donma-çözülme döngüsünü tamamlayamadıkları görülmüştür. Donma-çözülme sonrasında numunelerin su emme (%) oranlarında donma-çözülme öncesine göre azalma gözlenmiştir (Şekil 4.16).



Şekil 4.15 Harç yaşının ve bağlayıcı/agrega oranının katkısız ve katkılı serilerde su emme (%) etkisi.



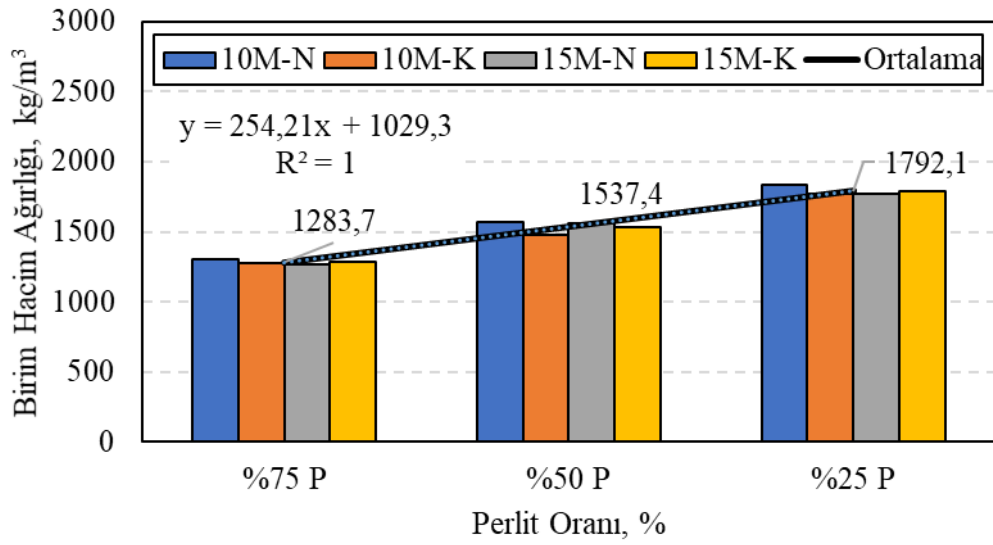
Şekil 4.16 Donma-çözülme sonrası harç yaşının ve bağlayıcı/agrega oranının katkısız ve katkılı serilerde su emme (%) etkisi.

4.2.3 Birim Hacim Ağırlık

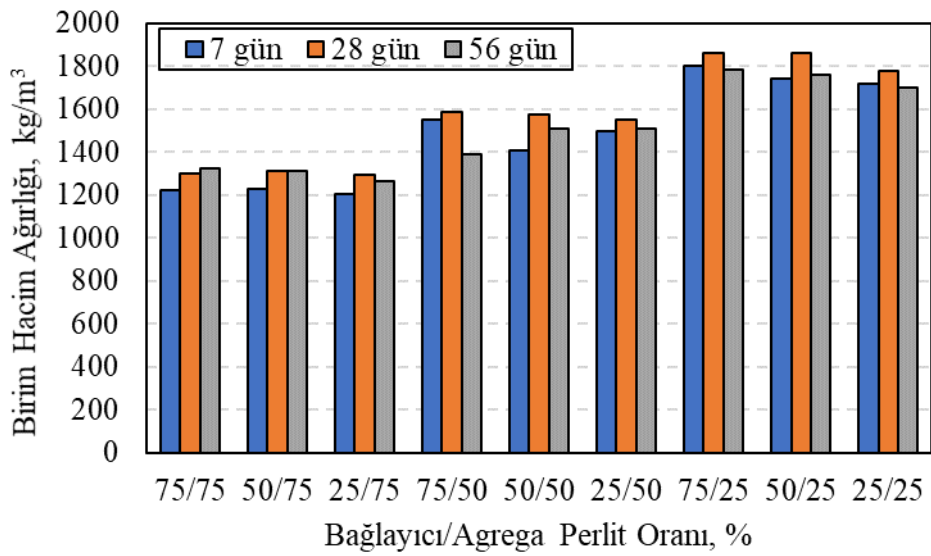
Üretilen harç numunelerinden elde edilen verilere göre birim hacim ağırlık değerleri perlit oranı azaldıkça artmıştır (Demirboğa vd. 2001, Kocakerimoğlu 2020). Birim hacim ağırlık; %75 perlit içeren numunelerde ortalama $1283,7 \text{ kg/m}^3$, %50 perlit içeren numunelerde ortalama $1537,4 \text{ kg/m}^3$, %25 perlit içeren numunelerde ortalama $1792,1 \text{ kg/m}^3$ değerleri elde edilmiştir (Şekil 4.17). Bağlayıcı/agrega perlit oranı değişen harç numunelerinde perlitin oranı azaldıkça, birim hacim ağırlık değerleri diğer numunelere göre artış göstermiştir. 10 M katkısız harç numuneleri için maksimum değer 28 günlük 50/25 bağlayıcı/agrega perlit oranında $1863,9 \text{ kg/m}^3$ olarak elde edilmiştir (Şekil 4.18). 15 M katkısız harç numuneleri için maksimum değer ise 7 günlük 75/25 bağlayıcı/agrega perlit oranında $1839,0 \text{ kg/m}^3$ olarak elde edilmiştir (Şekil 4.19).

10 M katkılı harç numuneleri için maksimum değer 28 günlük 50/25 bağlayıcı/agrega perlit oranında $1815,1 \text{ kg/m}^3$ olarak elde edilmiştir (Şekil 4.20). 15 M katkılı harç numuneleri için maksimum değer ise 28 günlük 50/25 bağlayıcı/agrega perlit oranında $1815,4 \text{ kg/m}^3$ olarak elde edilmiştir (Şekil 4.21).

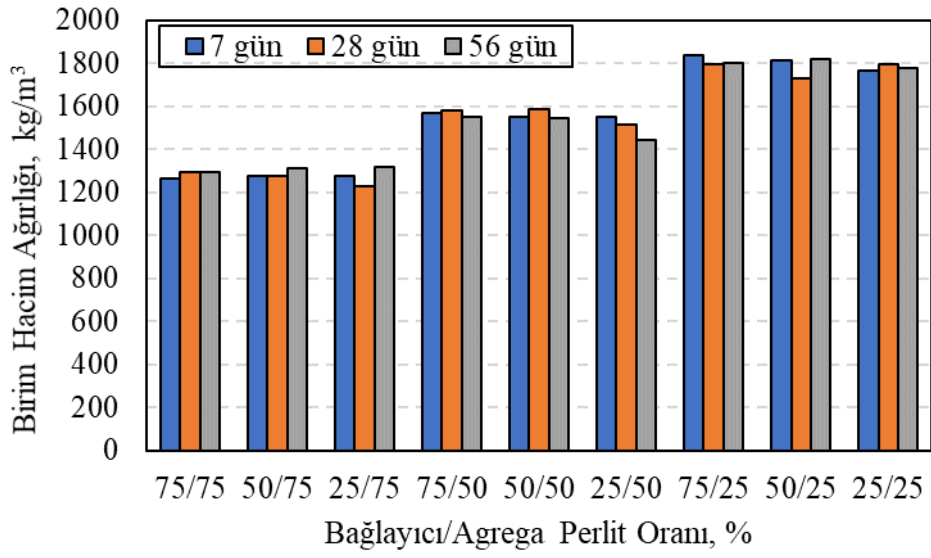
7 ve 56 günlük katkısız numune örneklerinde birim hacim ağırlık değerlerinde molarite artışı ve perlit oranının azalmasına bağlı olarak artış gözlemlenmiştir (Şekil 4.22). 7 ve 56 günlük katkılı numune örneklerinde ise birim hacim ağırlık değerlerinde molarite ve perlit miktarının azalmasına bağlı olarak artış gözlemlenmiştir. 28 günlük katkısız numune örneklerinde birim hacim ağırlık değerlerinde molarite ve perlit oranının azalmasına bağlı olarak artış gözlemlenmiştir (Şekil 4.22). 28 günlük katkılı numune örneklerinde ise birim hacim ağırlık değerlerinde molarite artışı ve perlit oranının azalmasına bağlı olarak artış gözlemlenmiştir (Gökçe vd. 2010).



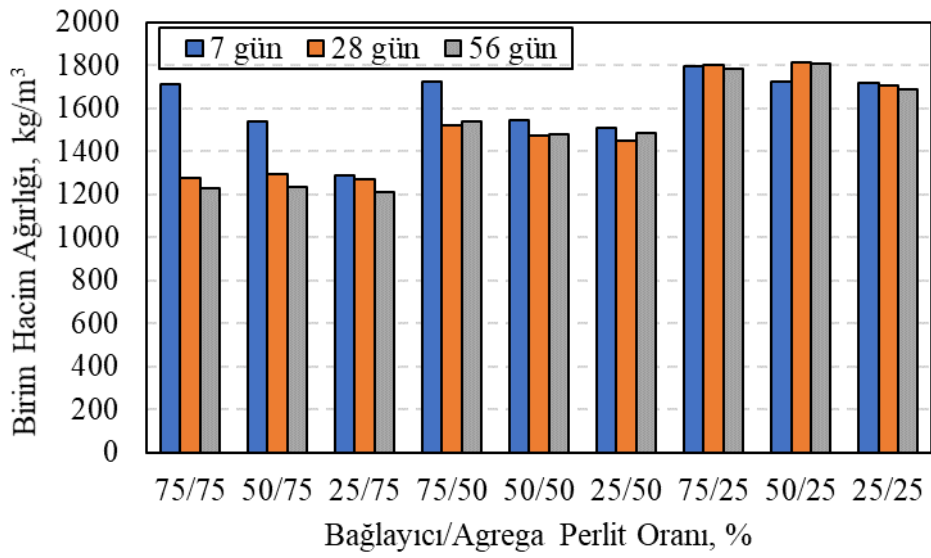
Şekil 4.17 Perlit oranına göre birim hacim ağırlık değişimi.



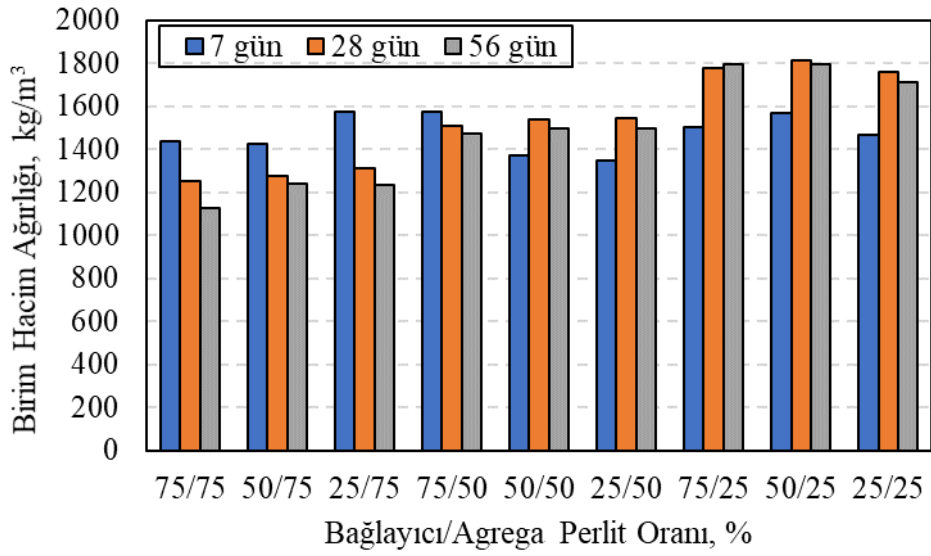
Şekil 4.18 10 M Katkısız geopolimer harçların birim hacim ağırlığı.



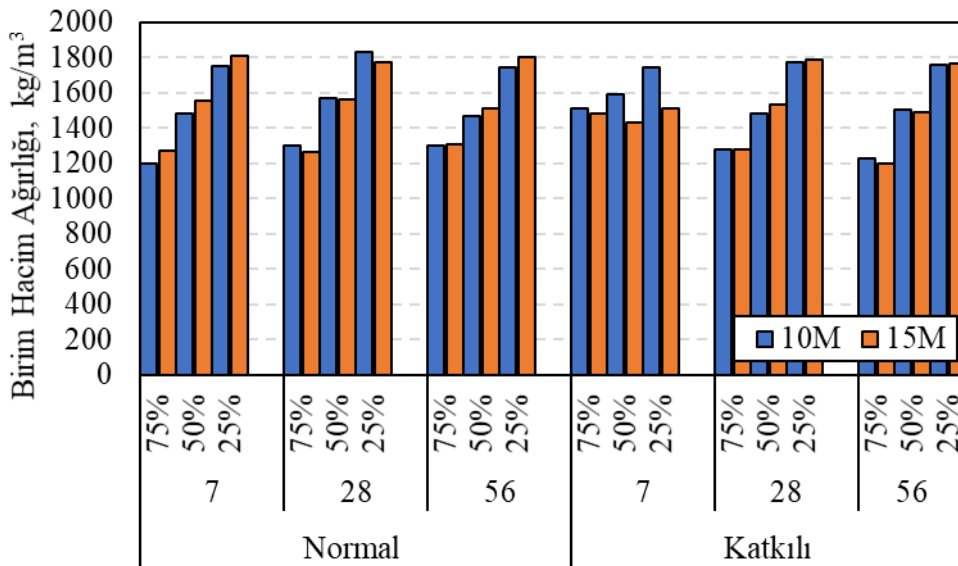
Şekil 4.19 15 M Katkısız geopolimer harçların birim hacim ağırlığı.



Şekil 4.20 10 M Katkılı geopolimer harçların birim hacim ağırlığı.



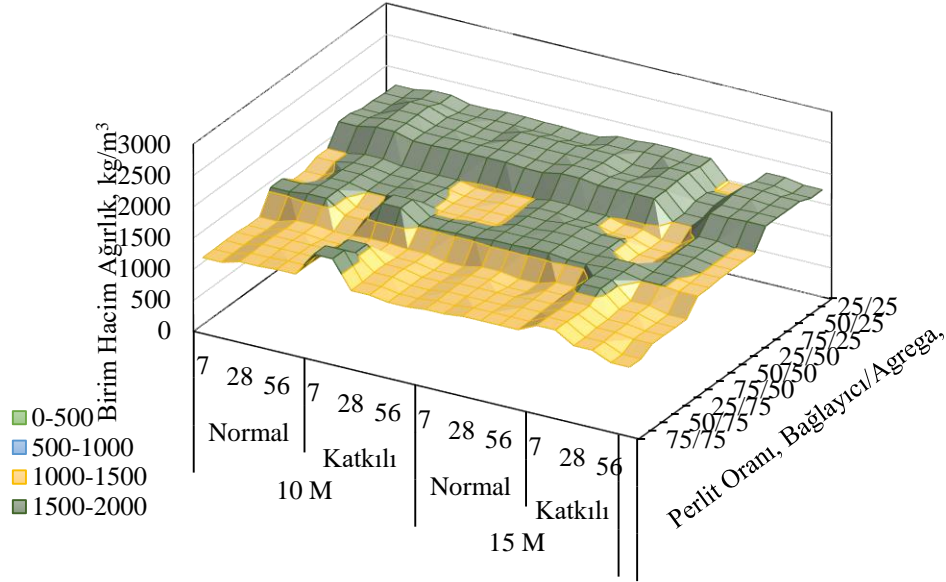
Şekil 4.21 15 M Katkılı geopolimer harçların birim hacim ağırlığı.



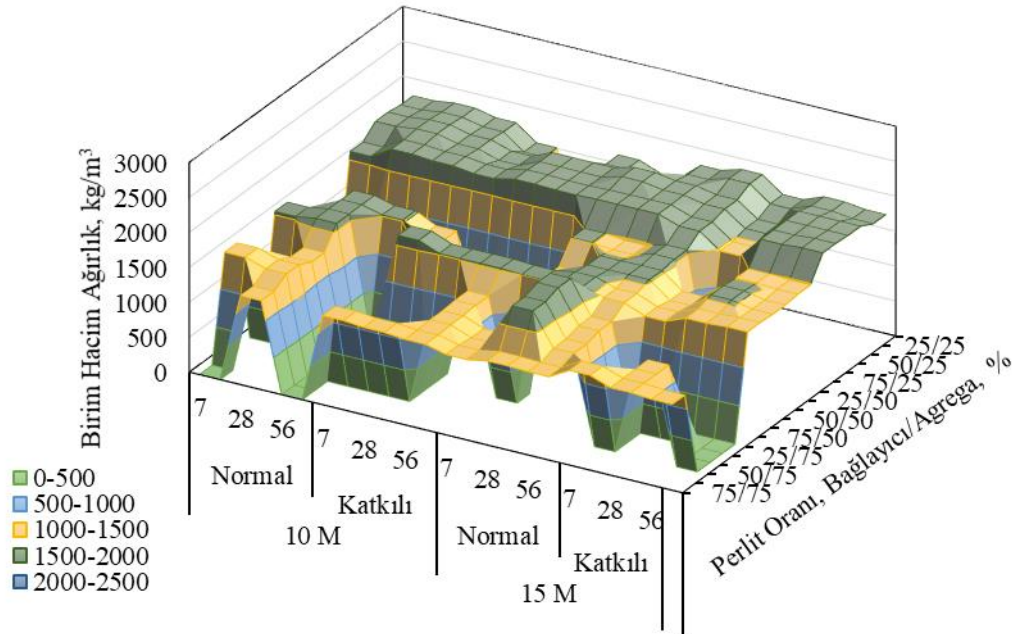
Şekil 4.22 Harç yaşının katkısız ve katkılı serilerde birim hacim ağırlığa etkisi.

Donma-çözülme öncesinde numunelerin birim hacim ağırlığı perlit oranının azalmasına bağlı olarak artış göstermiştir. Katkısız seriler için erken yaşta birim hacim ağırlığı düşükken 28 ve 56 günlük numunelerde birim hacim ağırlığında daha yüksek değerler gözlemlenmiştir (Şekil 4.23). Katkılı serilerde ise perlit oranı yüksek iken düşük birim hacim ağırlık değerleri gözlenmiştir. Katkısız ve katkılı serilerde birim hacim ağırlık değerlerinde bariz bir farklılık olmamıştır. Donma-çözülme sonrasında ise bazı serilerin donma-çözülme döngüsünü tamamlayamadıkları görülmüştür. Donma-çözülme

sonrasında numunelerin birim hacim ağırlıklarında donma-çözülme öncesine göre azalma gözlenmiştir. (Şekil 4.24).



Şekil 4.23 Harç yaşının ve bağlayıcı/agrega oranının katkısız ve katkılı serilerde birim hacim ağırlığa etkisi.



Şekil 4.24 Donma-çözülme sonrası harç yaşının ve bağlayıcı/agrega oranının katkısız ve katkılı serilerde birim hacim ağırlığa etkisi.

4.2.4 Görünür Yoğunluk

Üretilen harç numunelerinden elde edilen verilere göre görünür yoğunluk değerleri incelendiğinde perlit oranı azaldıkça artmıştır. Görünür yoğunluk; %75 perlit içeren numunelerde ortalama 1997,5 kg/m³, %50 perlit içeren numunelerde ortalama 2120,1 kg/m³, %25 perlit içeren numunelerde ortalama 2256,7 kg/m³ değerleri elde edilmiştir (Şekil 4.25).

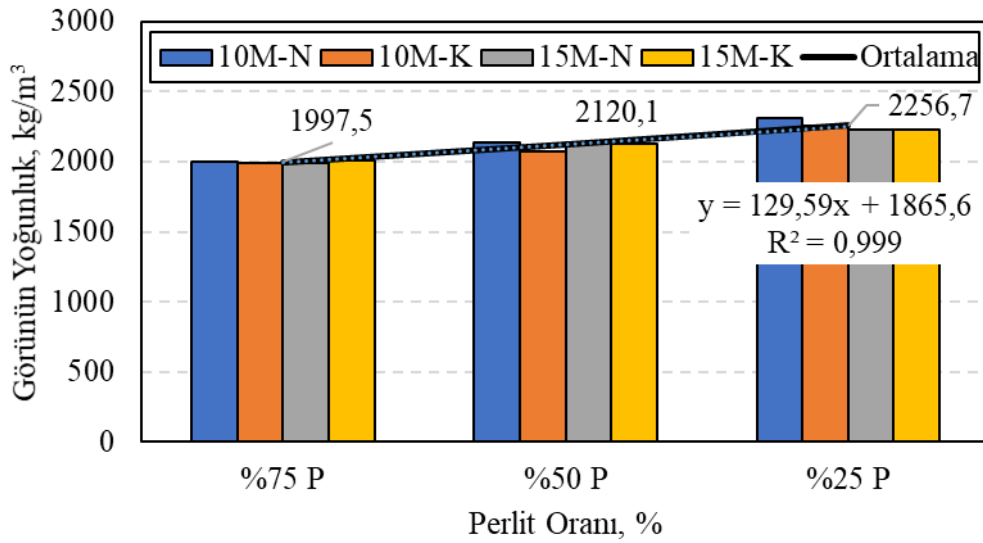
Bağlayıcı/agrega perlit oranı değişen harç numunelerinde perlitin oranı azaldıkça, görünür yoğunluk değerleri diğer numunelere göre artış göstermiştir. 10 M katkısız harç numuneleri için maksimum değer 7 günlük 50/25 bağlayıcı/agrega perlit oranında 2386,3 kg/m³ olarak elde edilmiştir (Şekil 4.26). 15 M katkısız harç numuneleri için maksimum değer ise 7 günlük 25/25 bağlayıcı/agrega perlit oranında 2359,7 kg/m³ olarak elde edilmiştir (Şekil 4.27).

10 M katkılı harç numuneleri için maksimum değer 7 günlük 25/75 bağlayıcı/agrega perlit oranında 2822,8 kg/m³ olarak elde edilmiştir (Şekil 4.28). 15 M katkılı harç numuneleri için maksimum değer ise 7 günlük 25/75 bağlayıcı/agrega perlit oranında 2838,2 kg/m³ olarak elde edilmiştir (Şekil 4.29).

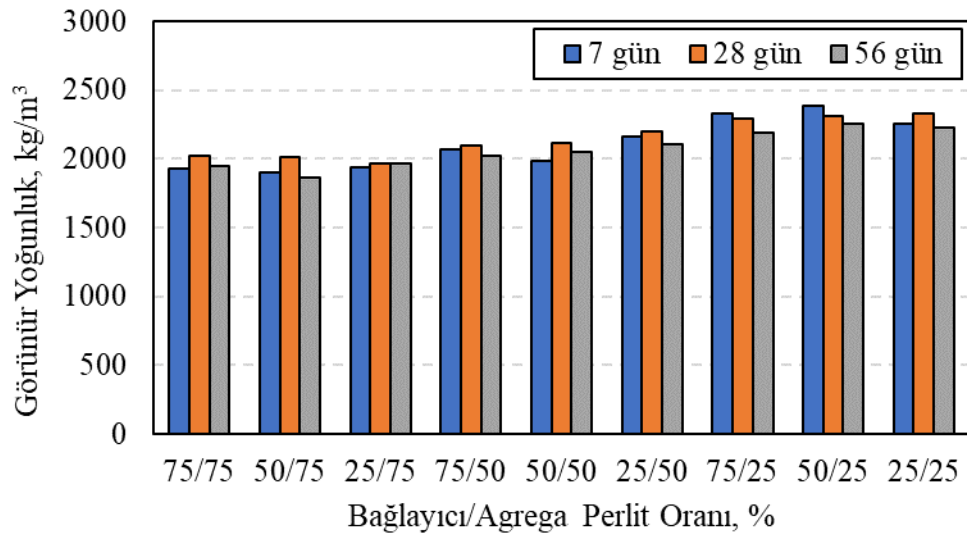
Numunelerin görünür yoğunlukları molarite, perlit oranı, katkısız ya da katkılı olmasına bağlı olarak değişkenlik göstermiştir.

7 günlük katkısız numune örneklerinde görünür yoğunluk değerlerinde molarite artışı ve perlit oranının azalmasına bağlı olarak artış gözlemlenmiştir (Şekil 4.30). Ancak 7 günlük katkısız numune örneklerinden %25 perlit içerenlerde 10 M 15 M'e göre daha yüksek görünür yoğunluk değerine sahiptir. 7 günlük katkılı numune örneklerinde ise görünür yoğunluk değerleri %75 perlit içeren numunelerde yüksek molaritede daha yüksek iken %50 ve %25 perlit içeren numunelerde bu durumun tam tersi olduğu gözlemlenmiştir. 28 günlük katkısız numune örneklerinde görünür yoğunluk değerlerinde %75 ve %25 perlit içeren numunelerde düşük molaritede görünür yoğunluk daha yüksek iken %50 perlit içeren numunede bu durum tam tersidir (Şekil 4.30). 28 günlük katkılı numune

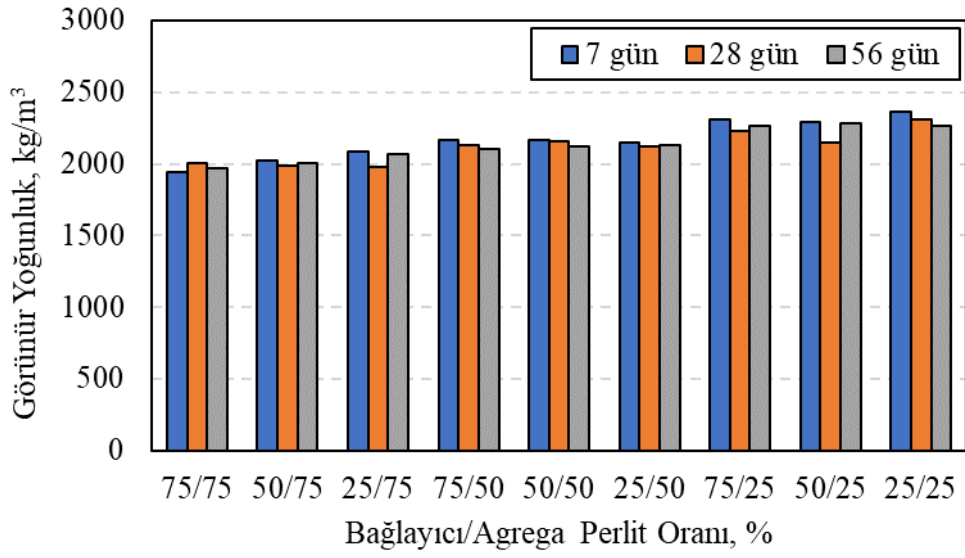
örneklerinde görünür yoğunluk değerlerinde %75 ve %50 perlit içeren numunelerde yüksek molaritede görünür yoğunluk daha yüksek iken %25 perlit içeren numunede bu durum tam tersidir. 56 günlük katkısız numune örneklerinde görünür yoğunluk değerlerinde molarite artışı ve perlit oranının azalmasına bağlı olarak artış gözlemlenmiştir (Şekil 4.30). 56 günlük katkılı numune örneklerinde görünür yoğunluk değerlerinde %75 ve %25 perlit içeren numunelerde yüksek molaritede görünür yoğunluk daha yüksek iken %50 perlit içeren numunede bu durum tam tersidir.



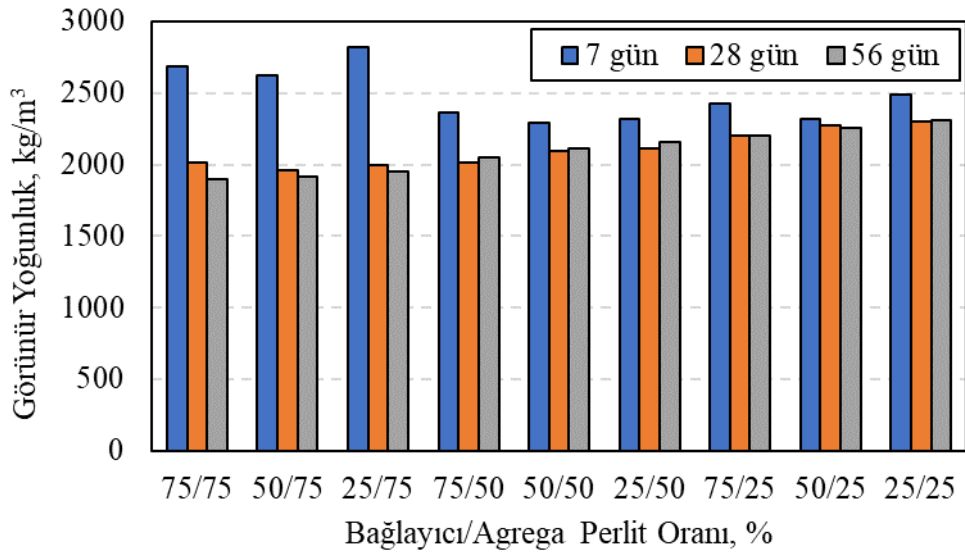
Şekil 4.25 Perlit oranına göre görünür yoğunluk değişimi.



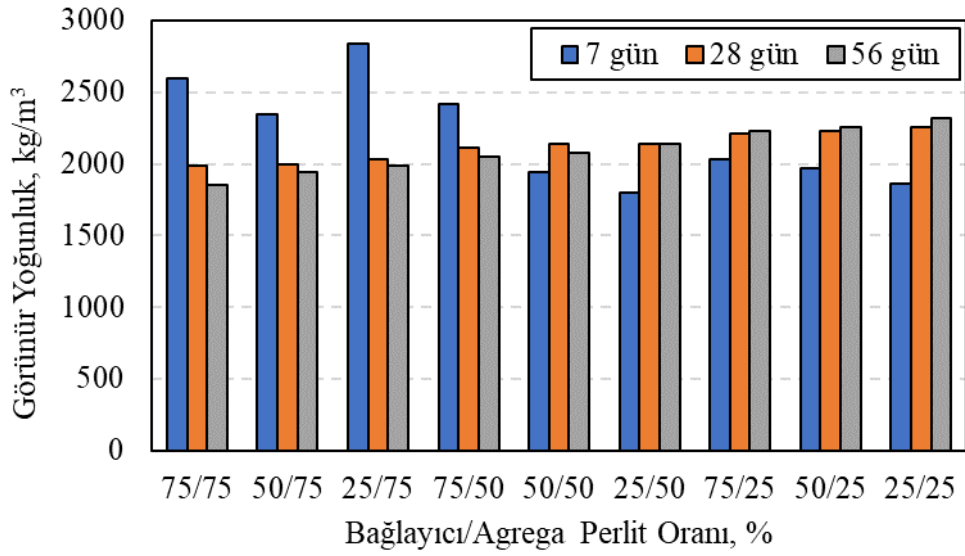
Şekil 4.26 10 M Katkısız geopolimer harçların görünür yoğunluğu.



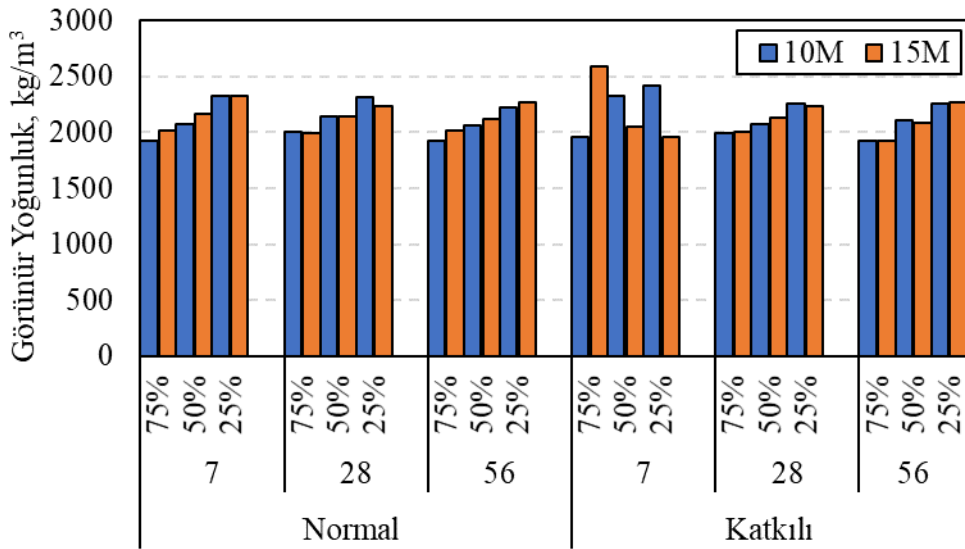
Şekil 4.27 15 M Katkısız geopolimer harçların görünür yoğunluğu.



Şekil 4.28 10 M Katkılı geopolimer harçların görünür yoğunluğu.



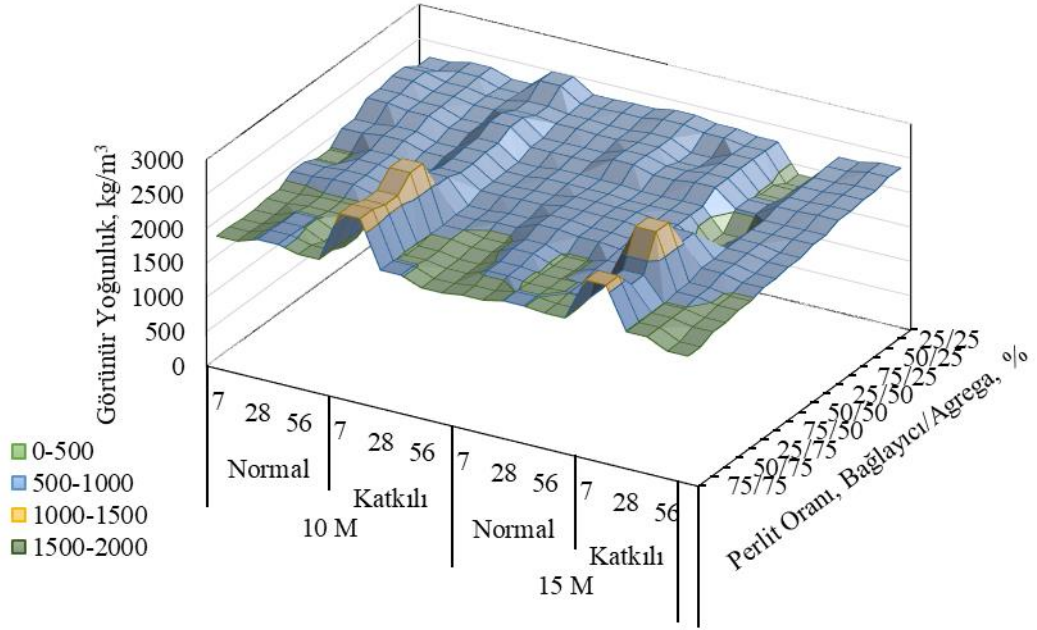
Şekil 4.29 15 M Katkılı geopolimer harçların görünür yoğunluğu.



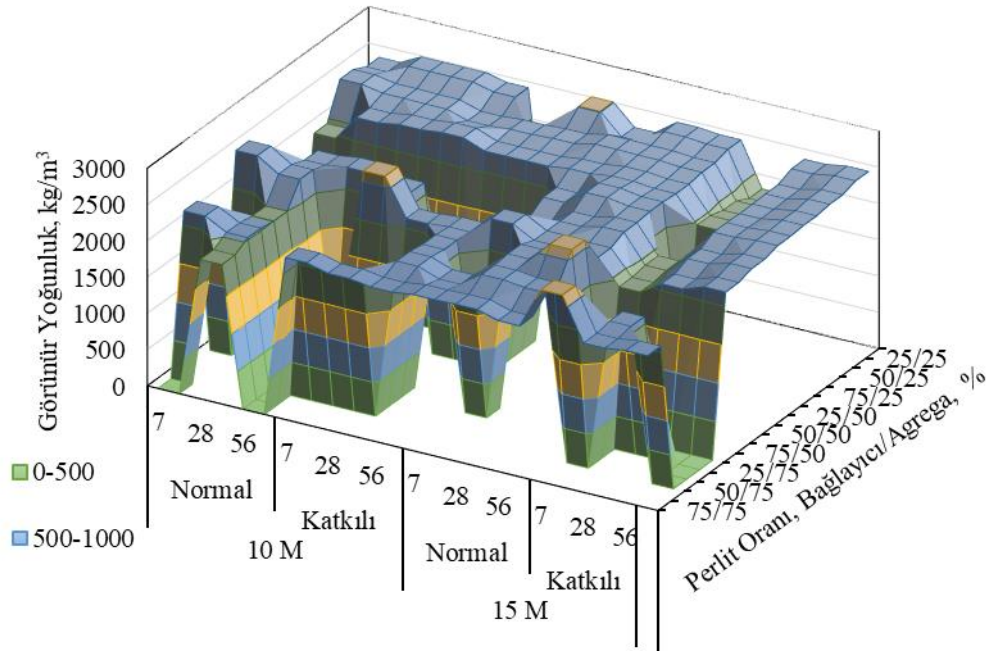
Şekil 4.30 Harç yaşının katkısız ve katkılı serilerde görünür yoğunluğa etkisi.

Donma-çözülme öncesinde numunelerin görünür yoğunluğu perlit oranının azalmasına bağlı olarak artış göstermiştir. 10 M katkısız ve katkılı seriler için 7 günlük numunelerde görünür yoğunluk daha yüksektir. 15 M katkısız seriler için 7 günlük numunelerin görünür yoğunluğu düşükken 28 ve 56 günlük numunelerde görünür yoğunluğun daha yüksek değerlerde olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.31). Katkısız ve katkılı serilerde bariz bir farklılık olmamıştır. Donma-çözülme sonrasında ise bazı serilerin donma-çözülme döngüsünü tamamlayamadıkları görülmüştür. Donma-çözülme sonrasında numunelerin

görünür yoğunluklarında donma-çözülme öncesine göre azalma gözlenmiştir (Şekil 4.32).



Şekil 4.31 Harç yaşının ve bağlayıcı/agrega oranının katkısız ve katkılı serilerde görünür yoğunluğa etkisi.



Şekil 4.32 Donma-çözülme sonrası harç yaşının ve bağlayıcı/agrega oranının katkısız ve katkılı serilerde görünür yoğunluğa etkisi.

4.3 Geopolimer Harçların Mekanik Özellikleri

4.3.1 Basınç Dayanımı

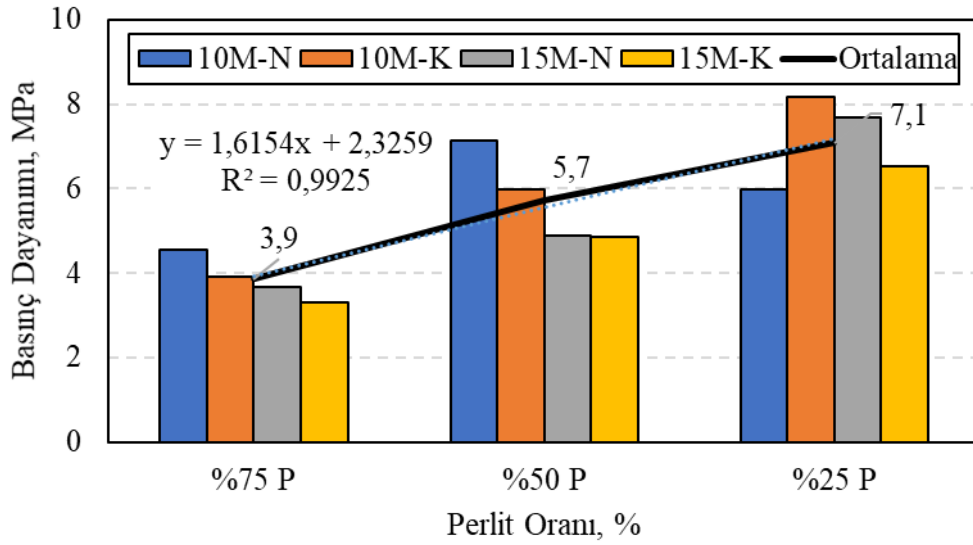
Üretilen harç numunelerinden elde edilen verilere göre basınç dayanımı değerleri incelendiğinde perlit oranı azaldıkça ve kür süresi uzadıkça artmıştır (Şengül vd. 2011). Basınç dayanımı; %75 perlit içeren numunelerde ortalama 3,90 MPa, %50 perlit içeren numunelerde ortalama 5,70 MPa, %25 perlit içeren numunelerde ise ortalama 7,10 MPa değerleri elde edilmiştir (Şekil 4.33).

Bağlayıcı/agrega perlit oranı değişen harç numunelerinde perlitin oranı azaldıkça, basınç dayanım değerleri artış göstermiştir (Güzelküçük 2020). 10 M katkısız harç numuneleri için maksimum değer 56 günlük 50/50 bağlayıcı/agrega perlit oranında 10,95 MPa olarak elde edilmiştir (Şekil 4.34). 15 M katkısız harç numuneleri için maksimum değer ise 56 günlük 25/25 bağlayıcı/agrega perlit oranında 11,29 MPa olarak elde edilmiştir (Şekil 4.35).

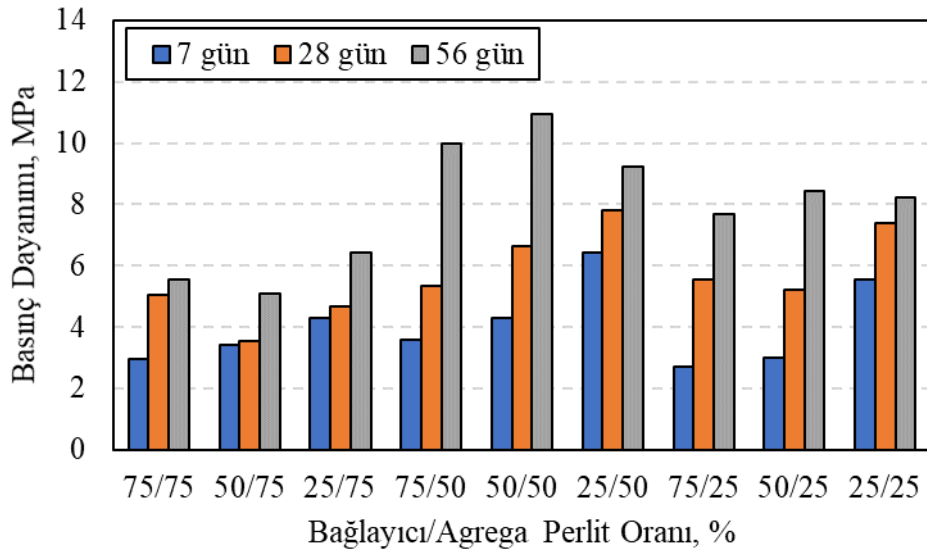
10 M katkılı harç numuneleri için maksimum değer 56 günlük 25/25 bağlayıcı/agrega perlit oranında 11,95 MPa olarak elde edilmiştir (Şekil 4.36). 15 M katkılı harç numuneleri için maksimum değer ise 56 günlük 25/25 bağlayıcı/agrega perlit oranında 9,24 MPa olarak elde edilmiştir (Şekil 4.37).

7 günlük katkısız numune örneklerinde basınç dayanımı değerleri %75 ve %50 perlit içeren numunelerde molarite ve perlit oranının azalmasına bağlı olarak artış gözlemlenmiştir (Şekil 4.38). %25 perlit içeren numunelerde ise molarite artışı ve perlit oranının azalmasına bağlı olarak artış gözlemlenmiştir. 7 günlük katkılı numune örneklerinde ise basınç dayanımı değerleri molarite ve perlit oranının azalmasına bağlı olarak artış gözlemlenmiştir 28 günlük katkısız numune örneklerinde %75 ve %50 perlit içeren numunelerde düşük molaritede basınç dayanımı değerleri daha yüksek iken %25 perlit içeren numunelerde bu durum tam tersidir (Şekil 4.38). 28 günlük katkılı numune örneklerinde basınç dayanımı değerlerinde molarite ve perlit oranının azalmasına bağlı olarak artış gözlemlenmiştir. 56 günlük katkısız numune örneklerinde basınç dayanımı

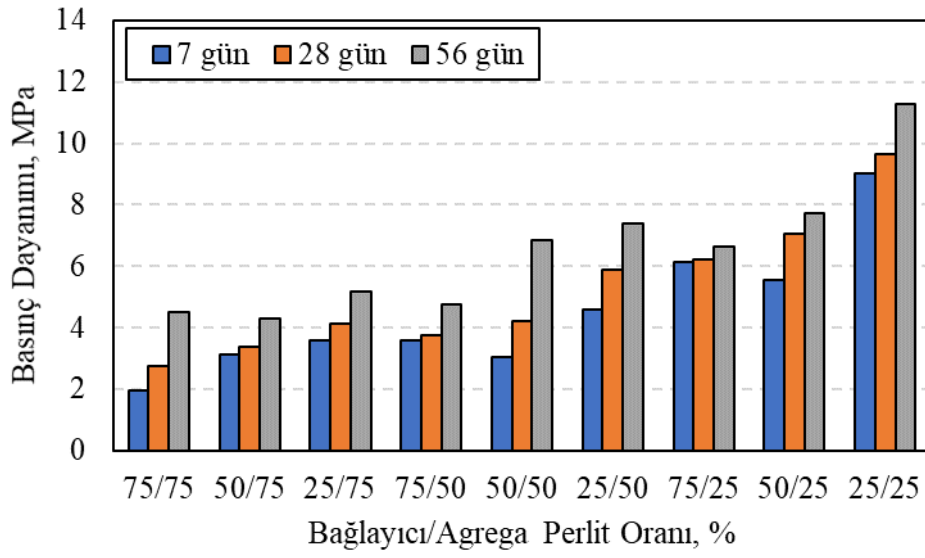
değerleri %75 ve %50 perlit içeren numunelerde düşük molaritede basınç dayanımı değerleri daha yüksek iken %25 perlit içeren numunede bu durum tam tersidir (Şekil 4.38). 56 günlük katkıli numune örneklerinde basınç dayanımı değerleri molarite ve perlit oranının azalmasına bağlı olarak artış gözlemlenmiştir (Gökçe vd. 2010).



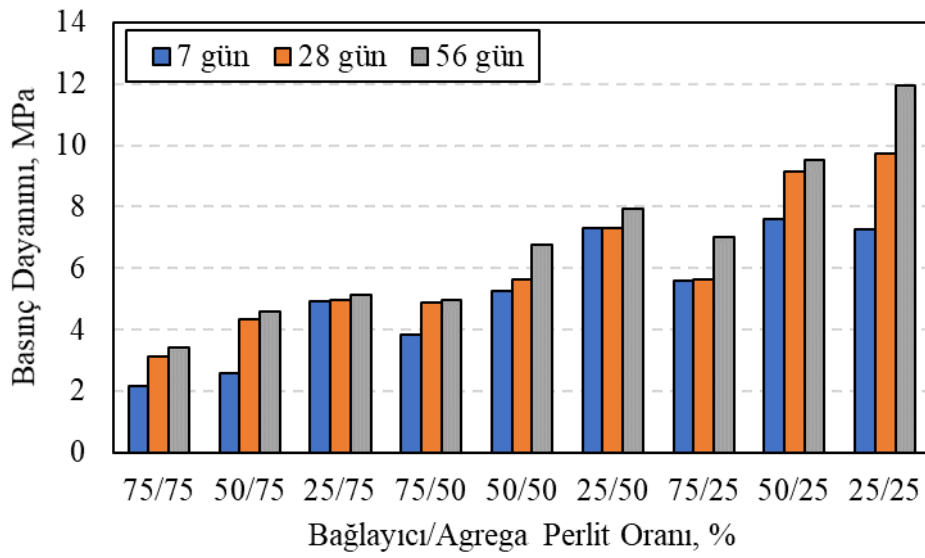
Şekil 4.33 Perlit oranına göre basınç dayanımı değişimi.



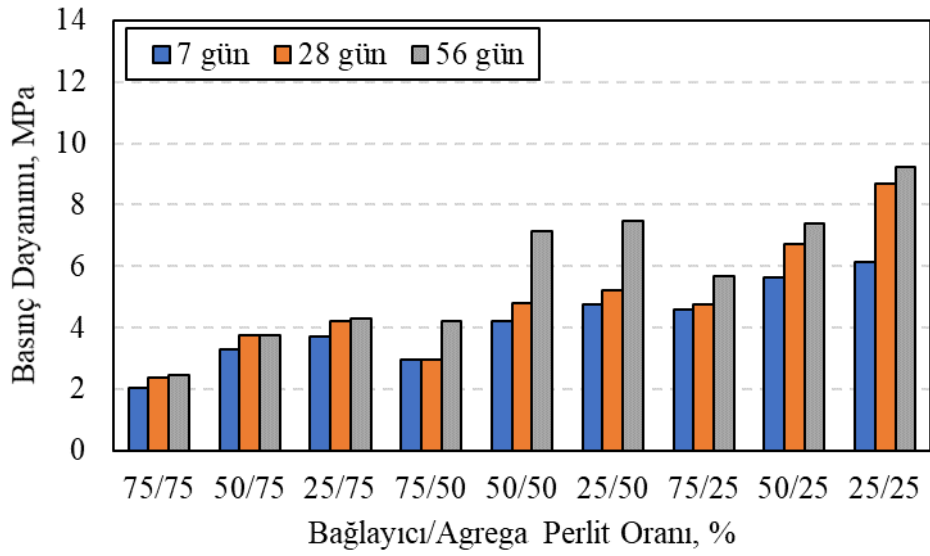
Şekil 4.34 10 M Katkısız geopolimer harçların basınç dayanımı.



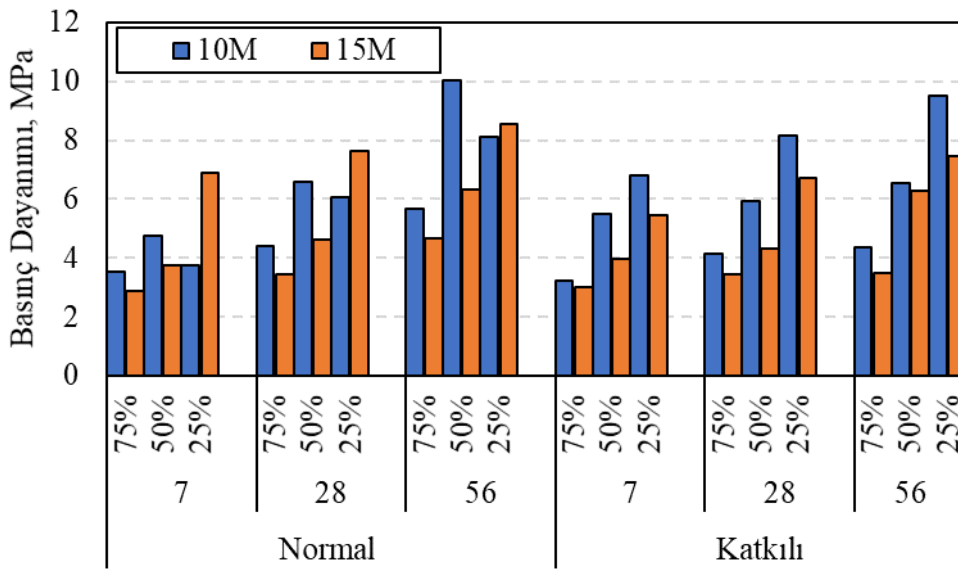
Şekil 4.35 15 M Katkısız geopolimer harçların basınç dayanımı.



Şekil 4.36 10 M Katkılı geopolimer harçların basınç dayanımı.



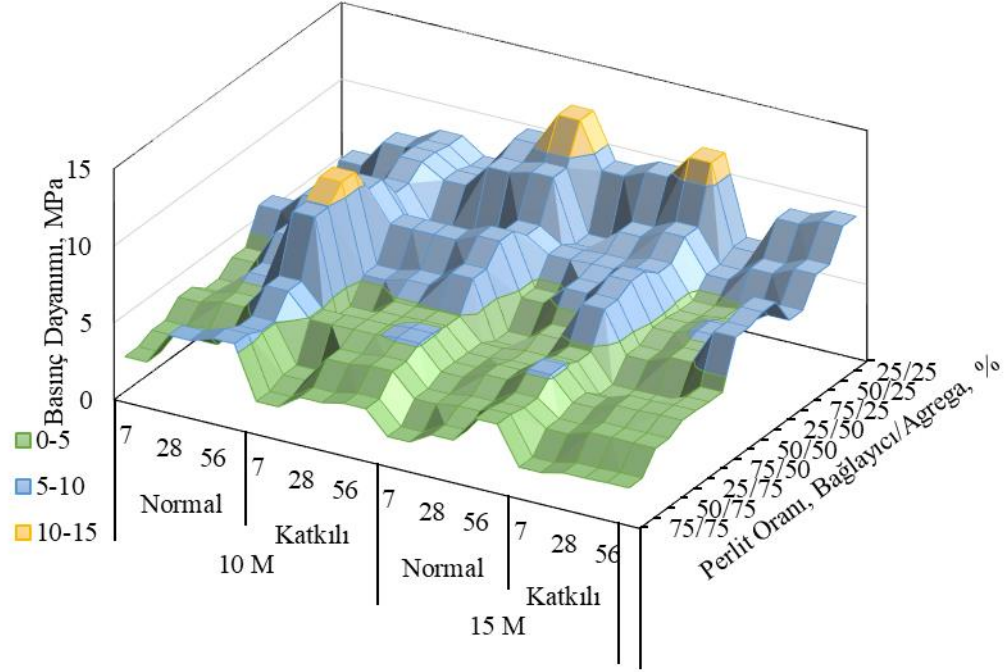
Şekil 4.37 15 M Katkılı geopolimer harçların basınç dayanımı.



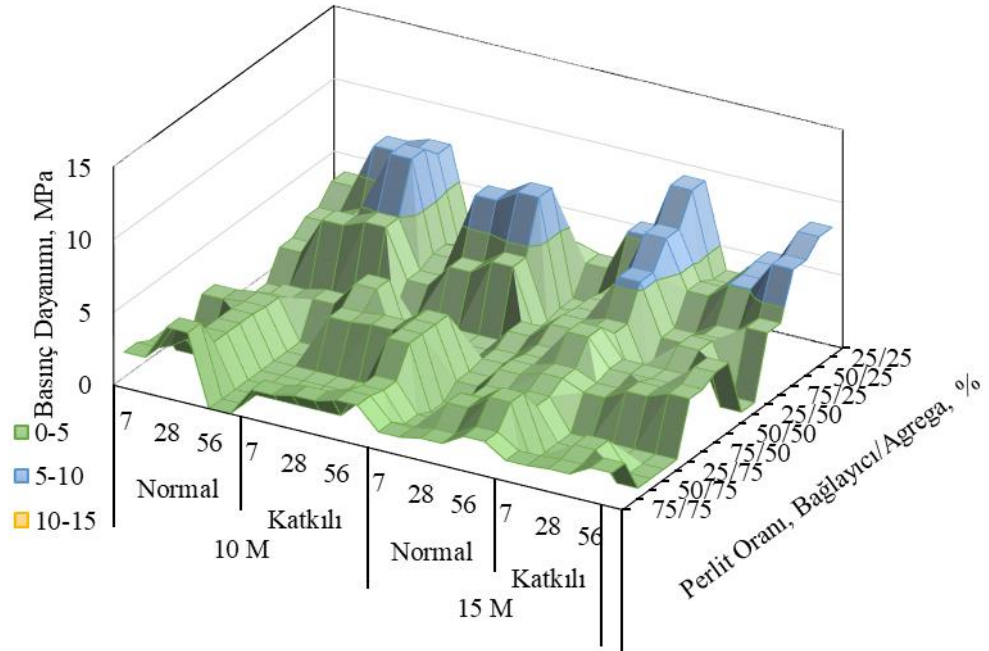
Şekil 4.38 Harç yaşının katkısız ve katkılı serilerde basınç dayanımına etkisi.

Donma-çözülme öncesindeki numunelerin basınç dayanımı perlit oranının azalmasına bağlı olarak artış göstermiştir. 10 M katkısız ve katkılı seriler için perlit oranı azaldıkça basınç dayanımı artış göstermiştir. 15 M katkısız seriler için 56 günlük bağlayıcı / agrega oranı %25 olan numunelerde yüksek basınç dayanımı göstermiştir. 15 M katkılı serilerdeki numunelerde ise katkısız serilere göre basınç dayanımı değerinin daha düşük değerlerde olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.39). Donma-çözülme sonrasında ise bazı serilerin donma-çözülme döngüsünü tamamlayamadıkları görülmüştür. Donma-çözülme

sonrasında numunelerin basınç dayanımı donma-çözülme öncesine göre azalma gözlenmiştir (Şekil 4.40).



Şekil 4.39 Harç yaşının ve bağlayıcı/agrega oranının katkısız ve katkılı serilerde basınç dayanımına etkisi.



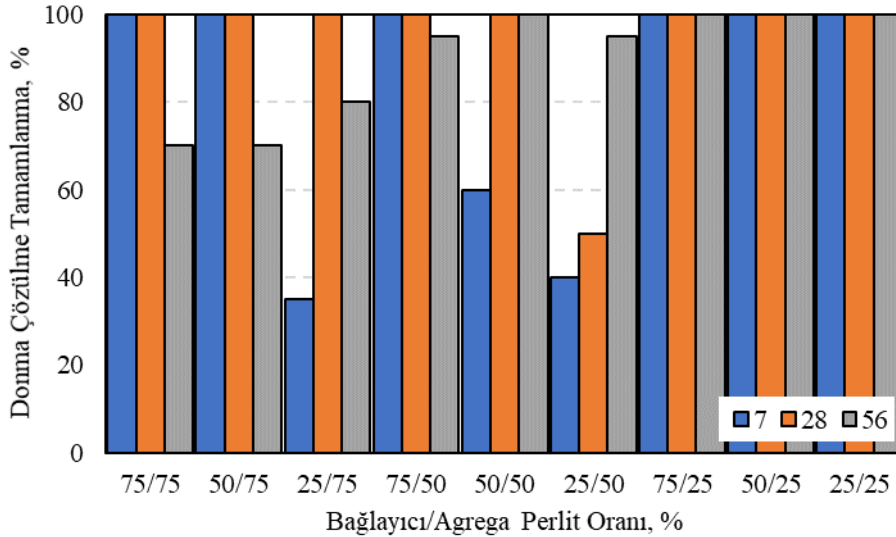
Şekil 4.40 Donma-çözülme sonrası harç yaşının ve bağlayıcı/agrega oranının katkısız ve katkılı

serilerde basınç dayanımına etkisi.

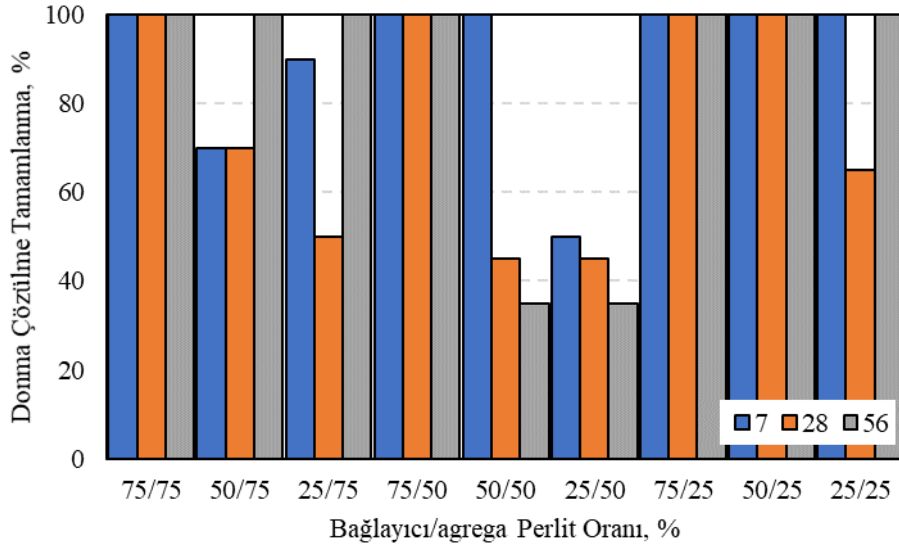
4.3.2 Donma Çözülme Etkisi

Üretilen harç numuneleri donma-çözülme deneyine tabi tutulmuştur. Bu deney sonucunda döngülerini tamamlayan ve tamamlayamayan numuneler olmuştur. Döngülerini tamamlayan numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerine bakılmış ve bunların karşılaştırılması yapılmıştır.

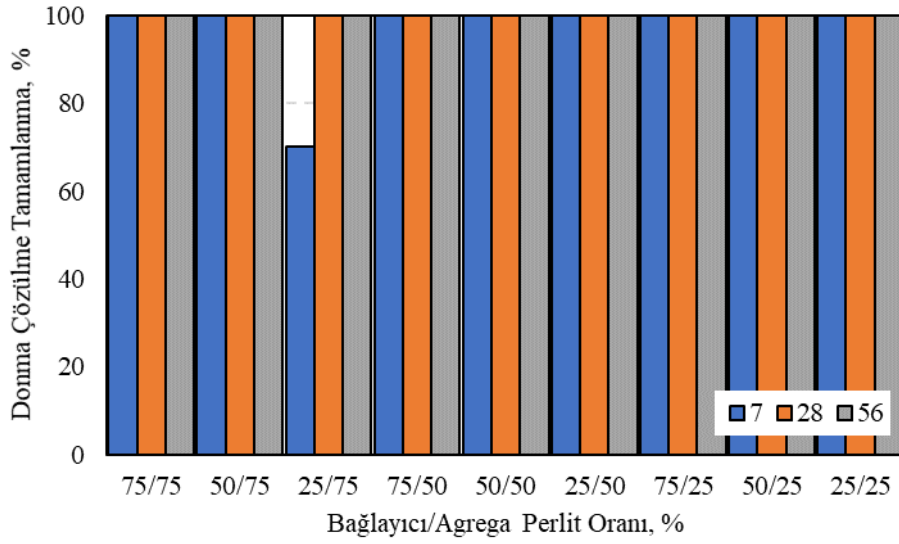
10 M içeren harç karışımlarında katkısız serilerde döngüsünü tamamlayan numuneler bazı katkıli serilerde döngüsünü tamamlayamamıştır (Şekil 4.41 ve Şekil 4.42). Donma-çözülme döngüsünü 15 M içeren harçlar daha yüksek oranda tamamlamıştır. 15 M içeren serilerde ise donma-çözülme döngüsünü tamamlama oranı katkısız serilerde katkıli serilere göre daha fazladır (Şekil 4.43 ve Şekil 4.44). Donma-çözülme döngüsünü tamamlamada katkının belirgin bir faydası olmamıştır. Perlit oranı azaldıkça donma-çözülme döngüsünü tamamlama oranı artmıştır.



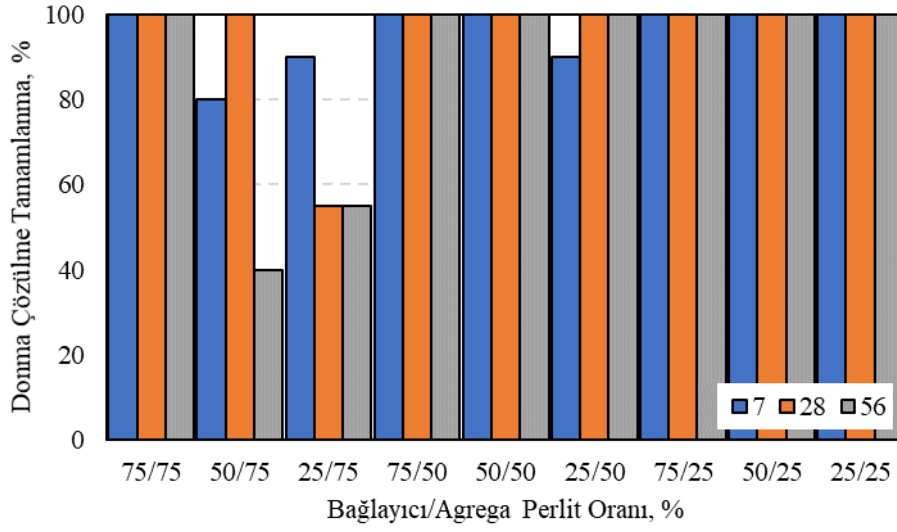
Şekil 4.41 10 M Katkısız geopolimer harçların donma çözülme döngüsünü tamamlama oranı.



Şekil 4.42 10 M Katkılı geopolimer harçların donma çözülme döngüsünü tamamlama oranı.

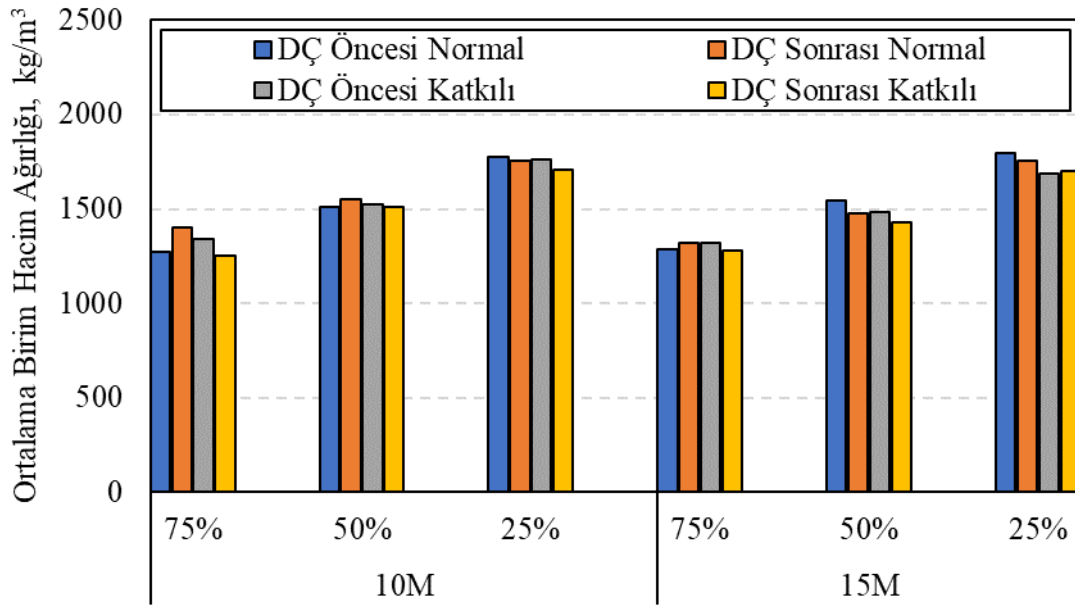


Şekil 4.43 15 M Katkisız geopolimer harçların donma çözülme döngüsünü tamamlama oranı.

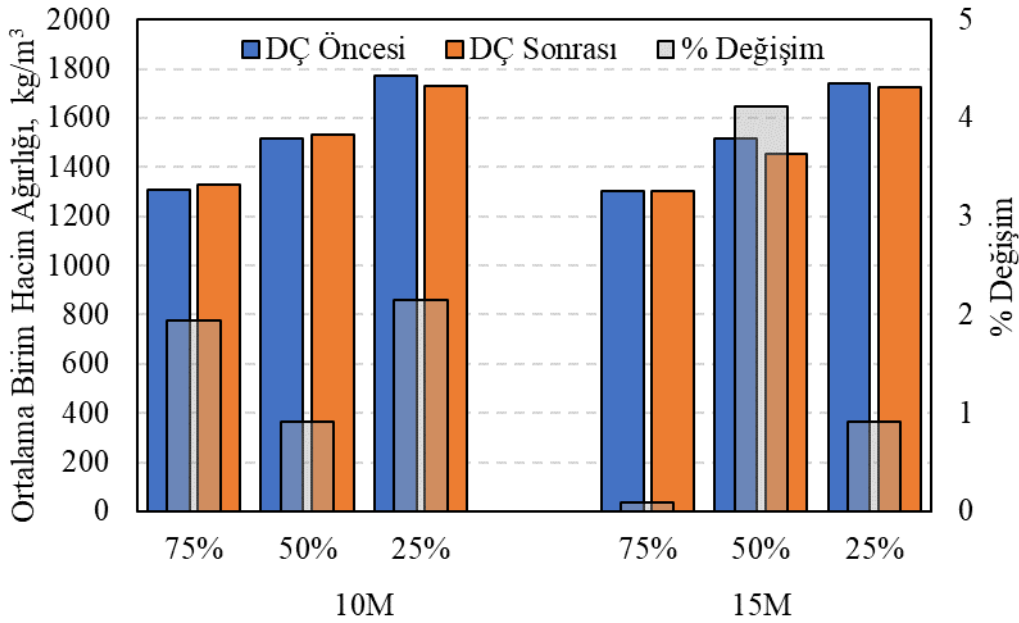


Şekil 4.44 15 M Katkılı geopolimer harçların donma çözülme döngüsünü tamamlama oranı.

Donma-çözülme öncesi ve sonrası numunelerin birim hacim ağırlıkları karşılaştırılmıştır. 10 M için %75 ve %50 perlit içeren numunelerde katkısız serilerde donma-çözülme sonrası artış olurken %25 perlit içeren numunelerde katkısız serilerde donma-çözülme sonrası azalma meydana gelmiştir. Katkılı serilerde ise donma-çözülme sonrasında birim hacim ağırlığında azalma olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.45). 15 M için %75 perlit içeren numunelerde katkısız serilerde donma-çözülme sonrası artış olurken %50 ve %25 perlit içeren numunelerde katkısız serilerde donma-çözülme sonrası azalma meydana gelmiştir. Katkılı serilerde ise %75 ve %50 perlit içeren numunelerde donma-çözülme sonrası azalma olurken %25 perlit içeren numunelerde donma-çözülme sonrasında birim hacim ağırlığında artış olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.45 ve Şekil 4.46).



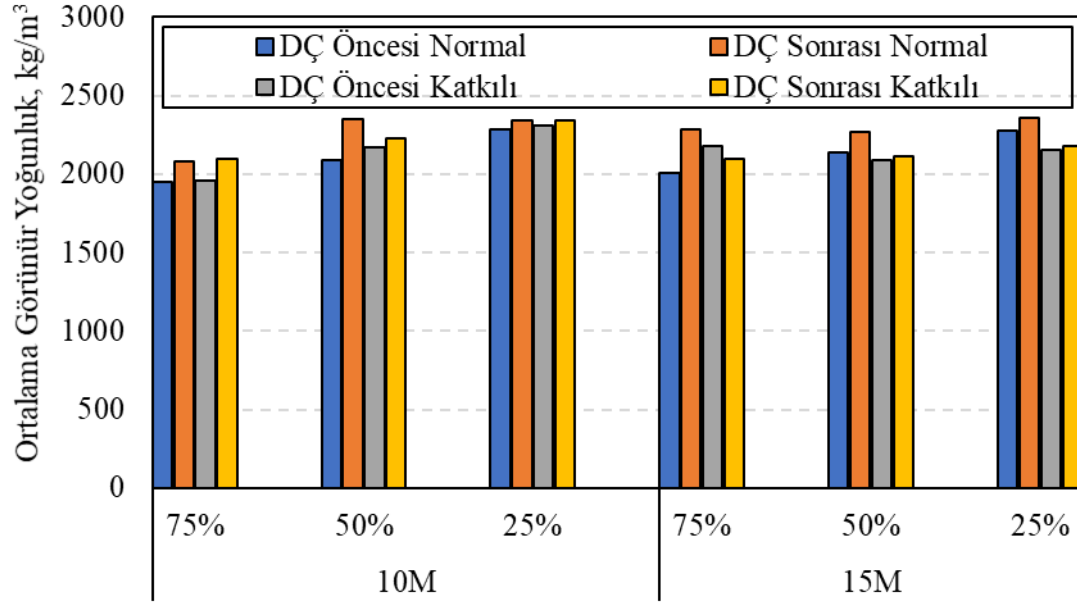
Şekil 4.45 Donma-çözülme öncesi ve sonrasında 10 M ve 15 M Katkısız ve katkılı seriler için ortalama birim hacim ağırlıkları.



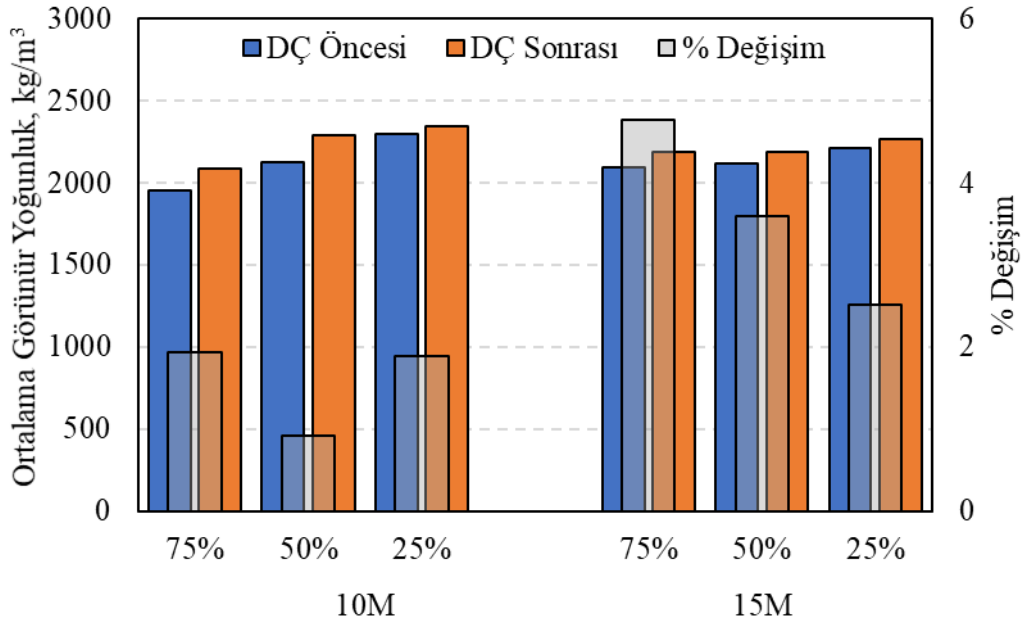
Şekil 4.46 Donma-çözülme öncesi ve sonrasında geopolimer harçların ortalama birim hacim ağırlıklarındaki % değişimi.

Donma-çözülme öncesi ve sonrası numunelerin görünür yoğunlukları karşılaştırılmıştır. 10 M için katkısız ve katkılı serilerde donma-çözülme sonrası ortalama görünür yoğunlukta artış olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.47). 15 M için %75 perlit içeren

numunelerde katkısız serilerde donma-çözülme sonrası artış olurken %50 ve %25 perlit içeren numunelerde katkısız serilerde donma-çözülme sonrası azalma meydana gelmiştir. Katkılı serilerde ise %75 ve %50 perlit içeren numunelerde donma-çözülme sonrası azalma olurken %25 perlit içeren numunelerde ise donma-çözülme sonrasında görünür yoğunluğunda artış olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.47 ve Şekil 4.48).

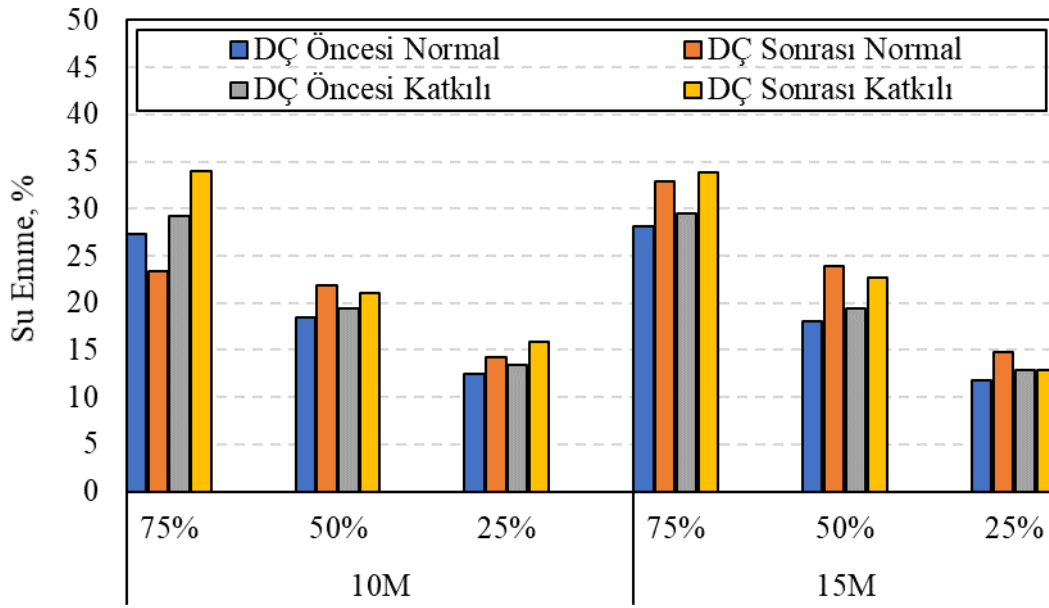


Şekil 4.47 Donma-çözülme öncesi ve sonrasında 10 M ve 15 M Katkısız ve katkılı seriler için ortalama görünür yoğunlukları.

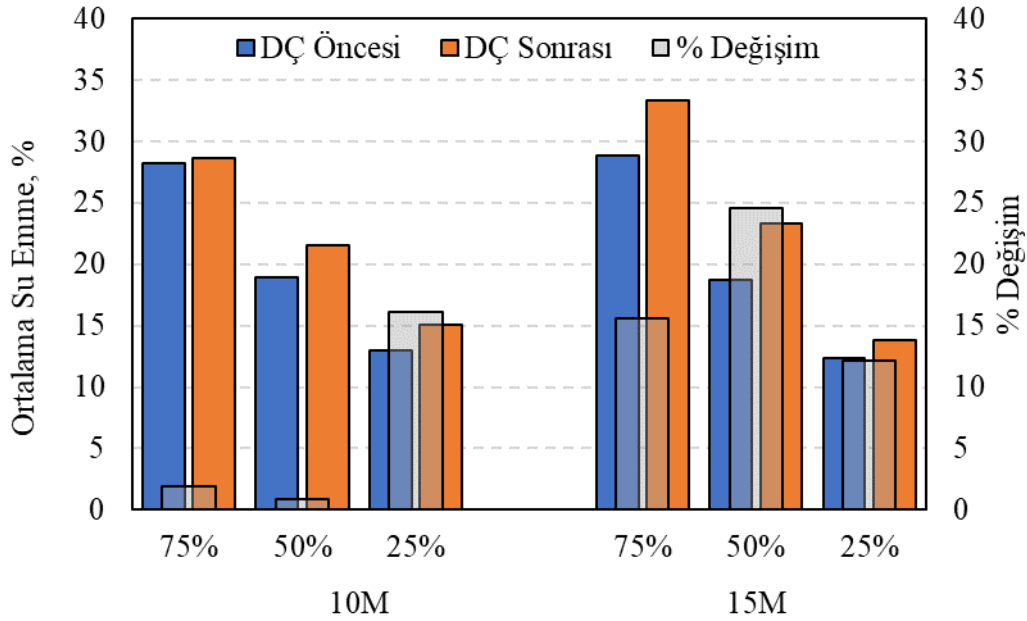


Şekil 4.48 Donma-çözülme öncesi ve sonrasında geopolimer harçların ortalama görünür yoğunluklarındaki % değişimi.

Donma-çözülme öncesi ve sonrası numunelerin su emme (%) oranları karşılaştırılmıştır. 10 M için %75 perlit içeren numunelerde katkısız serilerde donma-çözülme sonrası su emme (%) oranı azalırken %50 ve %25 perlit içeren numunelerde bu durum tam tersidir (Şekil 4.49). Katkılı serilerde ise tüm perlit oranlarında donma-çözülme sonrası su emme (%) oranında artış olduğu gözlemlenmiştir. 15 M için tüm perlit oranlarındaki numunelerde katkısız serilerde donma-çözülme sonrası su emme (%) oranı artış göstermiştir. Katkılı serilerde ise %75 ve %50 perlit içeren numunelerde donma-çözülme sonrası artış olurken %25 perlit içeren numunelerde donma-çözülme sonrasında herhangi bir değişiklik olmamıştır (Şekil 4.49 ve Şekil 4.50).



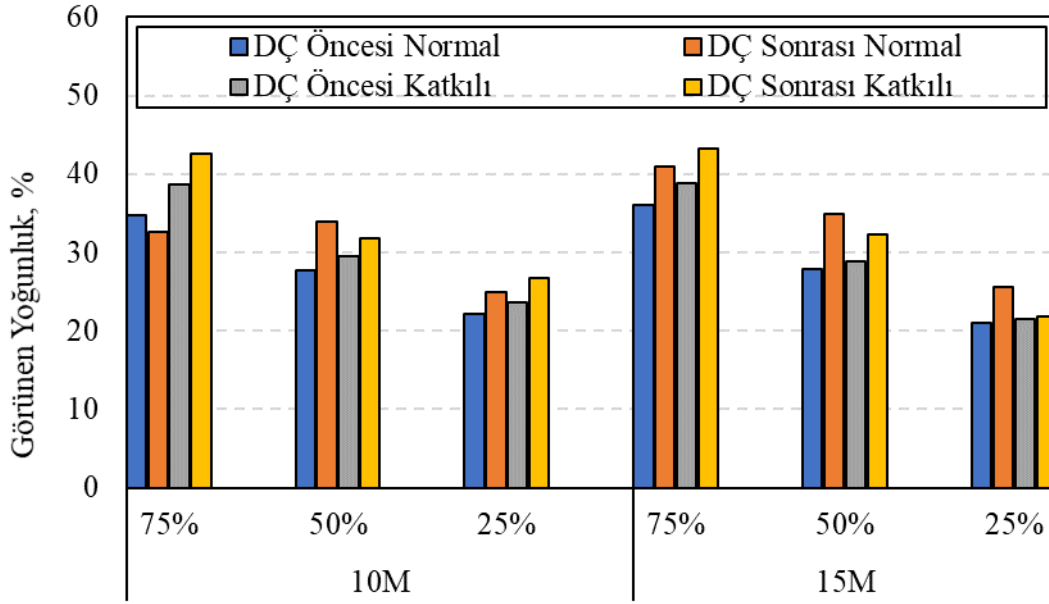
Şekil 4.49 Donma-çözülme öncesi ve sonrasında 10 M ve 15 M Katkısız ve katkılı seriler için su emme oranları.



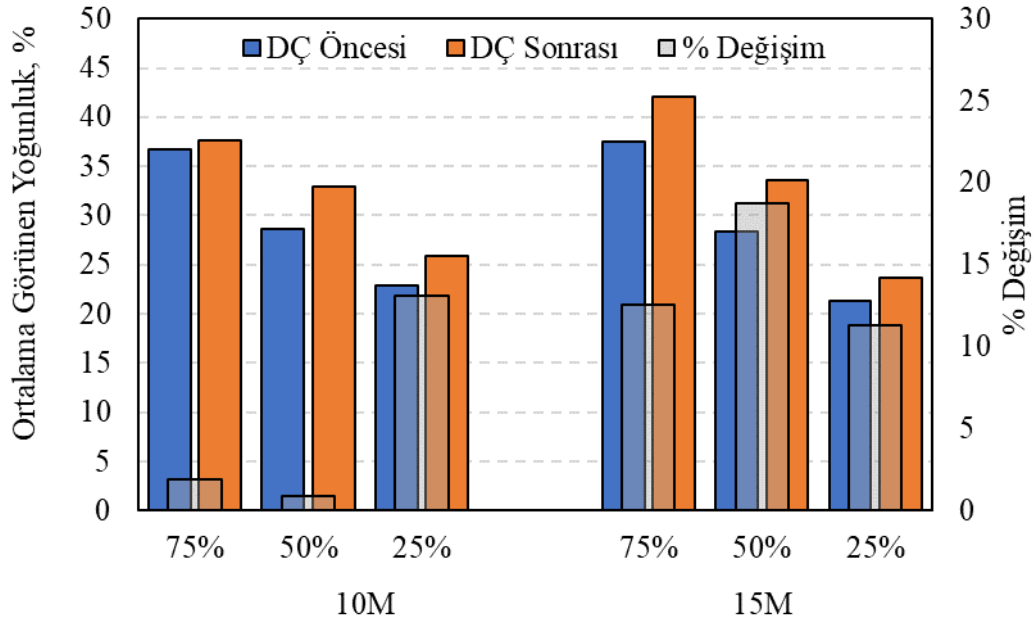
Şekil 4.50 Donma-çözülme öncesi ve sonrasında geopolimer harçların ortalama su emme oranlarındaki değişim.

Donma-çözülme öncesi ve sonrası numunelerin görünen yoğunluk (%) oranları karşılaştırılmıştır. 10 M için %75 perlit içeren numunelerde katkısız serilerde donma-çözülme sonrası görünen yoğunluk (%) oranı azalırken %50 ve %25 perlit içeren

numunelerde bu durum tam tersidir (Şekil 4.51). Katkılı serilerde ise tüm perlit oranlarında donma-çözülme sonrası görünen yoğunluk (%) oranında artış olduğu gözlemlenmiştir. 15 M için tüm perlit oranlarındaki numunelerde katkısız ve katkılı serilerde donma-çözülme sonrası görünen yoğunluk (%) oranı artış göstermiştir (Şekil 4.51 ve Şekil 4.52).

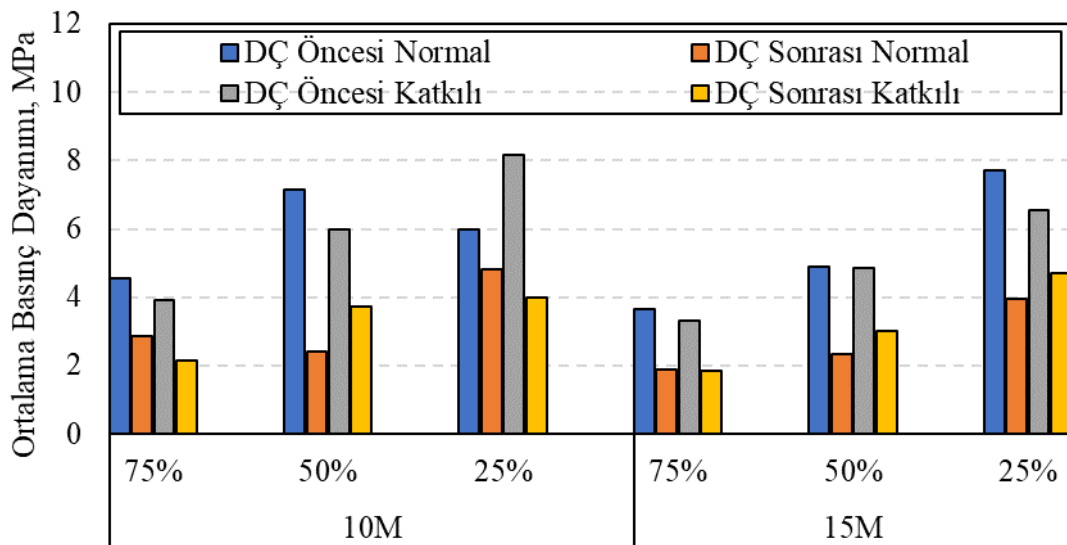


Şekil 4.51 Donma-çözülme öncesi ve sonrasında 10 M ve 15 M Katkısız ve katkılı seriler için görünen yoğunluk oranları.



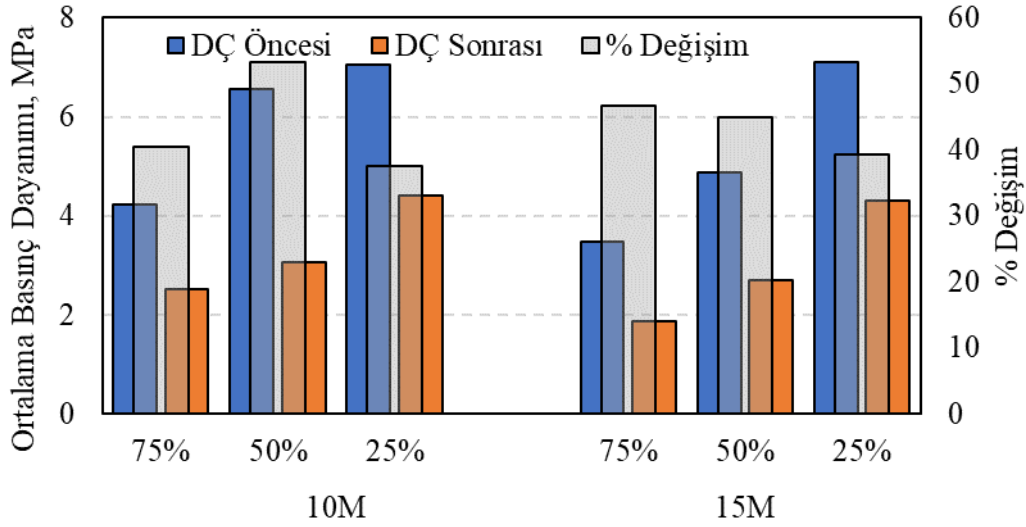
Şekil 4.52 Donma-çözülme öncesi ve sonrasında geopolimer harçların ortalama görünen yoğunluk oranlarındaki değişim.

Donma-çözülme öncesi ve sonrası numunelerin basınç dayanımları karşılaştırılmıştır. 10 M için tüm perlit oranlarında katkısız ve katkılı serilerde donma-çözülme sonrası ortalama basınç dayanımı azalmıştır (Şekil 4.53). 15 M için tüm perlit oranlarındaki numunelerde katkısız ve katkılı serilerde donma-çözülme sonrası ortalama basınç dayanımı azalmıştır (Şekil 4.53 ve Şekil 4.54).



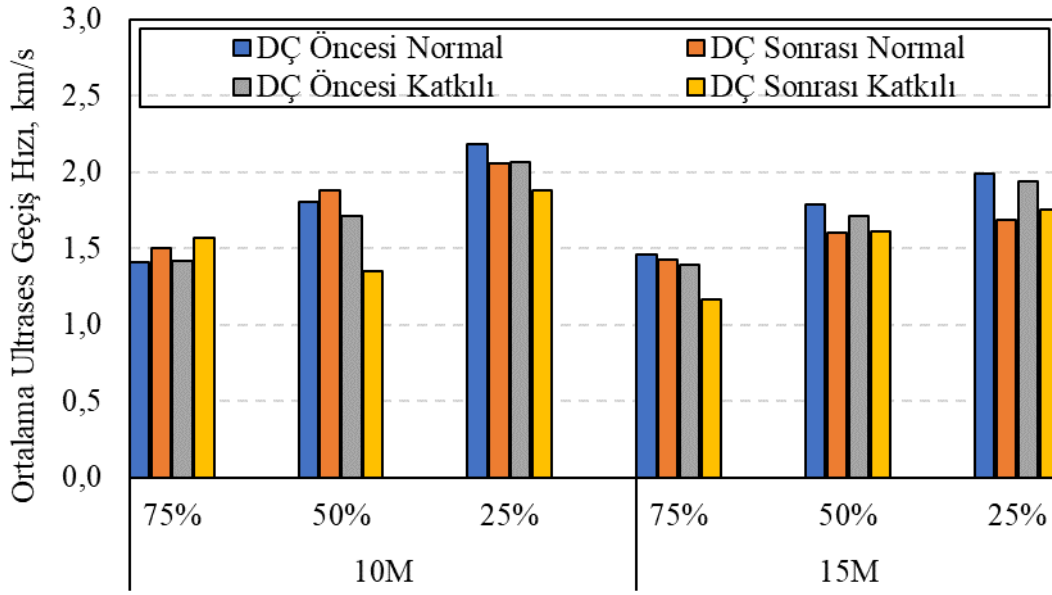
Şekil 4.53 Donma-çözülme öncesi ve sonrasında 10 M ve 15 M Katkısız ve katkılı seriler için

ortalama basınç dayanımları.

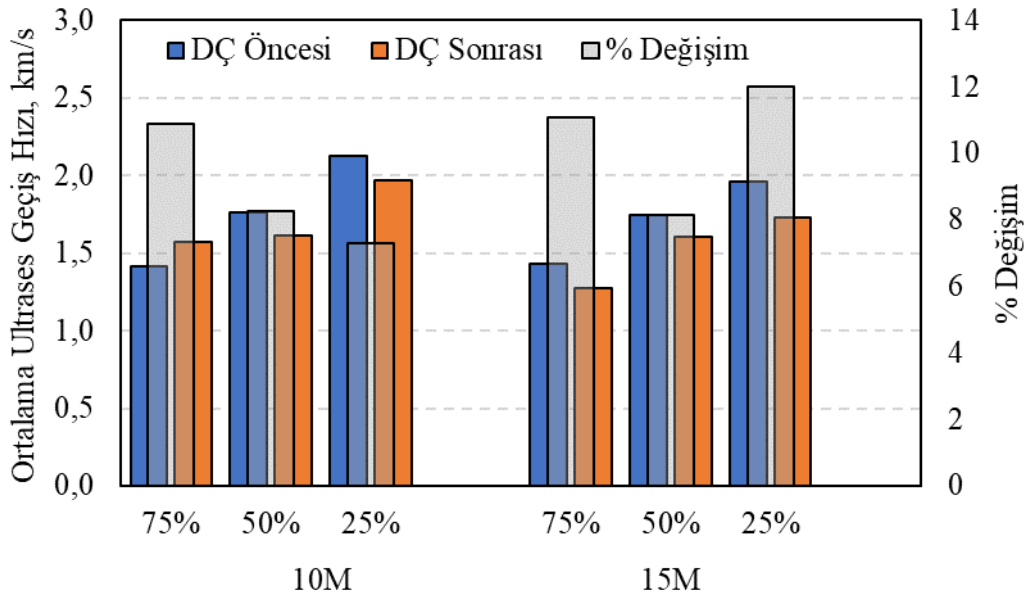


Şekil 4.54 Donma-çözülme öncesi ve sonrasında geopolimer harçların ortalama basınç dayanımlarındaki değişim.

Donma-çözülme öncesi ve sonrası numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri karşılaştırılmıştır. 10 M %75 ve %50 perlit içeren numunelerde katkısız serilerde donma-çözülme sonrası ortalama ultrases geçiş hızı değerleri artmıştır. %25 perlit içeren numunelerde katkısız serilerde donma-çözülme sonrası ortalama ultrases geçiş hızı değerleri azalmıştır (Şekil 4.55). 10 M %75 perlit içeren numunelerde katkılı serilerde donma-çözülme sonrası ortalama ultrases geçiş hızı değerleri artmıştır. %50 ve %25 perlit içeren numunelerde katkılı serilerde donma-çözülme sonrası ortalama ultrases geçiş hızı değerleri azalmıştır. 15 M için tüm perlit oranlarındaki numunelerde katkısız ve katkılı serilerde donma-çözülme sonrası ortalama ultrases geçiş hızı değerleri azalmıştır (Şekil 4.55 ve Şekil 4.56), (Şanlıtürk 2019).



Şekil 4.55 Donma-çözülme öncesi ve sonrasında 10 M ve 15 M Katkısız ve katkıli seriler için ortalama ultrases geçiş hızı değerleri.



Şekil 4.56 Donma-çözülme öncesi ve sonrasında geopolimer harçların ortalama ultrases geçiş hızı değerlerindeki değişim.

Donma-çözülme öncesindeki numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri perlit oranının azalmasına bağlı olarak artış göstermiştir. 10 M katkısız ve katkıli serilerdeki ultrases geçiş hızı değerleri 15 M katkısız ve katkıli numunelerdeki değerlere göre daha yüksektir (Şekil 4.57). Katkısız ve katkıli serilerde bir farklılık olmamıştır. Donma-çözülme

Şekil 4.58 Donma-çözülme sonrası harç yaşının ve bağlayıcı/agrega oranının katkısız ve katkılı serilerde ultrases geçiş hızı değerleri.

4.4 SEM ve EDS Analizleri

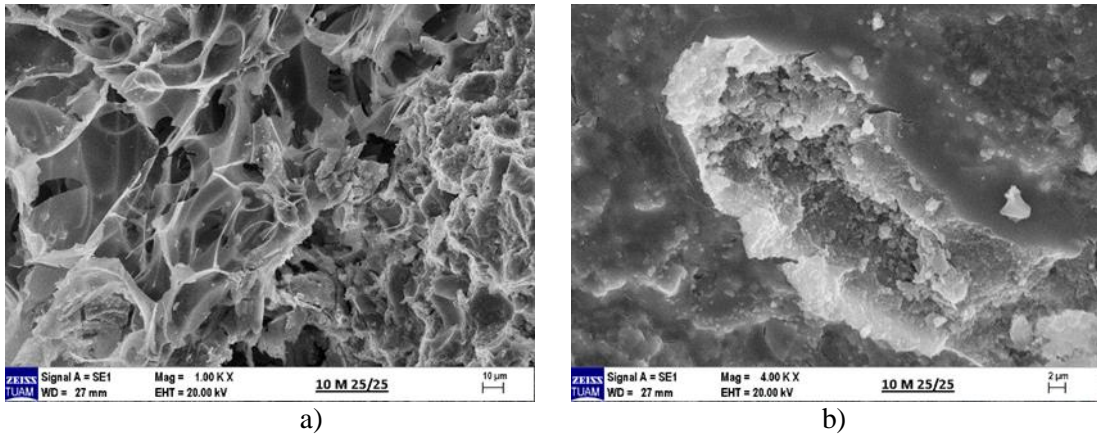
Geopolimer harç numunelerinden seçilen örnek üzerinde yapılan SEM görüntülemeleri ve EDS analiz sonuçları aşağıda verilmiştir (Çizelge 4.1-4.6 ve Resim 4.3-4.8). 10 M ve 15 M değerlerine sahip çözeltilerle üretilmiş %25, %50 ve %75 oranında öğütülmüş ham perlit içerikli binder ile %25, %50 ve %75 genişletilmiş perlit agregası içerikli harçlarda gözenekli perlit yapısı ve bunun geopolimer bağlayıcı ile oluşan arakesiti incelenmiştir. Bunun için incelenen tüm serilerde x1000 ve x4000 SEM görüntülerinin yanında x1000 görüntüleri üzerinde alansal EDS analizleri gerçekleştirilmiş ve bu bölgelerdeki Ca, Al, Si ve Na içerikleri haritalandırılmıştır.

Geopolimer harç üretiminde agrega olarak kullanılan genişletilmiş perlit, tipik olarak taneleri birbirinden iyi ayrılabilen, camsı yapıya sahip, küresel parçacıklardan oluşur. SEM görüntüleri incelendiğinde tüm serilerde genel olarak genişletilmiş perlit yapısı olarak granüller, şiddetli genişleme sürecinden dolayı düzensiz küçük parçalara sahip parçalanmış yüzeyler ve izole hücreler olarak açık ve kapalı gözenekler, ince duvarlı kabarcıklar ve içi boş mikro küreler içeren oldukça gözenekli bir mikro yapı ile karakterize edilir (Papa vd. 2018). Bu özellikleri harçların hazırlanması esnasında uygulanan karıştırma ve sıkıştırma işlemleri esnasında bozulmadan kalabilmiştir. Perlit kırıkları ile alkali çözelti arasındaki reaksiyon sonucunda geopolimer çökeltilerinin oluştuğunu göstermektedir. Perlitin çözünmesi ve çökertilmesinin öncelikle gözenekli yapının dış ince duvarında ve kesme karıştırma ve sıkıştırma ile desteklenen parçalar üzerinde gerçekleştiği varsayılmaktadır (Szabó vd. 2021).

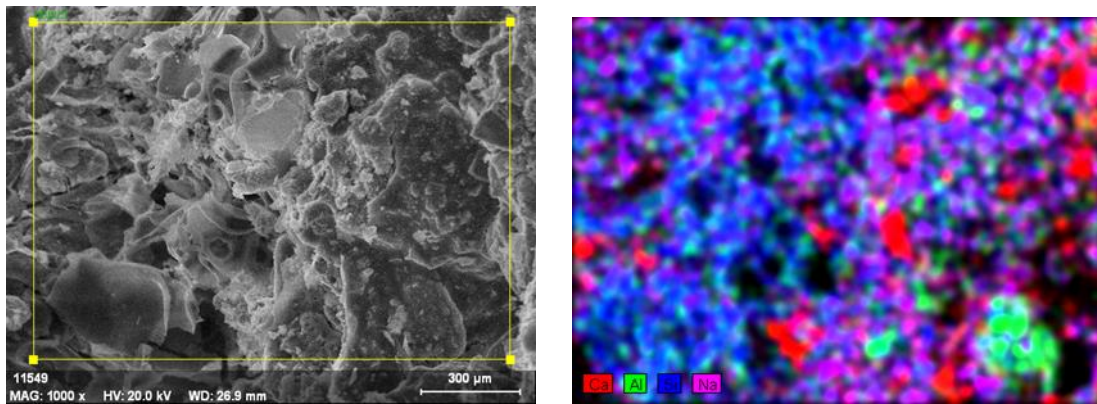
Genel olarak, ana morfolojik özellikler, kullanılan uçucu külün özelliğinden kaynaklanan (Özdemir 2001) kısmen reaksiyona giren senosfer, bir bölgeden yayılan iğnemsî şekilli taneler, lifli ürünler ve keskin geometrik dış hatları olmayan tip parçacıklar gözlenmektedir. Geopolimer jelin varlığı tüm serilerde yaygındır. Zeolite karşılık gelen bileşime sahip iğnemsî ve lifli özelliklerin oluşumu geopolimer jelin zeolite kısmen dönüştürülmesinden kaynaklanmıştır (Kumar ve Kumar 2011).

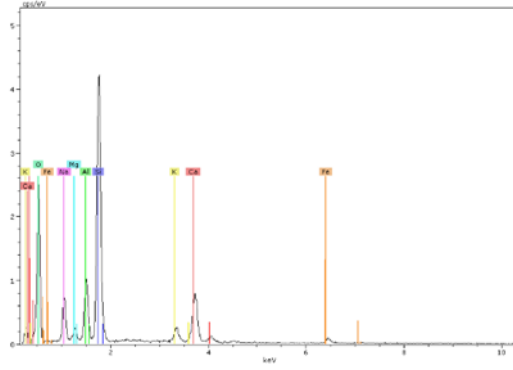
Resim 4.3-4.8’de görülen SEM görüntülerinden 10 M serilerde perlit oranının düşük olduğu serilerde çatlaksız bir matris gözlenirken perlit miktarının artması ile çatlaklı ve gözenekli bir yapı oluşmaktadır. Bağlayıcı faz olarak C-A-S-H ve N-A-S-H tipi geopolimer yapı mevcuttur. Yüksek perlit içeriği N-A-S-H tipi geopolimer jel oluşumunu arttırmaktadır (Aziz vd. 2021). EDS analizleri ile belirlenen sodyum, alüminyum, silisyum ve kalsiyum içeriği de bunu desteklemektedir.

SEM–EDS analizlerine göre 10 M 25/25 harç numunelerinin bünyesinde; sodyum, magnezyum, alüminyum, silis, potasyum, kalsiyum, demir ve oksijen bulunmaktadır (Çizelge 4.1 ve Resim 4.3 ve 4.4). Perlit oranının en düşük olduğu bu serilerde basınç dayanımı, birim hacim ağırlığı, görünür yoğunluk gibi fiziksel ve mekanik özelliklerde en yüksek değerler elde edilmiştir.



Resim 4.3 10 M 25/25 harç numunesinin SEM görüntüsü.



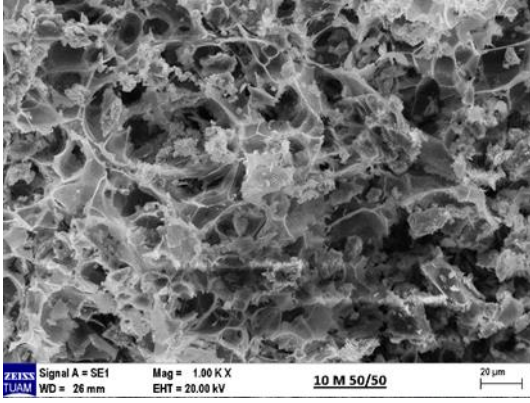


Resim 4.4 10 M 25/25 harç numunesinin SEM, haritalandırma görüntüsü ve EDS grafiği.

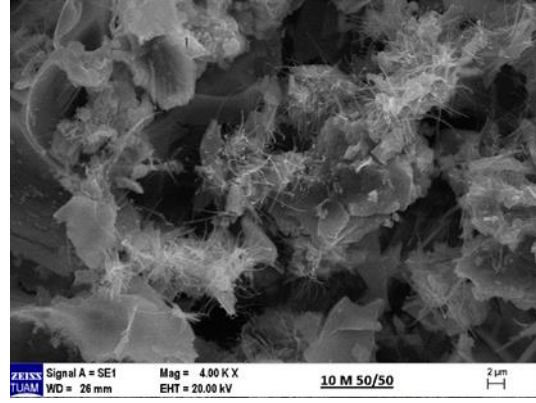
Çizelge 4.1 10 M 25/25 harç numunesine ait EDS verileri.

Element	Net	unn, C [ağ.-%]	norm, C [ağ.-%]	Atom, C [at.-%]	Oksit	Oksit, C [ağ.-%]
Sodyum	4366	6,22	5,62	4,88	Na ₂ O	9,62
Magnezyum	1231	1,25	1,13	0,92	Mg	1,43
Alüminyum	6991	5,7	5,15	3,81	Al ₂ O ₃	12,36
Silis	31712	24,11	21,8	15,48	SiO ₂	59,2
Potasyum	2177	1,92	1,74	0,89	K ₂ O	2,66
Kalsiyum	8160	7,33	6,63	3,3	CaO	11,76
Demir	859	1,81	1,64	0,59	Fe ₂ O ₃	2,98
Oksijen	14453	62,24	56,29	70,14		26,42

SEM–EDS analizlerine göre 10 M 50/50 harç numunelerinin bünyesinde; sodyum, magnezyum, alüminyum, silis, potasyum, kalsiyum, demir ve oksijen bulunmaktadır (Çizelge 4.2 ve Resim 4.5 ve 4.6). Perlit oranının arttığı bu serilerde basınç dayanımı, birim hacim ağırlığı, görünür yoğunluk gibi fiziksel ve mekanik özelliklerde 10 M 25/25 harç numunelerine göre daha düşük değerler elde edilmiştir. Perlit miktarının artması ile harçlarda çatlaklı ve gözenekli bir yapı oluştuğu gözlemlenmiştir. 10 M 25/25 harç numunelerine göre CaO, Al₂O₃, SiO₂ değerlerinde düşüş olduğu görülmüştür.

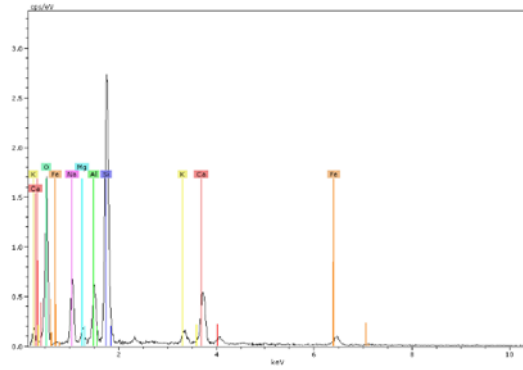
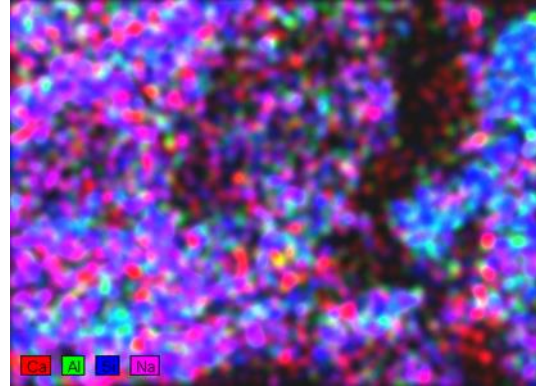
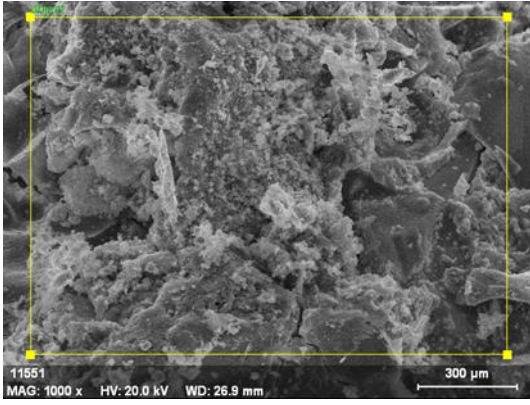


a)



b)

Resim 4.5 10 M 50/50 harç numunesinin SEM görüntüsü.

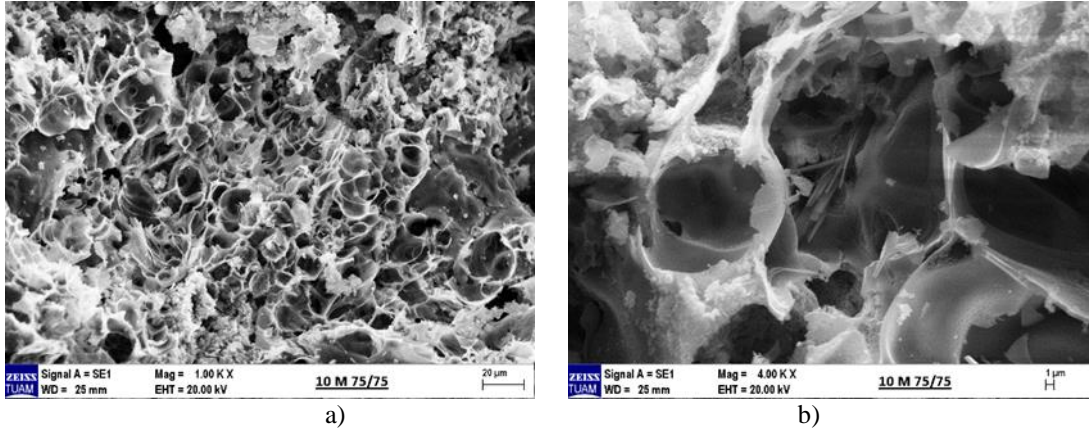


Resim 4.6 10 M 50/50 harç numunesinin SEM, haritalandırma görüntüsü ve EDS grafiği.

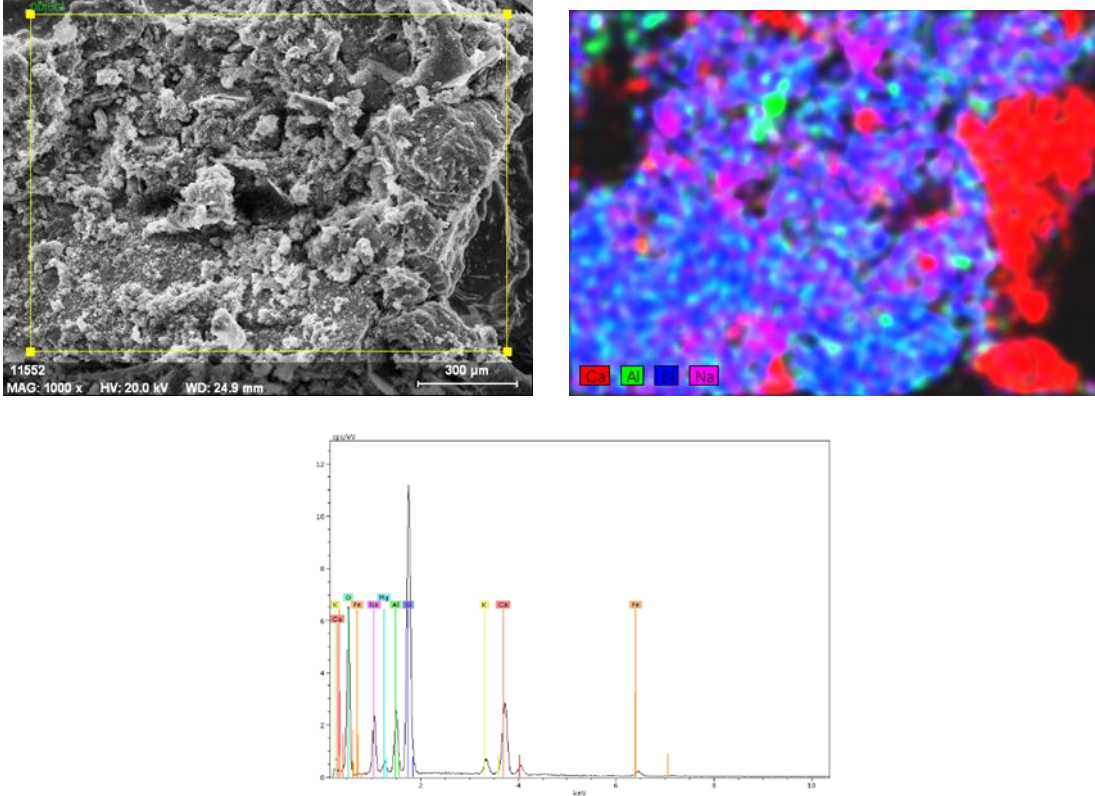
Çizelge 4.2 10 M 50/50 harç numunesine ait EDS verileri.

Element	Net	unn, C [ağ.-%]	norm, C [ağ.-%]	Atom, C [at.-%]	Oksit	Oksit, C [ağ.-%]
Sodyum	2986	8,49	7,86	6,81	Na ₂ O	13,41
Magnezyum	638	1,34	1,24	1,02	Mg	1,57
Alüminyum	3086	5,2	4,82	3,56	Al ₂ O ₃	11,52
Silis	14631	22,74	21,05	14,94	SiO ₂	57,03
Potasyum	842	1,29	1,19	0,61	K ₂ O	1,82
Kalsiyum	3987	6,14	5,68	2,83	CaO	10,07
Demir	768	2,72	2,52	0,9	Fe ₂ O ₃	4,57
Oksijen	6954	60,11	55,64	69,33		26,22

SEM–EDS analizlerine göre 10 M 75/75 harç numunelerinin bünyesinde; sodyum, magnezyum, alüminyum, silis, potasyum, kalsiyum, demir ve oksijen bulunmaktadır (Çizelge 4.3 ve Resim 4.7 ve 4.8). Perlit oranının arttığı bu serilerde basınç dayanımı, birim hacim ağırlığı, görünür yoğunluk gibi fiziksel ve mekanik özelliklerde 10 M 25/25 harç numunelerine göre daha düşük değerler elde edilmiştir. Perlit miktarının artması ile harçlarda çatlaklı ve gözenekli bir yapı oluştuğu gözlemlenmiştir. Diğer perlit oranlı harç numunelerine göre CaO değerinin en yüksek Al₂O₃, SiO₂ değerlerinin ise en düşük olduğu görülmüştür.



Resim 4.7 10 M 75/75 harç numunesinin SEM görüntüsü.

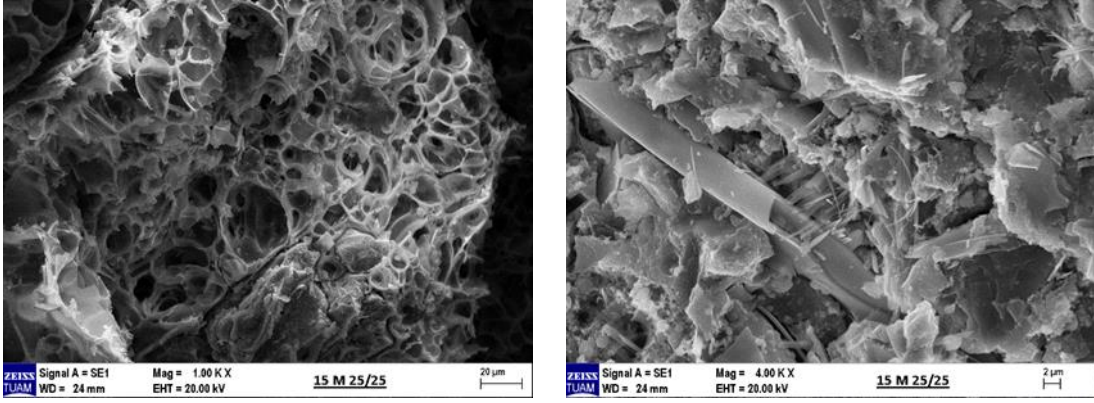


Resim 4.8 10 M 75/75 harç numunesinin SEM, haritalandırma görüntüsü ve EDS grafiği.

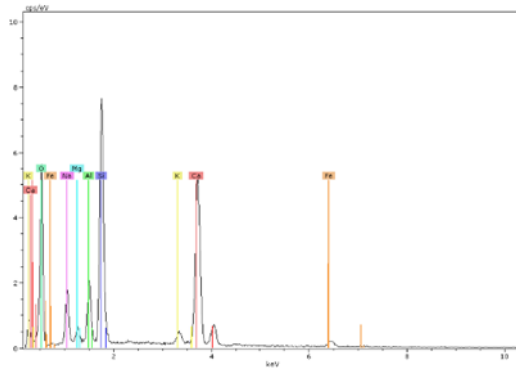
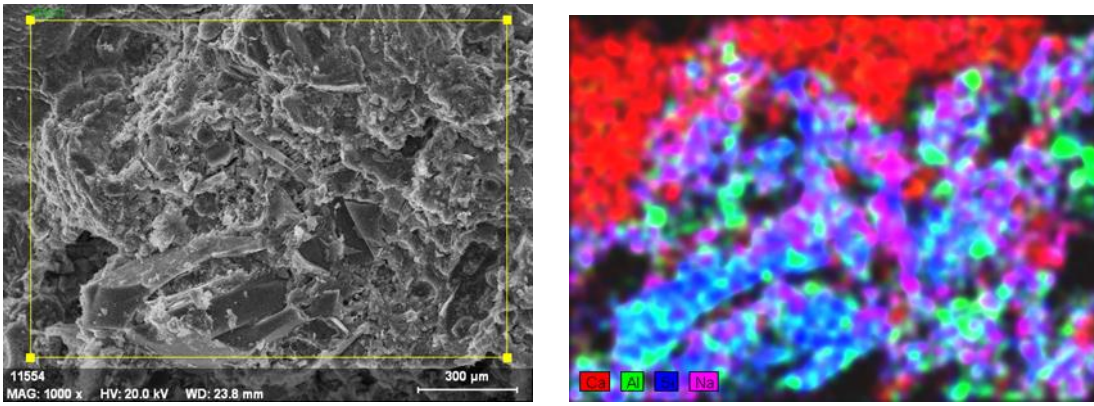
Çizelge 4.3 10 M 75/75 harç numunesine ait EDS verileri.

Element	Net	unn, C [ağ.-%]	norm, C [ağ.-%]	Atom, C [at.-%]	Oksit	Oksit, C [ağ.-%]
Sodyum	10713	7,59	6,79	5,92	Na ₂ O	11,72
Magnezyum	2313	1,18	1,06	0,87	Mg	1,35
Alüminyum	12310	5,02	4,5	3,34	Al ₂ O ₃	10,88
Silis	60053	22,59	20,22	14,42	SiO ₂	55,4
Potasyum	4082	1,73	1,55	0,79	K ₂ O	2,39
Kalsiyum	22337	10,01	8,96	4,48	CaO	16,05
Demir	1376	1,34	1,2	0,43	Fe ₂ O ₃	2,2
Oksijen	28696	62,24	55,72	69,75		27,42

SEM–EDS analizlerine göre 15 M 25/25 harç numunelerinin bünyesinde; sodyum, magnezyum, alüminyum, silis, potasyum, kalsiyum, demir ve oksijen bulunmaktadır (Çizelge 4.4 ve Resim 4.9 ve 4.10). Perlit oranının en az olduğu bu seride basınç dayanımı, birim hacim ağırlığı, görünür yoğunluk gibi fiziksel ve mekanik özelliklerde genellikle 10 M sahip farklı perlit oranlarındaki harç numunelerine göre daha yüksek değerler elde edilmiştir.



Resim 4.9 15 M 25/25 harç numunesinin SEM görüntüsü.

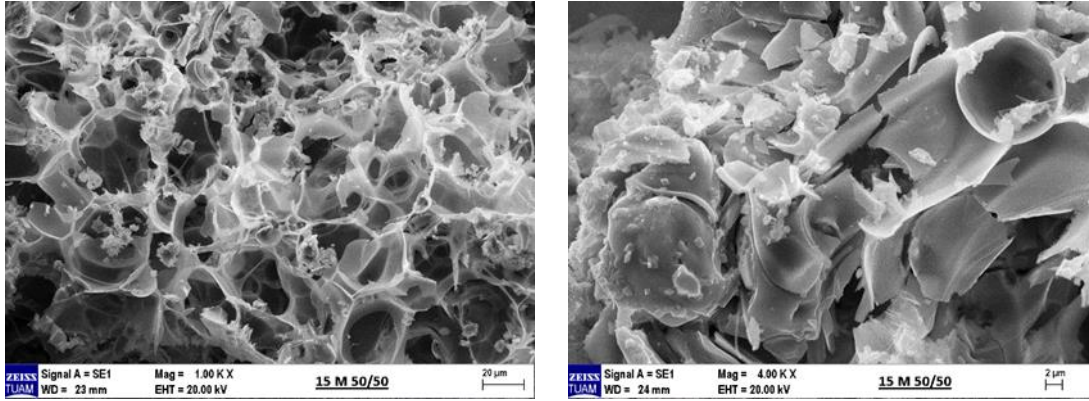


Resim 4.10 15 M 25/25 harç numunesinin SEM, haritalandırma görüntüsü ve EDS grafiği.

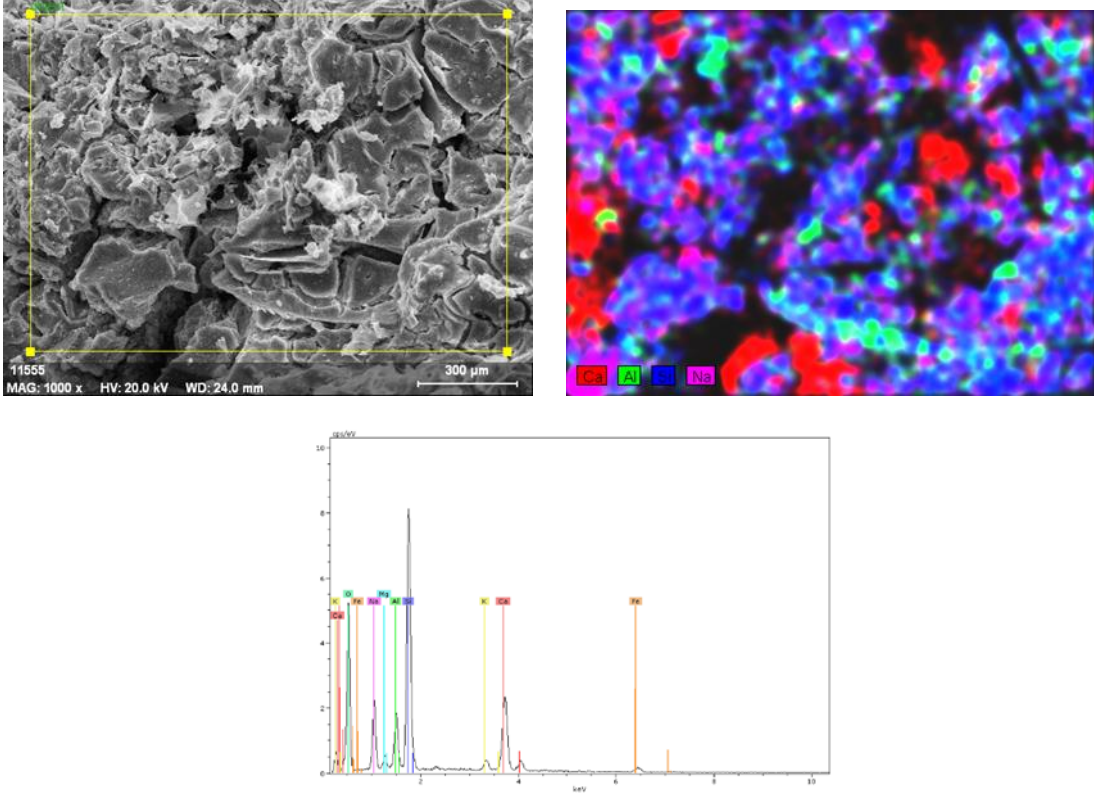
Çizelge 4.4 15 M 25/25 harç numunesine ait EDS verileri.

Element	Net	unn, C [ağ.-%]	norm, C [ağ.-%]	Atom, C [at.-%]	Oksit	Oksit, C [ağ.-%]
Sodyum	8202	6,12	5,76	5,1	Na ₂ O	10,56
Magnezyum	2487	1,32	1,24	1,04	Mg	1,69
Alüminyum	9831	4,16	3,92	2,95	Al ₂ O ₃	10,06
Silis	41239	15,84	14,91	10,79	SiO ₂	43,34
Potasyum	2974	1,16	1,09	0,57	K ₂ O	1,79
Kalsiyum	39656	16,4	15,44	7,83	CaO	29,36
Demir	1702	1,75	1,65	0,6	Fe ₂ O ₃	3,2
Oksijen	24084	59,45	55,98	71,12		33,54

SEM-EDS analizlerine göre 15 M 50/50 harç numunelerinin bünyesinde; sodyum, magnezyum, alüminyum, silis, potasyum, kalsiyum, demir ve oksijen bulunmaktadır (Çizelge 4.5 ve Resim 4.11 ve 4.12). Perlit oranının arttığı bu serilerde basınç dayanımı, birim hacim ağırlığı, görünür yoğunluk gibi fiziksel ve mekanik özelliklerde diğer harç numunelerine göre daha düşük değerler elde edilmiştir. Perlit miktarının artması ile harçlarda çatlaklı ve gözenekli bir yapı oluştuğu gözlemlenmiştir. 15 M 25/25 harç numunelerine göre CaO değerinin daha düşük, Al₂O₃ ve SiO₂ değerlerinin ise daha yüksek olduğu görülmüştür.



Resim 4.11 15 M 50/50 harç numunesinin SEM görüntüsü.



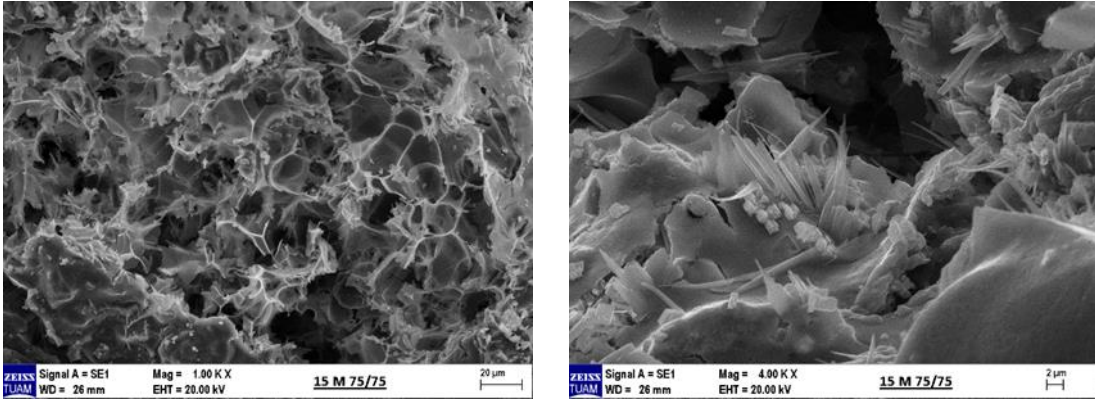
Resim 4.12 15 M 50/50 harç numunesinin SEM, haritalandırma görüntüsü ve EDS grafiği.

Çizelge 4.5 15 M 50/50 harç numunesine ait EDS verileri.

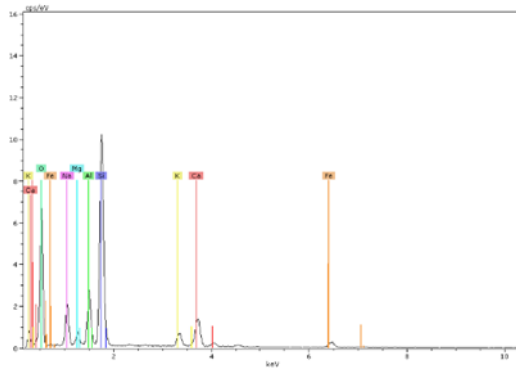
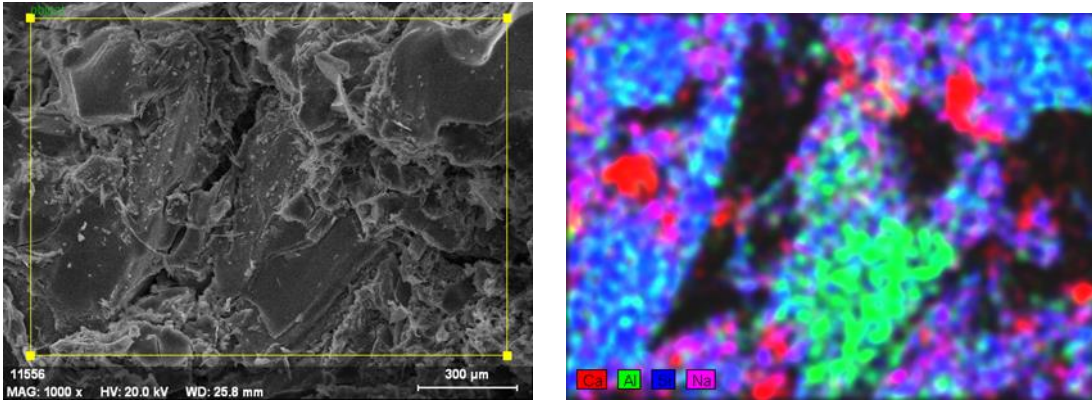
Element	Net	unn, C [ağ.-%]	norm, C [ağ.-%]	Atom, C [at.-%]	Oksit	Oksit, C [ağ.-%]
Sodyum	10854	9,17	8,24	7,15	Na ₂ O	14,31
Magnezyum	2289	1,44	1,29	1,06	Mg	1,66
Alüminyum	10067	5,06	4,55	3,36	Al ₂ O ₃	11,07
Silis	47210	21,8	19,59	13,9	SiO ₂	53,99
Potasyum	2256	1,04	0,93	0,48	K ₂ O	1,45
Kalsiyum	19698	9,61	8,64	4,3	CaO	15,57
Demir	1117	1,17	1,05	0,38	Fe ₂ O ₃	1,94
Oksijen	24234	61,95	55,69	69,38		27,86

SEM–EDS analizlerine göre 15 M 75/75 harç numunelerinin bünyesinde; sodyum, magnezyum, alüminyum, silis, potasyum, kalsiyum, demir ve oksijen bulunmaktadır (Çizelge 4.6 ve Resim 4.13 ve 4.14). Perlit oranının arttığı bu serilerde basınç dayanımı, birim hacim ağırlığı, görünür yoğunluk gibi fiziksel ve mekanik özelliklerde diğer harç numunelerine göre daha düşük değerler elde edilmiştir. Perlit miktarının artması ile harçlarda çatlaklı ve gözenekli bir yapı olduğu gözlemlenmiştir. Diğer perlit oranlı 15 M sahip harç numunelerine göre CaO değerinin en düşük, Al₂O₃ ve SiO₂ değerlerinin ise

en yüksek değerler olduğu görülmüştür.



Resim 4.13 15 M 75/75 harç numunesinin SEM görüntüsü.



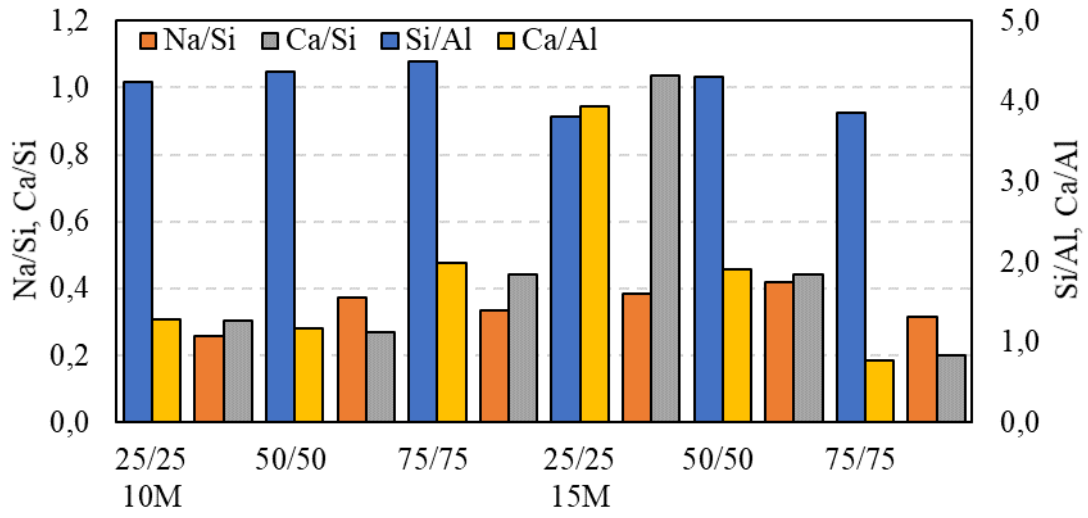
Resim 4.14 15 M 75/75 harç numunesinin SEM, haritalandırma görüntüsü ve EDS grafiği.

Çizelge 4.6 15 M 75/75 harç numunesine ait EDS verileri.

Element	Net	unn, C [ağ.-%]	norm, C [ağ.-%]	Atom, C [at.-%]	Oksit	Oksit, C [ağ.-%]
Sodyum	9771	8,36	7,07	6,15	Na ₂ O	11,69
Magnezyum	3202	2	1,69	1,39	Mg	2,07
Alüminyum	13550	6,85	5,79	4,29	Al ₂ O ₃	13,42
Silis	55675	26,42	22,34	15,91	SiO ₂	58,62
Potasyum	4231	2,05	1,73	0,88	K ₂ O	2,56
Kalsiyum	10651	5,34	4,51	2,25	CaO	7,75
Demir	2288	2,63	2,22	0,8	Fe ₂ O ₃	3,9
Oksijen	29213	64,63	54,65	68,32		23,09

N-A-S-H varlığını gösteren Na/Si oranı 0,3 ile 0,7 arasında olmaktadır ve optimum oran ise 0,5 dir (Cheah vd. 2019). Şekil 4.59 EDS grafiğinden elde edilen oranlar incelendiğinde Na/Si oranları 0,26 ile 0,42 arasında değerler almakta ve optimuma en yakın oranı 0,42 değeri ile 15 M 50/50 serisi göstermektedir. 10 M serilerde ise en yüksek Na/Si oranı 0,37 ile 50/50 oranında görülmektedir. C-A-S-H jel fazının Ca/Al oranının değeri 0,78 ile 3,94 arasında değişmektedir. En yüksek değer 15 M 25/25 serilerde görülmektedir. Oranın yüksek olduğu serilerde EDS değerlendirmesi yapılan alanda bulunan kalsiyum karbonat ürünlerinden dolayıdır. Bu dağılım haritalandırma ile net bir şekilde görülmektedir.

Si/Al molar oranı, geopolimerlerin basınç dayanımının yanı sıra mineralojik özellikleri üzerinde de büyük bir etkiye sahip gibi görünmektedir. Herhangi bir çözümlü silika ilavesi olmadan sentezlenen geopolimerler, azaltılmış basınç mukavemeti sunarken, geopolimerik matriste yeni oluşan zeolitik fazlar tespit edilebilir. Si/Al oranının ideal oranı aşması, basınç dayanımının düşmesine neden olur (Taxiarchou vd. 2013). EDS analizleri ile hesaplanan Si/Al oranı 3,80 ile 4,49 arasında değişmektedir.



Şekil 4.59 EDS analizlerine göre harç numunelerdeki Ca/Si, Ca/Al, Al/Si ve Na/Si oranları.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Geopolimer harç örneklerinde farklı miktarlarda uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve perlit ikame edilen karışımların fiziksel ve mekanik özelliklerinde meydana getirdiği değişimlerin araştırıldığı bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Harçların hazırlanmasında üç farklı perlit ikamesi (%25, %50 ve %75) yapılmıştır. Eklenen perlit oranları dikkate alındığında perlit oranının %25 olduğu durumda daha yüksek basınç dayanımları elde edilmiştir.

Perlit yapısındaki büyük gözenekler nedeniyle su talebini artırmıştır. Perlitli geopolimer harç numunelerindeki perlit miktarı arttıkça numunelerin birim hacim ağırlığı düşmektedir. Katkısız ve katkılı serilerde molariteye bağlı değişiklikler gözlenmiştir. Perlitli geopolimer harç numunelerinin birim hacim ağırlığı düştükçe basınç dayanımları artmaktadır. Harç numunelerinden elde edilen birim hacim ağırlık değerleri incelendiğinde uygulanan kür süresinin artması ve perlit oranının düşmesi ile birlikte numunelerin birim hacim ağırlık değerlerinde artış olduğu belirlenmiştir.

Perlitli geopolimer harç numunelerindeki perlit miktarı arttıkça numunelerin görünür yoğunluğu düşmektedir. Harç numunelerinden elde edilen görünür yoğunluk değerleri incelendiğinde 7 günlük katkılı seriler için daha yüksek değerler elde edilmiştir.

Perlitli geopolimer harç numunelerindeki perlit miktarı azaldıkça numunelerin su emme oranı azalmaktadır. Harç numunelerinden elde edilen su emme oranı değerleri incelendiğinde uygulanan kür süresinin artması ve perlit oranının düşmesi ile birlikte numunelerin su emme oranı değerlerinde azalma olduğu belirlenmiştir. Katkılı serilerde su emme oranı değerlerinin daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

Perlitli geopolimer harç numunelerindeki perlit miktarı azaldıkça numunelerin görünür porozite değeri azalmaktadır. Harç numunelerinden elde edilen görünür porozite değerleri incelendiğinde uygulanan kür süresinin artması perlit oranının düşmesi ile birlikte numunelerin görünür porozite değerlerinde azalma olduğu belirlenmiştir. Katkılı

serilerde görünen porozite değerlerinin daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

Perlitli geopolimer harç numunelerinde perlit oranı azaldıkça basınç dayanımı artmaktadır. Harç numunelerinden elde edilen basınç dayanım değerleri incelendiğinde uygulanan kür süresinin artması ile birlikte numunelerin dayanımlarında artış olduğu belirlenmiştir.

Donma-çözülme döngülerini tamamlamada en yüksek oran 15 M katkısız olan serilere aittir. Donma-çözülme öncesi ve sonrası numunelerin birim hacim ağırlıkları karşılaştırılmıştır. 10 M için %75 ve %50 perlit içeren numunelerde katkısız serilerde donma-çözülme sonrası artış olurken %25 perlit içeren numunelerde katkısız serilerde donma-çözülme sonrası azalma meydana gelmiştir. Katkılı serilerde ise donma-çözülme sonrası birim hacim ağırlığında azalma olmuştur. 15 M için %75 perlit içeren numunelerde katkısız serilerde donma-çözülme sonrası artış olurken %50 ve %25 perlit içeren numunelerde katkısız serilerde donma-çözülme sonrası azalma olmuştur. Katkılı serilerde ise %75 ve %50 perlit içeren numunelerde donma-çözülme sonrası azalma olurken %25 perlit içeren numunelerde donma-çözülme sonrası birim hacim ağırlığında artış olmuştur.

Donma-çözülme öncesi ve sonrası numunelerin görünür yoğunlukları karşılaştırılmıştır. 10 M için katkısız ve katkılı serilerde donma-çözülme sonrası ortalama görünür yoğunlukta artış olmuştur. 15 M için %75 perlit içeren numunelerde katkısız serilerde donma-çözülme sonrası artış olurken %50 ve %25 perlit içeren numunelerde katkısız serilerde donma-çözülme sonrası azalmıştır. Katkılı serilerde ise %75 ve %50 perlit içeren numunelerde donma-çözülme sonrası azalma olurken %25 perlit içeren numunelerde ise donma-çözülme sonrası görünür yoğunlukta artış olmuştur.

Donma-çözülme öncesi ve sonrası numunelerin su emme (%) oranları karşılaştırılmıştır. 10 M için %75 perlit içeren numunelerde katkısız serilerde donma-çözülme sonrası su emme (%) oranı azalırken %50 ve %25 perlit içeren numunelerde bu durum tam tersidir. Katkılı serilerde ise tüm perlit oranlarında donma-çözülme sonrası su emme (%) oranında artış olmuştur 15 M için tüm perlit oranlarındaki numunelerde katkısız serilerde donma-

çözülme sonrası su emme (%) oranı artış göstermiştir. Katkılı serilerde ise %75 ve %50 perlit içeren numunelerde donma-çözülme sonrası artış olurken %25 perlit içeren numunelerde donma-çözülme sonrasında herhangi bir değişiklik olmamıştır.

Donma-çözülme öncesi ve sonrası numunelerin görünen yoğunluk (%) oranları karşılaştırılmıştır. 10 M için %75 perlit içeren numunelerde katkısız serilerde donma-çözülme sonrası görünen yoğunluk (%) oranı azalırken %50 ve %25 perlit içeren numunelerde bu durum tam tersidir. Katkılı serilerde ise tüm perlit oranlarında donma-çözülme sonrası görünen yoğunluk (%) oranında artış olmuştur. 15 M için tüm perlit oranlarındaki numunelerde katkısız ve katkılı serilerde donma-çözülme sonrası görünen yoğunluk (%) oranı artış göstermiştir. Donma-çözülme döngüleri sonunda tüm numuneler katkısız ve katkılı seri fark etmeksizin dayanım kaybına uğramıştır.

Donma-çözülme öncesi ve sonrası numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri karşılaştırılmıştır. 10 M %75 ve %50 perlit içeren numunelerde katkısız serilerde donma-çözülme sonrası ortalama ultrases geçiş hızı değerleri artmıştır. %25 perlit içeren numunelerde katkısız serilerde ise donma-çözülme sonrası ortalama ultrases geçiş hızı değerleri azalmıştır. 10 M %75 perlit içeren numunelerde katkılı serilerde donma-çözülme sonrası ortalama ultrases geçiş hızı değerleri artmıştır. %50 ve %25 perlit içeren numunelerde katkılı serilerde donma-çözülme sonrası ortalama ultrases geçiş hızı değerleri azalmıştır. 15 M için tüm perlit oranlarındaki numunelerde katkısız ve katkılı serilerde donma-çözülme sonrası ortalama ultrases geçiş hızı değerleri azalmıştır.

Perlit oranının azaldığı serilerde donma-çözülme döngüsünü tamamlama oranının yüksek olduğu görülmektedir.

Harçta agreganın bir parçası olarak geliştirilmiş perlitin ilave edilmesi su emme, geçirgenlik, gözeneklilik gibi özellikleri arttırmıştır.

Perlit, sıvalarda ve tek kat harçlarda en önemli özelliklerden biri olarak kabul edilen harçların işlenebilirliğini geliştirmek için faydalıdır.

Çalışmanın sonucunda perlitin önemli bir puzolanik etkiye sahip olduğu ve geopolimer harç için iyi bir aktif mineral katkı maddesi olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak perlitli geopolimer harç karışımlarında uygun geliştirilmiş perlit agregası seçiminin, harçların birim hacim ağırlık, su emme, görünür porozite, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı gibi özelliklerini olumlu yönde etkilediğini göstermektedir.

Perlit ve hava sürükleyici katkının hidrofobik olması sebebiyle bu çalışmada katkının bariz bir faydası görülmemiştir. Bu yüzden perlit ile ilgili çalışma yapılırken hidrofilik bir katkı seçilmesinin sonuçlarda değişikliğe sebep olup olmayacağına bakılabilir. Bunun yanında çimentolu harç ve beton için üretilen hava sürükleyici katkının geopolimerler için ayrıca değerlendirilmesi ve geliştirilmesi de gerekebilir.

Perlit ülkemizde büyük oranda rezerve sahiptir. Perlitin inşaat sektöründe kullanım alanının artırılması ile ekonomimiz açısından önemli yararlar sağlanacağı öngörülmektedir. Bu nedenle perlitin inşaat sektöründe verimli kullanımına katkı sağlayacak şekilde perlit katkılı hafif betonların ve harçların üretilmesi yapılan bu çalışmanın literatüre katkı sağlayacağı ümit edilmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Abdullah V, Aydın E, Bedirhanoglu İ, 2016, Beton Elastisite Modülünün Ultrasonik Ses Dalgası Yayılma Hızı ile Tahmin Edilmesi, Dicle Üniversitesi Mühendislik Dergisi, 3, 475-484.
- ACI 233R-95, 2000, Ground Granulated Blast-Furnace Slag As A Cementitious Constituent In Concrete, 18, USA.
- Alkaya D, 2002, Uçucu Kül Katkısının Dolgu Zeminlerin Stabilitesine Etkisi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi,203s, Denizli.
- Alkaya D, 2009, Uçucu Küllerin Zemin İyileştirmesinde Kullanılmasının İncelenmesi Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 5, 61-72.
- Altındağ R, Güney A, 2006, ISRM Suggested Method for Determining The Shore Hardness Value, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43, 19-22.
- Amran M, Debbarma S, Ozbakkaloglu T, 2021, Fly Ash-Based Eco-Friendly Geopolymer Concrete: A Critical Review of The Long-Term Durability Properties, Construction and Building Materials, 270, 121857.
- ASTM C 618, 2019, Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan For Use As A Mineral Admixture In Portland Cement Concrete, ASTM, Philadelphia.
- ASTM C 597, 2003, Standard Test Method For Pulse Velocity Through Concrete, ASTM, Philadelphia.
- Aydın T, 2017, The Impact of Quartz And Metakaolen Additives on The Properties of Geopolymers. Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 9, 41–49.
- Aziz A, Benzaouak A, Bellil A, Alomayri T, El Hassani I E E N, Achab M, Shaikh, vd. 2021, Effect of Acidic Volcanic Perlite Rock on Physio-Mechanical Properties And Microstructure of Natural Pozzolan Based Geopolymers, Case Studies In Construction Materials, 15, e00712.

- Barbosa V F F, MacKenzie K J D, 2003, Synthesis and Thermal Behaviour of Potassium Sialate Geopolymers, *Materials Letters*, 57, 1477-1482.
- Bernal S A, Provis J L, Rose V, de Gutierrez R M, 2011, Evolution of Binder Structure In Sodium Silicate-Activated Slag-Metakaolin Blends, *Cement and Concrete Composites*, 33, 46-54.
- Bilim C, 2006, Yüksek Fırın Cürufu Katkısının Çimento Tabanlı Malzemelerde Kullanılabilirliği, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 206s, Adana.
- Bondar D, Lynsdale C J, Milestone N B, Hassani N, Ramezaniyanpour A A, 2011, Effect of Type, Form, and Dosage of Activators on Strength of Alkali-Activated Natural Pozzolans, *Cement and Concrete Composites*, 33, 251-260.
- Cheah C B, Tan L E, Ramli M, 2019, The Engineering Properties and Microstructure of Sodium Carbonate Activated Fly Ash/Slag Blended Mortars with Silica Fume. *Composites Part B: Engineering*, 160, 558-572.
- Çelikten S, Sarıdemir M, 2018, An Investigation on The Production Potential of Geopolymer Mortar with Tunçbilek Fly Ash, Cement, Concrete and Jeopolymers, IV. International Ceramic, Glass, Porcelain Enamel, Glaze and Pigment Congress, October 10-12, Eskişehir, Anadolu Üniversitesi, 295–300.
- Çiçek Y E, 2002, Pişmiş Toprak Tuğla, Bimsbeton, Gazbeton Ve Perlitli Yapı Malzemelerinin Fiziksel, Kimyasal Ve Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 129s, İstanbul.
- Deb P S, Nath P, Sarker P K, The Effects of Ground Granulated Blast-Furnace Slag Blending with Fly Ash and Activator Content on The Workability and Strength Properties of Geopolymer Concrete Cured At Ambient Temperature, *Materials & Design (1980-2015)*, 62, 32-39.
- Demirboğa R, Örüng I, Gül R, 2001, Effects of Expanded Perlite Aggregate and Mineral Admixtures on The Compressive Strength of Low-Density Concretes, *Cement and Concrete Research*, 31, 1627-1632.
- DPT, 2001 a, Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Yapı Malzemeleri III (Pomza,

- Perlit, Vermikülit, Flogopit, Genleşen Killer), Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Sekizinci Beş Yıllık (2001-2005) Kalkınma Planı, 2617, 628, Ankara.
- DPT, 2001 b, 8. Kalkınma Planı (2001-2005) Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Ankara.
- Duxon P, Fernandez-Jimenez A, Provis J.L, Lukey G.C, Palomo A, Van Deventer J S J, 2007, Geopolymer Technology: The Current State of The Art, Journal of Materials Science, 42, 2917-2933.
- El Mir A, Nehme S G, 2017, Utilization of Industrial Waste Perlite Powder In Self-Compacting Concrete, Journal of Cleaner Production, 156, 507-517.
- El Mir A, Nehme S G, Essaad J J, 2020, Durability of Self Consolidating Concrete Containing Natural Waste Perlite Powders, Heliyon, 6, doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03165.
- Erdoğan T Y, 1995, Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu ve Kullanımı, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu Bildiriler Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 1-11, Ankara.
- Erdoğan S T, 2015, Properties of Ground Perlite Geopolymer Mortars, Journal of Materials in Civil Engineering, 27,04014210.
- Escalante J I, Gómez L Y, Johal K K, Mendoza G, Mancha, H, Méndez, J, 2001, Reactivity of Blast-Furnace Slag in Portland Cement Blends Hydrated Under Different Conditions, Cement and Concrete Research, 31, 1403–1409.
- Esfandiari J, Loghmani P, 2019, Effect of Perlite Powder and Silica Fume on The Compressive Strength and Microstructural Characterization of Self-Compacting Concrete with Lime-Cement Binder, Measurement, Volume 147, doi.org/10.1016/j.measurement.2019.07.074.
- EIE, 1979, Türkiye Uçucu Küllerinin Özellikleri ve Kullanılma Olanakları, Ankara.
- EIE, 1982, Türkiye Uçucu Küllerinin Özellikleri, EIE Yayını, 82: 21-28. Ankara.
- Gökçe H S, Şimşek O, Durmuş G, Demir İ, 2010, Ham Perlit Agregalı Hafif Beton Özelliklerine Alternatif Genleştirilmiş Perlit Kullanımının Etkisi, Politeknik

- Dergisi, 13, 159-163.
- Görhan G, Kürklü G, 2014, The Influence of The NaOH Solution on The Properties of The Fly Ash-Based Geopolymer Mortar Cured at Different Temperatures, Composites Part B: Engineering, 58, 371-377.
- Güzelküçük S, 2020, Isı Yalıtım Kabiliyetine Sahip Perlit Esaslı Geopolimer Bağlayıcı Harçların Geliştirilmesi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 150s, Kırıkkale.
- Hewlett P C, 2004, LEA's Chemistry of Cement and Concrete, Butterworth Heinemann, Oxford, England.
- Hossain M U, Poon C S, Dong Y H, Xuan D, 2018, Evaluation of Environmental Impact Distribution Methods for Supplementary Cementitious Materials, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82, 597-608.
- Hycnar J, 1983, Reducing Harmful Influence of Power Stations on The Natural Environmental by The Utilization of Fly Ashes and Slags. UNEP/USSR, Donetok.
- Jamei M, Guiras H, Chtourou Y, Kallel A, Romero E, Georgopoulos I, 2011, Water Retention Properties of Perlite As A Material With Crushable Soft Particles, Engineering Geology, 122, 261-271.
- Kaplan G, Gültekin A B, 2010, Yapı Sektöründe Uçucu Kül Kullanımının Çevresel ve Toplumsal Etkiler Açısından İncelenmesi, 1.Uluslararası Sürdürülebilir Yapılar Sempozyumu, 26-28 Mayıs, Gazi Üniversitesi, Ankara, 59-64.
- Kasaniya M, Thomas M D A, Moffatt E G, 2021, Pozzolanic Reactivity of Natural Pozzolans, Ground Glasses and Coal Bottom Ashes and Implication of Their Incorporation on The Chloride Permeability of Concrete, Cement and Concrete Research, 139, doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106259.
- Kavasoglu E, 2019, Mikro Fiber ve Uçucu Kül Katkılı Çimento Harçlarının Dayanıklılık İndeksinin Belirlenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 79s, Afyon.
- Kefelioğlu S, 1998, Türkiye Uçucu Küllerinin Özellikleri ve Kullanılma İmkanları, Teknoloji.

- Keskin F Ş, Yıldırım S T, Taguchi Metoduyla Deneysel Tasarım Kullanarak Yalıtımlı Harç İçin Perlit ve Taban Külü Kullanılabilirliğinin Araştırılması, El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi, 3, 91-102.
- Kocakerimoğlu F, 2020, Köpük Beton Üretiminde Farklı Mineral Katkıların Fiziksel ve Mekanik Özelliklere Etkisinin Araştırılması, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 103s, Afyon.
- Kozhukhova N I, Chizhov R V, Zhernovsky I V, Strokova V V, 2016, Structure Formation of Geopolymer Perlite Binder vs. Type of Alkali Activating Agent, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 11, 12275-12281.
- Kumar S, Kumar R, 2011, Mechanical Activation of Fly Ash: Effect on Reaction, Structure and Properties of Resulting Geopolymer, Ceramics International, 37, 533-541.
- Lyon R E, Balaguru P N, Foden A, Sorathia U, Davidovits J, Davidovics M, 1997, Fire-Resistant Aluminosilicate Composites. Fire and Materials, 21, 67-73.
- Marvila M T, Azevedo D A R G, Oliveira L B D, Xavier G D C, Vieira C M F, 2021, Mechanical, Physical and Durability Properties of Activated Alkali Cement Based on Blast Furnace Slag As A Function of %Na₂O, Case Studies In Construction Materials, 15, doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00723.
- Moffatt E G, Thomas M D A, Fahim A, 2017, Performance of High-Volume Fly Ash Concrete In Marine Environment, Cement and Concrete Research, 102, 127-135.
- Moffatt E G, Thomas M D A, 2018, Performance of 25-Year-Old Silica Fume and Fly Fsh Lightweight Concrete Blocks In A Harsh Marine Environment, Cement and Concrete Research, 113, 65-73.
- Morrison R E, 1970, A Review of Ash Specifications, Symposium on Fly Ash Utilization, 24-31, Pittsburgh.
- Neupane K, 2016, Fly Ash and GGBFS Based Powder-Activated Geopolymer Binders: A Viable Sustainable Alternative of Portland Cement in Concrete Industry, Mechanics of Materials, 103, 110-122.
- Newman J, Choo B S, 2003, Advanced Concrete Technology Constituent Materials,

Elsevier Butterworth Heinemann, Oxford, England.

- Özdemir O, 2001, Tunçbilek Termik Santrali Uçucu Küllerinin Karakterizasyonu Ve Yan Ürünlerinin Eldesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 114s, İstanbul.
- Pal S C, Mukherjee A, Pathak S R, 2003, Investigation of Hydraulic Activity of Ground Granulated Blast Furnace Slag In Concrete, *Cement and Concrete Research*, 33, 1481–1486.
- Panias D, Giannopoulou I P, Perraki T, 2007, Effect of Synthesis Parameters on The Mechanical Properties of Fly Ash-Based Geopolymers, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 301, 246–254.
- Papa E, Medri V, Murri A N, Laghi L, De Aloysio G, Bandini S, vd. 2018, Characterization of Alkali Bonded Expanded Perlite, *Construction and Building Materials*, 191, 1139-1147.
- Rashad A M, 2016, A Synopsis About Perlite As Building Material–A Best Practice Guide for Civil Engineer, *Construction and Building Materials*, 121, 338-353.
- Reddy B K, Varaprasad J, Reddy K K, 2010, Strength and Workability of Low Lime Fly-Ash Based Geopolymer Concrete, *Indian J. Eng. Sci. Technol*, 3, 1188-1189.
- Sadjadi S, Koohestani F, 2021, Palladated Composite of Cu-BDC MOF and Perlite As An Efficient Catalyst for Hydrogenation of Nitroarenes, *Journal of Molecular Structure*, 1250, 131793.
- Sarıdemir M, Çelikten S, 2017, The Strength Properties of Alkali-Activated Silica Fume Mortars, *Computers and Concrete*, 19, 153-159.
- Sumesh M, Alengaram U J, Jumaat M Z, Mo K H, Alnahhal M F, 2017, Incorporation of Nano-Materials In Cement Composite and Geopolymer Based Paste and Mortar– A rReview, *Construction and Building Materials*, 148, 62-84.
- Szabó R, Dolgos F, Debreczeni Á, Mucsi G, 2021, Characterization of Mechanically Activated Fly Ash-Based Lightweight Geopolymer Composite Prepared with Ultrahigh Expanded Perlite Content, *Ceramics International*, In press.
- Şanlıtürk, F, 2019, Kaplamalı ve Kaplamasız Perlit Agregasıyla Üretilen Harçların

Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 60s, Tekirdağ.

Şengül O, Azizi S, Karaosmanoglu F, Tasdemir M A, 2011, Effect of Expanded Perlite on The Mechanical Properties and Thermal Conductivity of Lightweight Concrete, *Energy and Buildings*, 43, 671–676.

Taylor H F W, 1997, *Cement Chemistry*, 2nd Edition. 10.1680/cc.25929.

Taxiarchou M, Panias D, Panagiotopoulou C, Karalis A, Dedeloudis C, 2013, Study on The Suitability of Volcanic Amorphous Aluminosilicate Rocks (Perlite) for The Synthesis of Geopolymer-Based Concrete, *Geopolymer Binder Systems*, ASTM International

Topçu İ B, Canbaz M, 2007, Alkali Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürüflü Harçların Fiziksel Özellikleri, *Yapı Mekaniği Semineri*, Haziran 2007, Eskişehir, 156-162.

Torres M L, García-Ruiz P A, 2009, Lightweight Pozzolanic Materials Used In Mortars: Evaluation of Their Influence on Density, Mechanical Strength and Water Absorption, *Cement and Concrete Composites*, 31, 114-119.

Türker P, Erdoğan B, Katnaş F, Yeğınobalı A, 2003, Türkiye’de Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, TCMB, Ankara.

TS EN 772-4, 2000, *Kagır Birimler, Deney Metotları–Bölüm 4: Tabii Taş Kâgir Birimlerin Toplam Ve Görünen Porozitesi İle Boşluksuz Ve Boşluklu Birim Hacim Kütlesinin Tayini*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 934-2, 2002, *Kimyasal Katkılar-Beton, Harç ve Şerbet İçin*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 196-1, 2002, *Çimento Deney Metotları–Bölüm I: Bileşim, Dayanım Tayini*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 1936, 2010, *Doğal Taşlar-Deney Yöntemleri-Gerçek Yoğunluk, Görünür Yoğunluk, Toplam ve Açık Gözeneklilik Tayini*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

UNEP, 2018, Sustainable, https://www.unenvironment.org/exploretopics/resource_efficiency/what-we-do/cities/sustainable.

- Ünal O, Güçlüer K, 2016, Gazbeton Üretiminde Yüksek Fırın Cürufu Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, Özel Sayı, 218-221.
- Wang H, Li H, Yan F, 2005, Synthesis and Mechanical Properties of Metakaolinite-Based Geopolymer, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 268, 1-6.
- Wang Y S, Alrefaei Y, Dai J G, 2019, Silico-Aluminophosphate and Alkali-Aluminosilicate Geopolymers: A Comparative Review, Frontiers in Materials, 6, 106.
- Yang L Y, Jia Z J, Zhang Y M, Dai J G, 2015, Effects of Nano-TiO₂ on Strength, Shrinkage and Microstructure of Alkali Activated Slag Pastes, Cement and Concrete Composites, 57, 1-7.
- Yazıcı H, 2004, Termik Santral Atığı Yapay Alçı-Uçucu Kül-Taban Külü Esaslı Yapı Malzemesi Geliştirilmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 434s, İzmir.
- Zhai Q, Kurumisawa K, 2021, Effect of Accelerators on Ca(OH)₂ Activated Ground Granulated Blast-Furnace Slag At Low Curing Temperature, Cement and Concrete Composites, 124, doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104272.

İnternet Kaynakları

- 1- www.genper.com.tr/perlit-nedir, 18.09.2021
- 2- www.bilgiustam.com/perlit-nedir-yapi-malzemesi-olarak-islevi-nedir, 27.09.2021

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Selen ŞANALDI
Doğum Yeri ve Tarihi : Afyonkarahisar 05/02/1996
Yabancı Dili : İngilizce, Almanca
İletişim (Telefon / e-posta) : 0 (555) 756 56 17 – selen_2826@outlook.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Afyonkarahisar Ali Çağlar Anadolu Lisesi (2009–2013)
Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği
Bölümü (2013–2017)
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı (2019–2022)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

: 3DM MÜHENDİSLİK Proje Mühendisi (2017–2018)