

**ISIL İŞLEM GÖRMÜŞ HAM PERLİT İLE YENİ NESİL
YAPI MALZEMESİ GELİŞTİRİLMESİ**

Ergün YEŞİLYURT

**DOKTORA TEZİ
YAPIEĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜŐÜ**

**EYLÜL2013
ANKARA**

Ergün YEŞİLYURT tarafından hazırlanan “ISIL İŞLEM GÖRMÜŞ HAM PERLİT İLE YENİ NESİL YAPI MALZEMESİ GELİŞTİRİLMESİ” adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK

.....

Tez Danışmanı, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Yapı Eğitimi Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Metin ARSLAN

.....

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Yrd. Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK

.....

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Prof. Dr. İ. Özgür YAMAN

.....

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, O.D.T.Ü.

Prof. Dr. H.Yılmaz ARUNTAŞ

.....

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Doç. Dr. Mustafa ŞAHMARAN

.....

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Tez Savunma Tarihi: 24/09/2013

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Ergün YEŞİLYURT

**ISIL İŞLEM GÖRMÜŞ HAM PERLİT İLE YENİ NESİL
YAPI MALZEMESİ GELİŞTİRİLMESİ
(Doktora Tezi)**

Ergün YEŞİLYURT

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ÖZET

Perlitin Dünyada'ki uygulamaları, daha çok izolasyon sektöründe kullanılmak üzere ham perlitin çeşitli sıcaklık derecelerinde genişletme süreçlerinden geçirilmesi şeklinde öne çıkmaktadır. Bu durum, diğer izolasyon malzemeleri karşısında perlit ürünlerinin girdi maliyetlerini olumsuz etkilemektedir. Bu çalışmanın amacı, ham perlitin ısı işleminden geçirilerek atıl durumda olan perlit yataklarının endüstriyel malzemeler sınıfında hak ettiği yere ulaşmasını sağlamaktır.

Yapılan çalışmada aksel basınç dayanımı değeri, işlenebilirlik ve enerji girdileri dikkate alınarak ulaşılan optimum dizaynda; % 10 bağlayıcı, 1175 °C sıcaklıkta 1 dk pişirilen ham perlit esaslı ürünlerde 57,90 MPa basınç dayanımı, 11,53 MPa eğilme dayanımı, 1,90 g/cm³ birim hacim ağırlığı, 2,42 g/cm³ yoğunluk, % 0,15 ağırlıkça su emme oranı, 20 mm aşınma dayanımı elde edilmiştir. Ayrıca, elde edilen ürünlerin porozitesi % 21,38, kompasitesi % 78,62 olarak hesaplanmıştır. Don deneyi sonucunda, numunelerin hasara ve dayanım kaybına uğramadığı tespit edilmiştir.

Deneysel çalışmada, Yüksek sıcaklık etkisinde bırakılan örneklerin morfolojisi ve kimyasal kompozisyonu taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Enerji dağılımlı X-ışını dedektörü (EDS) kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca yüksek

sıcaklık etkisinde kalan numunelerin Elektron Tarayıcı Mikroskopla mikroyapısal özellikleri analiz edilmiştir.

Bu özellikleriyle, yapı sektöründe taban kaplama elemanı olarak kullanılabilir, perlit esaslı ısıtılma işlem görmüş yeni nesil bir yapı malzemesi elde edilmiştir. Ulaşılan sonuçlar, elde edilen malzeme özelliklerinin gelişmeye açık olduğunu göstermektedir.

Bilim Kodu : 714.1.143
Anahtar Kelimeler : Perlit, ısıtılma işlem, beton, yapı malzemesi
Sayfa Adedi : 127
Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK

**DEVELOPMENT OF NEW GENERATION BUILDING MATERIAL
WITH HEAT-TREATED RAW PERLITE**

(Ph.D. Thesis)

Ergün YEŞİLYURT

**GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

ABSTRACT

The most preferred application of perlite in the world is the use of perlite expanded at various temperatures in the insulation industry. This kind of use affects the input cost of the perlite products negatively compared to the other insulation materials. The aim of this study is, by heat-treating the raw perlite, to enable this unproductive mineral to reach the place it deserves within the category of industrial materials.

In this study, 57.90 MPa compressive strength, 11,53 MPa bending strength, 1.90 g/cm³ unit weight, 2.42 g/cm³ density, 0.15 % water absorption by mass and 20 mm abrasion resistance were obtained for the optimum design parameters considering axial compressive strength, workability and energy inputs for crude perlite-based products with 10% binder ratio and fired at 1175 °C.

Additionally, porosity and compactness ratio values of the obtained products were calculated as 21.38 and 78.62% respectively. The results of freeze-thaw tests demonstrated that the samples did not undergo any deformation and loss of compressive strength.

In the experimental study, the morphologies and chemical compositions of the

samples exposed to high temperature were examined using scanning electron microscope (SEM) and energy-dispersive X-Ray spectroscopy (EDS). Additionally, micro-structural characteristics of samples are exposed to high temperatures were analysed, using scanning electron microscope.

With the characteristics briefed; a perlite-based, heat-treated, new generation building material, that could be used as flooring material in the construction industry, was obtained. However, the achieved results suggest that the characteristics of the obtained material are open to improvement.

Science Code : 714.1.143
Keywords : Perlite, heat-treated, concrete, construction material
Page Number : 127
Supervisor : Assist. Prof. Dr. Osman Şimşek

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında kıymetli katkılarıyla beni sürekli araştırmaya yönlendiren ve tecrübelerinden sürekli faydalandığım Hocam Yrd.Doç.Dr.Osman ŞİMŞEK'e, aynı süreçte çalışmalarında zamanını ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Prof.Dr. H.Yılmaz ARUNTAŞ'a, tezimin şekillenip olgunlaşmasında beni farklı bakış açılarıyla yönlendiren Sayın Prof.Dr.İ.Özgür YAMAN'a, bütün çalışmalarında sürekli beni destekleyen Sayın Doç.Dr.Ahmet BİLGİL'e, çalışmalarında kendilerinden istifade ettiğim sayın Doç.Dr. İlhami DEMİR'e, Prof.Dr. Salih YAZICIOĞLU'na ve Yrd.Doç.Dr. M.Vehbi GÖKÇE'ye, tez yazımı süresince yardımlarını esirgemeyen sayın Öğr.Gör. Mustafa İLHAN'a, bana sürekli samimi ilgilerini esirgemeyen başta Gazi Üniversitesi Yapı Eğitimi Bölümü başkanı sayın Prof.Dr. Metin ARSLAN'a, bütün bölüm hocalarımla ve personeline, ayrıca manevi destekleriyle beni sürekli destekleyen çok değerli aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiv
RESİMLERİN LİSTESİ	xvii
HARİTALARIN LİSTESİ.....	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
1.GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	5
2.1. Isıl İşlemlili Yapay Malzeme Üretim Süreci	5
2.2.Konstrüktif Yapı Elemanları	7
2.3. Perlitin Tanımı.....	8
2.3.1. Genleştirilmiş perlit kullanım alanları.....	9
2.3.2. Tasnif edilmiş ham perlitin kullanım alanları	10
2.3.3. Perlit üzerine yapılan çalışmalar	11
2.4. Jeopolimer	14
2.4.1. Siloksonat-Cam suyu esaslı jeopolimerler	19
2.4.2. Kaolinit/ Hidrosodalit esaslı jeopolimerler	21
2.4.3. Metakaolinit esaslı jeopolimerler	22
2.4.4. Kalsiyum esaslı jeopolimerler	23

Sayfa

2.4.5. Kayaç esaslı jeopolimerler	24
2.4.6. Silika esaslı jeopolimerler	25
2.4.7. Uçucu kül esaslı jeopolimer	26
2.4.8. Fosfat esaslı jeopolimer.....	28
2.4.9. Organik mineral jeopolimer	29
2.5. Isıl İşlemler Çalışmaları	30
2.5.1. Bağlayıcılar	30
2.5.2. Tuğlalar	34
2.5.3. Betonlar	38
2.6. Çalışmanın Amacı ve Önemi	43
3. MATERYAL VE METOT	44
3.1. Materyal.....	44
3.1.1. Ham perlit.....	46
3.1.2. Alçı	47
3.1.3. Su.....	48
3.1.4. Numune harcının hazırlanması ve karışım oranı.....	49
3.2. Metot	50
3.2.1. Birim hacim ağırlık tayini	52
3.2.2. Eğilme dayanımı	52
3.2.3. Basınç dayanımı	53
3.2.4. Aşınma dayanımı.....	54
3.2.5. Yoğunluk tayini	56
3.2.6. Su emme	57
3.2.7. Görünür porozite	58

Sayfa	
3.2.8. Kompasite.....	58
3.2.9. Porozite.....	58
3.2.10. Dona dayanıklılık	59
3.2.11. Mikro yapısal analiz	60
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	61
4.1. Birinci Aşama Bulguları.....	61
4.1.1. Pişirme süresi 1 dk olan numunelerin birim hacim ağırlık ve basınç dayanım değerleri.....	61
4.1.2. Pişirme süresi 30 dk olan numunelerin birim hacim ağırlık ve basınç dayanım değerleri	69
4.1.3. Pişirme süresi 60 dk olan numunelerin birim hacim ağırlık ve basınç dayanım değerleri	76
4.1.4. Pişirme süresi 90 dk olan numunelerin birim hacim ağırlık ve basınç dayanım değerleri	83
4.1.5. Pişirme süresi 120 dk olan numunelerin birim hacim ağırlık ve basınç dayanım değerleri	89
4.2. İkinci Aşama Bulguları	95
4.2.1. Ön performans değerinin seçimi	95
4.2.2. Optimum deney aralıklarının ve basınç dayanımlarının tespiti.....	96
4.2.3. Fiziksel özellikler	99
4.2.4. Mekanik özellikler.....	101
4.2.5. Optimum değerinin seçimi	103
4.2.6. Mikro yapı özellikleri.....	107
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	117
5.1. Sonuçlar.....	117
5.2. Öneriler.....	119

Sayfa

KAYNAKLAR	120
ÖZGEÇMİŞ	126

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Ham perlitin kimyasal analizi	9
Çizelge 3.1. Perlit ve Alçının kimyasal analizi	48
Çizelge 3.2. Şehir şebeke suyu analizi	48
Çizelge 3.3. Bir kalıplık deney numunesi için gerekli malzeme miktarları.....	49
Çizelge 3.4.Çalışma deneme planı	50
Çizelge 4.1. 1dk pişirilen numunelerin; BHA ve basınç dayanımları.....	62
Çizelge 4.2.30 dk pişirilen numunelerin; BHA ve basınç dayanımları.....	69
Çizelge 4.3. 60 dk pişirilen numunelerin; BHA ve basınç dayanımları.....	76
Çizelge 4.4. 90 dk pişirilen numunelerin; BHA ve basınç dayanımları.....	83
Çizelge 4.5. 120 dk pişirilen numunelerin; BHA ve basınç dayanımları	89
Çizelge 4.6. Alçıyla fırınlanan perlitin;BHA ve basınç dayanımları	95
Çizelge 4.7.Alçılı numunelerin; BHA ve basınç dayanımları (optimum)	97
Çizelge 4.8. % 10 Alçılı, 1 dk. pişirmelimumunelerde su emme tespiti	99
Çizelge 4.9. % 10 Alçılı, 1 dk. pişirilen numunelerde yoğunluk tespiti	100
Çizelge 4.10. %10 Alçılı, 1 dk. pişirilennumunelerin özellikleri.....	101
Çizelge 4.11. % 10 Alçılı, 1 dk.pişirilen numunelerin dikey aşınmadeğeri.....	101
Çizelge 4.12. % 10 Alçılı, 1 dkpişirilennumunelerin dona dayanıklılıktespiti	102
Çizelge 4.13. % 10 Alçılı, 1dkpişirilennumunelerinin mekaniközellileri.....	102

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1 . Üretim akış şeması.....	51
Şekil 4.1.1 dk pişirilen numunelerin alçı oranı ve basınç dayanımı ilişkisi.....	65
Şekil 4.2. %5 Alçılı ve 1 dk pişirilen numunenin BHA-basınç dayanımı ilişkisi	67
Şekil 4.3. % 10Alçılı ve 1 dk pişirilen numunenin BHA-basınç dayanımı ilişkisi	67
Şekil 4.4. % 15 Alçılı ve 1 dk pişirilen numunenin BHA-basınç dayanımı ilişkisi	68
Şekil 4.5. % 20Alçılı ve 1 dk pişirilen numunenin BHA-basınç dayanımı ilişkisi	68
Şekil 4.6. 30 dk pişirilen numunelerin alçı oranı ve basınç dayanımı ilişkisi.....	73
Şekil 4.7. %5 Alçılı ve 30 dk pişirilen numunenin BHA-basınç dayanımı ilişkisi.	73
Şekil 4.8. % 10Alçılı ve 30 dk pişirilen numunenin BHA-basınç dayanımı ilişkisi.	74
Şekil 4.9. % 15 Alçılı ve 30 dk pişirilen numunenin BHA-basınç dayanımı ilişkisi.	74
Şekil 4.10. % 20Alçılı ve 30 dk pişirilen numunenin BHA-basınç dayanımı ilişkisi.	75
Şekil 4.11. 60 dk pişirilen numunelerin alçı oranı ve basınç dayanımı ilişkisi.....	80
Şekil 4.12. %5 Alçılı ve 60 dk pişirilen numunenin BHA-basınç dayanımı ilişkisi	81
Şekil 4.13. % 10Alçılı ve 60 dk pişirilen numunenin BHA-basınç dayanımı ilişkisi	81
Şekil 4.14. % 15Alçılı ve 60 dk pişirilen numunenin BHA-basınç dayanımı ilişkisi	82

Şekil	Sayfa
Şekil 4.15. % 20 Alçılı ve 60 dk pişirilen numunenin BHA-basınç dayanımı ilişkisi	82
Şekil 4.16. 90 dk pişirilen numunelerin alçı oranı ve basınç dayanımı ilişkisi...	86
Şekil 4.17. % 5 Alçılı ve 90 dk pişirilen numunenin BHA-basınç dayanımı ilişkisi	86
Şekil 4.18. % 10 Alçılı ve 90 dk pişirilen numunenin BHA-basınç dayanımı ilişkisi	87
Şekil 4.19. % 15 Alçılı ve 90 dk pişirilen numunenin BHA-basınç dayanımı ilişkisi	87
Şekil 4.20. % 20 Alçılı ve 90 dk pişirilen numunenin BHA-basınç dayanımı ilişkisi	88
Şekil 4.21. 120 dk pişirilen numunelerin alçı oranı ve basınç dayanımı ilişkisi...	92
Şekil 4.22. % 5 Alçılı ve 120 dk pişirilen numunenin BHA-basınç dayanımı ilişkisi	93
Şekil 4.23. % 10 Alçılı ve 120 dk pişirilen numunenin BHA-basınç dayanımı ilişkisi	93
Şekil 4.24. % 15 Alçılı ve 120 dk pişirilen numunenin BHA-basınç dayanımı ilişkisi	94
Şekil 4.25. % 20 Alçılı ve 120 dk pişirilen numunenin BHA-basınç dayanımı ilişkisi.....	94
Şekil 4.26. Farklı oranda alçı ve derecede pişirilen numunelerin basınç dayanım ilişkisi	98
Şekil 4.27. Farklı derecelerde 1 dk %10 alçı için; BHA- basınç dayanımı	98
Şekil 4.28. %10 Alçılı ve 1 dk farklı pişirme sıcaklığında; Basınç -eğilme dayanımı ilişkisi	103
Şekil 4.29 . Isıl işlemsiz numunenin 35x büyütülmüş SEM görüntüsü	108
Şekil 4.30 . Isıl işlemsiz numunenin 100x büyütülmüş SEM görüntüsü.....	108

Şekil	Sayfa
Şekil 4.31 . Isıl işlemsiz numunenin 500x büyütülmüş SEM görüntüsü	109
Şekil 4.32. Isıl işlemsiz numunenin 1000x büyütülmüş SEM görüntüsü	109
Şekil 4.33. 1125 °C ısı ile işlemlenmiş numunenin 35x büyütülmüş SEM görüntüsü	110
Şekil 4.34. 1125 °C ısı ile işlemlenmiş numunenin 100x büyütülmüş SEM görüntüsü	110
Şekil 4.34. 1125 °C ısı ile işlemlenmiş numunenin 1000x büyütülmüş SEM görüntüsü .	111
Şekil 4.36. 1150 °C ısı ile işlemlenmiş numunenin 35x büyütülmüş SEM görüntüsü	111
Şekil 4.37. 1150 °C ısı ile işlemlenmiş numunenin 100x büyütülmüş SEM görüntüsü	112
Şekil 4.38. 1150°C ısı ile işlemlenmiş numunenin 500x büyütülmüş SEM görüntüsü	112
Şekil 4.39. 1150 °C ısı ile işlemlenmiş numunenin 2000x büyütülmüş SEM görüntüsü ...	113
Şekil 4.40. 1175°C ısı ile işlemlenmiş numunenin 35x büyütülmüş SEM görüntüsü	113
Şekil 4.41 . 1175 °C ısı ile işlemlenmiş numunenin 100x büyütülmüş SEM görüntüsü	114
Şekil 4.42 . 1175 °C ısı ile işlemlenmiş numunenin 500x büyütülmüş SEM görüntüsü	114
Şekil 4.43 . 1175 °C ısı ile işlemlenmiş numunenin 2000x büyütülmüş SEM görüntüsü ..	115
Şekil 4.44 . 1200 °C ısı ile işlemlenmiş numunenin 35x büyütülmüş SEM görüntüsü	115
Şekil 4.45. 1200 °C ısı ile işlemlenmiş numunenin 250x büyütülmüş SEM görüntüsü	116
Şekil 4.46. 1200 °C ısı ile işlemlenmiş numunenin 5000x büyütülmüş SEM görüntüsü	116

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Çalışmada kullanılan Kapadokya ham perlit işletme sahası.....	46
Resim 3.2. Kapadokya ham perlit yatakları	46
Resim 3.3. Mikser ve kalıplar	49
Resim 3.4. Eğilme dayanım aleti	53
Resim 3.5. Basınç dayanım aleti	54
Resim 3.6. Aşınma deney numuneleri	55
Resim 3.7. Dikey aşınma deney ekipmanı	56
Resim 3.8. Piknometre deney seti	57
Resim 3.9. Su emme deneyi seti	58
Resim 3.10. Derin dondurucu	59
Resim 4.1. 900-1200 °C’depişirilendeney numuneleri	66
Resim 4.2. Farklı sıcaklıklardapişirilendeney numuneleri.....	75
Resim 4.3. 1200 °C’ta pişirilen deney numuneleri	80
Resim 4.4. 1200 °C Geometrik şekli deforme olandeney numuneleri.....	88

HARİTALARIN LİSTESİ

Harita	Sayfa
Harita 3.1. Kapadokya bölgesi perlit yataklarının jeoloji haritası	45
Harita 3.2. Kapadokya bölgesi perlit yataklarının jeoloji kesitleri	45
Harita 3.3. Deney numunelerinin işletme sahası.....	47

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
d_0	Yoğunluk
k	Komposite
P	Kırılma yükü
P_g	Görünen porozite
P_r	Porozite
S_k	Ağırlıkça su emme yüzdesi
S_h	Hacimce su emme yüzdesi
$V_{g,u}$	Brüt hacim
λ	Isı iletim katsayısı
$P_{g,u}$	Birim hacim ağırlığı (Brüt kuru yoğunluk)
σ_b	Basınç dayanımı
σ_e	Eğilme momenti

Kisaltmalar	Açıklama
AAMK	Alkali-Aktive Metakolin
BHA	Birim Hacim Ağırlığı
CAFA	Chemically Activated Fly Ash (Uçucu küllü çimento)
dk.	Dakika
DPT	Devlet Planlama Teşkilatı
ERÜ-TEKMER	Erciyes Üniversitesi Teknoloji Merkezi
FA	Fly Ash (Uçucu kül)
GFC	Granüllü Yüksek Fırın Cürufu

Kısaltmalar	Açıklama
KASKİ	Kayseri Su ve Kanalizasyon Kurumu
LTGS	Low Temperature Geopolymer Setting
MAS-NMR	Açısal Spin-Manyetik Rezonans Spektrumları
MK	Metakaolinit
MS	Milattan sonra
MTA	Maden Tetkik Arama Enstitüsü
MÖ	Milattan önce
PC	Portlant Çimentosu
RHBA	Rice Husk And Bark Ash (Pirinç kabuğu ve külü)
SEM	Tarayıcı elektron mikroskobu
SH	Sodyum Hidroksit
SS	Sodyum Silikat
TK	Taban Külü
TÜRKAK	Türk Akreditasyon Kurumu
XRD	X Işını Kırınımı

1.GİRİŞ

Yeryüzünde var olduğundan beri, insanoğlunun barınma ihtiyacı en öncelikli konusu olmuştur. Bu temel ihtiyacını karşılamak için sürekli arayış içerisinde bulunmuş ve yaşam mekânlarını geliştirmekle meşgul olmuştur. Başlangıçta; deprem, sel, fırtına ve saldırılara karşı korunmak için güvenli alanlar oluşturmayı hedeflese de, daha sonra işlevsellik, konfor, estetik gibi özelliklerin de dikkate alınma ihtiyacı oluşmaya başlamıştır. Bu özellikler, inşaat sektöründe ön plana çıktıkça yeni, çok yönlü ve işlevselliğe sahip malzeme arayışlarında hız kazanmıştır.

İnsanlar, 19. yüzyıldan itibaren geçmişlerini öğrenmek hususunda büyük çaba göstermeye, eski uygarlıkların eserlerini bulup tanımaya, kullandıkları teknolojileri ortaya çıkarmak için uğraşmaya başlamışlardır. Yapılan arkeolojik kazılar, pek çok soruya cevap bulunmasına imkân sağlamış, özellikle inşaat teknolojisinin nasıl geliştiği, bugünkü düzeye hangi aşamalardan geçerek geldiği öğrenilmiş ve bunun sonucu olarak sektörde yepyeni buluşların önü açılmıştır.

Başlangıcı insanlık tarihiyle eşdeğer olan inşaat sektörü, farklı medeniyetlerde hayranlıkla incelenen şaşırtıcı gelişmeler sahne olmuştur. Günümüzde ise gelişen teknoloji ve bilgi birikimi ile talepleri karşılama çabalarında sağlık, estetik ve ekonomi olarak önemli üç temel unsur ortaya çıkmaktadır.

Sağlamlık: Yapılarda ve yapı malzemelerinde ilk çağlardan beri değişmeyen ve sürekli gündemde kalan önemli bir faktördür. Özellikle yapılardaki taşıyıcı sistemlerin tasarımında kullanılan malzemelerin, yaşam alanlarını emniyetli hale getirmesi gereği, değişmeyen bir ön koşul olarak kabul edilmektedir. Yüzyıllardan beri sağlamlığını korumuş önemli eserlerin, günümüze kadar kendisini koruyarak gelmesi, inşasında kullanılan malzemelerin dayanıklılık derecesinin yüksekliğine bağlıdır. Doğal yapı malzemelerinde homojenliğin yapay malzemelere göre daha zayıf olması, yapı güvenliğini sağlamada ister istemez estetik ve maliyet açısından olumsuzlukları da beraberinde getirmiştir.

Estetik: İnsanlar zaman içerisinde yaşam alanlarında dayanım performansının yanında, estetik görünümünde yer verme ihtiyacı duymaya başlamıştır. Yapı tasarımında dayanımı azaltmadan, kullanılan malzemelerin homojenliği ve yapı elemanlarının ebatındaki küçülme arzusu olarak, mevcut doğal malzemelerle estetik probleminin çözümünde güçlükler ortaya çıkmıştır. Bu olumsuzluklara ancak yapay malzeme üretimiyle çözümler geliştirilebilmiştir. Özellikle doğal kaynaklı endüstriyel malzemelerin üretiminde istenilen renk, desen ve boyutların oluşturulması estetik projelerin tasarlanabilmesi, bu malzemelere olan ilgiyi günden güne artırmaktadır.

Ekonomi: Artan Dünya nüfusu, refah seviyesinin yükselmesi, doğal kaynakların ekolojik dengeyi bozacak derecede azalması gibi etkenler yapı maliyetlerini olumsuz etkilemektedir. Araştırmacılar, bu olumsuzlukları gidermek ve yapı maliyetlerini aşağı çekmek için hem yapım sistemlerinde, hemde yapay malzeme üretiminde devrim niteliğinde çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Özellikle endüstriyel yapım sistemlerindeki çağdaş çözümlerin ön şartı olan seri ve hızlı üretim sürecine girilmesi, yapı maliyetlerinde ekonomik faydayı da beraberinde getirmiştir. Ayrıca doğal kaynaklı yapay malzemeler, sektörün ihtiyaç duyduğu performansı gösterebilecek çözümleri yapabilme kabiliyeti, yapı maliyetlerini önemli ölçüde aşağı çekmektedir.

Zamanla insanoğlunun malzemedeki görünüm çeşitliliği istekleri de talep olarak ortaya çıkınca malzeme seçiminde performansa dayalı malzeme üretimi sürecini başlatmıştır. Yapım sistemlerindeki gelişmeye paralel malzeme teknolojisinde hızlı bir ivme kazanmıştır.

İleri teknolojilerle inovasyon çalışmaları sonunda, her geçen gün yeni malzemelerin inşaat sektöründeki yerini aldığı görülmektedir. Günümüzde, çağdaş yapı teknolojisine ve hızına doğal malzeme imkânlarıyla yetişmek pek olanaklı görünmemektedir. Bu zorunluluk, doğal malzeme kaynaklarının yetersizliğinden dolayı inşaat sektörünü malzeme yönünden yeni arayışlara itmiştir. Malzeme kaynaklarının geçmişte bilinçsizce kullanılması ve buna paralel artan talebin çok

yüksek olması, üretim maliyetlerini olumsuz etkilemiş, doğal kaynakların dengesiz kullanımını beraberinde çevre tahribatlarında meydana getirmiştir.

Gerek Dünya'da gerekse Türkiye'de ham perlit yatakları diğer doğal kaynakların aksine büyük rezervlere sahiptir. Türkiye'deki başlıca perlit cevheri yatakları İzmir, Manisa, Balıkesir, Eskişehir, Çankırı, Ankara, Nevşehir, Erzincan, Erzurum, Kars, Bitlis ve Van illerindedir. Bu yayılım alanı Anadolu'nun volkanik kökenli arazileri ile paralellik göstermektedir. Türkiye'de 90'lı yıllarda yapılan araştırmalarda potansiyel perlit rezervlerinin tümü 3,5 milyar ton olarak telaffuz edilirken, 2001 yılında Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı tarafından yayınlanan Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Raporu'nda ülkemizdeki perlit rezervlerinin 4,5 milyar tonu bulunduğu, 2004 yılı verilerindeyse, Türkiye'de nerdeyse dünya rezervinin yarısına yakın bir miktarda, 5,7 milyar metreküp perlit rezervi bulunduğu belirtilmiştir [1].

İkinci Dünya Savaşından sonra küçük genleştirme (patlatma) tesisleri kurularak perlitin kullanım alanları ile ilgili denemeler yapılmaya başlanmıştır. 1949 yılında "The Perlite Institute" A.B.D'de kurularak bu yeni endüstri dalının gelişmesini hızlandırmak üzere organize edilmiştir. Ayrıca bu enstitü, araştırmalarla ticari standartların tespitini ve yeni kullanım sahaları ile pazarların bulunması için çalışmalarını sürdürmektedir.

Günümüzde aranan teknoloji; ekolojik yapılar, düşük enerji tüketiminin ve sera gazı salınımının yanı sıra, sıfır atık prensibine adapte olmasıdır. Bu arayışlar içerisinde Jeopolimer teknolojisi öne çıkmaktadır [2].

Bu çalışmada; ham perlitin ısıtma işleminden geçirilerek yeni nesil konstrüktif yapı malzemesi üretilmesi hedeflenmiştir. Çalışmada ham perlit esaslı numuneler, ısıtma işleminden geçirildikten sonra elde edilen inovatif yapı elemanının, performans değerleri incelenmiştir. Çalışmanın en önemli girdisi, büyük ham perlit yataklarının jeopolimer teknolojisiyle yapı teknolojisine kazandırılmasıdır.

Çalışma dört bölümden oluşmaktadır. Giriş bölümünden sonra, ikinci bölümde, endüstriyel hammaddelerin inşaat sektöründe kullanım alanları üzerine yapılan çalışmalar ile ilgili kaynak araştırması yapılmıştır. Üçüncü bölümde, çalışma materyali incelenerek, uygulanacak yöntemler belirlenmiş ve seçilen çalışma yöntemlerine göre numunelerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Farklı hacimsel oranlarda ağırlıkçaperlit/alçı karışımlarından numuneler üretilmiş ve numuneler üzerinde gerekli fiziksel deneyler yapılarak irdelenmiştir. Yapılan tüm deney kombinasyonları sonunda optimizasyon değerlendirmesi yapılmıştır. Daha sonra, üretilen numunelerden optimum performans gösteren 1175 °Cpişirme sıcaklığına sahip olan perlitli elemanlar üzerinde; fiziksel ve mekanik testler(Birim hacim ağırlık, basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı, su emme, porozite, kompasite, yoğunluk, aşınma ve dona dayanıklılık) uygulanmıştır. Dördüncü bölümde ise elde edilen sonuçlar irdelenmiş, üretilen ürünün inşaat sektöründe kullanılabilme imkânları değerlendirilerek öneriler sunulmuştur.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

İnsanlık tarihiyle eşdeğer başlangıca sahip olan inşaat sektöründe kullanılan yapı malzemeleri, doğada bulunduğu şekliyle veya kaynağından çıkartıldıktan sonra küçük değişiklikler yapılarak kullanılmaktaydı. Daha sonra yapı malzemelerinde dayanım, ekonomi ve estetik özellikler bakımından toplum taleplerindeki farklı bakış açıları, malzeme sektörünü yeni arayışlara yönlendirmiştir. Bu arayış ilk çağlardan günümüze kadar aralıksız devam etmiş ve sektörü endüstriyel ilerlemede ön sıralara taşımıştır.

Günümüzde performansa dayalı, istenilen özellikteki yapı malzemesi talebinin doğal kaynaklardan karşılanması son derece sınırlıdır. Buna karşılık yapı malzemesi teknolojisindeki gelişim, istenilen ebat ve özellikte yapay malzemelerin üretiminde çağdaş çözümlerin önünü açmıştır. Bu çalışmalarla yapay ürün teknolojisinden, özellikli yapı elemanı üretiminin yanında, çevre ve ekonomik faktörlerin de dikkate alındığı bir proses beklenmektedir.

2.1. Isıl İşlemlerle Yapay Malzeme Üretim Süreci

İnsanoğlu doğal malzemelerle yapılarını oluşturması ilk çağlardan beri kesintisiz devam etmektedir. Başlangıçta yapılarını toprak, taş, ahşap, kamyş gibi malzemelerle oluşturmasına rağmen, zamanla doğal malzemeleri belirli işlemlerden geçirerek yeni parçalı yapı elemanları geliştirmiştir. Eski çağlarda insanoğlu taşın yanında, Dünyanın ana malzemelerinden olan toprağı keşfetmiş ve kerpiç haline getirerek ilk yapay yapı elemanını oluşturmuş, bu elemanları da yapıda kullanmıştır.

Tuğlanın kullanımı, ilk çağlardan günümüze kadar farklı performans özelliklerinde, teknolojinin gelişimine paralel aralıksız olarak devam etmektedir. Mezopotamya kazılarında tuğlanın 15 asırdan beri kullanıldığı bilinmektedir. Mezopotamyalılar, tuğlaları güneşte kuruttuktan sonra, 1000 °C'ye varan sıcaklıktaki fırınlarda pişirmişlerdir. Daha sağlam, daha estetik ve daha yüksek yapılar inşa etme istekleri doğrultusunda yeni malzeme arayışları ile pişmiş tuğla üretme başarısını

göstermişlerdir. Mezopotamyalılar tuğlayı kalıplayıp, pişirdikten sonra bilinen ilk kullanımını M.Ö. 4. Yüzyılda Babil kulesinin yapımında gerçekleştirmişlerdir. Günümüzde kullanılan tuğlalar istenilen ebat, renk ve desende taşıyıcı, konstruktif amaçlı ve izolasyon özellikleriyle son şeklini almıştır [3].

Linling ve ark., tuğla hamuruna uçucu kül ilave etmişler ve tuğlaları 1050 °C sıcaklıkta pişirmişlerdir. Uçucu kül katkısının basınç dayanımını artırdığını, suemme değerini azalttığını, kireç içeriğinden doğan çatlamayı ortadan kaldırdığını, donmaya ve çözülmeye karşı dayanımı artırdığını tespit etmişlerdir [4].

Onche ve ark., kaolin ve kilden üretilen tuğlaların yalıtım özelliklerini iyileştirmek için daha önce Ugheoke ve arkadaşları tarafından tuğla hamuru kompozisyonuna eklenen pirinç kabuğuna diatomiti de eklemiş, tuğlaları 900, 1000, 1100 ve 1200 °C sıcaklıklarda pişirmiş; ağırlık olarak 3/2, 4/1 oranlarında kaolin, plastik kil, pirinç kabuğu ve diatomitten oluşan karışımın basınç dayanımı, porozite, birim ağırlık ve ısı iletimi açısından bütün pişirme sıcaklıklarında çok iyi sonuçlar verdiğini bulmuşlardır [5].

Tuğlanın, günümüzde modern teknoloji ile donatılan fabrikalarda, istenilen boyutlarda, istenilen özelliklerde ve değişik amaçlara yönelik üretimi gerçekleştirilmekte olup adına makine tuğlası denmektedir. Bu tuğlalar, makine, klinker, kaldırım, ateş, cephe, sinterlenmiş, baca ve dekoratif tuğla isimleri altında üretilmekte ve incelenmektedir. Standard bir tuğla 190x90x50 mm boyutlarındadır. Endüstride kullanılan tuğlalar yapım yöntemlerine, delik durumlarına, basınç dayanımlarına ve birim hacim ağırlıklarına göre değerlendirilerek:

- Klinker tuğlaları adıyla delikli olup olmadıklarına,
- Sinterleşmemiş tuğlalar adıyla delikli olup olmadıklarına ve delik durumlarına,
- Düşey delikli tuğlalar adıyla, delik kesit alanlarının üst yüzey alanına oranlarına,
- Yatay delikli tuğlalar adıyla, birim hacim ağırlıklarına ve basınç dayanımlarına bağlı olarak adlandırılmakta ve sınıflandırılmaktadır [6].

Tarihten bu güne kadar gelen süreçte, doğal yapı malzemelerinin kaynağından çıktığı gibi doğrudan yapıda kullanım oranları günden güne azalmaktadır. Bunun nedenlerinden birincisi, doğal kaynakların giderek azalması, ikincisi ise doğal malzemenin eşdeğer yapay malzemeler gibi birçok özelliği birden sunamamasıdır. Oysa yapay malzemelerle istenilen renk ve desende daha estetik, dayanıklı, ekonomik ve çevreci çözümler ortaya konulabilmektedir.

Endüstriyel boyutta klinkerin, çimentonun ve akabinde betonun bulunmasıyla Dünyada hammadde kullanımı, inşaat sektöründeki artan talepleri karşılamakta zorlandığı gibi, çevresel ve ekonomik maliyetleride olumsuzlaştırmıştır. Yapay yapı malzeme üretiminde, doğal kaynaklar dengesiz bir şekilde tüketilmektedir. Mermer, taş gibi bazı doğal kaynaklar tükenme noktasına gelmekle birlikte, perlit, pomza, diatomit gibi doğal kaynaklarımızın mevcut rezervlerinden de anlaşılacağı gibi atıl durumda beklemektedir. Ancak son yıllarda inşaat sektöründeki inovasyon çalışmaları, atıl durumdaki bu doğal malzemeleri taşıyıcı ve konstrüktif yapı elemanlarına dönüştürerek, yeni, sağlam, ekonomik ve daha çevreci ürün elde etme sürecine girmiştir [7].

2.2.Konstrüktif Yapı Elemanları

Genel olarak, günümüz inşaat teknolojisinde kullanılan konstrüktif yapı elemanları endüstriyel hammaddelerden üretilmektedir. Endüstriyel hammadde tanımı; kum ve çakıl, kireçtaşı, killer, zeolit, talk, vermikulit, sepiolit, diatomit, grafit ve silikadan, manyezit, perlit, pomza, feldispat, mika, wollastonit, barit, florit gibi doğal taşlar ve gübreye kadar her çeşit mineral ve kayaçları kapsamaktadır. Türkiye, karmaşık jeolojik yapısı nedeniyle farklı tiplerde, yukarıda bahsedilen önemli miktarda endüstriyel hammadde yataklarına sahiptir.

Dünyada enerji maliyetlerinin giderek artması ve küresel ısınma problemi nedeniyle, temiz enerji elde edilmesi için yoğun çalışmalar yapılması, dünyanın son derece ciddi bir sorunla karşı karşıya olduğunu göstermektedir. Bir yandan yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları üzerinde çalışılırken, diğer yandan enerji tasarrufu için

alınacak önlemler üzerinde de durulmaktadır. İnşaat sektörü de, gelişen ve değişen ihtiyaçlar çerçevesinde, sosyal ortam ve teknik bakımdan daha nitelikli binaların üretimine yönelmiş ve bu yapılarda kullanılan yapı elemanlarının da daha üstün nitelikli olması gereği ortaya çıkmıştır. Son yıllarda, binaların mukavemetinin yüksek ve enerji tüketiminin az olmasını sağlayacak özelliklere sahip ürünlerden inşa edilmesi, giderek daha fazla önemsenmektedir [8].

Ülkemiz özellikle endüstriyel hammaddeler grubunda yer alan perlit madeni yönünden oldukça zengin yataklara sahiptir. Böyle olmasına rağmen endüstride gerektiği gibi değerlendirilmediği için hemen tamamı atıl durumda kalmaktadır. Perlit, arduvaz, kil, killi şist, vermikulit çoğunlukla geliştirilerek hafif beton ve duvar bloğu üretiminde agrega olarak kullanılan minerallerdendir. Ayrıca, pomza, perlit, kil, diyatomit, alçı ve kireç, geliştirilmeden çok az işleme tabi tutularak ta kullanılmaktadır [8].

2.3. Perlitin Tanımı

Perlit, doğal olarak oluşan silis esaslı volkanik kayalara verilen bir isimdir. Perliti diğer volkanik camlardan ayıran en önemli özellik ise yumuşama sıcaklığı civarında ısıtıldığı zaman orijinal hacminin dört ile yirmi dört katına kadar genişemesidir. Bu genişleme, ham perlitte % 2-4 arasında bulunan özsuya (Kristal su) bağlıdır. Perlit hızlı bir şekilde 870 °C üzerinde ısıtıldığı zaman bünyesindeki özsuyun buharlaşması ile mısır taneleri gibi patlar ve ısıyla genişleyen perlit üzerinde sayısız gözenekler oluşur. Ham perlitin kimyasal ve fiziksel özellikleride Çizelge 2.1’de verilirken fiziksel özellikleride; Rengi genelde gri ve siyah, pH ortalama 7 ± 5 , yoğunluğu $2,2 \pm \text{g/cm}^3$, ergime derecesi 1310 °C 1380 °C, ağırlık kaybı % 0,5 şeklinde özetlenebilir [9].

Genleştirilmiş perlitin inşaat sektöründe kullanımı oldukça sınırlıdır. Az da olsa binalarda, sıva, çatı kaplama ve katlar arasında ısı ve ses izolasyonunda kullanılmaktadır.

Çizelge 2.1. Ham perlitin kimyasal analizi [1].

Kimyasal Bileşeler	SiO ₂	Al ₂ O ₃	H ₂ O	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO	Eser
Oranlar (%)	71,0-75,0	12,5-16,0	3,0-4,0	4,0-5,0	0,4-0,82	0,3-0,5	0,03-0,2	0-0,1	4,10-4,30

2.3.1. Genleştirilmiş perlit kullanım alanları

Perlit, 0,0-2,5 mm aralıklarda kırılıp, değişik aralıklı eleklerden geçirilerek tasnif edilmekte, 850-1150°C'deki alev şokunda, bünye suyunun mineral yapısından uzaklaştırılması ve patlatılmasıyla tane hacminin 35 misline kadar geliştirilebilmektedir. Ham perlit, kimyasal bileşimi bakımından silisli ve alüminyumlu bileşikler içermesi nedeni ile kalsiyum esaslı bağlayıcılarla kimyasal reaksiyona girerek, hidrolik aktivite gösterdikleri için inşaat sektöründe geniş çapta kullanılmaktadır. Perlitin kullanılması, çimentodan ekonomi sağladığı gibi yapı elemanına dayanıklılık da kazandırmaktadır. Genleştikten sonra 0,032-0,18 g/cm³ yoğunlukta üretilebilen perlit, binalarda sıvada, dökme olarak çatı döşemesinde ve katlar arasında ısı-ses izolasyonunun yanında, çimento ve alçı bağlayıcısı ile hafif yapı elemanı üretiminde de kullanılmaktadır. Genleştirilmiş perlit, döküm sanayinde çeşitli uygulamalarda, yani pota örtmede sıcak örtmede, besleyicilerde alaşımları örtmede, ekzotermik ve yalıtım şekillerinde yastıklama aracı olarak kalıplama kumunda ayrıca refrakter tuğla ve blok üretiminde yalıtım malzemesi olarak kullanılmaktadır [9].

Perlit çoğunlukla ingot ve döküm parçalarında çekilme boşluklarını önleme amacı ile ekzotermik astarla karıştırılarak hot-top ve besleyicilerde kullanılır. Perlit bu tip uygulamalarda uygunluğu maliyeti ve üstün özellikleri sebebi ile hafif dolgu malzemesi olarak çok sık kullanılır. Perlit genellikle % 3-20 oranında yalıtım ve ekzotermik bileşiklere katılır. Besleyici ve hot-top panelleri için oyuk silindirik (kol tertibatı) şeklindeki biçimlerde kullanılır. Bu şekiller hot-top ve besleyici tozları ve bileşikleri ile aynı işleri görür [9].

2.3.2. Tasnif edilmiş ham perlitin kullanım alanları

Ham perlit kimyasal bileşimi itibariyle silisli ve alüminyumlu bileşikler içerdiğinden kalsiyum esaslı bağlayıcılar ile kimyasal reaksiyona girerek hidrolik aktivite gösterir. Bu özelliği nedeniyle inşaat sektöründe geniş çapta kullanılmaktadır. Perlit çimentoya dayanıklılık kazandırmaktadır.

Ham perlitin, kırılmış öğütülmüş ve tane boyutlarına ayrılmış olarak sektörün birçok alanında kullanılmaktadır. Bu alanlar;

- 1- Asit ve bazlara karşı dayanıklı olduğu için özellikle kanalizasyon borularının üretiminde,
- 2- İç ve dış inşaat sıvalarında
 - a) Dona karşı dayanıklı olduğundan su alan inşaatlarda,
 - b) Çatı ve terasların su izolasyonlarında,
 - c) Yüzme havuzlarının yapımında,
 - d) Isı izolasyonunda sıva olarak veya briket kiremit gibi izolasyonlu hafif yapı elemanının üretiminde,
- 3- Demiryollarında patinaj kumu olarak,
- 4- Sanayide aşındırıcı olarak,
- 5- Filtre kumu ve /veya çakıllı olarak su arıtma tesislerinde (Genellikle geliştirilmiş perlit tercih edilmektedir.)
- 6- Karayollarında asfalt dolgu malzemesi olarak,
- 7- Dökümhanelerde atık koyulaştırıcı, metal temizleyici ve silis kaynağı olarak,
- 8-Toz sabun ve deterjanlarda (Ham perlitin tozu),
- 9- Beton kiremit üretimi şeklindedir [9].

2.3.3. Perlit üzerine yapılan çalışmalar

Türkiye, karmaşık jeolojik yapısı nedeniyle farklı tiplerde, önemli endüstriyel hammadde yataklarına sahiptir. Günlük yaşantımızda vazgeçilmez bir yeri olan ve sanayinin kullanımına sunulan endüstriyel hammaddelerin üretilmesi,

zenginleştirilmesi, son ürün haline getirilmesine yönelik bilimsel ve teknik bilgi üretiminin, araştırmacılar ve uzmanlar tarafından paylaşılmasının, yeni ürünlerin geliştirilmesi için yapılan çalışmalarda önemli bir yeri vardır. Yapı teknolojisinde kullanılan endüstriyel hammaddelerin başında pomza ve perlit gelmektedir.

Günümüz yapı endüstrisinde geniş bir kullanım alanı bulan pomza, kalsiyum esaslı (Çimento vb.) bağlayıcılar ile kimyasal reaksiyona girerek hafif duvar blokları ve yalıtım malzemeleri gibi kompozit ürün haline getirilebilmektedir. Fakat hafif malzemelerin yapıda kullanılabilirliği üzerine çalışmalar gittikçe artan bir şekilde devam etmektedir. Ham perlit ise pomza gibi sektörde geniş bir kullanım alanı bulamamış ancak birçok üstün özellikleriyle araştırmacıların dikkatlerini üzerine çekmeyi başarmıştır.

Perlitin kullanılmasına yönelik çalışmalarda, işlenmiş perlitin kil ile karıştırılarak konstrüktif tuğla üretiminde kullanılabilirliği, Topçu ve Işıkdag tarafından incelenerek geleneksel yöntemlerle kilden üretilen tuğlaya %30 oranında katılan perlitin, birim hacim ağırlığı, basınç dayanımı, ısı iletim direnci ve maliyet açısından en iyi sonucu verdiği ifade edilmiştir [10].

Türkmen ve Kantarcı, Perlitin taşıyıcı sistemlerde kullanılabileceği yönünde yaptıkları çalışmada; geliştirilmiş perlit agregası ile normal agregaya içeren ve kendiliğinden yerleşen betonların (çimento+silis dumanı olarak seçilen bağlayıcı dozajı 450 kg/m^3 olarak sabit tutulmuş) değişik kür koşullarındaki basınç dayanımını, görünür porozitesini ve kılcallık katsayısını araştırmışlardır. Geliştirilmiş perlit kullanıldığında, kılcallık katsayısının ve görünür porozitesinin arttığını, bunun yanında artan geliştirilmiş perlit oranıyla birlikte basınç dayanımının azaldığını göstermişlerdir [11].

Topçu ve Işıkdag, standart agregaya yerine geliştirilmiş perlitin % 0 ile %60 oranında kullanarak hafif beton numuneleri üretmişlerdir. Deneylerinde CEM II 32,5 ve CEM I 42,5 olmak üzere iki tip çimento kullanmışlar ve dozajı 300, 350 ve 400 kg olarak seçmişlerdir. Ürettikleri numunelerde, 300 kg dozaj ve %30 oranında perlit değişimi

için minimum birim ağırlığı $1,8 \text{ g/cm}^3$, basınç dayanımını iki çimento türüne göre 20 MPa ve 30 MPa olarak elde etmişlerdir [12].

Demirboğa ve ark., hafif beton üretiminde geliştirilmiş perlit ve pomzayı birlikte agrega olarak kullanmışlardır. Çimento dozajının %1,5'i kadar süper akışkanlaştırıcıyı su/çimento oranını düşürmek için karışımlara ilave etmişlerdir. Perlit agregasının oranı arttıkça, betonun birim hacim ağırlığının $0,735 \text{ g/cm}^3$ 'e kadar düştüğünü tespit etmişlerdir. Karışımdaki perlit oranının pomzaya göre artırılmasının 7 günlük ve 28 günlük basınç dayanımlarını artırdığını gözlemişlerdir [13].

Demir ve Başpınar, çökme havuzlarında biriken mermer tozlarını, ağırlıkça %2,5-5 arasında geliştirilmiş perlit ile harmanlamış ve oluşturulan karışımı kireç ve alçı ile bağlayarak pişirme işlemine tabi tutmadan tuğlalar üretmişlerdir. Yapılan testler sonucunda bu malzeme ile yeterli mekanik özellikleri sağlayan hafif duvar bloklarının üretilebileceğine karar vermişlerdir [14].

Yu ve ark., perlit tozunu betona puzolanik katkı olarak ilave etmişler ve perlitin mineral katkı olarak puzolanik etkilerini, spesifik dayanım oranı, spesifik dayanım indeksi ve puzolanik etkinin dayanıma katkı yüzdesi açısından niceliksel olarak araştırmışlar ve doğal perlit tozunun yüksek puzolanik bir etkisi bulunduğunu ve beton için iyi bir aktif mineral katkı olduğunu belirtmişlerdir [15].

Erdem ve ark., doğal perlitin çimento üretiminde puzolanik katkı olarak kullanımını araştırmışlardır. %20 ve %30 perlit katkısı ile $320 \text{ m}^2/\text{kg}$ ile $370 \text{ m}^2/\text{kg}$ Blaine inceliğinde çimentolar üretmişlerdir. Üretilen çimentoların performansını lazer difraksiyon ile tanecik büyüklüğü dağılımı, normal kıvam, sertleşme süresi ve basınç dayanımı testleri ile kontrol etmişler, perlitin katkılı çimento üretiminde kullanılmak için yeterli puzolanik etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir [16].

Demirboğa ve Gül, geliştirilmiş perlitli beton üretiminde agrega olarak kullanmışlar ve 200 kg/m^3 olan çimento dozajını sabit tutarak bu ağırlığın %10, %20 ve %30'u kadar silis dumanı ve uçucu külü çimento yerine kullanıp sonuçlarını incelemişlerdir.

Karışımın su çimento oranını düşürmek için, ağırlık olarak %1,5 oranında süper akışkanlaştırıcı katmışlardır. Çimento yerine %14 ve %18 oranlarında silis dumanı ve uçucu kül katılmasıyla ısı iletkenliğinin azaldığını ve bu katkıların miktarının artmasıyla numune yoğunluklarının $0,483 \text{ g/cm}^3$ 'e kadar düştüğünü belirlemişlerdir. Silis dumanı katkısının 7 günlük basınç testlerinde düşük değerlere, 28 günlük testlerde artan değerlere, uçucu külün ise her iki yaşta da düşük değerlere neden olduğunu tespit etmişlerdir [17].

Tokcan, yaptığı çalışmada geliştirilmiş perlitin sıvaya katıldığında duvarlarda ses ve ısı izolasyonu sağladığını, ayrıca yanmadığı için yangına karşı koruyucu bir malzeme olduğunu ve bu özelliklerinden dolayı bilhassa inşaat sektöründe kullanıldığını belirtmiştir. Bununla beraber meşrubat, içki sanayiinde filtrasyon olarak, ilaçların taşınmasında inert katalizör olarak, ziraatta toprak ıslahı ve gübrelemede, ambalaj sanayiinde, kirli suların temizlenmesinde, döküm sanayiinde kullanılmaktadır [18].

Ceylan ve ark., yaptıkları çalışmada, farklı oranlarda ham ve patlatılmış perlit kiremit kiline ilave etmiş ve etkilerini incelemiştir. İki farklı sıcaklıkta pişirilen örneklerin artan perlit oranına ve artan sıcaklığa bağlı olarak fiziko-mekaniksel özellikleri belirlenmiştir. Çalışmada, artan perlit ilaveleri ile su emme ve porozite artmış, büzülme, yoğunluk ve mukavemetler azalmıştır. Ham ve patlatılmış perlit ilaveli örneklerin $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ve $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de pişirildikten sonraki mukavemetlerinde perlit oranının artışına paralel olarak azalma gözlenmiştir. Patlamış perlit ilaveli örneklerin mukavemetleri ham perlit ilaveli örneklere göre daha fazla azalmıştır. Ham perlit ve patlatılmış perlit ilaveli numunelerde sıcaklık artışıyla birlikte mukavemet artışı olmuştur. Patlamış perlitli örneklerin mukavemetinin ham perlitlilere göre daha az olduğu belirlenmiştir [19].

Şimşek ve Gökçe yaptıkları çalışmada, perlit agregasının en fazla boy değişimini veren reaktif agrega oranının tespiti amaçlanmıştır. Bu amaçla farklı oranlardaki perlit agregasının reaktif olmayan kireçtaşı agregası ile alkali-silika reaksiyonu (ASR)'na ilişkin özellikleri belirlenmektedir. Perlit, kireçtaşı ve her ikisinin birlikte

kullanıldığı örnekler üzerinde hızlandırılmış harç çubuk metoduna göre boy değişim değerleri ölçülmüştür. En fazla boy değişimi veren örneklerin morfolojisi ve kimyasal kompozisyonu SEM ve EDX ile yapılmıştır. Boy değişiminin artması ile çatlak yoğunluğu ve Ca oranının arttığı gözlenmiştir. 14 günlük boy değişim ortalamalarına göre, içerisinde %40 oranında perlit agregası içeren örnekler en fazla boy değişimine uğramış ve perlit agregasının pesimum reaktif agrega oranı olarak belirlenmiştir [20].

Bütün bu çalışmalara rağmen perlit inşaat teknolojisine istenilen seviyede değildir. Bunun nedeni olarak kalsiyum esaslı bağlayıcılarla anti reaksiyonlara girmesi gösterilmektedir. Ancak gelişen teknolojiye paralel malzeme üretiminde kalsiyum esaslı bağlayıcılar yerine, jeopolimerler olarak isimlendirilen sıvı çimentolar kullanılmaya başlamış ve aynı endüstriyel hammaddelerden daha üstün özelliklerde ürünler oluşturulabilmiştir. Bu çalışmada ise perlitin inşaat teknolojisinde kullanılabilirliği üzerinde durulmuş, klasik bağlayıcılar yerine farklı yöntemler denenmiş, inşaat sektöründe kullanım imkânları araştırılmış ve genel anlamda ham perlit dolgulu, jeopolimer esaslı ürün süreçleri incelenmiştir.

2.4. Jeopolimer

Jeopolimer polikondensasyon sonucu oluşan termoset polimer yapısına sahiptir. Polikondensasyon, çeşitli ısıl ve kimyasal etki ile monomerler arasındaki bağların değişmesi ve moleküller içindeki atomların enerji düzeylerinin değişmesi ile gerçekleşir. Bakalit fenolve formaldehitin alkali ortamda polikondensasyona uğraması ile oluşmuştur. Jeopolimer oluşumunda ise 100–150 °C sıcaklıklarda kaolin alkali NaOH (sodyum hidroksit) ile reaksiyona girerek hidrasyon sodası halinde polikondensasyona uğrar, oluşan ürün tektoalüminosilikat (feldispatoit) ve hidroksisodalittir [21].

Jeopolimerler, geliştirilmiş ileri teknoloji kompozitler ve seramik uygulamalar için döküm taş formunda özellikle portlant çimentonun yerini alabilecek pek çok potansiyel kullanım alanı olan sentetik alümina silikat malzemelerdir. İlk olarak, bu

malzemeler konusunda araştırmaları olan Joseph Davidovits jeopolimer adını kullanmıştır. Jeopolimerler yerine daha çok zemin imentosu (soil cement) adı daha yaygındır ve portlant çimentoya katılarak mukavemet ve stabilite geliştirmek için oldukça sık kullanılırlar. Alkali olarak aktif bağlayıcılar özellikle alkali olarak aktif metalürjik cüruflar ve ilgili diğer malzemeler jeopolimer çimentolara örnek verilebilir. Jeopolimerlerin önemli özelliklerinden biriside, yüksek sıcaklıklara dayanabilmesidir. Jeopolimeri, termoset maden polimerler olarak tanımlamak daha uygundur [21].

Jeopolimer, organik kimya rnpolimerlerden farklı olarak karbon elementi yerine kuartz içerisindeki silisyum moleküllerinin yüksek pH'lı alkali ortamda alminatlarla polikondensasyona uğraması ile oluşur. Jeopolimer kayaç oluşturan madenlerden üretilmekle beraber tüm Jeopolimer retimteknini inorganik polimerler olarak sınıflandırmak doğru olmayabilir. Zira, organik polimerelementlerinin de sentezlendiği metil grubu, petrol ve kerojen bileşikli organo-Jeopolimerler üretilmektedir [22].

1970'li yıllarda Fransa şehirlerindeki özellikle ahşap ve elik binalardayangınların artması yeni kaplama malzemelerinin keşfini gerektirmiştir. Kapı ve pencerelerdekullanılan Poli –Vinil- Klorür, yalıtımda kullanılan Poli retan gibi organik kimya ürünü termoset polimerlerin yanmazlık özelliği göstermesi mümkün değildir. Çünkü organik polimerlerin ana yapısında bulunan petrol türevi karbon içeren monomerler yanıcıdır [21].

Yanmazlık özelliği ancak minerallerde bulunur. Silisyum (Si), organik kimyanın ana elementlerinden olan karbon (C) elementi ile periyodik tabloda atom özellikleri itibarı ile aynı grupta bulunmakla beraber bir alt periyottadır. Bu durum, ametal olan karbondan farklı olarak silisyum elementinin metaloit özellikleri bulunduğunu gösterir. Metaloidler, kimyasal olarak metal gibi davranmakla birlikte yarı iletkenlikleri yönüyle metal özellikte gösterirler [23].

1912 yılında Alman bilim adamı Alfred Stock (SiH_4) polisilan molekül zincirlerini elde etmiştir. Ancak polisilan molekülleri kararlı olmadıkları için oldukça tehlikelidirler ve polimerizasyon zincir sayısı en fazla 4 olmaktadır. Silisyum oksijen ve diğer elementlerle kurduğu bileşikler daha kararlı davranmaktadır. Bu da daha sıkı kristalize ve yanıcılığı az olan malzeme yapısını sağlayacaktır. Silikat (SiO_3) molekülleri ile oluşmuş piroksen vollaistonit kristalleri birer kayaç örneği olduğu gibi doğadaki kuartz SiO_4 bileşiği ise en sert taştır. Kuartzı yapay olarak üretmek oldukça zordur. Ancak başka element ve bileşiklerin silikatlarla (SiO_2) kovalent bağlı polimerler oluşturmasıyla üç boyutlu yarı kristal amorf yapıda basınç ve yanma dayanımı yüksek malzemeler elde edilebilmektedir. Buradan yola çıkılarak, silika moleküllerinin zincir bağlarından oluşmuş silokson ya da silikat moleküllerinin, (AlO_4) alüminat molekülleri ile oksijen atomu elektronlarını paylaşması ile elde edilen polisilatların keşfi ile Jeopolimer kimyasının temelleri atılmıştır [21].

Kil, seramik yapımında da önem arz eden oksit mineraller içermektedir. Kaolin, montmorillonit, pirofilit, muskovit, klorit, laterit gibi neredeyse tüm killi toprak türleri alkalisoda (NaCO_3 , NaOH , KOH) ile tepkime vererek ısı etkisinde katılaşmaktadır. Özellikle kaolinkili içerisinde yüksek miktarda bulunan Al ve Si elementlerinin oksitli bileşikleri bağlayıcılık ve hacimsel tokluk sağlayıcı monomerler oluşturabilmektedir. Alkali ortamda organik kimya ürünü bakalit gibi polimerler için söz konusu olan termoset hidrotermal koşullar, kaolin ve benzeri kil tiplerine alkali tuz eşliğinde (NaOH) uygulanmış; feldispatoit ve zeolit türü kayaçların yapay olarak eldesi araştırılmıştır. 1972 yılında Kaolinit kili ve alkali aktifleştiricilerin etkisiyle 15 MPa basınçla sıkıştırılmış pastanın 100–130 °C da sunta üzerine 30 bar basınçlı buhar pres ile preslenmesiyle yanmaz ahşap panel üretimi gerçekleştirilmiştir. Davidovits ve ark., silisyum içeren monomerlerin, elde edilen polimer malzemenin ana bileşenlerini oluşturması sebebi ile bu prosese “Siliface” ismini vermişlerdir [21].

Davidovits ve ark., erken dayanımı yüksek beton üretimi, refrakter, uçak kabin malzemesi gibi üretimler için çeşitli doğal ve yapay minerallerin alkali tuz ve alkali silikatlarla kimyasal reaksiyona girmesiyle oluşan yarı seramik, genellikle üç

boyutlu hegzagonal kristal yapılı bağlayıcı, çimento, harç, reçine tipinde de ürünler geliştirmiştir. İçinde yüksek fırın cürufunun ve alkali tuzların (NaOH, KOH) hidrolik bağlayıcı olarak kullanıldığı beton, yüksek basınç dayanımı, esneklik, erken dayanım ve yüksek asit direnci göstermiştir. Pyrament ticari ismindeki bu jeopolimerik çimento pastası, 1984 yılında Amerika'da havaalanı betonu dökümünde Portland çimentolu betonla karıştırılarak kullanılmış ve 6 saat içinde uçağın inebileceği dayanım ve sertlikte beton elde edilmiştir. Betonun 28 günlük basınç dayanımı ise 80 MPa dır [21].

Yüksek fiziksel özellikler gösteren bu tür inorganik kimya ürünlerine içinde bolca barındırdığı toprak mineralleri ve termoset polikondensasyon reaksiyonlu polimer kimyasıyla benzer reaksiyonlarla elde ediliyor olmasından dolayı Davidovits, jeopolimer adını uygun görmektedir. Jeopolimer malzemelerin plastiği andıran parlak ve pürüzsüz yüzeyleri polimer isimlendirmesinin uygunluğunu doğrulamaktadır. Jeopolimer prosesi bir füzyon sinterleme yada eritme işlemi değil polimerleşme sürecidir.

Jeopolimer, özellikle Si-Al-Mg-Ca-P-K-Na gibi mineral moleküllerini içeren monomerlerin birbirleri arasında polikondensasyon sonucu oluşan kovalent kompleks zincir bağlı polimerler kurması ile oluşur. Jeopolimerin eniyi özellikler gösterdiği ürünler ise 750 °C'de kalsine olmuş metakaolinit kilinin alkali tuz vealkali silikatlar ile aktifleştirilmesi ile elde edilen çözeltisinin, düşük ısıda (40–100 °C) fırınlanmasıyla elde edilir [21].

Jeopolimer gördüğü ısıl işlemler sonrası, monolitik (yekpare taş) seramik yapıya ulaşır. Jeopolimer bileşimine girenler ve ürünleri ise şu şekilde basitleştirilebilir;

Jeolojik esaslı ham madde+camsuyu([Na, K,Li] SiO₂)+alkalituz (Na, K,Li)OH 100-150°C→hidrosodalit (Çözünür Silikatlar)60-100°C→polisialat

Hidrosodalit ve polisialatlar hegzagonal üç boyutlu molekül dizilimindedir. Bir başka deyişle hidrotermal polikondensasyon sonucunda içindeki suyu hem kimyasal hem de fizikselyollarla vererek (dehidratasyon+dehidrasyon) zeolit kayaçlarına benzer

tanecik yapısına ulaşan, ancak zeolit kristallerinden farklı olarak amorf üç boyutlu hekzagonal moleküler bağyapıda olan alümin silikat toprak malzemeler jeopolimerdir [24].

Jeopolimeri zeolitlerden ayıran bir diğer faktör de 80 °C'ta sentezlenebiliyor olmasıdır. Bundan dolayı jeopolimer, yapısında su moleküllerinin bir kısmını da tutmaktadır. Zeolit ise 150–250 °C de yapısı içinde boşluklar bırakarak kristalleşmektedir [21].

Jeopolimer göstermiş olduğu mükemmel fiziksel ve kimyasal özellikleriyle; prefabrik yapı endüstrisi, taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan yapı malzemeleri, heykelcilik ve süsleme sanatları, beton esaslı yol kaplamaları, zemin iyileştirme, zehirli ve nükleer atıkların depolanması, refrakter (yüksek ısı) seramik malzeme üretimi, ağır iklim şartlarına ve yangına dayanıklı duvar kaplaması üretimi, güçlendirme, tarihsel yapıların taşıyıcı sistemlerinin restorasyonu, uçak ve yarış arabası endüstrisi ve nükleer santrallerde kullanılabilir. Kullanılan teknolojinin gelişmişlik düzeyine, seçilen kimyasal oranlara göre ve toprak esaslı hammaddede yapılan fiziksel iyileştirmelerle jeopolimere pek çok seramik malzeme de olduğu gibi istenilen fiziksel özellikler kazandırılabilir. Ayrıca jeopolimer kimyası ile ilgili bilgiler bugün Mısır Piramitlerinin gizemini, Roma ve Horasan harçlarının kimyasal yapısını da aydınlatmaktadır [21,25].

Kaplama refrakter malzemesi olarak da kullanılan jeopolimerin çelik adhezyonu, kil taneciklerinin daha ince öğütülmesi ile sağlanır [26].

Jeopolimer konsepti ile üretilen gerek düşük teknoloji ve gerekse gelişmiş teknolojilerde, molekül yapısını belirleyici olan jeolojik toprak kaynak ve aktifleştirici alkali silikatların toplam Si:Al molar oranıdır . Bu oranın 1 olduğu sistemlerde zeolit kristal benzeri tuğla seramik ve yangından koruyucu ürünler elde edilebilir. Bu oran 2 olduğunda yine seramik amorf arası yapıda jeopolimer çimento ve betonu sentezlenebildiği gibi biraz daha ileri teknoloji ile radyoaktif atıkların istiflenmesi için gerekli yapılar üretilmektedir. Si:Al oranının 3 olduğu durumlarda akışkan polimerik karakter biraz daha artmakta fırın kaplamaları fiber

glass yangından koruyucu kaplamalar ve gelişmiş teknolojiler için 1000 °C dayanabilen malzemeler üretilebilmektedir. Si:Al oranı 3'ün üzerine çıktığında dolgu malzemesi köpükler üretilebilir. Si:Al>15 olduğunda, 2 boyutlu moleküler ağ yapısında jeopolimer pastası oluşmakta ve bu yapı savaş uçaklarında kullanılabilen nano kompozit yangın ve ısı dayanımı yüksek malzemelerin üretiminde kullanılabilir [21].

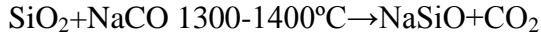
Al-Si bileşiği bulunduran ve serbest kalsiyumun düşük olduğu mineral kompozisyondaki uçucu küllerle (F tipi uçucu kül) ya da 750 °C' de fırınlanmış metakaolinit (MK750) gibi ham maddelerle yüksek dayanım ve dayanıklılık özellikleri olan malzemeler elde edilebilmektedir. Fırınlanmamış kaolin kili ise daha düşük basınç dayanımı vermektedir [27].

Jeopolimerin fiziksel özellikleri, kullanılan ham maddedeki Al-Si oranlarına göre değişiklik gösterir. İstenilen fiziksel dayanıklılık ve dayanım özelliklerini kazandırmak için ham maddenin kimyasal özelliklerini iyi tespit ederek istenilen özellikleri sağlayacak karışımlar oluşturulabilir [28].

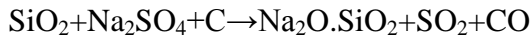
Örneğin, polisialat kristallerinin arasına sudaki hidroksil iyonlarının kimyasal olarak bağlanması ile ısı direnci yüksek kaplama malzemeleri üretilebilmektedir [19]. Ayrıca 9 tip mevcut jeopolimer malzeme tanımlanmıştır [29]. Bu tanımlanan jeopolimer malzeme Özbek tarafından da kabul edilmiştir [7]. Bu malzemeler sırasıyla aşağıda verilmiştir.

2.4.1. Siloksonat-Cam suyu esaslı jeopolimerler

Si:Al=1:0 dır. Jeopolimer hamurunun işlenebilirliğini ve kimyasal reaksiyonların gerçekleşmesini sağlayan en önemli bileşen alkali silikat ya da siloksonat olarak da isimlendirilen, kum içerisindeki kuartz mineralini oluşturan silikat moleküllerinin alkali tuzlar etkisinde eritilmesi ve suda çözünmesi ile elde edilen cam suyudur. Basitçe elde edilen kimyasal denklem aşağıdaki gibidir.



Ekonomik olmakla birlikte üretimi aşamasında atmosfere bırakılan SO₂ gazının sülfirikasit oluşumuna neden olmasından dolayı günümüzde terk edilen bir diğer üretim formülü ise aşağıda verilmiştir.



Eski Mısır'da M.Ö. 3600 yılında bağlayıcı olarak mezar heykelleri ve seramik yapımında, alkali silikatların kullanıldığı yapılan araştırmalarla keşfedilmiştir [28].

Günümüz teknolojisi ile kuartz kumu ve sodyum karbonatın 1300–1400 °C'ta ergitilmesi ve su içinde soğutulması ile sıvı ya da öğütülmüş granüle alkali silikatlar elde edilir. Eski çağlarda busıcaklığı sağlayacak bir kimyasal teknolojinin sağlanamayacağı açıktır.

Mısır'daki ilk üretim bol silis bulduran buğday, arpa ve kamış küllerinin opal çakmaktaşı krisokolla çakmaktaşı gibi içlerinde tuttıkları suyunda etkisi ile SiO₂ molekülü bağlarının kuartz'a kıyasla biraz daha zayıf olduğu volkanik taşlarla birlikte öğüterek elde ettikleri katı karışımı özellikle soda gölleri içinde bulunan sodyum karbonat, sodyum klorür, sodyum sülfat alkali tuzlarının sulu çözeltisi ile 620 °C sıcaklıkta kimyasal reaksiyona sokarak eriyik halinde (Na, K, SiO₂) alkali silikatları elde edip yapı ve heykellerinde kullandıkları düşünülmektedir [30].

Analitik kimya, jeopolimer üretiminde önemli bir bileşen olan çözünür silikatları 19.yüzyılda ortaya çıkarmıştır. İlk kâşifi olan Von Glauber tarafından (oleum silisium) silis yağıolarak isimlendirilen çözünür silikat bitki külleri içindeki potasyum karbonat ile kuartz kumunun birlikte ergitilmesi ile üretilmiştir. Johann Von Fuchs camsuyu (Wasser glass) ismiile 1818 de ürünün patentini almıştır. Daha sonraları KCO₃ ile SiO₂'in çözüldüğü alkali ürünelde edilmiş ve taş likörü olarak isimlendirilmiştir. Deterjan, yapıştırıcı, diş macunu bileşeni, korozyon önleyici yapımında kullanılan alkali silikatlar zeolit sentezi, silika jel (silikon) ve jeopolimer

üretiminde de önemli bir hammaddedir. Toz ve sıvı olarak ticari kullanımı mevcuttur. Ürün sınıflandırmasında $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ molar oranı belirleyicidir. Molar oranın 0,5 olduğu sodyum ortosilikat Na_4SiO_4 formülüne sahip iken, molar oranın 2 olduğu sodyum disilikat ($\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$) genellikle yoğun üretilen ticari bileşiktir. Jeopolimer çalışmalarında kullanılan sodyum metasilikat (Na_2SiO_3) molar oranı 1'dir. Hidrotermal üretim prosesi ile silika dumanının NaOH ya da KOH ile 600–800 °C sıcaklıklarda tepkimeye girmesi ile elde edilen ürün çok yüksek düzeyde yabancı tortu içermekle birlikte silis dumanının hammadde olarak kullanımı ile üretiminde daha az ısı enerjisinin tüketildiği camsuyu üretim tekniğidir. Hidrotermal proses pek kullanılmamakla beraber özellikle jeopolimer hamurunun aktive edilmesinde kullanılan sodyum metasilikatı daha kolay ve ucuz elde edebilmek için jeopolimer laboratuvarlarında kullanılabilir [21].

2.4.2. Kaolinit/ Hidrosodalit esaslı jeopolimerler

$\text{Si}:\text{Al}=1:1$ dir. Malzeme kompozisyonu içinde bulunan Al ve Si oksitli bileşiklerin Jeopolimer oluşturan 3 boyutlu bağ yapısına ulaşabilmesi için moleküllerin bağ yapma özellikleri iyi değerlendirilmelidir. Alüminyumun 3 Silisyumun 4 değerlikli olması oksijen bağlarının kovalent bağlı (elektron paylaşımı) yoksa iyonik bağlı mı (elektron alışverişi) gerçekleşeceği kimyasal analizle gözlenmeli ve seçilecek malzemenin karışım oranları ve uygulanacak ısı işlemler buna göre belirlenmelidir. Kaolinit kilinin mineral kompozisyonu zeolit kristallerini elde etmek için oldukça uygun iken; 100 °C altında Jeopolimer sentezi alüminyumun oluşturduğu hidroksil iyonlarının bağlı olduğu cipsit kristallerinden dolayı oldukça zordur. Kaolinit kili kimyasal yapısı şu şekildedir;



Doğada elde edilen kaolinit A,B,C olmak üzere üç tip kompozisyonda bulunmaktadır.

- A tipi kaolin % 94 kaolinit ,% 6 kuartz ve muskovit

- B tipi kaolin % 92 kaolinit, % 8 montmorillonit, anastaz ve kuartz
- C tipi kaolin ise %33 kaolinit, %66 kuartz muskovit ve profillit içerir.

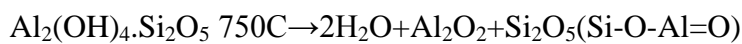
Kaolinit içerisindeki alüminyum ve silisyum oksit kompozisyonu önemlidir. A ve B tipikaolindeki % 45 düzeyindeki SiO_2 ve % 45 düzeyindeki Al_2O_3 , jeopolimer reaksiyonu için gerekli içeriği sağlamaktadır. Aynı sebeple metakaolinit esaslı jeopolimer üretiminde de A ve B tipi kaolin tercih edilmektedir. Ancak kaolinit kili alkali tuzlarla kararlı reaksiyonlar vermemektedir [21].

Yüksek pH'lı ortamda kaolin kili içerisindeki alüminyum molekülleri ayrışmaktadır. Daha çok kankrinit tipi zeolitlerin sentezinde kullanılan kaolin kili ile jeopolimerizasyon $150\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta 30 MPa buhar presi ile üretilmiş panellerde sağlanmıştır. $150\text{ }^\circ\text{C}$ ısı kil içindeki dehidroksilasyonu sağlamak ve Al-OH-Si-O bağları arasındaki sumolekülleri buharla birlikte ayrışmaktadır. Oluşan ürün sentetik polisialat hidrosodalittir. Mikro moleküler, yapı jeolojik feldispatoit kayaları ile aynıdır. Panel presle üretilen malzemenin iç kısmı $100\text{ }^\circ\text{C}$ kadar ısınmadığı için hegzagonal kaolinit kristalleri oluşurken yüzeyde amorf (camsı) düzensiz yapı vardır [31].

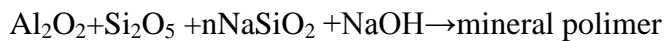
2.4.3. Metakaolinit esaslı jeopolimerler

Si:Al=2:1 dir. Kaolinit $750\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta fırınlandığında dehidroksilasyona uğrar ve su molekülleri ayrıştığında alümina silikat oksitler elde edilir. Bu yapı metakaolinit ya da kandoksi MK 750 olarak adlandırılmaktadır.

Siloksoalumoksil



Metakaolinit + alkali silikat + alkali tuz → mineral polimer rezene



Metakaolinit tanecik büyüklüğü kaolin killerinden daha yüksektir. Bu durum fırınlama etkisiyle kil taneciklerinin genleşmesinden kaynaklanmaktadır [32].

Metakaolinit molekül bağ yapısı, dehidroksilasyon sonrası kaolinden farklı ve daha kararlı bir Al-O-Si bağ yapısıdır. Dehidroksilasyon sonrasında metakaolin içerisinde oluşan Van-der Wals kuvvetlerine bağlı olarak 4-5 ve 6 koordinatlı Alüminyum bağları oluşmaktadır. Bir metakaolinit örneğinde herüç bağ yapısına da rastlanılmaktadır. İki Si-O-Al dizilimi arasında tek kovalent bağlı bileşik oluşmuşsa 5 koordinatlı; İki komşu Al-O-Si diziliminin ikisi de kovalent bağlı bileşik oluşturmuşsa, 4 koordinatlı; hidroksil iyonlarının bir kısmı dehidroksilasyona uğramamışsa alüminyum 6 koordinatlı bağ yapmaktadır. Bağ yapısı hakkındaki bilgiler MAS-NMR ışındeneyleleri ile elde edilmektedir. Metakaolinit esaslı jeopolimer sentezi ile yüzey sertliği yüksek olan ürünler, ısı dayanımı yüksek malzemeler, yüzey pürüzsüzlüğünün önemli olduğu sanatsal seramik ürünler elde edilebilmektedir. Metakaolinit ile üretilen Jeopolimerin priz alma süresi $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$ molar oranı ile ilişkilendirilmektedir. 80 °C'deki sentezde 1.23 oranında 1 saatte priz alırken, bu oran 2'yi geçtiğinde uygun sertliğe 4 saatte ulaşılmaktadır [21].

2.4.4. Kalsiyum esaslı jeopolimerler

Si:Al=1-2-3 dür. Kireç ve kil esaslı malzemelerin karıştırılarak su geçirgenliği düşük kaplamaların üretimi M.Ö. 1500 yıllarındaki Mısır uygarlığına kadar dayanmaktadır. Hiyeroglifler üzerindeki son dönem çalışmaları Mısırlı Yusuf peygamberin, kuraklığa karşı su kaynaklarını korumak için bu malzemeyi geliştirdiği düşünülmektedir [32].

Kalsiyumun suda çözünürlüğünün az olması Jeopolimer reaksiyonunun yavaş sürmesine neden olur. Oluşan ürünlerin erken dayanımı da düşüktür. Yüksek fırın cürufu ve polisialatların kullanımı ile erken dayanımı yüksek beton üretiminde kalsiyum esaslı jeopolimerizasyon kimyası kullanılmıştır. Dökme demir ve çelik üretiminin yan ürünü olan yüksek fırın cürufunu, Portland çimentosu, NaOH ve KOH gibi (Sodyum hidroksit- potasyum nitrat) alkali tuzlar, camsuyu ve sitrikasit ile

pH 12 olan ortamda aktive edilerek hem erkendayanımını 4 saatte 30MPa düzeyinde alan hem de hacimsel genişmeye uğramayan jeopolimer betonu üretilmiştir [33].

Bu beton Pyrament ismi ile patentlendirilmiştir. Farklı kaynaklar kullanılarak erken dayanımı yüksek Jeopolimer malzemeler geliştirilmiştir. Bu çimentolu sistemin ana yapısını oluşturan 3 farklı kimyasal sistemin varlığı tespit edilmiştir. Bunlar, alumino silikat oksitler ($\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_2$) ; potasyum disilikat [$\text{K}_2\text{-(H}_3\text{SiO}_4)_2$]ve kalsiyum disilikat (CaH_3SiO_4) tır. Kalsiyum esaslı Jeopolimerlerin Si: Al=3 olduğu kompozisyonları ile radyoaktif atık stabilizasyonu yapılabilmektedir [34].

2.4.5. Kayaç esaslı jeopolimerler

$1 < \text{Si:Al} < 5$ dir. Doğal jeolojik oluşumlu kil kayaçlar geçirimsizliklerinin yüksek olması yönü ile radyoaktif atık depolama sistemlerinde kullanıma uygundur. Yüksek ve düşük değişken pH'lı radyoaktif çözeltiler hapis olundukları malzemeyi delerek depolardan sızmakta veyeraltı sularının kirlenmesi tehdidini oluşturmaktadırlar. Özellikle Portland çimentolu betonesaslı depolar oldukça kolay aşınmakta, yeraltı suyuna karışan sızıntılar oluşmakta, ayrıcaiptal olmuş nükleer santralin atıkları çimentonun hidrotermal reaksiyonunun da etkisi ile sürekli ısınan nükleer bombalara dönüşmektedir. Patlamadan sonra Portland çimentolu betonla kaplanan Çernobil santrali bunun en korkunç örneğidir ve bilim adamlarına göre hala tehlike arz etmektedir [34].

Kil kayaçların esaslı olan feldispatoitler ve kumu oluşturan kuartz yeryüzünde en çokbulunan toprak madenler olmakla birlikte kimyasal potansiyelleri tam olarak bilinmemektedir. Düşük ve yüksek pH'lı ortamların oluştuğu radyoaktif çözeltilere dayanabilecek malzemelerin her iki ortamda da kararlı davranması gereklidir. Çeşitli feldispat kayaçlar ve kuartzın etkileştirilmesinden üretilen Jeopolimer radyoaktif nükleotid eşlenik ve eşlenik olmayan çözeltileri radyoaktif sızıntıyı önleyici özellikte depolama amacıyla kullanılabilirler. Eşlenik çözünme iyonik bağ yapısına bağlı iken eşlenik olmayan çözeltilerde feldispat içindeki alüminyum oksitlerle kuartz içindeki silikatlar pH düzeyine bağlı olarak etkileşmekte ve sulu ortamda orto-

siklo-sialat-disilokso hidratı oluşturmaktadırlar. Radyoaktif elementler jeopolimer monomerlerinin çerçeve yapısında hapsolmaktadır. Böylece uzun süre radyoaktif sızıntı ya da ısınma oluşmamaktadır. Diğer Jeopolimer oluşumlarından farklı olarak kayaç esaslı jeopolimer sentezinde farklı tipteki kayaçların asit içerisinde çözünümü söz konusudur. Cs, Co, Sr, Tc, U, Cr gibi radyoaktif elementlerin düşürülmüş enerjili atık izotopları asit çözeltiler içinde reaktifliklerini tamamen yitirmekte ancak yine de hiperalkalin çözeltiler oluşturmaktadır. Çözünmüş alüminosilikat kaynağı kayaç daha sonra alkali tuz ve silikat çözeltilerin etkisi ile jeopolimere dönüşmektedir [34].

Jeopolimer betonu, Portland çimentolu betona göre 2–3 kat daha fazla çekme dayanımına sahiptir. Ayrıca potasyum polisialat esaslı jeopolimerlerin donma çözülme dayanımları da daha iyidir. Doğaya zarar veren arsenik, sülfirik asit, radyoaktif atıkların zapt edilmesinde jeopolimer kayaç yapısı gelecek vaat etmektedir. Geopolimit 50 ticari ismindeki K-poli-sialat formülü ile pH düzeyinin 1,5–3 arasında olduğu Kanada'daki uranyum ve arsenik atıkların kapsülasyonu araştırılmış ve jeopolimer matris yapısının bozulmadan radyoaktif mineralleri hapsedebileceği gözlenmiştir [34].

2.4.6. Silika- esaslı Jeopolimer

Sialate ve siloxo bağlı poly (Si:Al>5) dir. Mavi emaye kaplamalı silis esaslı fayanslar M.Ö. 3000 yıllarında Mısır piramitlerinde kullanılmıştır. Emaye kaplama fayans teknolojisi 1000 °C sıcaklık gerektirmekle birlikte emayeleşmenin vereceği parlaklık silis esaslı jeopolimer ile 200 °C'de gerçekleşmektedir. Bu kimyasal sistemin eski Mısırlılar tarafından da keşfedildiği düşünülmektedir. Silis esaslı malzemelere tarihi bir diğer örnekte, M.Ö 200'lü yıllarda inşa edilen Çin Seddi'dir [21].

Günümüzdeki SiO₂ kaynağı ise kuartzın 3–10 µm aralığında öğütülmesi ile üretilen silistozu ve ferrosilikon çelik üretiminde açığa çıkan 0.05–1 µm silis dumanıdır. Silis tozu yüzey kaplaması aşınma yüzeyi ve parlak seramik yüzey üretiminde ince dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır [21].

Silis dumanının çimentolu beton içinde filler ve puzolan olarak kullanımı mevcuttur. SiO_2 mükemmel bir puzolan malzemedir. Jeopolimer sentezinde ise silis dumanı, NaOH ve KOH gibi alkali sodyum ve potasyum hidroksitleri ile oldukça kolay aktifleştirilebilen bir kaynaktır. Çözünür silikat ve siloksonatlar içindeki silis partikülleri nano jeopolimer üretimini sağlamaktadır. Oluşan nanopolisilanol jeopolimer ile ısı ve yangın dayanımı yüksek paslanmaz çelik boyaları üretilebileceği gibi, yüksek ısı direnci olan seramik malzemeler de üretilebilir [21].

2.4.7. Uçucu kül esaslı jeopolimer

Uçucu kül daha önce de tanımlandığı gibi termik santral bacalarından elde edilmiş, içi boş, küresel tanecik yapılı bir atık malzemedir. Uçucu kül tanecikleri amorf camı yapıda mullit, hematit, magnetit, kuartz gibi kristaller içermektedir. Oluşacak kristal tipleri kömürün çıktığı bölgeye ve baca ısısına bağlıdır. Öğütülmüş kömür teknolojisiyle ısıtılan fırınlarda 1200–1500 °C baca ısısı oluşurken gaz haline getirilmiş kömür prosesi ile 1800 °C sıcaklık oluşmaktadır. Bu teknoloji ile uçucu külün tamamı ince parçacıklı kristallere dönüşmekte ve çok daha yüksek düzeyde silika, alumina ve demir oksit içermektedir. Uçucu külü, yüksek fırın cürufu ile benzer kompozisyona ulaştırmakta ve daha verimli jeopolimer reaksiyonu veren bir hammadde elde edilmektedir [35].

Uçucu kül, Portland çimentolu betonun içinde puzolan olarak kullanıldığında, hidrasyon enerjisini dengeleyerek içinde bulundurduğu silika ile bağlayıcı kalsiyum silikathidrat oluşum oranını arttırmakta, alkali agrega reaksiyonunu önlemekte ve hacimsel tokluk sağlamaktadır. Uçucu külün jeopolimerik üretimlerde kullanımını teşvik eden ise, özellikle F tipi uçucu küllerin içerdiği yüksek Al_2O_3 (alumina) ve SiO_2 (silika) kompozisyonudur. Baca sıcaklığının 1200 °C ve üstüne çıktığı santrallerde oluşan içi boş küresel yapıdaki ve camsılığın yüksek olduğu uçucu küller jeopolimer sentezi için kullanışlıdır. Mikroyapısı incelendiğinde jeopolimer reaksiyonunun alkali aktif çözeltisi ile küresel uçucu kül taneciklerinin bir kısmı reaksiyon vererek jeopolimer yapısı içinde yer alırken bir kısmı yüksek

pH'lı alkali ortamda ve kür ısı ile parçalanmakta ve alkali silika jeli boş uçucukül küre taneciği içine girebilmektedir. Uçucu kül ve alkali silika çözeltisi ile üretilen ilk ürün Amerika'da patentlendirilmiş CAFA çimentosudur [36].

Deneyleerde, 90 °C'ta 18 saat kür edilmiş beton örnekleri 85 MPa kadar dayanım vermektedir. Çözünür silikatın kullanılmadığı, yalnızca alkali tuz içeren çözeltilerlede zeolit matrisli uçucu kül jeopolimer sentezi gerçekleşmektedir. Ancak yüksek alkali ortam oluşturan bu karışım kullanıcıya zarar verici tehlikeli bir döküm işlemini gerektirmektedir [21].

Çözünür silikat ilavesi pH'ı dengelerken malzemenin daha tok bir yapıya kavuşmasını sağlar. Çözünür silikat ilavesi ile gerçekleşen uçucu kül Jeopolimer reaksiyonlarında mikro yapı içerisinde bulunan açık gri topraklar yüksek silikon konsantrasyonunu göstermektedir.

- $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ bileşiklerinin uçucu kül kompozisyonu içindeki ağırlıkça oranı 2–3,5 arasında olmalıdır.
- Uçucu kül kompozisyonu içinde fırınlanma etkisi görmemiş malzeme oranı % 5'i geçmemelidir.
- Puzolan olarak kullanımında da gerektiği gibi CaO oranı düşük olmalıdır.
- Camsı fazdaki tanecikler daha fazla olmalıdır. Böylece alkalinyasyon prosesi hızlanır ve reaksiyon derecesi artar. Mullit ve kuartz kristallerinin fazla olması ise Al-Si oranını düşürmektedir. Kompozisyon içindeki mullit miktarı ağırlıkça % 5'in altında olmalıdır.
- Uçucu külün 4 μm 'nin altında incelikte olması, basınç dayanımını direk arttırıcı bir etkisizdir, ancak kalın partiküllerle de olumlu bir sonuç elde edilememektedir. Uçucu külün ortalama (10–40) μm iyi derecelenmiş kompozisyonu uygun toklukta malzemeyi sağlayacaktır.
- Kompozisyon içerisinde sülfid bileşikleri ve metal madenler bulunmamalıdır.
- Fe_2O_3 bileşiği, hematit ve magnetit kristalleri jeopolimer reaksiyonunu yavaşlatmakta, düşük basınç dayanımı vermektedir.

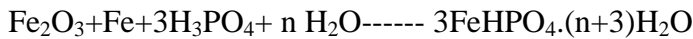
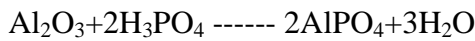
- Kömür içindeki yanmamış karbon parçacıklarının varlığı da malzeme özelliklerini olumsuz etkileyeceğinden kompozisyon içinde fazla bulunmamalıdır.

Jeopolimerin amorf yapısı ve kompozisyon içindeki kaba taneciklerin ayrışması pasta içersinde boşluklar oluştuğunu düşündürmektedir.

2.4.8. Fosfat esaslı jeopolimer

Mısır'da Giza piramitlerinin en büyüğü olan Keops piramidinin iç kısmından alınan birörneğin 1982 yılındaki X ışınları incelemesinde CaCO_3 (kireçtaşı) ve SiO_2 oluşan matris içinde beyaz kaplamaya kırmızı ton veren (P) fosfat molekülleri ile karşılaşmış ve bu farklı yapısında kristal hidroksiapatitten oluşmuş bir jeopolimerik sistem olduğu düşünülmüştür [37].

Diğer Jeopolimer sentezlerinden farklı olarak fosfat esaslı Jeopolimer düşük pH'lı ortamda iki veya üç değerlikli bir metal oksitin H_3PO_4 (ortofosforik asit) içinde asit baz reaksiyonları vermesi ile sentezlenmektedir.



Orto fosforik asit, canlı kemiklerinin fırınlanması ve sülfirik asit ile reaksiyona sokulması ile üretilmektedir. Fosforik asit zincir yapısı polisialat zincir yapısı ile benzeşmektedir. Fosforik asit tuzları alkali silikatların sertleştirilmesinde kullanılmaktadır. Fosfo siloksonat Jeopolimeri Si-O-P-O-Si zincir bağı asit ortamda gerçekleşmektedir. Bir diğer jeopolimerik oluşum şekli Ca-fosfo silikattır. Vollandonit (CaSiO_3) molekül yapısı fosfat ile reaksiyon vermektedir. Mikro yapısı iğne yığını andıran vollandonit seramik üretiminde önemli bir kaynaktır. Yapay vollandonit üretiminde fosfat kullanımı silikat zincir oluşum hızını azaltarak, iğnecik kristallerinin daha düzenli oluşumunu sağladığı ve hidrasyon rötresini azalttığı tespit edilmiştir. Fosfat esaslı jeopolimer, diş protez harcı üretiminde, yapı malzemesi üretiminde kullanıldığı gibi en önemli kullanım alanlarından biri de

radioaktif atık depolama işlemleridir. Fosfat esaslı jeopolimer ile ilgili çalışmalar oldukça kısıtlı olmakla beraber gelecek vaat eden önemli bir araştırma konusu olduğu düşünülmektedir [21].

2.4.9. Organik mineral jeopolimer

Hidrokarbon bağ yapılı organik polimerler ile polisialat jeopolimer yapısı kullanılarak üç tip malzeme sentezi yapılabilmektedir. Humik asitin jeolojik mineraller üzerinde yoğunlaşması ile poli organo siloksan yapısı ve kerojen elde edilebildiği gibi; organik polimerleri mineral jeopolimere, karıştırma ve emdirme işlemleri ile de organo jeopolimer bileşikler elde edilir [21].

Poli organo siloksan yapısı içerisindeki silikon atomu bir iki ya da üç organik grup ile kimyasal bağ kurabilmektedir. Organo jeopolimerlerde asidik ve bazik ortam polimerizasyon prosesini katalize edebilmektedir. Asit katilizasyonu ile dehidrasyon sağlanmakta, silanolbirimleri (Si-OH) 1 mol su çıkararak siloksanbağ (SiO₂) oluşumunu hızlandırmaktadır. Poli metil siloksan (CH₃SiO₂) ve poli etil siloksan ağ yapılı teknik silikonlar; elastik, kırılabilirliği düşük, soğuk ve sıcak hava koşullarına direnç ve dielektirik özellikli, yüzey gerilimine direnç gösteren dayanıklı malzemelerdir [21].

Organik polimerlerin inorganik yapıya eklenmesi malzemenin dayanım ve dayanıklılığını arttırmaktadır. Kerojen, mikro organizmalar etkisinde ölü canlı hücre ve dokularının bozulmasından oluşan humik ve fluvik asit içerisinde sentezlenen bir biopolimerdir. Kerojen ve petrol esaslı malzeme ile inorganik minerallerin etkileşimi yüksek dayanım ve dayanıklılık özelliği gösteren malzemeler üretme fikri Amerika'da Yen ve ark., tarafından ortaya atılmıştır. Jeolojik kayaç ve kil esaslı jeopolimerin humik, malik, aspartik asitlere olan direnci düşüktür. Kerojenin asit içinde sentezlenen inorganik ve organik polimerleri kapsayan ağ yapısı asit ve iklim şartlarından daha az etkilenen malzemelerin üretimini sağlayabilecektir[38].

2.5. Isıl İşlemler Çalışmaları

2.5.1. Bağlayıcılar

Betonda bağlayıcılık sağlayan bileşen çimentodur. Diğer bağlayıcı ve reçinelerden farklı olarak çimentonun ısı kür uygulanmaksızın oda sıcaklığında sertleşmesi ve priz alması ve içindeki toprak kompozit malzemeyle uyum göstermesi önemlidir. Portland çimentosunun muadili jeopolimer çimentosundan da bu özelliği göstermesi beklenmektedir. Kalsiyum, kayaç ve uçucu kül esaslı jeopolimer sentezleri ile jeopolimer çimento bağlayıcılar üretilebilmekte ve oda sıcaklığında priz alması sağlanmaktadır. Portland çimentosu klinkeri 3 mol CaO molekülüne 1 mol SiO₄ bağlanması ile oluşur. Jeopolimer çimentosu ise 1 mol alkali oksidin (Na₂O, K₂O) 6 mol polisialat (Si-O-Al-O-Si-O) molekülünü aktive etmesi ile oluşmaktadır [21].

Bu yönüyle bakıldığında Jeopolimer pastasının bağlayıcılık özelliğinin daha az alkali aktivasyon ile gerçekleştiği söylenilebilir. Bu da birim ürün için daha az entalpi enerjisi gerektirecektir. Günümüzde çimentolu beton üretimi yüksek düzeyli CO₂ emisyonuna neden olmasıyla çevreciler tarafından sorgulanan bir konudur. 1 ton çimento üretilirken çimento fırını ısıtmak için 0.55 ton, klinker oluşum reaksiyonu ile de 0,4 ton CO₂ salınımı oluşmaktadır. 1990 yılında Dünya’da bir milyar tonluk dünya çimento tüketimi sonucu atmosfere 1 milyar ton CO₂ bırakılmıştır. 40–100 °C gibi düşük ısılarda sentezlenen jeopolimer hamuru ile üretilen beton kuşkusuz 1400–1450 °C sıcaklıkta sentezlenen çimento harcına kıyasla atmosferde % 80–90 daha az CO₂ oluşumuna neden olacaktır [39].

Jannie ve ark., yaptıkları çalışmada elde ettikleri en iyi formülün; uçucu kül, metalurjik cürüfler ve doğal puzolanlarla yapılan jeopolimer çimentonun, portland çimento ile yapılan üretime göre % 80 oranında CO₂ emisyonunu azaltabileceğini belirtmektedirler. Ancak, inşaat, çimento bağlayıcı malzemeler ve beton kullanımına ilişkin hemen tüm standartlar ve tasarım kodları Portland çimentosu kullanımına dayanmaktadır. Portland çimentosu uygulama hizmetinin 100 yılı geçmiş bir süreyle sahip olması gereği dayanıklılık testi için kullanılan kabullerin jeopolimer çimento

için doğrulanması ve varsayılması gerekir. Dahası, çimentomsu malzeme ile bağlantılı tüm tedarik zinciri Portland çimentosu üretimine dayanmaktadır. Alüminosilikatlar ile jeopolimarizasyonun temelini, Portland çimentosunun kalsiyum silikat hidrat kimyası ile karşılaştırıldığında inşaat malzemeleri kimya ve sentez yolları köklü bir değişikliğe neden olur. Sonuç olarak, düzenleyici, tedarik zinciri, ürüne güven ile jeopolimer çimentonun yaygın olarak kabul edilmesi için aşılması gereken teknik engeller vardır. Avustralya'da yapılan bu çalışmada, jeopolimer çimentonun ticarileştirilebilmesi için; karmaşık düzenlemelerle, varlık yönetimi, sorumluluk ve sanayinin paydaş katılımı göz önüne alınmıştır. Küçük ölçekli ve laboratuvar şartları teknik açıdan sınırlı olsa jeopolimer çimento sanayinin dünya piyasasına katılımı ve kabulü önemlidir. Bilinçli bir piyasa tarafından Jeopolimer çimentonun talep edilmesi kısa vadede bu bağlayıcının benimsenmesi için önemli faktör olmaya devam ettiğini göstermektedir. Portland çimentosu ölçeğinde jeopolimer çimentonun uzun ömür açısından kıyaslanma sıkıntısı olmasına rağmen, laboratuvar testlerindeki dayanıklılık üstünlüğünü ortaya koymak, jeopolimer çimento teknolojisi geliştirmek için gereklidir. Kolloid ve ara yüzey bilimi, mineraller, mühendislerin tanıdığı kavramlar jel kimya, faz oluşumu, reaksiyon kinetiği, taşınım olayları, parçalanma, partikül ambalaj ve reoloji, ayrıca jeopolimer bilginin geliştirilmesinde önemli yapı taşlarıdır[40].

Topçu ve Toprak, Termik Santral taban külünün (TK) alkalilerle aktive edilerek hafif harç üretiminde kullanılmasını araştırmıştır. Bu amaçla öğütülmüş TK sodyum hidroksit (SH) ve sodyum silikat (SS) alkali çözeltileri kullanılarak 4x4x16 cm boyutlarında çimentosuz harç karışımları üretilmiştir. Numunelere 20 saat 75 °C'de etüvde veya laboratuvarında 20 °C'ta havada olmak üzere iki farklı kür uygulanmıştır. 1, 7 ve 28. günlerde numunelerin birim ağırlık, ultra ses geçiş hızı ve basınç dayanımları belirlenmiştir. En uygun numunenin birim ağırlığı 1,59 kg/dm³ ve basınç dayanımı 18,51 MPa, 80 donma-çözülme çevrimi sonucudayanım kaybı % 11,5 olarak bulunmuş ve numune 400 °C'ye kadar termal stabilitesini korumuştur[41].

Termik santral taban külü (TK) çimento ve beton standartlarına uygun olmadığı için kullanılamamakta ve çevre kirliliğine neden olmaktadır. Ayrıca TK'ların taşınması

ve depolanması yüksek maliyetler oluşturmaktadır. TK'lar öğütme ile yüksek sıcaklıkta kür uygulanarak, kireç katılarak veya alkaliler kullanılarak aktive edilebilmektedirler. Serbest silis ve alümin içeren malzemelerin sodyum silikat, sodyum hidroksit, potasyum hidroksit gibi alkaliler ile aktivasyonu ile bağlayıcı malzeme üretilebildiği belirtilmektedir. Üretilen bağlayıcı malzeme jeopolimer olarak adlandırılmaktadır [42-43].

Jeopolimerlerin oluşumunda görülen reaksiyonlar aşağıda verilmiştir.

(Si-Al içeren malzemeler) + (Alkaliler) = (Jeopolimer ara bileşeni)

(Jeopolimer ara bileşeni) + (Alkaliler) = (Jeopolimer)

Görüldüğü gibi jeopolimerlerin yapısında su yoktur. Jeopolimerlerde karışım aşamasında kullanılan su işlenebilirlik için kullanılmakta, jeopolimerin kür ve kuruması sırasında jeopolimer içerisinde süresiz nano boşluklar bırakarak jeopolimeri terk etmektedir. Bu durum jeopolimere hafiflik, ısı yalıtımı ve yangın dayanımı gibi olumlu özellikler kazandırmaktadır. Jeopolimerlerin önemli avantajları arasında kısa sürede dayanım kazanmaları, dış etkilere dayanıklılıkları, düşük ısıl iletkenlikleri ve yüksek hacim stabilitesine sahip olmaları sayılabilir [44-45].

Alkali aktivasyonu toksik atık ve nükleer kalıntıların, ağır metal iyonlarının stabilizasyonunda başarıyla kullanılmıştır. Ayrıca uçucu kül gibi silis ve alüminli endüstriyel atıkların alkali aktivasyonu ile üretilen harçlar, çimento harçlarına göre daha hafiftirler ve dayanıklılık özellikleri daha yüksektir [46].

Lecomte ve ark., yaptıkları çalışmada, son yıllarda, Portland çimento (PÇ) üzerinde yapılan deneylerle aynı zamanda yeni tip bağlayıcılar da geliştirilmiştir. Bunlar alkali-aktive metakolin (AAMK) ya da granüllü yüksek fırın cürufundan (GFC) oluşturulmuş ve sırasıyla jeopolimerler ve alkali-aktive cüruflar olarak adlandırılmıştır. PC, AAMK, GFC ve bir GFC-AAMK karışımı olmak üzere dört farklı çimento materyali sentezlenmiştir. Bu sentezler, kompozisyonları ve mikroyapıları açısından tamamıyla karşılaştırılmıştır. X-ray difraksiyonunda, yarı

billur C S H, PC içinde bağlayıcı jel fazda iken, AAMK, GFC ve GFC-AAMK içinde neredeyse düzensiz olduğu ve kızılötesi spektroskop yardımıyla, değişik örnekler arasında aşamalı yapısal değişimler gözlenmiştir. ^{29}Si ve ^{27}Al magic-angle-spinning nükleer manyetik rezonans spektroskop: alüminyum silisat çerçevesinde PC, AAMKve GFCde polimerizasyon olduğu, Elektron mikroskobu taramasına göre, GFC homojen bir matriks, buna karşın diğer bileşimler bağlayıcı bir matriksle çevrelenmiş dokuları içerdiği belirlenmiştir[47].

Aruntaş, yaptığı çalışmada, termik santrallerden elde edilen uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyelini incelemiştir. Termik santral atığı olan uçucu küller, çok önemli çevre kirliliğine neden olmaktadır. Bu nedenle, uçucu külün çeşitli alanlarda kullanılması ve değerlendirilmesi çok önemlidir. Bu çalışma uçucu külün özellikleri, bmalzemenin puzolanik bir malzeme olduğunu ve inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılabileceğini göstermektedir [48].

Temuujin ve ark., yaptıkları deneysel çalışmada, kum agrega, değişik düzeylerde olan jeopolimer harç hazırlayarak fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Kum/agrega ağırlık oranı jeopolimer bağlayıcı 9'dan 1'e kadar değişmiştir. Basınç dayanımı ve uçucu kül bazlı jeopolimer hamurun Young modülü 60 MPa ve 2,27 GPa elde edilmiş ve bu değerlerde % 50 ağırlıkta kum agregası ilavesi ile önemli bir değişiklik olmadığı görülmüştür. Jeopolimer bağlayıcı, kum agrega ile güçlü bir bağ sergilemiş ve alkali aktivatör miktarını artırmadan kum oranı arttıkça bağlayıcı bir sistem olarak jeopolimerizasyonda azalma olduğu tespit edilmiştir[49].

Vasconcelos ve ark., çalışmalarında, güçlendirme amaçlı metakaolin tabanlı jeopolimer harçlarının kullanımı hakkında ki sonuçlarını sunmaktadır. Çalışmada tamir katmanı olarak veya beton yüzey arasındaki yapışmayı sağlamak için bağlayıcı bir ajan olarak jeopolimerik harçların kullanımı yapılmıştır. Ağırlıkça çeşitli oranlarda kum/bağlayıcı metakaolin jeopolimer harç bileşimleri, değişen oranlarda sodyum hidroksit konsantrasyonları hazırlanmış ve metakaolin jeopolimer harcın yüksek bir mekanik direnç ve beton zemin için önemli bir yapışma gösterdiğini tespit etmişlerdir [50].

Isıl işlemlerde kullanılan fırın teknolojileri çok çeşitli olmakla birlikte en yaygın kullanılanları iki tiptir.

Hoffman fırını: Fırın kesiti dairesel tonoz biçimindedir. Ateş hareketli, ürünler sabittir. Fırının üstündeki deliklerden yakıt püskürtülmekte, pişme safhası ilerledikçe püskürtme işlemi delikler boyunca ilerlemektedir. Genelde katı yakıtlar kullanılmaktadır.

Tünel fırını: Bu fırında ürünler hareketli, ateş sabittir. Uzun bir tünel ve içinde hareketli fırın vagonları vardır. Fırın içinde hareket eden ürünler ısıyı gitgide artan, rutubeti azalan bir hava ortamı ile karşılaşmaktadır. Bu bölge ısınma bölgesidir. Orta bölümde pişme bölgesi (cehennemlik) vardır. Burada pişen ürün ilerlemeye devam ederek giderek soğumaya başlamaktadır. Pişirme bölgesinde genel olarak sıvı yakıt kullanılmakta, bazen katı yakıtlı sistemlerde yapılabilmektedir [51].

2.5.2. Tuğlalar

Tuğla üretimi ilk kez 1982 yılında low temperature jeoplimeric setting “LTGS” düşük sıcaklıklı priz yöntemi ile lateritik diye de adlandırılan kırmızı kil topraktan üretilmiş ve Fransa’da patentlendirilmiştir [52]. Aynı araştırmacıların kaolinitik killerden üretilen siyah yüzeyli tuğlaları da aynı senteze dayanmaktadır [53].

Ağırlıkça % 5 alkali soda (NaOH, KOH) ve kırmızı toprağın 70 °C civarında bir sıcaklıkta sentezlenmesiyle üretilen tuğlanın basınç dayanımı 900 °C ısıl işlemlerle üretilen seramik kiltuğlaların basınç dayanımından daha yüksek bulunmuştur. Ayrıca lateritik tuğlanın mikromoleküler yapısının suyu tutma özelliği bina içersinde nem oluşumunu önlemekte ve serinlik sağlamaktadır. Ucuz enerji ile üretilebilir olması ve tek katlı binalarda kullanılacak tuğlaların standardını karşılaması yönüyle lateritik tuğlaların Afrika ülkelerindeki barınma sorununun çözümünde uygun bir yöntem olduğu ileri sürülmektedir. Afrika’daki sönmüş volkan külleri ve sodalı göller % 3–5 civarındaki Na₂O alkali aktivatörü sağlamada yararlanılabilecek doğal kaynaklardır [54].

Düşük sıcaklıklı oluşumunda alkali tuz oranı % 1–5 aralığında değişirken 85 °C ısıtılma sıcaklığında 6–18 MPa arası dayanımlar elde edilirken, ısıtılma sıcaklığı 450 °C olduğunda, basınç dayanımı 60MPa'a çıkmıştır. Tuğla üretiminde kostik soda (NaOH veya KOH) ile aktifleştirilmiş kil esaslı hammadde uygun kompaksiyon enerjisi ile preslenir. Alkali soda seramik sentezinde ısıtılma rötrenin önüne geçmekte, böylece üretilen malzemede çatlak ve boşluk oluşmamaktadır. Bu üretim tekniği daha sağlam, daha ekonomik tuğlaların üretimini sağladığı gibi yapı elemanlarına da elastiklik ve bina içerisinde doğal iklimlendirme ve temiz hava da sağlar [52].

Davidovits, Mc Kenzie'nin yapmış olduğu çalışmada, bugün kullanılan pişirilmiş kil tuğlaların üretimi ile tuğlaların üretiminin kıyasını basitleştirerek özetlerken, 1 Kg bugünkü modern teknoloji ile pişirilmiş tuğla üretimi için 850 Kcal harcanırken, 1 Kg jeopolimer tuğlası üretimi için 350 Kcal harcandığını ifade etmektedir. Böylece 2/5 düzeyinde bir enerji verimliliği sağlanmaktadır. Tuğla üretim örneklerinden biri de yangın dayanımı yüksek dekoratif modern seramik tuğlalardır. Geopoly-therm ticari ismi ile Cordi tarafından patentlendirilmiş kaplama seramikleri refrakter olarak kullanıldığı gibi yüksek ısı ve ışığa maruz kalan dekoratif yüzeylerde de kullanılmıştır. 1400 °C sıcaklığa dayanan malzeme 80–90 °C'ta sentezlendikten sonra yüzeyinde sırlama işlemi için 1120 °C sıcaklık uygulanmaktadır [54].

Zeybek'e göre, yapı malzemesi biliminin son zamanlarda ilgi gören konularından biri sürdürülebilir ve enerji tasarrufu sağlayan malzemelerin üretimi ile ilgilidir. Çalışma, jeopolimerizasyon yöntemini araştırarak, C ve F sınıfı uçucu kül yüksek dayanımlı yapı tuğlası üretiminde değerlendirilmesini amaçlamaktadır. Uçucu kül esaslı malzemeler hammaddenin fırınlama işlemi gerektirmemesi yönüyle enerji tasarrufu sağlayan ürünlerdir. Çalışmanın başlangıcında Türkiye'deki termik santrallerin bir kısmından sağlanan uçucu küllerin mineral kompozisyonunun sentezine uygunluğu araştırılmıştır. En uyumsuz kompozisyondaki C sınıfı uçucu kül ile en uygun kompozisyondaki F sınıfı uçucu kül deneysel çalışmanın devamında kullanılmıştır. 30 MPa basınçla şekillendirilen 40–60–80–100 °C arasındaki sıcaklıklarda 2–4–6–24–48–72 saat aralığındaki ısıtılma işlemleriyle üretilen, tuğlaların

basınç dayanımı, su tutma, yoğunluk değerleri ve donma çözülme dirençleri değerlendirilmiştir. F sınıfı uçucu külden üretilen tuğlalar Si/Al molar oranının 2 olduğu 60 °C sıcaklıkta etüvde 24 saat uygulanan ısı işlem sonrasında optimum basınç dayanımı değerini 45 MPa düzeyinde vermiştir. Suda çözme kurutma ve öğütme işlemleri sonrasında C sınıfı uçucu küllerle üretilen tuğlalar geleneksel tuğla malzeme standartlarına ulaşmaktadır [7].

Panias ve ark., yaptıkları çalışmada, uçucu kül tabanlı jeopolimer sentezindeki suyun, sodyum hidroksitin ve sodyum silikatin, jeopolimerlerin basınç dayanımları üzerine etkisini incelenmiştir. Jeopolimerlerin x-ray difraktogramları uçucu külün kristalimsi fazının varlığını, aynı zamanda jeopolimerik matrislerin yeni amorf formasyonunu göstermiştir. Fourier kızılötesi dönüşüm “FTIR” spektroskop analizi jeopolimerlerin mekanik dayanımını etkileyen temel uçucu kül faz değişimini ortaya çıkarmıştır. Üretilen jeopolimerin dayanımı keşfedilen parametrelerin jeopolimerizasyon sürecinde oynadığı rolle ilişkilidir. Basınç dayanımı su içeriğinin azalmasıyla ve jeopolimer sentezindeki sodyum silikat oranının artmasıyla yükselmiştir. Sodyum hidroksit içeriğine ilişkin olarak, basınç dayanımının sodyum hidroksit konsantrasyonu 6.6 M olan sulu çözelti için optimize edildiği gözlenmiştir. Genel olarak, keşfedilmiş parametreler arasından üzerinde uzlaşılacak bir oran basınç dayanımı 40MPa’dan fazla olan jeopolimerleri oluşturabilmiştir [55].

Burciaga ve ark., çalışmalarında; % 70 kaolinit ve % 30 kuvarzdan oluşan kaba bir mineral kalsinlemiş ve Na_2SiO_3 ve NaOH alkalın çözeltisiyle kimyasal olarak aktifleştirmiştir. Basınç dayanımı gelişimi 20 °C ve 80 °C fırınlama sıcaklığının ve $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ve $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ çözeltilerinin molar oranlarının bir fonksiyonu olarak gözlemlenmiştir. 20 °C için en iyi bileşimi $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 2.96$ ve $\text{NaO}/\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.62$ belirlemişler ve 85 MPa’a 28 günde ulaşmışlardır. Jeopolimerik formulasyonun X-ray difraksiyonu sınırları olmayan benzer yapıdaki silikoalüminatları göstermiştir. Mikroyapılar, silikoalüminat polimerlerinin matris içindeki etkileşmemiş kuartz ve metakaolinit parçacıklarından etkileşmemiş sodyum silikattan elde edilen yoğun silisyum dioksitjelinden oluştuğunu tespit etmişlerdir [56].

Temuujin ve ark., yaptıkları çalışmada, uçucu kül bazlı Jeopolimerler mekanik özelliklerine kalsiyum bileşiklerin etkisini (CaO ve Ca(OH)_2) incelenmiştir. Kalsiyum bileşikler, sırasıyla, ağırlıkça% 1, 2 ve 3 az uçucu kül içinde ikame edilmiştir. Jeopolimerler kür ortam sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. $20\text{ }^\circ\text{C}$ ve $70\text{ }^\circ\text{C}$ kür örnekleri özelliklerini azaltırken uçucu kül yerine kalsiyum bileşikleri eklenmesi ortam sıcaklığı kür örnekleri için mekanik özelliklerini geliştirmiştir. Yedi günlük küreme sonunda ortam sıcaklığına bağlı olarak basınç dayanımı % 3 CaO ve% 3 Ca(OH)_2 ilavesiyle, 11.8, ile 22.8 ve 29.2 MPa'a kadar yükseldiğini göstermişlerdir [57].

Daniel ve ark., çalışmalarında, jeopolimerler ve jeopolimer/F sınıfı uçucu kül ile yapılan agrega kompozit üzerine bir çalışma sunmaktadır. Örnekler, termal hasar nedeniyle güç kaybını değerlendirmek için $800\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar ısıtılmıştır. Jeopolimerler sıcaklığa maruz kaldıktan sonra yaklaşık %53 mukavemet artışları sergilemiştir. Ancak, aynı jeoplimer bağlayıcı formülasyonları ile jeoplimer/agrega kompozitleri aynısıcaklığa maruz kaldıktan sonra% 65'e kadar varan mukavemet azalması tespit edilmiştir. Testlerde agregalar giderek $800\text{ }^\circ\text{C}$ 'ta % 2.5 genleşmeye ulaşırken, bu durum agregaların sıcaklık artışı ile genişlemekte olduğunu göstermektedir. Jeopolimer matris $200\text{ }^\circ\text{C}$, $300\text{ }^\circ\text{C}$, $700\text{ }^\circ\text{C}$ ve $800\text{ }^\circ\text{C}$ arasında yaklaşık % 0.6 ile arasında % 1 daralmaya uğrar. Bu bariz uyumsuzluğun gözlenen güç kaybına neden olduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışmada 15 farklı jeoplimer kombinasyonları (karışım oranları, kür ve yaş) ve dört farklı agregaların sonuçlarını sunmuşlardır [58].

2.5.3. Betonlar

Beton yakıcı bir aktivatör ile tepkimeyle alüminat ve silikatlı malzemelerle yapılan bir üründür. Genellikle, demir ve metal üretimindeki, uçucu kül ve cüruf gibi atık maddeler kullanılır. Daha temiz bir çevreye yardımcı olur. Bu aslında betonun içinde atık madde kapsüllendiği ve kullanıldığından bertaraf edilmek zorunda da değildir. Çünkü jeopolimer beton üretiminde ısı ve karbondioksit salınımı olmaz. Oysa

standard Portland Çimento esaslı beton, ısı ve karbondioksit salınımı ile birlikte anılır [59].

Jeopolimer beton, standart betonlara göre önemli avantajlara sahiptir. Çok daha uzun ömürlü beton üretmek için yüksek maliyetli harcamalar yapmak gerekir. Oysa standart betondan daha fazla dayanıklı ve uzun ömürlü olan beton üretmek daha ucuz olmaktadır. Çok daha uzun ömürlü jeopolimer betonun bakım ve onarımı standart betonun bakım ve onarımından daha az maliyetli ve işlemi az olacaktır. Binlerce yıl boyunca ayakta kalan ve Romalılar tarafından kullanılmış olan antik betonların modern karşılıklarıyla eşdeğer olduğunu öğrenmek dikkat çekmektedir. Standart betonlar onlarca yıl kullanıma sahipken, betonlar, yüzlerce yıl boyunca güvenle kullanılabilir. Jeopolimer beton, korozyon ve yangına daha dayanıklıdır, yüksek basınç ve çekme dayanımına sahiptir. Onarımları kısa zamanda yapılarak çok hızlı bir şekilde maksimum gücüne kavuşmaktadır. Standart betonda bu süreler daha fazladır [59].

Dünyada insan odaklı sera gazı salınımları oldukça önemli miktardadır. Bu salınımın % 5-8'i kadarını Portland çimento bazlı betonlar oluşturmaktadır (standart betonlar). Standart betonlar yerine jeopolimer beton kullanılması bu oranı önemli ölçüde azaltacaktır. Standart beton yerine jeopolimer beton kullanmak demek, üretilen sera gazlarının yüzde seksen daha azalacağı anlamına gelir. Aslında Portland çimento esaslı beton üretiminde, betona göre beş kat daha fazla CO₂ (karbondioksit) salınımı gerçekleşmektedir. Jeopolimer beton gibi çevre dostu bir betonun, bir yapı malzemesi olarak kullanılmasının inşaat sektöründe çok geniş alana hitap ettiğini dikkate aldığımızda, ne derece önemli olduğu ortaya çıkmaktadır [59].

Jeopolimer beton, Portland çimentolu betona göre 2-3 kat daha fazla çekme dayanımına sahiptir. Ayrıca potasyum polisialat esaslı donma çözülme dayanımları daha iyidir. Doğaya zarar veren arsenik, sülfirik asit, radyoaktif atıkların zapt edilmesinde kayaç yapısı gelecek vadetmektedir. Geopolimer 50 ticari ismindeki K-poli-sialat formülü ile pH düzeyinin 1,5-3 arasında olduğu Kanada'daki uranyum ve

arsenik atıkların kapsülasyonu araştırılmış ve matris yapısının bozulmadan radyoaktif mineralleri hapsedebileceği gözlenmiştir [34].

Jeopolimerin priz alma ve fiziksel dayanıklılık özelliklerindeki bilinmezler, Dünyada beton üretiminin yaygınlaşmasını önlemektedir [27]. Bununla birlikte Avustralyalı araştırmacı Van Deventer Melbourne’de ticari olarak E-crete betonunun kullanımını başlatmıştır. Deneysel olarak üretilmiş birçok katlı binanın betonarme projesini de 2009 sonunda gerçekleştirmiştir. Jeopolimerin basınç dayanımı, rötne ve yangın dayanımı özellikleri çimentolu betona göre çok üstün olmakla birlikte fiziksel dayanıklılık (durabilite) özelliklerini zaman gösterecektir. Ayrıca bugünkü üretim koşullarında çimentolu betona göre % 10–15 daha fazla maliyetlidir [60].

Jeopolimer betonunun, yapılarda kullanımının gerçekleşmesi için Portland çimentolu betonun sağladığı malzeme standartlarını sağlaması gerekmektedir. Betonarme uygulamalar için beton ve çeliğin mukavemet uyumlarını doğrulayan basınç-çekme dayanım değerlerinin, çekip çıkarma deneyiyle, beton çelik donatı aderansının ve elastisite modülüne ulaşabilmek için poisson oranının belirlenmesi gerekmektedir. Avustralya’da üretilen betonunun yoğunluğu 2.35 t/m^3 olup, poisson oranı 25 MPa dayanımlı beton için 0,16’dır. Bu değerler Portland çimentolu beton değerlerine yakın olup çalışmada betonarme ile ilgili korelasyonlar da yapılmıştır [60].

Morris ve Hodges’un yaptığı elektrot deneyleri içeren çalışmalar ise jeopolimer beton içerisindeki çeliğin çimentolu betondakine kıyasla daha az korozyon uğradığını göstermektedir [61].

Uçucu kül esaslı çimento üretiminde uçucu külün öğütülerek incelik modülünün artırılması, oluşacak hamurdaki mikroyapıyı iyileştirerek basınç dayanımını arttırmaktadır [62].

Jeopolimer, alkali sülfatlar (Na_2SO_4) ve diğer asit etkilerine de yüksek dayanıklılık göstermekte olup; pH 12’den daha yüksek ortamda sentezlenmesine rağmen tehlikeli ve mikroyapıyı bozucu alkali silika reaksiyonları oluşmamaktadır. Prefabrik beton

üretimi ile ilgili bir başka çalışmada, atık su büz borularının çimentolu betondan üretiminde gerekli olan asit aşınma deneyleri uygulanmış Portland çimentolu betonun 50 yıl dayandığı sülfirik asit etkisine jeopolimer betonunun 900 yıl dayanabileceği deneylerde gözlenmiştir. Aynı araştırmacılar alkali agrega oluşumu, karbonatlaşma, çelik korozyonu, klor difüzyonu ile ilgili deneyleri de uygulamışlardır. Portland çimentosunun ana yapısını oluşturan kalsiyum alüminat hidratin çimentosunda olmayışı jeopolimerin bu tür etkilere de çok daha dayanıklı olmasını sağlamıştır. Yangın direnci de Portland çimentolu betonun yangın direnci ile karşılaştırılmış ve jeopolimer betonunun 1000 °C sıcaklıkta yanmadığı gözlenmiştir. Ayrıca prefabrik betonu üretiminde 60 °C sıcaklıkta 3–4 saat uygulanan buhar küründe 70 MPa dayanımı veren Portland çimentolu beton kür sırasında 20 MPa'lık dayanımına ulaşırken 100 MPa dayanım vermesi istenilen çimentolu prekast betonu 70 °C sıcaklıkta 2 saat kür ile 70MPa'lık erken dayanıma ulaşmaktadır [63].

Duxson ve ark., yaptıkları çalışmada, potansiyeli, konumu ve sürdürülebilir bir beton endüstrisi için bir itici güç unsuru olarak inorganik polimerleri tartışmışlardır. Bu malzemeler, geleneksel Portland çimentosundan çok daha düşük bir CO₂ salınımı ile çok iyi bir mukavemet ve kimyasal direnç özelliklerinin yanı sıra, başka potansiyel değerli bir dizi özellik gösterirler. Bu yaygın teknolojinin yaygın kabulünün, nispeten genç araştırma alanında da yanıklılık ve uzun ömür verileri (20+ yaş) ile ilgili belli konularda bir dizi faktör tarafından engellendiği bilinmektedir. Avrupa ve Kuzey Amerika'da bazı düzenleyici standartlarla ilgili zorluklar jeopolimer betonu avantajlı hale getirmektedir. Özellikle geleneksel çimentodaki klinker içerik seviyeleri, dayanım ve donma-çözünme kriterleri jeopolimer betonu daha avantajlı hale getirmektedir. Kötü formüle sistemleri ve zararlı etkilerinde serbest alkali ve silikat rolü karşılaştırılmalıdır. Jeopolimer betonla portland tabanlı çimentolar karşılaştırıldığında CO₂ salınımı ve kompozisyonu arasındaki ilişki ölçülmelidir [64].

Bakharev, çalışmasında; F sınıfı uçucu külden ve sülfat çevrelere maruz kalmış alkalın aktivatörden yapılmış jeopolimer maddelerin dayanımını inceleyen bir araştırmayı sunmaktadır. Jeopolimer maddelerin dayanımını ölçmek için üç test yapılmıştır. Testlerde hazırlanan jeopolimer deney numuneleri, %5'lik sodyum

sülfat, %5'lik magnezyum sülfat ve % 5 magnezyum sülfat + %5 sodyum sülfat çözeltilerinin içerisine 5 aylık daldırılmıştır. Deneylerde, numunelerdeki ağırlık değişimi, basınç dayanımı, bozulma ve mikro yapısal değişimler incelendi. Sodyum sülfat çözeltisinde, sodyum silikatla hazırlanan materyalde %18'lik dayanım azalması, sodyum hidroksit ve aktivatör olarak potasyum hidroksit karışımından hazırlanan materyalde %65'lik dayanım azalması, buna karşın sodyum hidroksitle aktive edilmiş numunelerde %4'lük dayanım artışı gibi önemli dayanım dalgalanmaları görülmüştür. En önemli bozulma sodyum sülfat çözeltisinde gözlenmiştir ve alkalilerin çözeltiye geçmesiyle ilgili görünmektedir. Magnezyum sülfat çözeltisinde, alkalilerin çözeltiye geçmesi, yüzey altına kalsiyum ve magnezyum geçmesi sodyum silikat çözeltisi ve sodyum ile potasyumun aktivatör olarak kullanıldığı çözeltilerde görülmüştür. En az dayanım değişimi %5 sodyum sülfat + %5 magnezyum sülfat çözeltisinde görülmüştür. Sodyum hidroksitle hazırlanmış materyal en iyi performansı göstermiş ve bu onun stabil çapraz bağlı alüminosilikat polimer yapısına atfedilmiştir [65].

Erdoğan, çalışmasında ferrokrom cürufunu kullanmıştır. Malzemeyi öğütürerek, blaine incelik değerini $3730 \text{ cm}^2/\text{g}$, yoğunluğunun 3.18 g/cm^3 olarak tespit etmiştir. Cürufun aktivasyonunda iki farklı kimyasal kullanmıştır. Bunlar; sodyum hidroksit ve sıvı haldeki sodyum silikattır. Çalışmada öncelikle öğütülmüş ferrokrom cürufu kullanılarak jeopolimer elde edilip edilemeyeceğini görmek amacıyla dayanım gelişimi incelenmiştir. Oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıkta kürlenmiş numunelerin basınç dayanımlarını ölçmek için; 600 g cürufa 210 g sodyum hidroksit çözeltisi katarak ve 600 g cürufa 225 g sodyum silikat katarak iki ayrı karışım hazırlanmıştır. Harç $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$ boyutunda kalıplanarak basınç testine tabi tutulmuştur. Deney sonucunda, oda sıcaklığında 21 gün kürlenmiş sodyum hidroksit çözeltili numuneler 2,0 MPa, sodyum silikatlı numuneler 6 MPa değerinde kalmıştır. Aynı karışımlar 2 gün $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ' de kürlendiğinde; sodyum hidroksit çözeltili numuneler 11,5 MPa, sodyum silikatlı numuneler 37,6 MPa değere ulaşmıştır. Deney sonuçlarına göre sodyum silikatlı numuneler $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ta 2 gün kürlenince yüksek dayanıma erişmiştir. Ayrıca yüksek sıcaklığın ferrokrom cürufu jeopolimer numunelerin dayanımına etkisi de incelenmiştir. Deney sonucunda 100°C 'de 98,7 MPa olan basınç dayanımı $400 \text{ }^\circ\text{C}$ ve

800 °C’de % 20’ye yakın düştüğü, 1100 °C’de dayanımını artırdığı ve koruduğu gözlenmiştir. Çalışmasında; ferrokrom üretimi sırasında elde edilen cürufu çimento ve toz bağlayıcı kullanmadan alkali içeren kimyasallarla ve sıcaklıkla aktive edilerek jeopolimerik malzeme üretilmesinin mümkün olduğunu göstermiştir. Çalışmada kullanılan sodyum silikat çözeltisi, sodyum hidroksit çözeltisine göre dayanımı daha fazla artırdığını belirlemiştir [66].

Aguilar ve ark., yaptıkları çalışmada, 0% ve 25% uçucu küllü metakolinden oluşan aktivatörle, $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}=1,2$ bağlayıcı kaynaklı sodyum silikat modüllü %15,2 oranında Na_2O kullanarak üretilen jeopolimerik hafif betonlar incelenmiştir. Yoğunluğu 1200, 900,300 kg/m^3 olan betonlar alüminyum tozu eklemek suretiyle havalandırılarak alınmıştır. Basınç ve eğilme dayanımı gelişimi 180 güne kadar izlenmiştir. Direnç, yoğunluğun düşmesiyle azalmış ve yüksek sıcaklıkta kütleme direnç gelişimini artırmıştır. Kül kullanımı 1200 kg/m^3 betonun dayanımı için olumlu etki göstermiş, kullanılan bağlayıcı miktarını azaltmıştır. 1800 ve 600 kg/m^3 arasındaki betonların ısı iletkenlikleri $\lambda=1.65$ ten 0.47 W/mK ’ne düşmüştür. Mikro yapıları ürünlerin ve tepkimemiş metakolin ve uçucu küllü ürünlerin tepkimesinden oluşan yoğun çimentomsu matrisler ortaya çıkarmıştır. Enerji ayırıcı stretoskoplar ve X-ray difraksiyon biçimlenmemiş silikoalimunate tepkimeli ürünlerin formasyonunu göstermişlerdir [67].

Konstantinos ve Komnitsasa, çalışmalarında geleceğin sürdürülebilir şehirlerinde, düşük enerji tüketiminin ve sera gazı salınımının yanı sıra sıfır atık prensibine de adaptasyonu ön görmüşlerdir. Jeopolimerler Al ve Si içeren katı maddelerin göreceli düşük sıcaklıktaki kimyasal tepkimeleri sonucu oluşan 3 boyutlu çimentomsu maddelerdir. Kömür külleri, metalurjik cüruf, yapım ve yıkım çöpleri gibi çeşitli çöpler veya yan ürünler jeopolimer beton ve yapı elemanları yapımında kullanılabilir olduğunu göstermiştir. Çalışmada jeopolimer esaslı ürünlerle, klinker esaslı geleneksel bağlayıcıların çevreye karbondioksit salınımı karşılaştırması yapılmıştır. Kısaca jeopolimer teknoloji avantajlarıyla ekolojik yapılarla, sürdürülebilir şehirlerin oluşturulabileceği ortaya koymuşlardır [68].

Vaou ve Panias, çalışmalarında jeopolimerizasyonu; fiziksel, mekanik ve termal özelliklere sahip inorganik polimer üretmek için yakıcı çözeltilerde kolayca çözülebilen, alüminyum silikat bileşiklerini kullanan ve yeni ortaya çıkan teknoloji olarak sunmuşlardır. Bu çalışma da, katı hammadde olarak çıkarılan perlitin ufalama ve boyutlandırılmasının yan ürünü olan çok ince perlitin ısı yalıtımlı köpüklü polimer üretmek için, jeopolimer teknolojinin kabiliyeti tanıtılmaktadır. Isı yalıtım maddelerinin termofiziksel özelliklerine patlayıcı madde eklenmesini göstermekteve bu özellikler ticari ısı yalıtım maddeleriyle karşılaştırıldığında, jeopolimer sektöründeki gelişimini belirtmişlerdir [69].

2.6. Çalışmanın Amacı ve Önemi

Türkiye dünyada en zengin perlit yataklarına sahip ülkeler arasında ön sıralarda yer almaktadır. Perlit yönünden oldukça zengin yataklara sahip olmasına rağmen tamamına yakını atıl durumdadır. Bu çalışmanın amacı, bağlayıcı olarak alçı kullanmak sureti ile ham perlitin ısıl işleme yeni bir malzeme üretiminde kullanılabilirliğini araştırmaktır. Çalışmanın en önemli çıktısı ise tamamen atıl durumda bulunan perlit endüstriye kazandırmak ve yeni bir sektör alanı oluşturmaktır.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

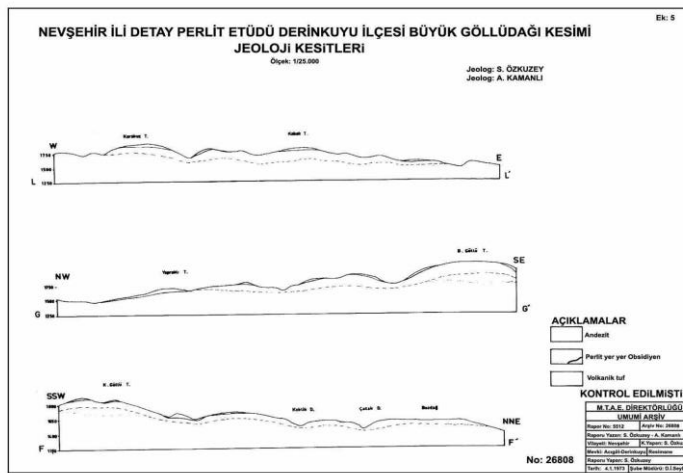
Çalışma konusunun materyali (75-300 μm ve 300-600 μm) boyutundaki ham perlit agregası ile belirli oranlarda alçı bağlayıcı olarak kullanılan 40x40x160 mm boyutundaki prizmalardır. Toz perlitin şekillendirilmesinde ise alçı bağlayıcı malzeme olarak kullanılmıştır.

Malzemenin jeolojik yapısı; Harita 3.1 ve 3.2 de verilen Kapadokya bölgesindeki (Aksaray-Niğde-Nevşehir-Kayseri) sahalardan elde edilen ham perlit numuneleridir. Nevşehir-Niğde asfalt yolu üzerindeki Derinkuyu İlçesi'nin batı kesiminde Kayırlı ve Kömürcü Köyleri arasındaki Kayışkıran, Bozdağ, Büyük ve Küçük Göllü Dağ civarında yer alır. Kayışkıran Tepe bu kesimde en geniş perlit mostrasına sahiptir. Alttan itibaren istiflenme, tuf, perlit, andezit şeklindedir. Perlitler, genel olarak açık gri renkli kırılma ve kırılma yüzeyi tozlu olup, gayet ince tanelidirler. Bu kesimden ham perlit numuneleri derlenerek MTA Laboratuvarları'nda kimya, teknoloji ve petrografi analizleri yapılmıştır. Ham perlitin elde edildiği ocakların fotoğrafı Resim 3.1, Resim 3.2' de ve Harita 3.1 de gösterilmiştir.

Kimyasal analiz bakımından tipik analiz prensiplerine uyar ince kesitte tamamıyla cam ihtiva ettiği tespit edilmiştir. Bu havzanın toplam rezervi yaklaşık 350 milyon ton'dur [70].



Harita 3.1. Kapadokya bölgesi perlit yataklarının jeoloji haritası [70].



Harita 3.2. Kapadokya bölgesi perlit yataklarının jeoloji kesitleri [70].



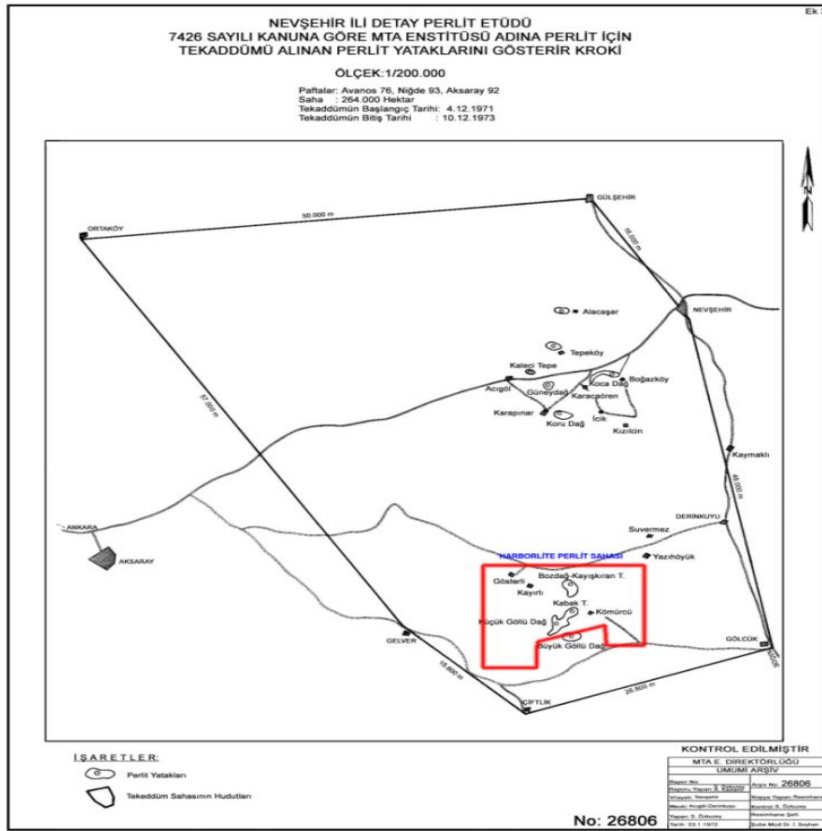
Resim 3.1. Çalışmada kullanılan Kapadokya ham perlit işletme sahası

3.1.1.Ham perlit

Ocaktan alınan ham perlitler Aksaray ilindeki öğütme tesisinden 75-300 mikron ve 300-600 mikron olmak üzere iki farklı tane boyutunda gruplandırılmıştır. Bu guruplardan toplamda 2 ton malzeme alınarak araştırmada kullanılmak üzere laboratuvara getirilmiştir.Ham perlitin petrografik ve kimyasal analizi Erciyes Üniversitesi Tekmer Merkezinde yaptırılmıştır ve deney sonuçları Çizelge 3.1' de verilmiştir.



Resim 3.2. Kapadokya ham perlit yatakları



Harita 3.3. Deney numunelerinin işletme sahası [70].

3.1.2. Alçı

Alçı, kimyasal formülü $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ olan alçıtaşının (jips) uygun sıcaklıkta ısıtılarak, atmosfer basıncı altında kısmi dehidratasyon işlemine uğratılıp, öğütülmesi ve elenmesi ile elde edilen bir bağlayıcıdır. Bu bağlayıcı suyun etkisiyle donup sertleşebilen bir yapı malzemesidir. Beyaz renkli, inorganik esaslı bir bağlayıcı türü olan alçı, su ile karıştırıldığında kısa süre içinde katılaşma özelliği gösterir.

Alçı yapımında kullanılan alçıtaşı (jips), çoğunlukla beyaz ve yumuşak bir mineral olup, yoğunluğu 2.3 g/cm^3 , sertliği 1.5-2 civarındadır. Asitlerden etkilenmez, suda az çözünür. Türkiye'de alçıtaşı, Burdur, Kütahya, Ankara, Bandırma, İstanbul dolaylarında bulunmaktadır. Günümüzde ısı iletkenlik değerleri saptandığında, alçının ısı iletkenlik değerinin doğal malzemeler arasında ahşaba çok yakın olduğu ve diğer doğal malzemelerden daha az ısı iletmediği görülmüştür.

Priz süresi, normal alçıda 8 dk'dan az, katkılı normal alçı, susuz alçı ve katkılı susuz alçıda 20 dk, saten alçıda ise 130 dk'dan az olmamalıdır.

Perlit ürün üretiminde bağlayıcı olarak alçı kullanılmıştır. Alçı, TS EN 13279-1 "Yapı Ve Sıva Alçıları" standardına göre "Ak Alçı" fabrikasında üretilmiş olup 25 kg'lık kağıt torba içinde piyasadan temin edilmiştir [71].

Çizelge 3.1. Perlit ve Alçının kimyasal analizi [72, 73].

Kimyasal Birleşik	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Cl	SO ₃	L.O.I.
Perlit (%)	71.01	1.48	12.87	2.25	0.21	4.46	3.42	0.20	-	3.57
Alçı (%)	0.40	41.48	0.11	0.09	0.21	0.02	-	-	48.27	9.05

3.1.3. Su

Çalışmada karışım suyu olarak Kayseri şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Karma suyunun kimyasal analizi KASKİ tarafından yapılmış olup sonuçları Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Şehir şebeke suyu analizi [74].

Parametreler	Analiz Sonuçları	Tolerans	Yönetmeliği Limit Değerleri	Deney Metodu
* pH (pH)	8,4	±0,03	6,5-9,5	SM 4500 -HB.
* İletkenlik	274 µS/cm	±0,02	2500	SM 2510 B.
Amonyum (NH ₄)	YOK		0,50	Kalitatif Metot
Serbest Klor (Cl ₂)	0,34 mg/L		0,2 - 0,5	Fotometrik Metot
Nitrit (NO ₂)	YOK		0,50	Kalitatif Metot
Klorür (Cl)	14 mg/L		250	SM 4110 B
Bulanıklık	0,20 NTU		Tüketicilerce Kabul Edilebilir	SM 2130 B.
Oksitlenebilirlik	0,23 mg/L		5	TS 6288 EN ISO 8467

3.1.4. Numune harcının hazırlanması ve karışım oranı

75-600 μm aralığında öğütülmüş ham perlit, alçı ve su masa tipi mikserde birinci hızda 1 dk, ikinci hızda 4 dk olmak üzere toplam 5 dk karıştırılmıştır. Karışımın kalıba yerleştirilmesinde TS EN 196-1'e göre yapılmıştır. Numune ağırlıkça karışım oranları Çizelge 3.3 te verilmiştir. Çizelge 3.4'te görüldüğü gibi su miktarları alçı miktarına bağlı olarak kıvam esas alınarak bulunmuştur. Numuneler 60 dk. sonra kalıptan çıkartılarak, en az 24 saat oda sıcaklığında (20 ± 2 °C) kurumaya bırakılmıştır. Oda ısısında kuruyan numuneler programlanabilir fırına yerleştirilerek, deneme planında belirtildiği gibinumune üretimine geçilmiştir [75].

Çizelge 3.3. Bir kalıplık deney numunesi için gerekli malzeme miktarları

Alçı Oranı (%)	Ham Perlit Miktarı (g)	Alçı Miktarı (g)	Su (g)	Karıştırma Süresi (dk.)
5	1000	50	325	5
10	1000	100	330	5
15	1000	150	335	5
20	1000	200	340	5



Resim 3.3. Mikser ve kalıplar

Çizelge 3.4. Çalışma deneme planı

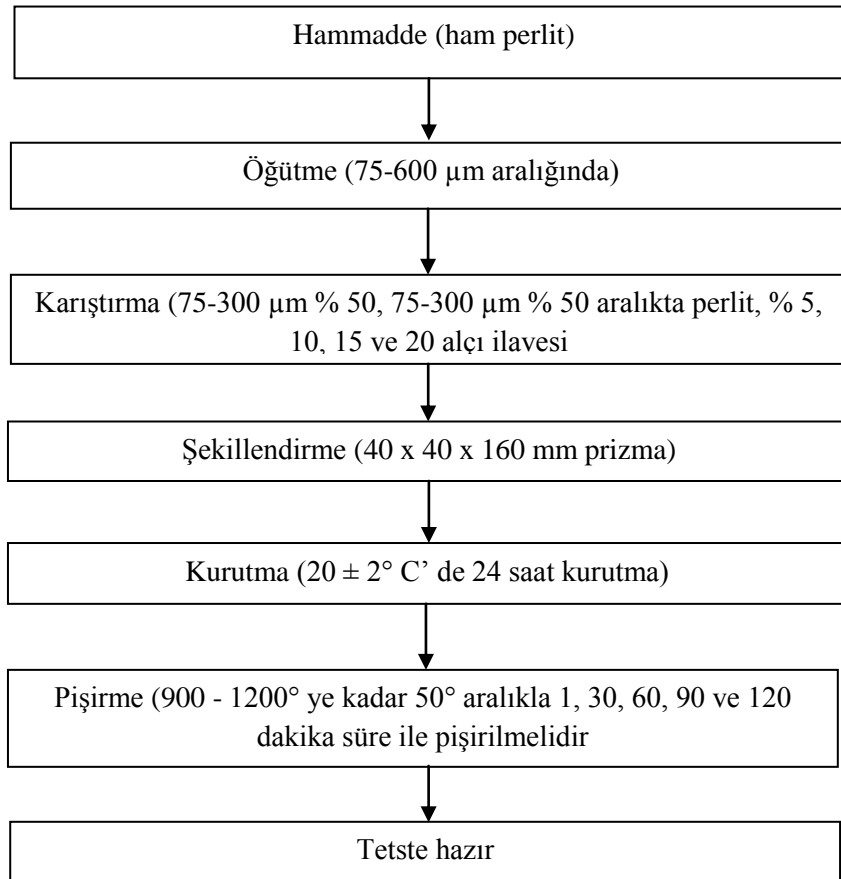
Pişirme sıcaklığı (°C)	Alçı oranı (%)	Pişirme süresi/ Numune sayısı									
		1 dk	Adet	30 dk	Adet	60 dk	Adet	90 dk	Adet	120 dk	Adet
900	5	3		3		3		3		3	
	10	3		3		3		3		3	
	15	3		3		3		3		3	
	20	3		3		3		3		3	
	Toplam	12		12		12		12		12	
950	5	3		3		3		3		3	
	10	3		3		3		3		3	
	15	3		3		3		3		3	
	20	3		3		3		3		3	
	Toplam	12		12		12		12		12	
1000	5	3		3		3		3		3	
	10	3		3		3		3		3	
	15	3		3		3		3		3	
	20	3		3		3		3		3	
	Toplam	12		12		12		12		12	
1050	5	3		3		3		3		3	
	10	3		3		3		3		3	
	15	3		3		3		3		3	
	20	3		3		3		3		3	
	Toplam	12		12		12		12		12	
1100	5	3		3		3		3		3	
	10	3		3		3		3		3	
	15	3		3		3		3		3	
	20	3		3		3		3		3	
	Toplam	12		12		12		12		12	
1150	5	3		3		3		3		3	
	10	3		3		3		3		3	
	15	3		3		3		3		3	
	20	3		3		3		3		3	
	Toplam	12		12		12		12		12	
1200	5	3		3		3		3		3	
	10	3		3		3		3		3	
	15	3		3		3		3		3	
	20	3		3		3		3		3	
	Toplam	12		12		12		12		12	

3.2. Metot

Çalışmada perlit ile alçı belirli oranda karışım oluşturularak, TS EN 196-1'de belirtilen çimento deney kalıbı ile 40x04x160 mm ölçülerinde numuneler üretilmiştir.

Çalışma iki aşamada yürütülmüştür. Birinci aşamada; Ham perlit toz haline getirilerek Şekil 3.1'de görüldüğü gibi, 75-600 µm aralığında incelikte olmak üzere

öğütülmüştür. Numuneler hava kurusu olarak üretilmiştir. Her bir gurup için, % 5-10-15 ve 20 alçı ile katı plastik kıvama gelecek şekilde suyla karıştırılarak kalıplanmıştır. Hava kurusu ve etüv kurusu numuneler programlanabilir seramik fırınında, 900-950-1000-1050-1100-1150 ve 1200 °C'larda, 1-30-60-90 ve 120 dk sürelerinde pişirilerek yeni ürünler elde edilmiştir. Elde edilen ürünlerin boyut kontrolü, birim ağırlık ve basınç testleri yapılmıştır. Bu ölçümler sonucunda optimum pişirme sıcaklığı tespit edilmiştir. Bu sıcaklığa ilave olarak, bu sıcaklığın ± 25 °C sıcaklıklarında olmak üzere üç ayrı sıcaklıkta yeniden her bir guruptan üçer adet ürünler üretilmiştir [75].



Şekil 3.1. Üretim akış şeması

İkinci aşamada ise; Birinci aşama sonucu elde edilen en yüksek basınç dayanımı sağlayan optimum malzeme tasarımı olarak belirlenmiştir. Bu malzemenin pişirme

sıcaklığı ± 25 °C'lerde tekrar her özellik ve her ısı aralığı için yeniden numune üretilmiştir. Bu numunelerin; birim hacim ağırlık, yoğunluk, basınç dayanımı, aşınma dayanımı, eğilme dayanımı, su emme, porozite, kompasite, dona dayanıklılık ve malzeme iç yapısı incelenmiştir.

3.2.1. Birim hacim ağırlık tayini

Numunelerin birim hacim ağırlıklarının belirlenmesinde TS 699 standardı esas alınmıştır. Üçer adet numunenin birim hacim ağırlığının aritmetik ortalaması alınarak o gruba ait birim hacim ağırlığı elde edilmiştir. Birim hacim ağırlığı hesaplanmasında aşağıdaki eşitlikten yararlanılmıştır [76].

$$\rho_{g,u} = \frac{m_{dry,u}}{V_{g,u}} (\text{g/cm}^3) \quad (3.1)$$

Burada;

$m_{dry,u}$: kuru birim ağırlığı

$V_{g,u}$: numunelerin brüt hacimleri (uzunluk, genişlik ve yükseklik çarpımı)

$\rho_{g,u}$: birim hacim ağırlığı

3.2.2. Eğilme dayanımı

Numunelerin eğilme dayanımı belirlenmesinde TS EN 196-1 standardı esas alınmıştır. Üçer adet numunenin eğilme dayanımı aritmetik ortalaması alınarak o gruba ait birim hacim ağırlığı elde edilmiştir. Eğilme dayanımı hesaplanmasında aşağıdaki eşitlikten yararlanılmıştır. Deney aleti Resim 3.4'de gösterilmektedir. Numunelerin ortalama eğilme dayanımı (σ_e) aşağıda verilen bağıntı kullanılarak tespit edilmiştir [75].

$$\sigma_e = \frac{1,5 \times P \times L}{b \times d^2} (\text{MPa}) \quad (3.2)$$

Burada;

σ_e : eğilme dayanımı (MPa),

P: kırılma yükü (kN),

L: mesnet aralığı (mm),

b: kalıbın iç boyut yüksekliği (mm),

d: kalıbın iç boyut uzunluğudur (mm).



Resim 3.4. Eğilme dayanım aleti

3.2.3. Basınç dayanımı

Basınç dayanımı testleri için, numuneler eğilme dayanımı deneyinden elde edilen iki parçaya ayrılmış numunelerin birer tanesi numaralandırılarak her sınıf için üç numune TS EN 196-1’de belirtilen yöntemler doğrultusunda Resim 3.5’te görüldüğü gibi basınç aletine yerleştirilmiştir. İstenen yükleme hızı limitlerinde yükleme yapılarak üçer adet numune basınç dayanım testine tabi tutulmuş ve elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınmak suretiyle ilgili grubun basınç dayanımı (σ_b) aşağıda verilen bağıntı yardımı ile elde edilmiştir [76].

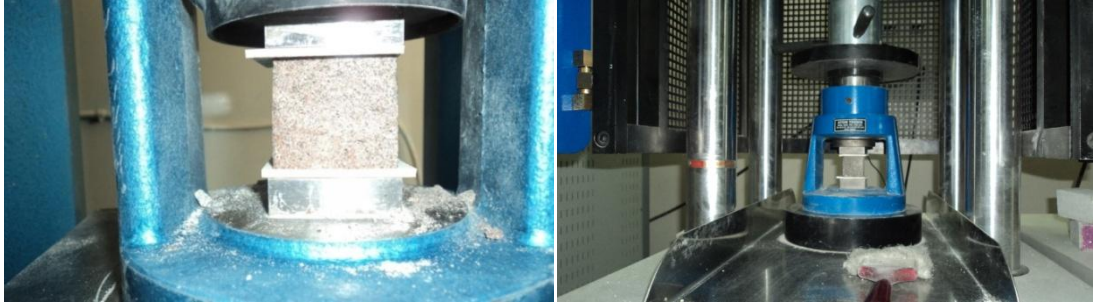
$$\sigma_b = \frac{P}{A} \quad \text{MPa} \quad (3.3)$$

Burada;

σ_e : eğilme dayanımı (MPa),

P: kırılma yükü (kN),

A:kuvvet uygulanan yüzey alanını ifade etmektedir (mm^2).



Resim 3.5. Basınç dayanım aleti

3.2.4. Aşınma dayanımı

Bu deneyde, TS 2824 EN 1338 standardına göre düşey aşınma yöntemi uygulanmıştır. Deney orijinal ölçülerdeki mamule veya üst yüzü de ihtiva edecek şekilde ve yüzey ölçüleri, en az (100x70) mm ve kalınlığı, en az (60 ± 10) mm olan kesilmiş parçaya uygulanmıştır. Deney numuneleri temiz ve kuru hale getirilmiştir. Deney numunesinin, işlem uygulanacak üst yüzeyi birbirine dik iki doğrultuda, 100 mm mesafede ölçülen tolerans, ± 1 mm olacak şekilde düz konuma getirilmiştir [77].

Deney numunesi yüzeyinin pürüzlü olması veya yüzeyin düzlemden sapmasının yukarıda verilen toleransları aşması hâlinde, yüzey hafifçe aşındırılarak, verilen toleranslar sağlanacak şekilde düzeltilmiştir. Deneyden hemen önce, işlem uygulanacak numune yüzeyi, sert fırça ile temizlenmiş ve aşınmayla oluşan oyuk uzunluğunun daha hassas ölçülebilmesini sağlamak üzere, uygun bir boya ile (kalıcı işaretleme kalem) boyanmıştır.

Aşındırma tozu silosu, rutubeti en fazla % 1 olan kuru aşındırma tozu ile doldurulmuştur. Deney numunesi Resim 3.6 ve 3.7'de görüldüğü gibi yüzeyi geniş aşındırma diskine temas edecek şekilde yaklaştırılmıştır. Aşınma tozu kontrol vanası açılır ve aynı anda motor, geniş aşındırma diski, (60 ± 3) saniye sürede 75 dönüş yapacak şekilde çalıştırılmıştır. Aşındırma malzemesi akış debisinin deney süresince değişip değişmediği gözle kontrol edilmiştir. Diskin 75 dönüş yapmasından sonra, aşındırma tozu akışı ve disk durdurulmuştur. Her bir numunede iki deney yapılmıştır.

Numune, anma büyütmesi en az 2x olan büyük boyutlu büyüteç altına konulmuş ve oyuk boyutlarının daha kolay ölçülebilmesini sağlamak üzere ışıklandırma donanımı bulundurulmuştur. Oyuğun her iki uzun kenarının (l_1 ve l_2) sınırları, uç kalınlığı 0,5 mm ve sertliği 6H veya 7H olan kurşun kalemle, cetvel kullanılarak çizilmiştir.

Daha sonra, oyuk uzun kenarlarının orta noktaları birleştirilerek, boyuna eksene dik doğrultuda (AB) doğrusu çizilmiştir. Sayısal göstergeli kumpasın ölçme uçları, uzun kenar (l_1 ve l_2) sınırlarının iç kısmına A ve B noktalarına, oyuk içine doğru yerleştirilmiş ve boyut $\pm 0,1$ mm yaklaşımla ölçülerek kaydedilmiştir.

Ölçme işlemleri, kalibrasyon amacıyla, oyuk uçlarından (C D), (10 ± 1) mm mesafedeki noktalarda tekrarlanmıştır. Bu şekilde üç ölçme sonucu elde edilmiştir.



Resim 3.6. Aşınma deneyi numuneleri



Resim 3.7. Dikey aşınma deney ekipmanı

3.2.5. Yoğunluk tayini

Numunelerin yoğunluğunun ölçüm işleminde TS 699 standardı esas alınmıştır. Yoğunluk deneyi piknometre kullanılarak yapılmıştır. Resim 3.8'deki düzenekte görüldüğü gibi deney sonucunda elde edilen aşağıdaki bağıntı yardımıyla numunenin yoğunluğu (d_0) tespit edilmiştir [76].

$$d_0 = \frac{G_{pn} - G_p}{G_{pn} - G_p - (G_{pns} - G_s)} \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (3.4)$$

Burada;

d_0 : Numune yoğunluğu (g/cm^3),

G_{pn} : Kuru numune + piknometre ağırlığı (g),

G_{ps} : Su emdirilmiş numune + su + piknometre ağırlığı (g),

G_p : Piknometre ağırlığı (g),

G_{pns} : Numune + su+ piknometre ağırlığı (g).



Resim 3.8. Piknometre deney seti

3.2.6. Su emme

Numunelerin su emme yüzdesi, TS 699 standardı esas alınarak tespit edilmiştir. Numunelerin su içerisindeki kütleleri Resim 3.9’ da görüldüğü gibi Archimedes terazisinde bulunmuştur. Deney verileri alındıktan sonra numunenin ağırlıkça su emme yüzdesi (S_k), aşağıdaki eşitlik yardımı ile bulunmuştur [76].

$$S_k = \frac{G_d - G_k}{G_k} \cdot 100 (\%) \quad (3.5 a)$$

Hacimce su emme yüzdesi (S_h) ise aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$S_h = \frac{G_d - G_k}{G_d - G_{ds}} \cdot 100 (\%) \quad (3.5 b)$$

S_k : Ağırlıkça su emme yüzdesi (%),

S_h : Hacimce su emme yüzdesi (%).

G_d : Su emdirilmiş numune ağırlığı (g),

G_{ds} : Archimedesterazisi ile numune ağırlığı (g),

G_k : Etüv kurusu numune ağırlığı (g),



Resim 3.9. Su emme deneyi seti

3.2.7. Görünür porozite

Bir malzemenin hacimce su emme oranı aynı zamanda o malzemenin görünen porozitesidir.

3.2.8. Kompasite

Kompasite, bir malzemenin doluluk oranıdır. Numunelerin kompasite değeri, birim hacim ağırlığı (d_h) ve yoğunluğundan (d_0) yararlanılarak aşağıdaki bağıntı yardımıyla bulunmuştur.

$$k = \frac{d_h}{d_0} \cdot 100 \quad (\%) \quad (3.6)$$

3.2.9. Porozite

Porozite, malzemedeki boşluk oranıdır. Numune porozite değeri, birim hacim ağırlığı (d_h) ve birim özgül ağırlığından (d_0) yararlanılarak aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanmıştır.

$$P_r = 1 - \frac{d_h}{d_0} \cdot 100 \quad (\%) \quad (3.7)$$

Burada;

d_h : Malzemenin birim hacim ağırlığı (g/cm^3),

d_0 : Malzemenin yoğunluğu (g/cm^3),

k : Komposite (%),

P_r : Porozite (%).

3.2.10. Dona dayanıklılık

Numuneler TS 699 numaralı standartta belirtildiği şekilde, suya doyurulup şartlandırıldıktan sonra, deney numuneleri, değişmez kütleyle gelinceye kadar kurutulmuştur. Numuneler Resim 3.10' da görüldüğü gibi soğuk hava dolabı kullanılmak suretiyle dona dayanıklılık testine tabi tutulmuştur. Donma ve çözülme işlemi 25 kez tekrarlanarak her defasında deney numunesinde meydana gelen gözle görülür değişiklikler kaydedilmiştir. Donma-çözülme işlemlerinin sonunda deney numuneleri $110^{\circ}C \pm 5^{\circ}C$ sıcaklıktaki etüvde değişmez kütleyle kadar kurutulup desikatörde soğutulduktan sonra 0,1 g hassasiyetle tartılmıştır [76].

Kurutulmuş deney numunelerinin deney öncesi ağırlıklarıyla karşılaştırması yapıldıktan sonra numuneler, serbest basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur. Don deneyi sonucu basınç dayanımı kaybı hesaplanarak rapor edilmiştir.



Resim 3.10. Derin dondurucu

3.2.11. Mikro yapısal analiz

Bu örneklere mikro yapı yüzey incelemeleri için Sputper Coater marka cihazda altın kaplama yapılmıştır. Tarayıcı Elektron mikroskopu (Scanning Electron Microscope) ile örnekler SEM görüntüleri ve Enerji yayıcı X-ışını analizörü (EDS) kullanılarak incelenmiştir. Mikro yapısal analizleri için X- ışını kırınımı (XRD) ve taramalı JSM 5600 marka elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. EDS analizleri 35 büyütmede yapılmıştır. Yapısal analiz çalışmaları Mühendislik Fakültesi Malzeme laboratuvarında yaptırılmıştır.

Bu çalışmada Erciyes üniversitesiKayseri Meslek Yüksekokulu İnşaat Bölümü laboratuvarı kullanılmıştır. Çalışma sonucunda ham perlitten elde edilen optimum ürünün mühendislik ve teknolojik özellikleri tespit edilerek, yapı malzemesi olarak inşaat sektöründe kullanılabilirliği irdelenmiştir.

4.BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Birinci Aşama Bulguları

Birinci aşamada bağlayıcı oranına, pişirme sıcaklığına ve pişirme süresine bağlı olarak en uygun basınç dayanımını veren karışım oranı belirlenmiştir. Belirlenen ikinci aşama karışım oranı aynı bağlayıcı miktarıyla pişirme sıcaklığını 25 °C artırmak ve azaltmak suretiyle en uygun pişirme ısısını ve pişirme süresini saptamaktır.

4.1.1. Pişirme süresi 1 dk olan numunelerin birim hacim ağırlık ve basınç dayanım değerleri

Pişirme süresi 1 dk olan numunelerin piştikleri ısı derecelerindeki (900, 950, 1000, 1050, 1100, 1150 ve 1200 °C) birim hacim ağırlık ve basınç dayanım değerleri toplu olarak Çizelge 4.1’de verilmiştir. 1 dk’lık ısı aralığı için hazırlanan deney numunelerinde olduğu gibi diğer pişirme sıcaklıklarına göre birim hacim ağırlık ve basınç dayanım değerleri diğer çizelgelerde gösterilmiştir. Çizelge 4.1 incelendiğinde bütün bağlayıcı oranlarıyla üretilen ve 900, 950, 1000 ve 1050°C’de pişirilen numunelerin basınç dayanımına sahip olmadığı tespit edilmiştir. Birim hacim ağırlıkları ise 1,24-1,41 g/cm³ arasında değiştiği görülmüştür. Diğer pişirme sıcaklığında yani, 1100, 1150 ve 1200 °C’de en uygun basınç dayanımını 43,1 MPa ile 1150 °C, % 10 alçı ile üretilen numunelerde saptanmıştır. En yüksek basınç dayanımı 44 MPa ile 1150 °C, % 5 alçı ile üretilen numunelerde saptanmasına rağmen, kalıplama ve pişirme öncesi şeklini koruması yönünden % 10 alçılı numune daha uygun değer olarak seçilmiştir. Bu numunenin birim hacim ağırlığı ise ortalama olarak 1,99 g/cm³ saptanmıştır.

Genel olarak % 5 alçı ile yapılan çalışmalarda numuneler kalıplardan çıkarılırken bozulma ve dağılmalara sık rastlanmıştır. Buda seri üretimde büyük problem oluşturacağı kanaati oluşturmuştur. Şeklini koruyan numunelerin pişirildiğinde % 10 alçılı numunelere göre biraz daha yüksek dayanım gösterdiği saptanmıştır.

Çizelge 4.1. 1 dk pişirilen numunelerin; BHA ve basınç dayanımları

Num. no	Piştirme sıcaklığı (°C)	Alçı (%)	Piştirme Süresi (dk)	BHA (g/cm ³)	BHA Ort. (g/cm ³)	Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Day.ort (MPa)	Enerji Sarfıyatı (KW)	
1	900	5	1'	1,24	1,24	*	*	14,86	
2				1,23		*			
3				1,25		*			
4		10		10	1,29	1,29	*		*
5					1,3		*		
6					1,29		*		
7		15		15	1,27	1,29	*		*
8					1,3		*		
9					1,29		*		
10		20		20	1,34	1,34	*		*
11					1,34		*		
12					1,35		*		
13	950	5	1'	1,27	1,27	*	*	15,721	
14				1,27		*			
15				1,27		*			
16		10		10	1,33	1,33	*		*
17					1,33		*		
18					1,34		*		
19		15		15	1,37	1,37	*		*
20					1,37		*		
21					1,37		*		
22		20		20	1,41	1,41	*		*
23					1,41		*		
24					1,4		*		

* Numune basınç dayanım değeri okunamamıştır

Çizelge 4.1. (Devam) 1 Dk pişirilen numunelerin; BHA ve basınç dayanımları

Num. no	Piştirme sıcaklığı (°C)	Alçı (%)	Piştirme Süresi (dk)	BHA (g/cm ³)	BHA Ort. (g/cm ³)	Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Day.ort (MPa)	Enerji Sarfiyatı (KW)	
24	1000	5	1'	1,26	1,27	*	*	17,85	
26				1,27		*			
27				1,27		*			
28		10		1,31	1,31	*	*		
29				1,32					
30				1,31					
31		15		15	1,34	1,33	*	*	17,85
32					1,33		*		
33					1,33		*		
34				20	1,36	1,36	*	*	
35					1,35		*		
36					1,36		*		
37	1050	5	1'	1,43	1,4	*	*	19,17	
38				1,38		*			
39				1,38		*			
40		10		1,44	1,48	*	*		
41				1,47		*			
42				1,53		*			
43		15		1,57	1,52	*	*		
44				1,51		*			
45				1,49		*			
46		20		1,55	1,57	*	*		
47				1,55		*			
48				1,6		*			

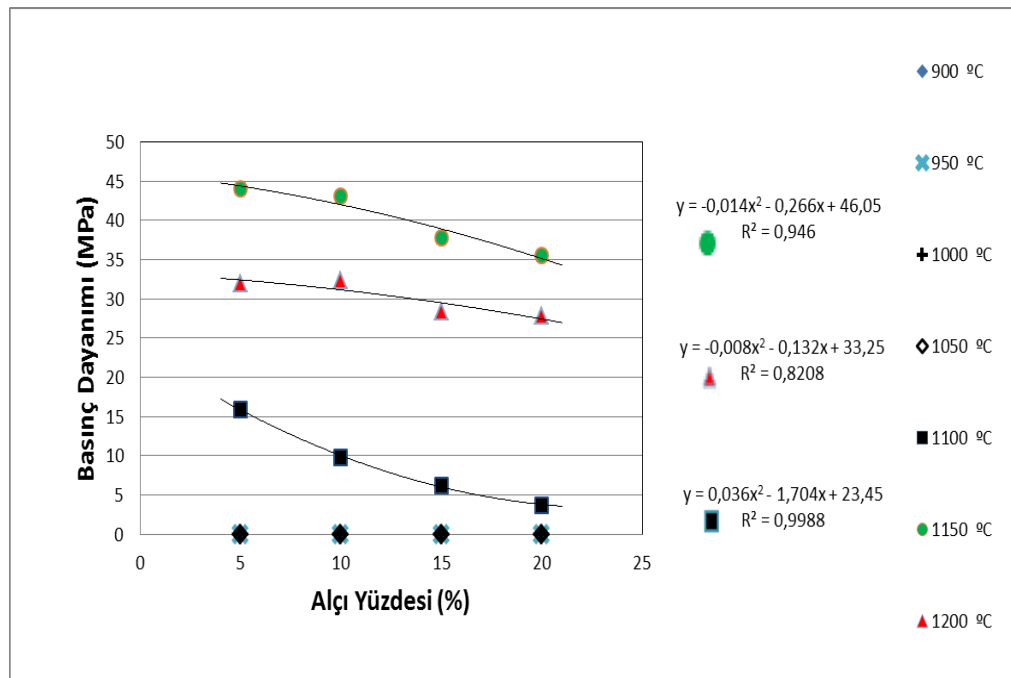
* Numune basınç dayanım değeri okunamamıştır

Çizelge 4.1. (Devam) 1 dk pişirilen numunelerin; BHA ve basınç dayanımları

Num. no	Piştirme sıcaklığı (°C)	Alçı (%)	Piştirme Süresi (dk)	BHA (g/cm ³)	BHA Ort. (g/cm ³)	Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Day.ort (MPa)	Enerji Sarfıyatı (KW)
49	1100	5	1'	1,73	1,7	15	15,9	21,225
50				1,71		18,1		
51				1,66		14,7		
52		10		1,8	1,81	9,2	9,8	
53				1,79		9,3		
54				1,85		10,8		
55		15		1,74	1,71	7,1	6,2	
56				1,72		5,7		
57				1,66		5,7		
58		20		1,68	1,69	3,1	3,7	
59				1,69		4,1		
60				1,69		3,8		
61	1150	5	1'	2,03	2,07	44	44	23,514
62				2,06		43		
63				2,12		44,2		
64		10		2	1,99	44	43,1	
65				1,99		41		
66				1,99		44,2		
67		15		2,12	2,04	39,6	37,8	
68				2		36,4		
69				2,01		37,6		
70		20		2,08	2,09	38	35,5	
71				2,07		33,9		
72				2,12		34,7		

Çizelge 4.1. (Devam) 1 dk pişirilen numunelerin; BHA ve basınç dayanımları

Num. no	Piştirme sıcaklığı (°C)	Alçı (%)	Piştirme Süresi (dk)	BHA (g/cm ³)	BHA Ort. (g/cm ³)	Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Day.ort (MPa)	Enerji Sarfıyatı (KW)
73	1200	5	1'	1,77	1,71	32,3	32,0	25,77
74				1,66		33,4		
75				1,69		30,4		
76		10		1,59	1,58	37,0	32,3	
77				1,56		26,9		
78				1,58		33,0		
79		15		1,64	1,63	28,8	31,3	
80				1,64		34,6		
81				1,62		30,6		
82		20		1,66	1,66	28,7	28,7	
83				1,71		28,4		
84				1,61		28,9		



Şekil 4.1. 1dkpişirilen numunelerin alçı oranı ve basınç dayanımı ilişkisi

1 dk pişirme sürelerinde 900, 950, 1000 ve 1050 °C’lerde Şekil 4.1.’de görüldüğü gibi numunelerin basınç dayanım değerlerinin olmadığı tespit edilmiştir. 1100 °C 1 dk’lık numunelerin alçı oranı azaldıkça lineer olarak basınç dayanımında artma olduğu tespit edilmiştir. Bağlayıcı oranı (%) arttıkça basınç dayanımlarında bir azalma görülmektedir. Bağlayıcı oranı (%) – basınç dayanımı bağıntısında kuvvetli bir ilişki yoktur. En kuvvetli ilişki 1100 °C ısıda pişirilen numunelerde rastlanmıştır. Burada Regrasyon katsayısı $R^2 = 0,9988$ ve denklemi $y = 0,036x^2 - 1,704x + 23,45$ olarak bulunmuştur.

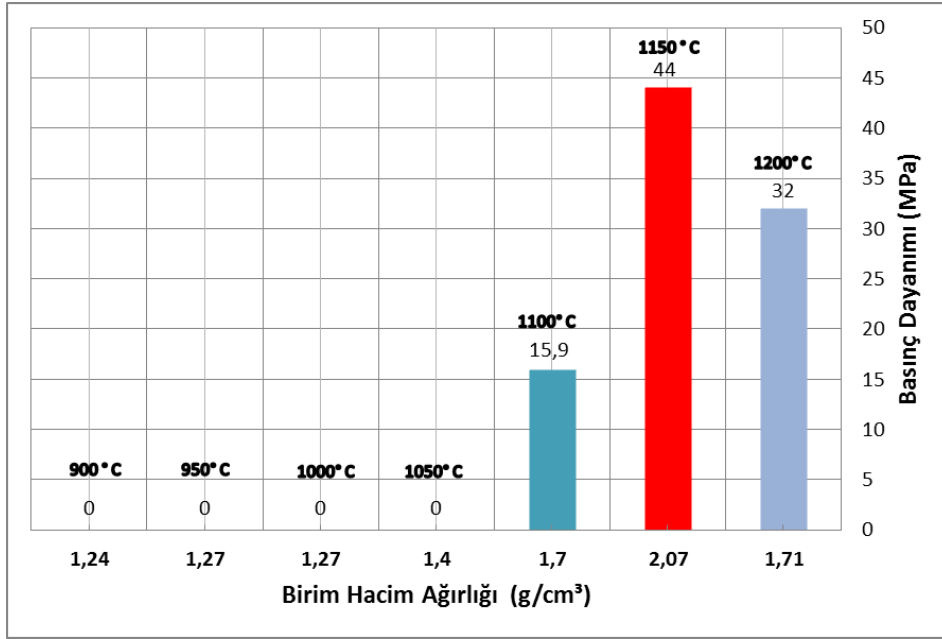
Şekil 4.1’de farklı derecelerde pişirilen numunelerde görüldüğü gibi, 1 dk pişirmelerde en yüksek basınç dayanımları 1150 °C’ de elde edilmiştir. Bu aralıkta % 5 alçılı numunelerin en yüksek performansına (ortalama 44 MPa) ulaşmıştır. 1200 °C’deki numunelerin basınç dayanımlarında dört alçı bağlayıcı gurubu için ortalama 31 MPa değeri yakalanmıştır.

1 Dk %5, % 10, %15 ve %20 alçılı numunelerin birim hacim ağırlığı- basınç dayanımı ilişkilerini gösteren grafikler irdelendiğinde; Şekil 4.2-4.5’de görüldüğü gibi numunelerin, birim hacim ağırlığı arttıkça basınç dayanımının arttığı, birim hacim ağırlığı azaldıkça dayanımının düştüğü tespit edilmiştir.



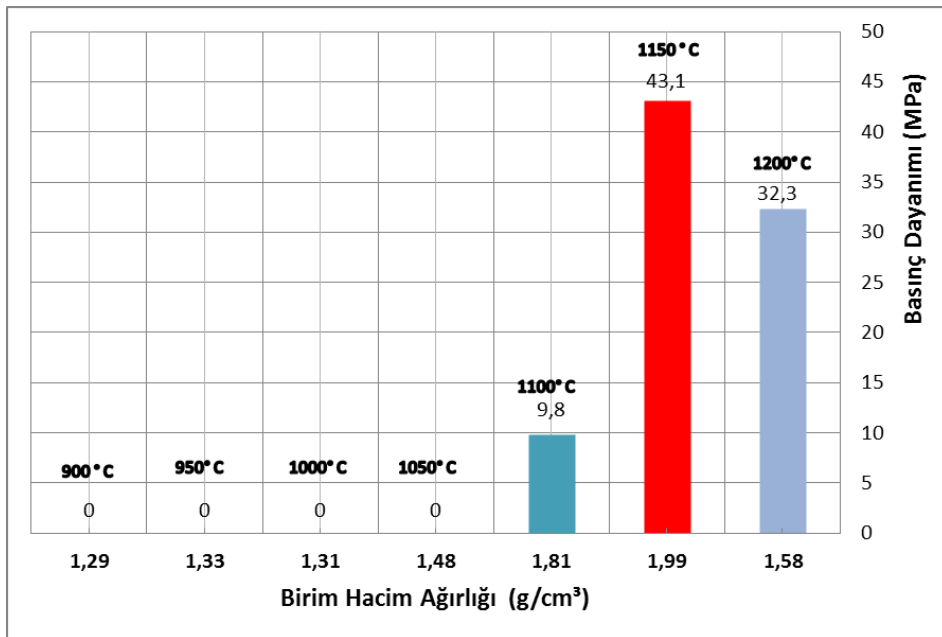
Resim 4.1. 900-1200 °C’de pişirilene y numuneleri

Resim 4.1. İncelendiğinde pişirme süresi ve derecesi arttıkça numunelerin rengi açık griden koyu gri renye doğru değişmiştir. 1200 °C’de 60 dk pişirilen numunelerin şeklinin bozulduğu ve aşırı camlaştığı görülmüştür.

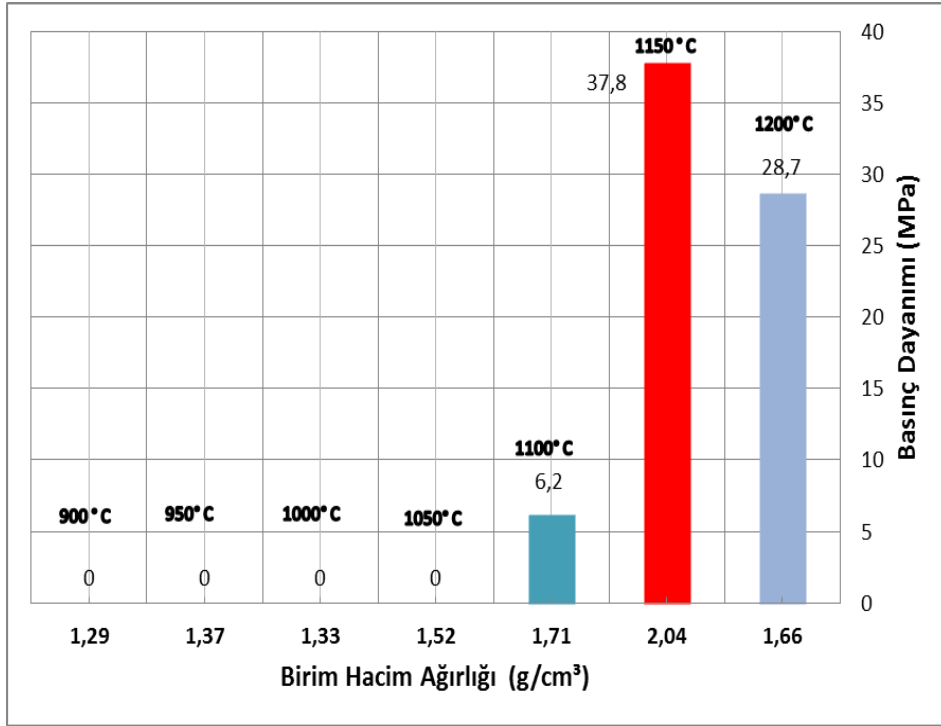


Şekil 4.2. %5 Alçılı ve 1 dk pişirilen numunenin BHA-basınç dayanımı ilişkisi

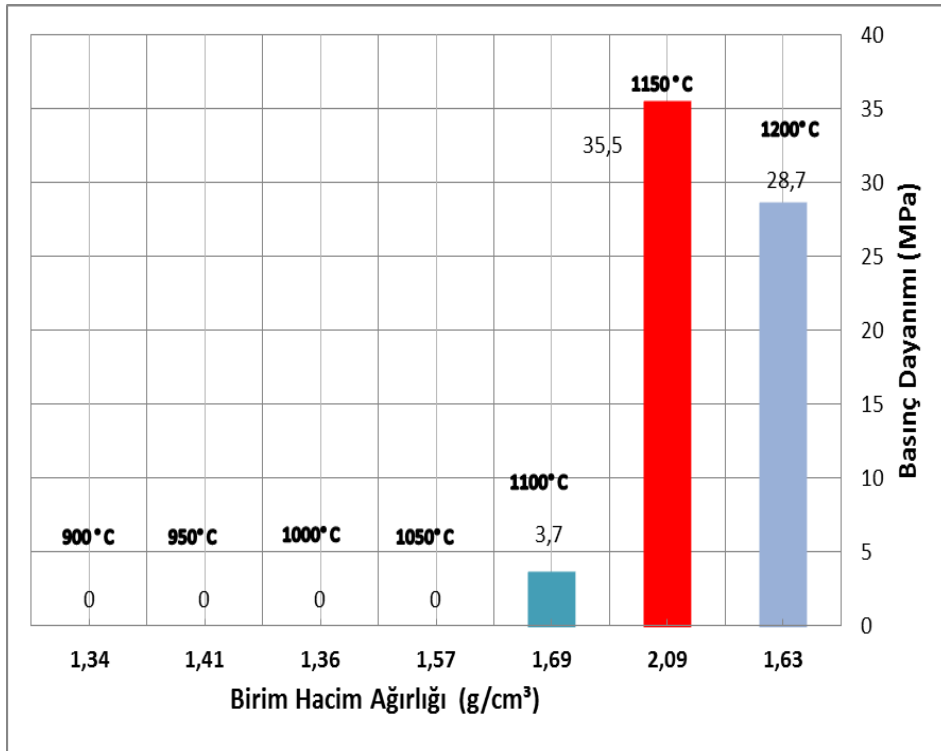
Şekil 4.2 incelendiğinde % 5 alçılı 1 dk süre ile pişirilen numunelerin basınç dayanımı – BHA ilişki sütun grafik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.3. %10 Alçılı ve 1 dk pişirilen numunenin BHA-basınç dayanımı ilişkisi



Şekil 4.4. % 15 Alçılı ve 1 dk pişirilen numunenin BHA-basing dayanımı ilişkisi



Şekil 4.5. % 20 Alçılı ve 1 dk pişirilen numunenin BHA-basing dayanımı ilişkisi

4.1.2. Pişirme süresi 30 dk olan numunelerin birim hacim ağılık ve basınç dayanım değerleri

Çizelge 4.2. 30 dk pişirilen numunelerin; BHA ve basınç dayanımları

Num. no	Piştirme sıcaklığı (°C)	Alçı (%)	Piştirme Süresi (dk)	BHA (g/cm ³)	BHA Ort. (g/cm ³)	Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Day.ort (MPa)	Enerji Sarfıyatı (KW)
85	900	5	30'	1,25	1,24	*	*	16,11
86				1,25		*	*	
87				1,22		*	*	
88		10		1,27	1,28	*	*	
89				1,28		*	*	
90				1,28		*	*	
91		15		1,32	1,33	*	*	
92				1,33		*	*	
93				1,33		*	*	
94		20		1,4	1,4	*	*	
95				1,4		*	*	
96				1,4		*	*	
97	950	5	30'	1,27	1,27	*	*	17,194
98				1,27		*	*	
99				1,27		*	*	
100		10		1,32	1,32	*	*	
101				1,32		*	*	
102				1,32		*	*	
103		15		1,38	1,37	*	*	
104				1,36		*	*	
105				1,36		*	*	
106		20		1,4	1,41	*	*	
107				1,41		*	*	
108				1,41		*	*	

* Numune basınç dayanım değeri okunamamıştır.

Çizelge 4.2. (devamı) 30 dk. pişirilennumunelerin; BHA ve basınç dayanımları

Num. no	Piştirme sıcaklığı (°C)	Alçı (%)	Piştirme Süresi (dk)	BHA (g/cm ³)	BHA Ort. (g/cm ³)	Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Day.ort (MPa)	Enerji Sarfiyatı (KW)	
109	1000	5	30'	1,36	1,35	*	*	19,15	
110				1,35		*			
111				1,35		*			
112		10		1,4	1,4	*	*		
113				1,4		*			
114				1,41		*			
115		15		15	1,43	1,43	*	*	19,15
116					1,44		*		
117					1,45		*		
118				20	1,53		*	*	
119					1,54	1,54	*		
120					1,56		*		
121	1050	5	30'	1,69	1,67	6,8	6,7	20,536	
122				1,64		6,9			
123				1,68		6,4			
124		10		1,64	1,66	5,5	6,1		
125				1,65		6			
126				1,68		6,9			
127		15		1,62	1,61	5,1	4,5		
128				1,61		4,6			
129				1,59		3,9			
130		20		1,62	1,62	5	4,6		
131				1,6		4,8			
132				1,64		4,2			

* Numune basınç dayanım değeri okunamamıştır

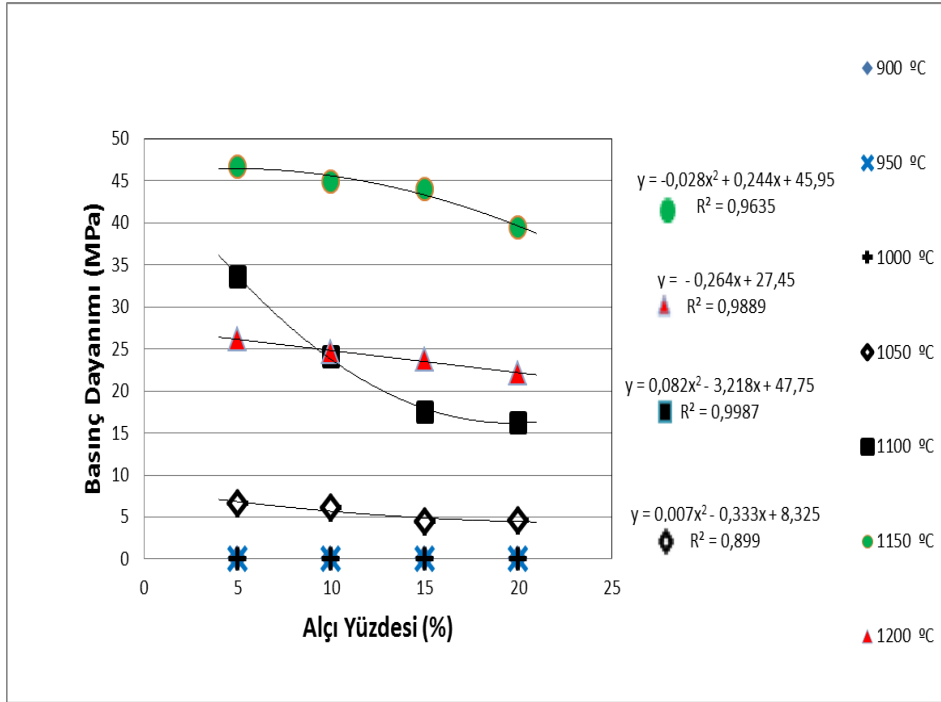
Çizelge 4.2. (devamı) 30 dk pişirilen numunelerin; BHA ve basınç dayanımları

Num. no	Piştirme sıcaklığı (°C)	Alçı (%)	Piştirme Süresi (dk)	BHA (g/cm ³)	BHA Ort. (g/cm ³)	Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Day.ort (MPa)	Enerji Sarfıyatı (KW)	
133	1100	5	30'	1,92	1,88	35,3	33,6	22,662	
134				1,92		35			
135				1,8		30,5			
136		10		1,93	1,93	1,9	22,4		24,1
137					1,78		20,1		
138					1,99		29,7		
139		15		1,93	1,93	1,88	19,1		17,6
140					1,91		18		
141					1,8		15,6		
142		20		1,83	1,83	1,85	14,3		16,3
143					1,85		16,2		
144					1,87		18,4		
145	1150	5	30'	1,73	1,71	46,5	46,7	25,32	
146				1,77		48,4			
147				1,63		45,3			
148		10		1,78	1,78	1,75	48,7		44,9
149					1,76		45,8		
150					1,7		40,3		
151		15		1,97	1,97	1,95	45,5		44
152					1,95		46,8		
153					1,92		39,6		
154		20		1,9	1,9	1,88	39,7		39,4
155					1,9		39,1		
156					1,86		39,6		

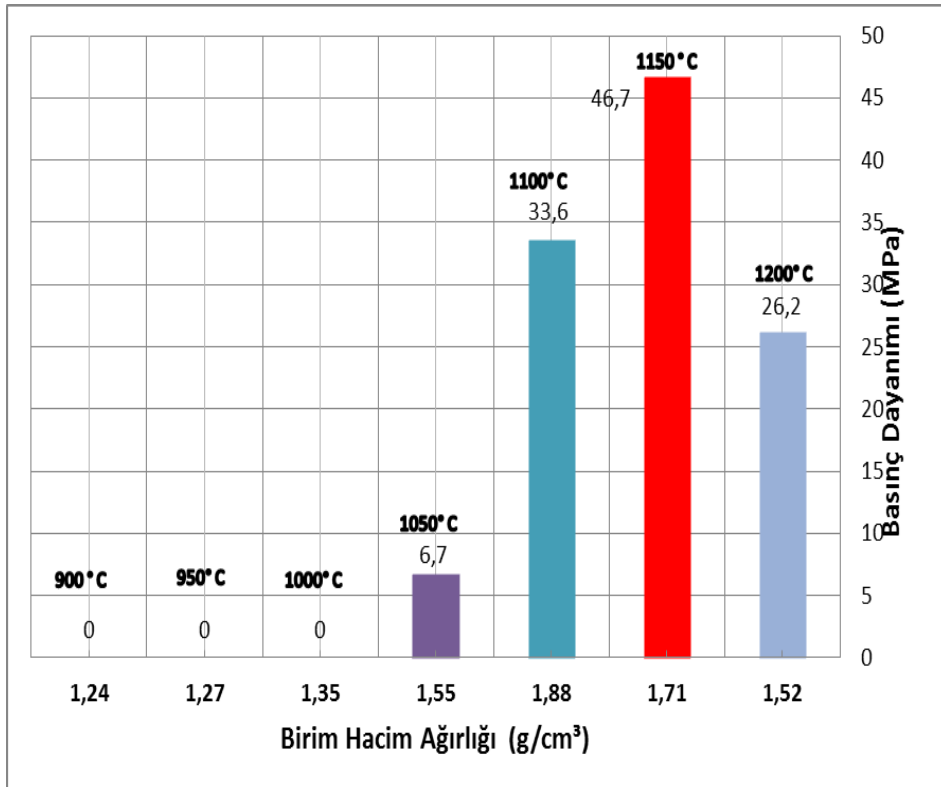
Çizelge 4.2. (devamı) 30 dk pişirilen numunelerin; BHA ve basınç dayanımları

Num. no	Piştirme sıcaklığı (°C)	Alçı (%)	Piştirme Süresi (dk)	BHA (g/cm ³)	BHA Ort. (g/cm ³)	Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Day.ort (MPa)	Enerji Sarfıyatı (KW)
157	1200	5	30'	1,52	1,52	25,2	26,2	27,3
158				1,5		26,7		
159				1,54		26,9		
160		10		1,5	1,54	25	24,6	
161				1,56		24,2		
162				1,56		24,8		
163		15		1,47	1,5	24,4	23,7	
164				1,49		23,5		
165				1,51		23,2		
166		20		1,46	1,47	22	22,1	
167				1,46		22,4		
168				1,49		21,9		

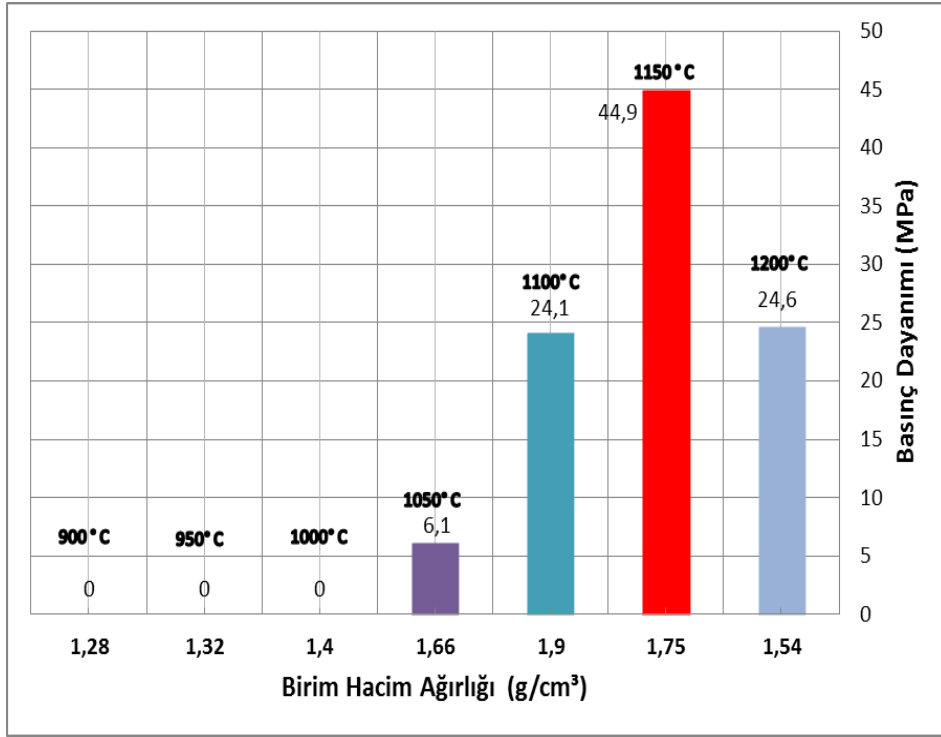
30 dk piştirme sürelerinde 900, 950 ve 1000°C numunelerin basınç dayanım değerlerinin olmadığı tespit edilmiştir. 30 dk pişirmelerde Şekil 4.6'da görüldüğü gibi 1050 °C'de numunelerin ortalama basınç dayanımlarının 5 MPa civarında olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca 30 dk pişirmelerde en yüksek basınç dayanımlarının 1 dk pişirimlerde olduğu gibi 1150 °C'de tespit edilmiştir. 1200 °C'deki numunelerin 30 dk piştirme sonucunda basınç dayanımlarında dört alçı gurubu için ortalama 25 MPa değerde kalarak 1 dk piştirme sonucu basınç dayanım değerinin altında kalmıştır. 30 Dk % 5, % 10, %15 ve % 20 alçılı numunelerin birim hacim ağırlığı-basınç dayanımı ilişkilerini gösteren grafikler irdelendiğinde ve Şekil 4.7- 4.10'da görüldüğü gibi düşük basınç dayanımı (5-25 MPa) ölçülen 1050 ve 1200 °C'de piştirilen numunelerin birim hacim ağırlığının 1.50 g/cm³ civarında olduğu tespit edilmiştir. 1100 ve 1150 °C'de piştirilen ve basınç dayanımları daha yüksek (33-46 MPa) ölçülen numunelerin, birim hacim ağırlığı 1.70-1.95 g/cm³ aralığında tespit edilmiştir.



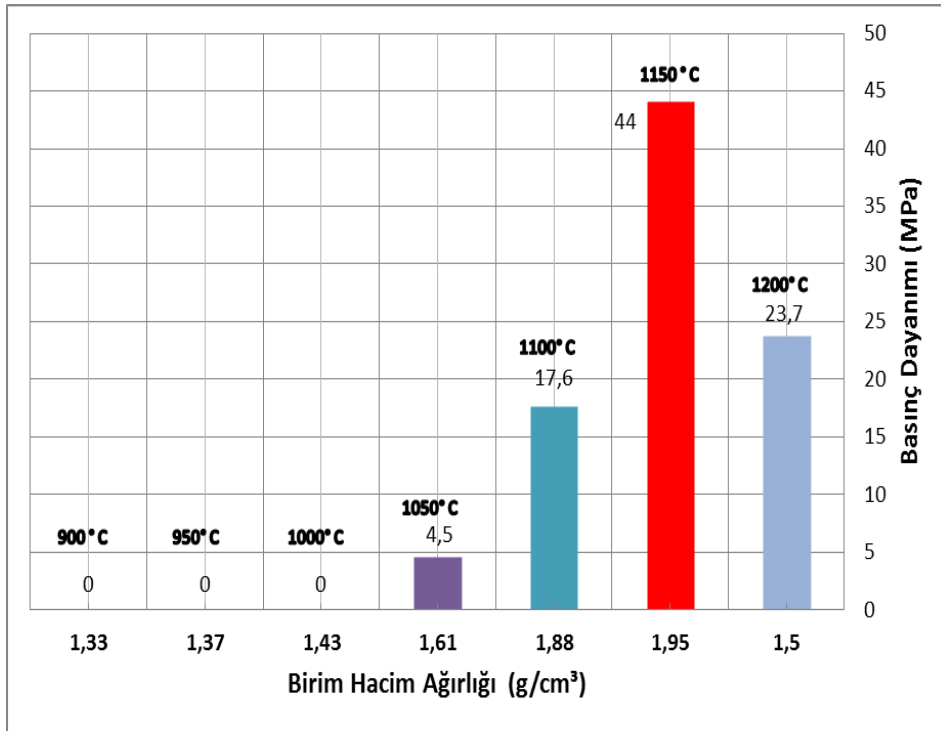
Şekil 4.6. 30 dk pişirilen numunelerin alçı oranı ve basınç dayanımı ilişkisi



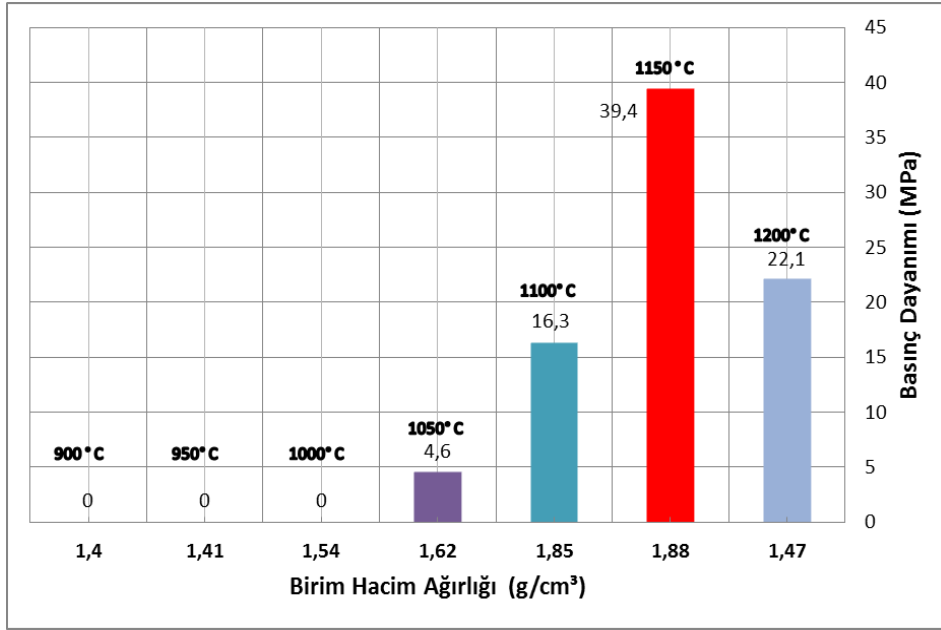
Şekil 4.7. %5 Alçılı ve 30 dk pişirilen numunenin BHA-basınç dayanımı ilişkisi



Şekil 4.8. % 10 Alçılı ve 30 dk pişirilen numunenin BHA-basınç dayanımı ilişkisi



Şekil 4.9. % 15 Alçılı ve 30 dk pişirilen numunenin BHA-basınç dayanımı ilişkisi



Şekil 4.10. % 20 Alçılı ve 30 dk pişirilen numunenin BHA-basınç dayanımı ilişkisi



Resim 4.2. Farklı sıcaklıklarda pişirilene numuneleri

Resim4.2. İncelendiğinde pişirme süresi ve derecesi arttıkça numunelerin rengi açık griden koyu gri renge doğru değişmiştir.

4.1.3. Pişirme süresi 60 dk olan numunelerin birim hacim ağırlık ve basınç dayanım değerleri

Çizelge 4.3. 60 dk pişirilen numunelerin; BHA ve basınç dayanımları

Num. no	Piştirme sıcaklığı (°C)	Alçı (%)	Piştirme Süresi (dk)	BHA (g/cm ³)	BHA Ort. (g/cm ³)	Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Day.ort (MPa)	Enerji Sarfıyatı (KW)
169	900	5	60'	1,27	1,27	*	*	17,36
170				1,28		*	*	
171				1,27		*	*	
172		10		1,3	1,31	*	*	
173				1,3		*	*	
174				1,3		*	*	
175		15		1,33	1,34	*	*	
176				1,33		*	*	
177				1,34		*	*	
178		20		1,38	1,37	*	*	
179				1,38		*	*	
180				1,37		*	*	
181	950	5	60'	1,3	1,3	*	*	18,35
182				1,29		*	*	
183				1,3		*	*	
184		10		1,34	1,36	*	*	
185				1,34		*	*	
186				1,4		*	*	
187		15		1,4	1,4	*	*	
188				1,39		*	*	
189				1,4		*	*	
190		20		1,36	1,34	*	*	
191				1,34		*	*	
192				1,33		*	*	

* Numune basınç dayanım değeri okunamamıştır

Çizelge 4.3. (Devam) 60 dk pişirilen numunelerin; BHA ve basınç dayanımları

Num. no	Piştirme sıcaklığı (°C)	Alçı (%)	Piştirme Süresi (dk)	BHA (g/cm ³)	BHA Ort. (g/cm ³)	Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Day.ort (MPa)	Enerji Sarfıyatı (KW)	
193	1000	5	60'	1,5	1,4	*	*	20,505	
194				1,35		*			
195				1,35		*			
196		10		1,46	1,46	*	*		
197				1,44		*			
198				1,48		*			
199		15		15	1,55	1,49	*	*	20,505
200					1,48		*		
201					1,44		*		
202				20	1,5	1,55	*	*	
203					1,56		*		
204					1,58		*		
205	1050	5	60'	1,63	1,65	8,6	8,8	21,865	
206				1,61		8,3			
207				1,72		9,6			
208		10		1,64	1,65	8,5	8,7		
209				1,69		9,3			
210				1,63		8,4			
211		15		1,72	1,7	8,5	7,3		
212				1,71		6,8			
213				1,68		6,8			
214		20		1,69	1,68	5,9	6,1		
215				1,65		5,8			
216				1,7		6,7			

* Numune basınç dayanım değeri okunamamıştır

Çizelge 4.3. (Devam) 60 dk pişirilen numunelerin; BHA ve basınç dayanımları

Num. no	Piştirme sıcaklığı (°C)	Alçı (%)	Piştirme Süresi (dk)	BHA (g/cm ³)	BHA Ort. (g/cm ³)	Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Day.ort (MPa)	Enerji Sarfiyatı (KW)
217	1100	5	60'	2,01	2,01	30,2	29,6	24,102
218				2,04		31,4		
219				1,98		27,2		
220		10		2,01	2,05	19	22,8	
221				2,08		24,4		
222				2,06		25		
223		15		1,98	1,94	20,7	18	
224				1,94		17,8		
225				1,91		15,5		
226		20		1,97	1,94	11,9	11,5	
227				1,93		11,6		
228				1,91		11		
229	1150	5	60'	1,23	1,31	22,2	22,3	26,502
230				1,37		22,2		
231				1,33		22,5		
232		10		1,38	1,35	20,1	21,1	
233				1,4		23,9		
234				1,28		19,2		
235		15		1,5	1,45	20,4	20,3	
236				1,33		18,4		
237				1,53		22,2		
238		20		1,51	1,48	19,4	19,9	
239				1,47		20,3		
240				1,46		20,1		

Çizelge 4.3. (Devam) 60 dk pişirilen numunelerin; BHA ve basınç dayanımları

Num. no	Piştirme sıcaklığı (°C)	Alçı (%)	Piştirme Süresi (dk)	BHA (g/cm ³)	BHA Ort. (g/cm ³)	Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Day.ort (MPa)	Enerji Sarfiyatı (KW)
241	1200	5	60'	*	*	*	*	28,1
242				*		*		
243				*		*		
244		10		*	*	*	*	
245				*		*		
246				*		*		
247		15		*	*	*	*	
248				*		*		
249				*		*		
250		20		*	*	*	*	
251				*		*		
252				*		*		

* Numune basınç dayanım değeri okunamamıştır

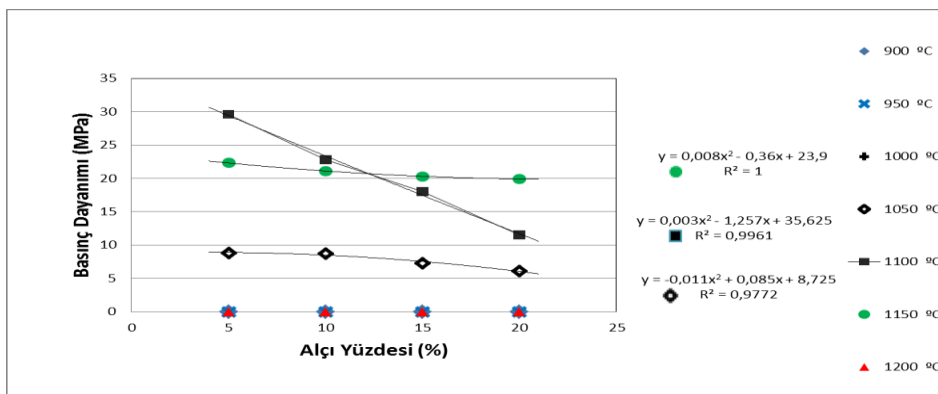
60 dk piştirme sürelerinde 900, 950 ve 1000 °C'lerde numunelerde 1 ve 30 dk piştirmelerde olduğu gibi basınç dayanım değerlerinin olmadığı tespit edilmiştir. 60 dk piştirmelerde Şekil 4.11.'da görüldüğü gibi 1050 °C'de numunelerin ortalama basınç dayanımlarının 7 MPa civarında olduğu tespit edilmiştir. 1100 °C' de 60 dk piştirmelerde; % 5 alçılı numunelerin 29 MPa, % 10 alçılı numunelerin 22 MPa, % 15 alçılı numunelerin 18 MPa, %20 alçılı numunelerin ise 11 MPa değerine ulaştığı tespit edilmiştir. Bu sürede 1100 °C'de alçı oranı arttıkça numunelerde basınç değerlerindeki buna paralel olarak azaldığı görülmektedir. 60 dk piştirme gurubunda en yüksek basınç dayanım performansını 29,6 MPa değeriyle 1100 °C ve % 5 alçılı numunelerin gösterdiği tespit edilmiştir. Şekil 4.11'de görüldüğü gibi 1200 °C'deki numunelerin 60 dk piştirme sonucunda eridiği basınç dayanımı performanslarının ölçülemediği belirlenmiştir.

Birim hacim ağırlığı- basınç dayanımı ilişkilerini gösteren Şekil 4.12-4.15 grafikleri incelendiğinde 60 dk numunelerin birim hacim ağırlığının 1050 °C’ de dört farklı gurup alçı numuneler için ortalama 1,65 ila 1,70 g/cm³ olduğu görülmektedir. Alçı oranının birim hacim ağırlığına etkisi olup olmadığı yargısına varmak oldukça zordur. Çünkü 900-1000 °C pişme ısısında elde edilen örneklerde pişme ısısı arttıkça birim hacim ağırlıkta 1,27-1,55 g/cm³ arasında bir artış gözlenmektedir. Bu numunelerden basınç dayanım değeri elde edilememiştir. 1100 °C’lik pişirme süresinde ise birim hacim ağırlığı her gurup alçı oranı için ortalama 2 g/cm³ olmasına karşılık basınç dayanımları %5 alçıda 29 MPa, %10 alçıda 22, % 15 alçıda 18 MPa ve % 20 alçıda ise 11 MPa azalarak indiği tespit edilmiştir.

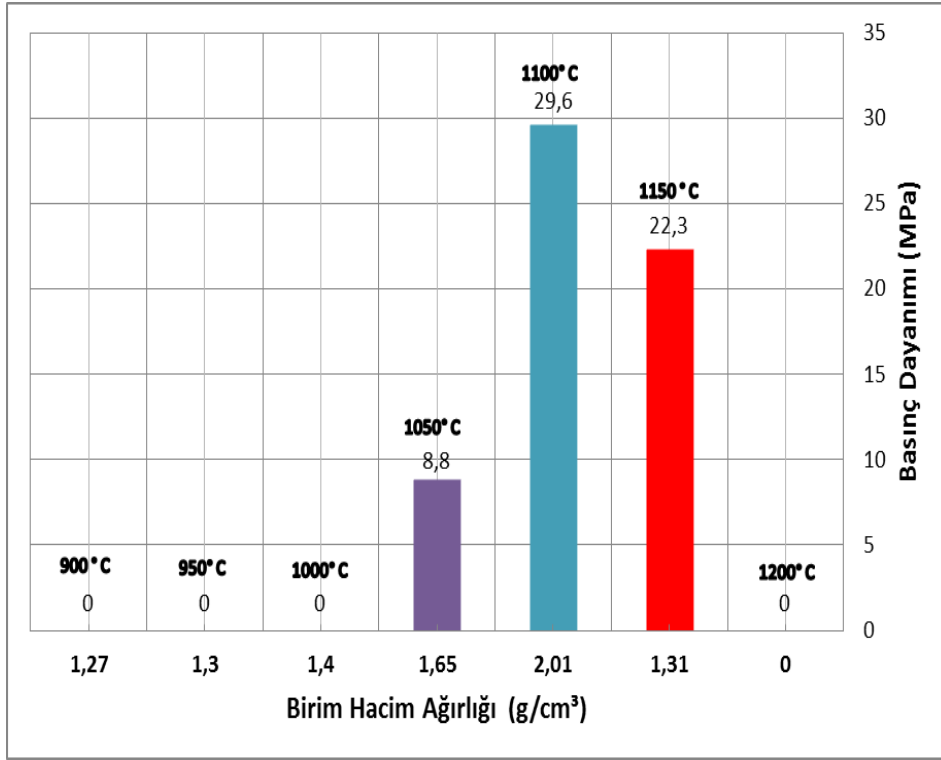


Resim 4.3. 1200 °C'ta pişirilendeney numuneleri

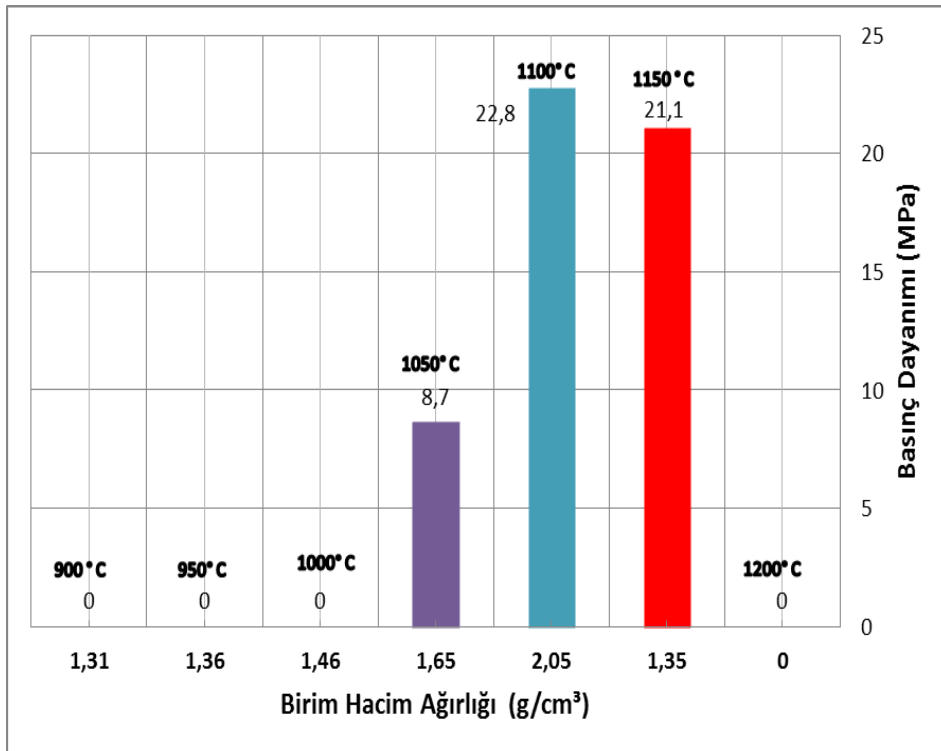
Resim 4.3. İncelendiğinde 1200 °C ‘de pişirme süresi arttıkça numunelerin koyu gri renge doğru değişmiştir. 1200 °C’de 60 dk pişirilen numunelerin şeklinin bozulduğu ve aşırı camlaştığı görülmüştür.



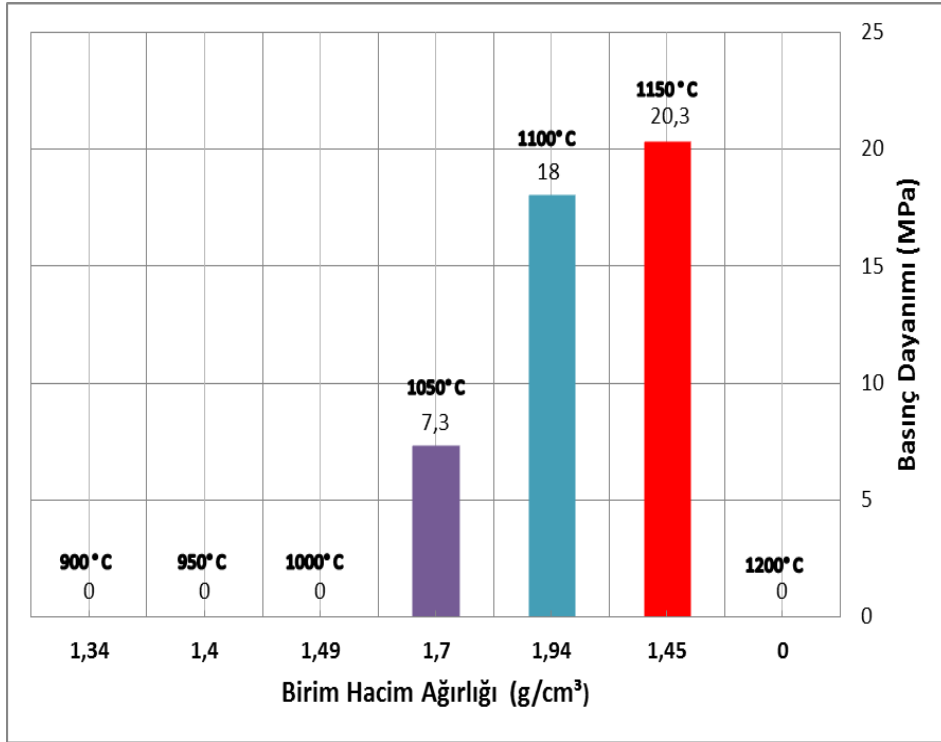
Şekil 4.11. 60 dk pişirilen numunelerin alçı oranı ve basınç dayanımı ilişkisi



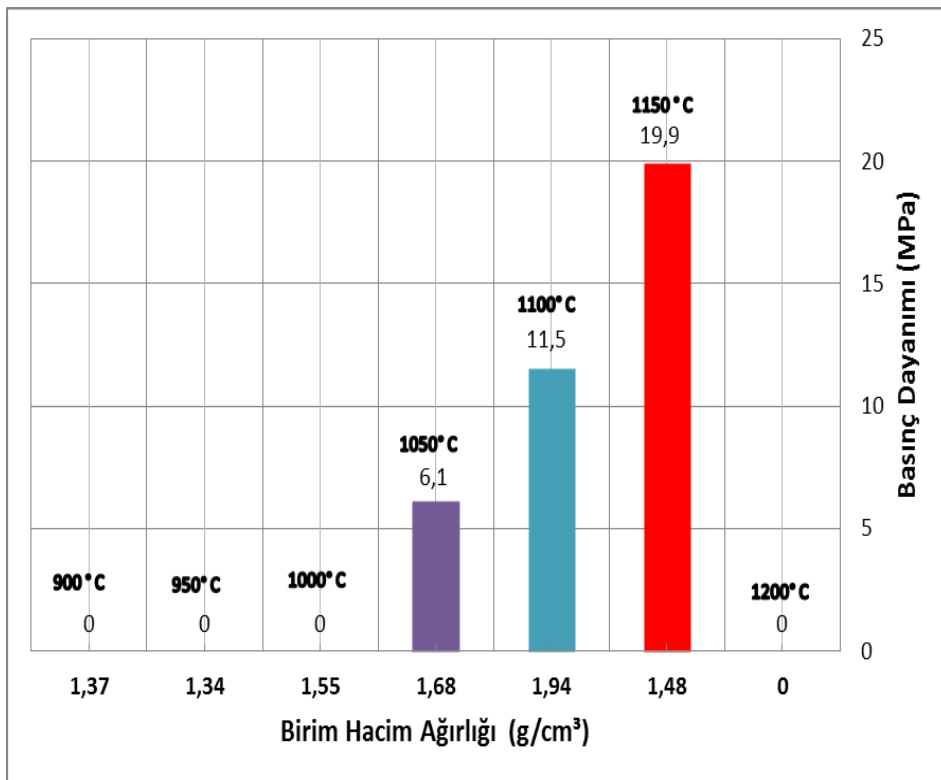
Şekil 4.12. % 5 Alçı ve 60 dk pişirilen numunenin BHA-basınç dayanımı ilişkisi



Şekil 4.13. % 10 Alçı ve 60 dk pişirilen numunenin BHA-basınç dayanımı ilişkisi



Şekil 4.14. % 15 Alçılı ve 60 dk pişirilen numunenin BHA-basınç dayanımı ilişkisi



Şekil 4.15. % 20 Alçılı ve 60 dk pişirilen numunenin BHA-basınç dayanımı ilişkisi

4.1.4. Pişirme süresi 90 dk olan numunelerin birim hacim ağılık ve basınç dayanım değerleri

Çizelge 4.4. 90 dk pişirilen numunelerin; BHA ve basınç dayanımları

Num. no	Piştirme sıcaklığı (°C)	Alçı (%)	Piştirme Süresi (dk)	BHA (g/cm ³)	BHA Ort. (g/cm ³)	Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Day.ort (MPa)	Enerji Sarfıyatı (KW)
253	900	5	90'	1,22	1,23	*	*	18,61
254				1,22		*	*	
255				1,23		*	*	
256		10		1,3	1,29	*	*	
257				1,31		*	*	
258				130		*	*	
259		15		1,33	1,34	*	*	
260				1,35		*	*	
261				1,35		*	*	
262				1,32		*	*	
263				1,3		1,31	*	
264		1,31		*	*			
265	950	5	90'	1,31	1,3	*	*	19,513
266				1,3		*	*	
267				1,3		*	*	
268		10		1,33	1,33	*	*	
269				1,33		*	*	
270				1,34		*	*	
271		15		1,46	1,46	*	*	
272				1,47		*	*	
273				1,46		*	*	
274		20		1,49	1,49	*	*	
275				1,5		*	*	
276				1,49		*	*	

*Numune basınç dayanım değeri okunamamıştır

Çizelge 4.4. (Devam) 90 dk pişirilen numunelerin;BHA ve basınç dayanımları

Num. no	Piştirme sıcaklığı (°C)	Alçı (%)	Piştirme Süresi (dk)	BHA (g/cm ³)	BHA Ort. (g/cm ³)	Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Day.ort (MPa)	Enerji Sarfıyatı (KW)	
277	1000	5	90'	1,37	1,38	*	*	20,832	
278				1,44		*			
279				1,33		*			
280		10		1,43	1,45	*	*		
281				1,43		*			
282				1,49		*			
283		15		15	1,48	1,49	*	*	20,832
284					1,51		*		
285					1,49		*		
286				20	1,51	1,52	*	*	
287					1,5		*		
288		1,53		*					
289	1050	5	90'	1,77	1,74	16,4	14,8	23,309	
290				1,71		14			
291				1,73		14,2			
292		10		1,75	1,78	8,6	10,1		
293				1,78		9,1			
294				1,8		12,8			
295		15		1,71	1,64	9,4	7,7		
296				1,61		6,9			
297				1,61		6,9			
298		20		1,7	1,72	4,1	5,3		
299				1,71		4,7			
300				1,74		7,2			

*Numune basınç dayanım değeri okunamamıştır

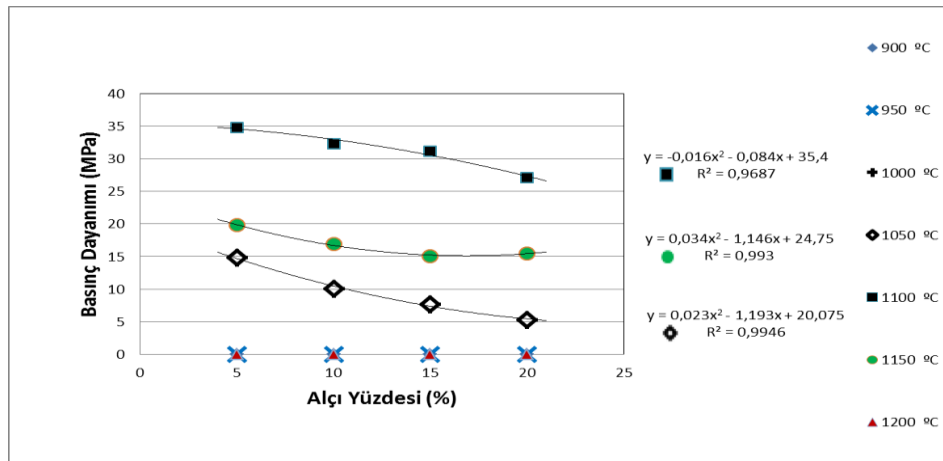
Çizelge 4.4. (Devam) 90 dk pişirilen numunelerin;BHA ve basınç dayanımları

Num. no	Piştirme sıcaklığı (°C)	Alçı (%)	Piştirme Süresi (dk)	BHA (g/cm ³)	BHA Ort. (g/cm ³)	Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Day.ort (MPa)	Enerji Sarfıyatı (KW)
301	1100	5	90'	1,95	1,94	35,9	34,8	25,428
302				1,93		34,2		
303				1,93		34,4		
304		10		2	1,93	34,4	32,3	
305				1,89		32,1		
306				1,9		31,9		
307		15		1,95	1,94	32,6	31,2	
307				1,95		31		
309				1,93		30,1		
310		20		1,93	1,94	25,6	27,1	
311				1,93		26,4		
312				1,97		29,5		
313	1150	5	90'	1,15	1,18	21,0	19,8	27,76
314				1,16		17,9		
315				1,23		20,6		
316		10		1,14	1,14	16,0	16,9	
317				1,13		16,9		
318				1,15		17,9		
319		15		1,16	1,2	14,1	15,0	
320				1,17		14,7		
321				1,27		16,2		
322		20		1,22	1,17	12,6	15,5	
323				1,1		11,9		
324				1,2		13,1		

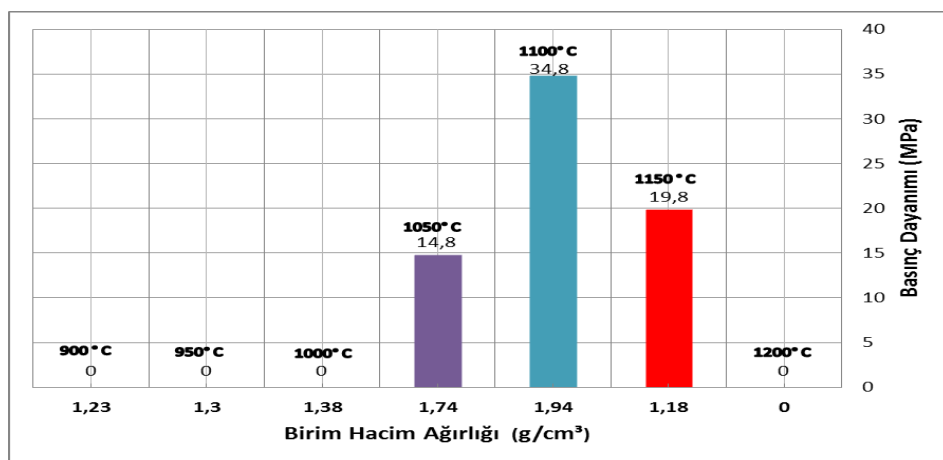
90 dk'lık piştirme sürelerinde diğer guruplarda olduğu gibi 900, 950 ve 1000 °C'lerde basınç dayanımı performansı ölçülememiştir. Şekil 4.16 incelendiğinde 1200 °C numuneler fırına giriş ebatlarını kaybetmiştir. Şekil bozulmasından dolayı basınç ve birim hacim ağırlık değerleri alınamamıştır. Bu numunelerin rengi koyu grive camsı bir yapıya sahip olduğu açıkça görülmektedir. Şekil 4.16'deki grafikte görüldüğü gibi 1050 °C'de ise alçı yüzdelere göre; %5 alçı 15 MPa, %10 alçı 10 MPa, %15

alçı 7 MPa, %20 alçı 5 MPa ortalama basınç dayanımına ulaşmıştır. Bu grupta da alçı oranı arttıkça dayanım azalmıştır. 90 dk pişirme ve 1100 °C’ de dört alçı bağlayıcı oranında da yaklaşık 30 MPa’lık basınç dayanımına ulaştığı görülmektedir. 1150 °C’ ta da benzer bir yaklaşımla ortalama 15 MPa dayanım tespit edilmiştir.

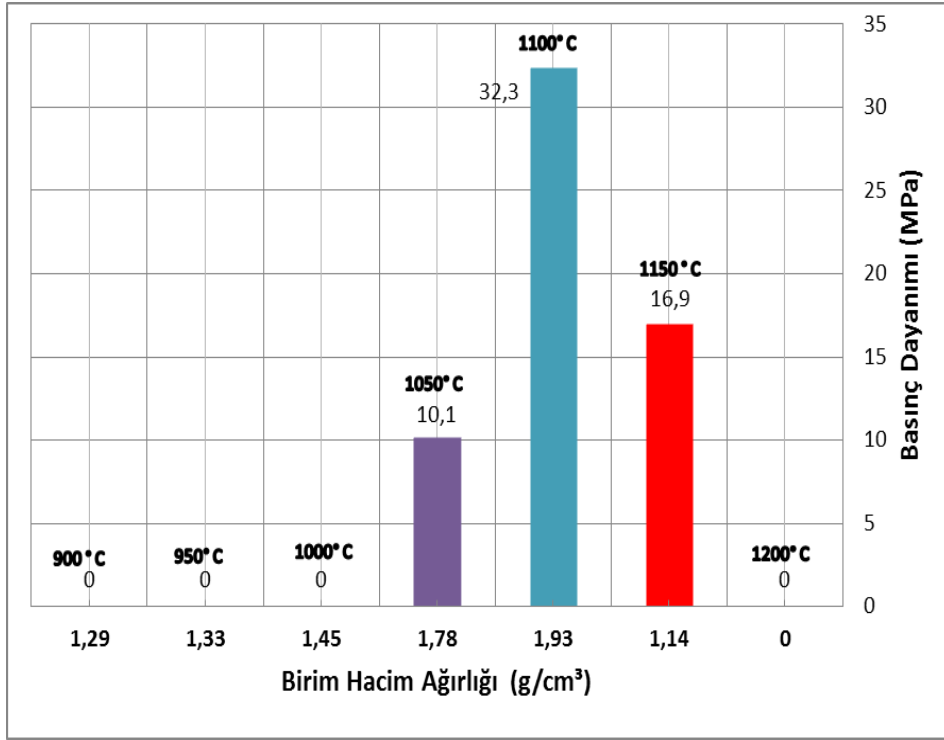
Birim hacim ağırlık-basınç dayanımı ilişkisinde, Şekil 4.17 ve 4.20’de görüldüğü gibi; 1100 °C’de bütün karışım oranlarında numunelerin ortalama 1,95 g/cm³’ lük birim ağırlığa 30 MPa’ lik dayanım karşılık gelmektedir. 1150 °C’de ise yaklaşık 1.20 g/cm³’ lük birim ağırlığa 16 MPa’ lik dayanıma ulaştığı görülmektedir.



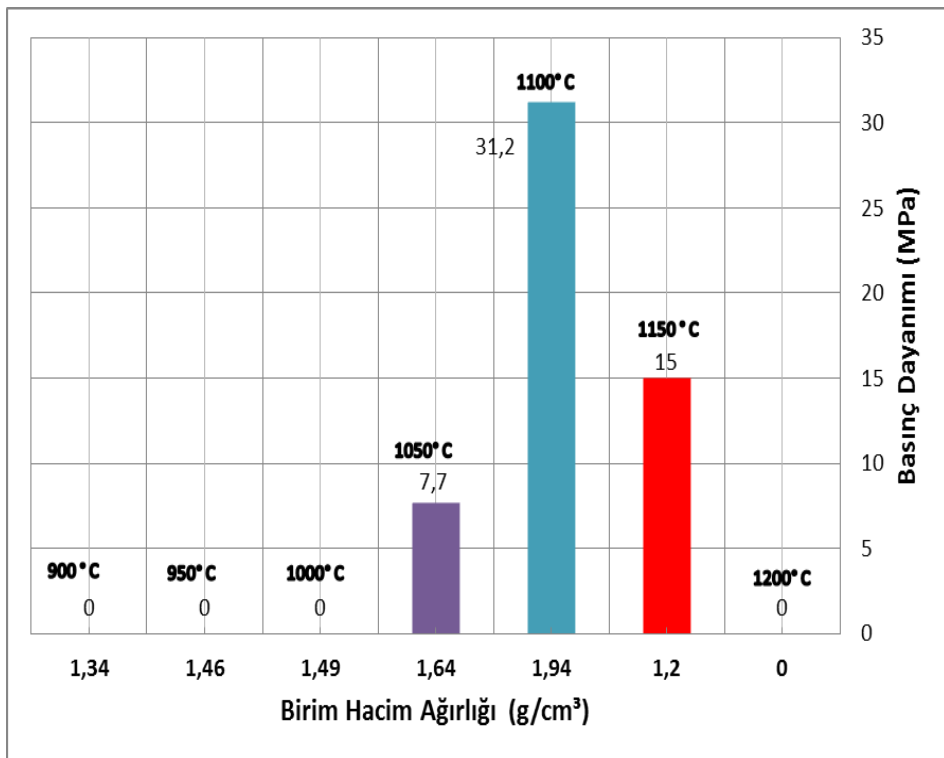
Şekil 4.16. 90 dk pişirilen numunelerin alçı oranı ve basınç dayanımı ilişkisi



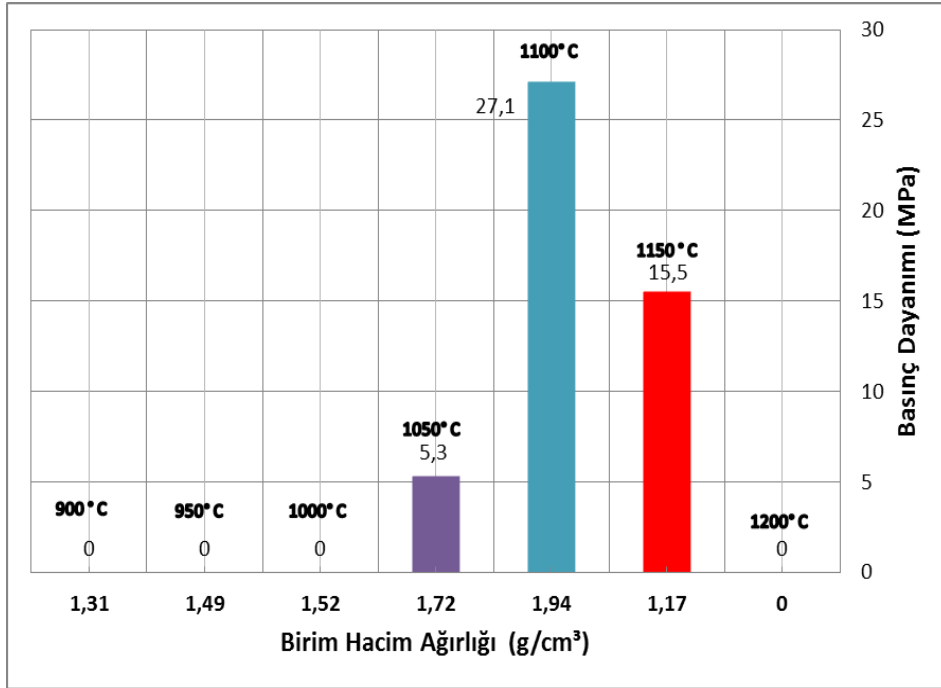
Şekil 4.17. % 5 Alçılı ve 90 dk pişirilen numunenin BHA-basınç dayanımı ilişkisi



Şekil 4.18. % 10 Alçılı ve 90 dk pişirilen numunenin BHA-basınç dayanımı ilişkisi



Şekil 4.19. % 15 Alçılı ve 90 dk pişirilen numunenin BHA-basınç dayanımı ilişkisi



Şekil 4.20. % 20 Alçılı ve 90 dk pişirilen numunenin BHA-basınç dayanımı ilişkisi



Resim 4.4. 1200 °C Geometrik şekli deforme olan deney numuneleri

Resim 4.4. 1200 °C’de pişirilen numunelerin şeklinin bozulduğu, aşırı camlaştığı ve alçı oranı azaldıkça renginin koyulaştığı görülmüştür.

4.1.5. Pişirme süresi 120dk olan numunelerin birim hacim ağırlık ve basınç dayanım değerleri

Çizelge 4.5. 120 dk pişirilen numunelerin; BHA ve basınç dayanımları

Num. no	Pişirme sıcaklığı (°C)	Alçı (%)	Pişirme Süresi (dk)	BHA (g/cm ³)	BHA Ort. (g/cm ³)	Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Day.ort (MPa)	Enerji Sarfıyatı (KW)	
325	900	5	120'	1,27	1,27	*	*	19,82	
326				1,26		*	*		
237				1,27		*	*		
328		10		10	1,28	1,29	*		*
329					1,29		*		*
330					1,29		*		*
331		15		15	1,34	1,34	*		*
332					1,34		*		*
333					1,34		*		*
334		20		20	1,36	1,36	*		*
335					1,36		*		*
336					1,36		*		*
337	950	5	120'	1,35	1,34	*	*	20,446	
337				1,34		*	*		
339				1,33		*	*		
340		10		10	1,36	1,36	*		*
341					1,34		*		*
342					1,39		*		*
343		15		15	1,47	1,46	*		*
344					1,46		*		*
345					1,44		*		*
346		20		20	1,46	1,48	*		*
347					1,49		*		*
348					1,5		*		*

* Numune basınç dayanım değeri okunamamıştır

Çizelge 4.5. (Devam) 120 dk pişirilen numunelerin;BHA ve basınç dayanımları

Num. no	Piştirme sıcaklığı (°C)	Alçı (%)	Piştirme Süresi (dk)	BHA (g/cm ³)	BHA Ort. (g/cm ³)	Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Day.ort (MPa)	Enerji Sarfiyatı (KW)
349	1000	5	120'	1,43	1,41	*	*	22,092
350				1,4		*		
351				1,41		*		
352		10		1,46	*	*		
353				1,47	*			
354				1,48	*			
355		15		1,5	*	*	22,092	
356				1,48	*			
357				1,52	*			
358		20		1,52	*	*		
359				1,51	*			
360				1,53	*			
361	1050	5	120'	1,7	1,7	16,5	16,5	24,61
362				1,72		18,2		
363				1,69		14,9		
364		10		1,7	10,5	11,6		
365				1,7	9,4			
366				1,72	14,9			
367		15		1,73	5,5	6,2		
368				1,73	6			
369				1,69	7,2			
370		20		1,69	4,9	4,3		
371				1,7	4,2			
372				1,7	3,9			

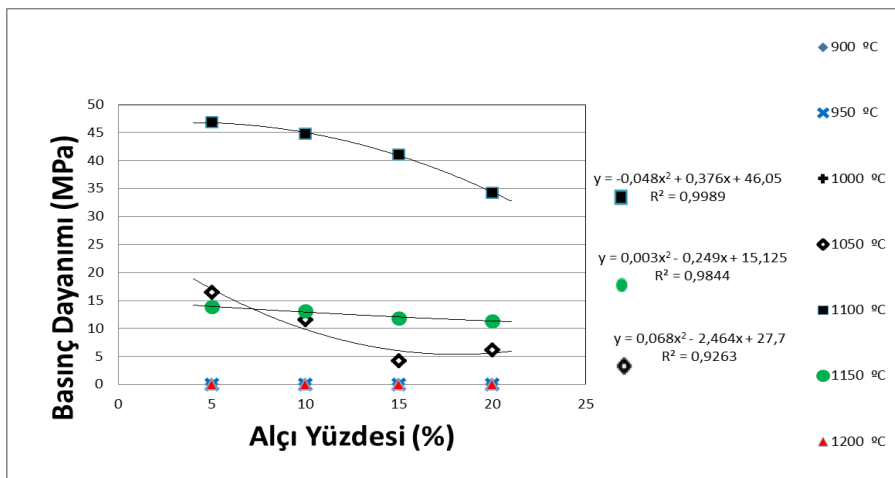
* Numune basınç dayanım değeri okunamamıştır

Çizelge 4.5. (Devam) 120 dk pişirilen numunelerin; BHA ve basınç dayanımları

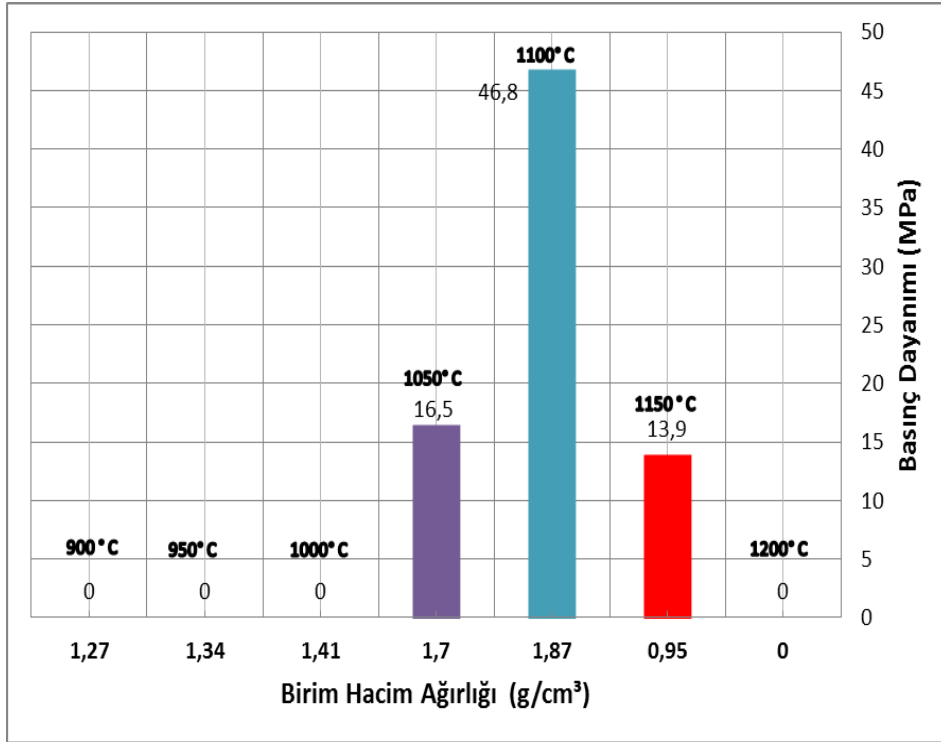
Num. no	Piştirme sıcaklığı (°C)	Alçı (%)	Piştirme Süresi (dk)	BHA (g/cm ³)	BHA Ort. (g/cm ³)	Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Day.ort (MPa)	Enerji Sarfiyatı (KW)
373	1100	5	120'	1,8	1,87	46,9	46,8	26,962
374				1,83		44,6		
375				1,97		48,9		
376		10		1,89	1,77	46,9	44,8	
377				1,7		42,8		
378				1,72		44,7		
379		15		1,92	1,92	42,8	41,1	
380				1,95		43,3		
381				1,9		37,1		
382		20		1,95	1,96	33,1	34,3	
383				1,95		33,6		
384				1,99		36,2		
385	1150	5	120'	0,9	0,95	14,2	13,9	28,763
386				0,97		13,4		
387				0,98		14,2		
388		10		1,04	1,06	12,9	13,1	
389				1,12		15,2		
390				1,03		11,9		
391		15		1,04	1,04	12,1	11,9	
392				1,05		11,2		
393				1,07		12,4		
394		20		1,17	1,14	9,6	11,4	
395				1,13		11,6		
396				1,13		12,8		

120 dk 1050 °C’de dört farklı gurup alçı numunelerde basınç dayanımı Şekil 4.21’den anlaşılacağı gibi 4-16 MPa arasında yer aldığı görülmektedir. 120 dk pişirme sürelerinde en yüksek basınç dayanımı 45 MPa ile 1100 °C’de % 5’lik alçılı numuneler göstermiştir. Diğer alçı karışım oranı arttıkça numunelerin basınç dayanımlarında düşüş görülmektedir. Yani alçı karışım oranıyla basınç dayanımı arasında ters ilişki gözlenmiştir. Bu alçı karışımları ve basınç dayanımları sırasıyla; %10 alçı 44 MPa, % 15 alçı 41 MPa, % 20 alçı 34 MPaolarak tespit edilmiştir. 1150 °C’de ise dört farklı alçı gurubunda ortalama 12 MPa basınç dayanımı değerini aldığı görülmektedir. Bu sıcaklıkta pişirilen numunelerde % 5 alçılı karışımın en yüksek basınç dayanımı 13,9 MPa iken % 20 alçılı karışımın 11,4 MPa en düşük basınç dayanımı olarak bulunmuştur. 1100 °C’de 120 dk süre ile pişirilerek üretilen numunelerin basınç dayanımı ile 1150 °C’de 120 dk süre ile pişirilerek elde edilen numunelerin arasında oldukça büyük fark olduğu görülmektedir. Bunun nedeni numunenin aşırı derecede camlaşması ve içsel gözeneklerin olduğu düşünülmüştür. Bu kanaati birim hacim ağırlık değerleride göstermektedir.

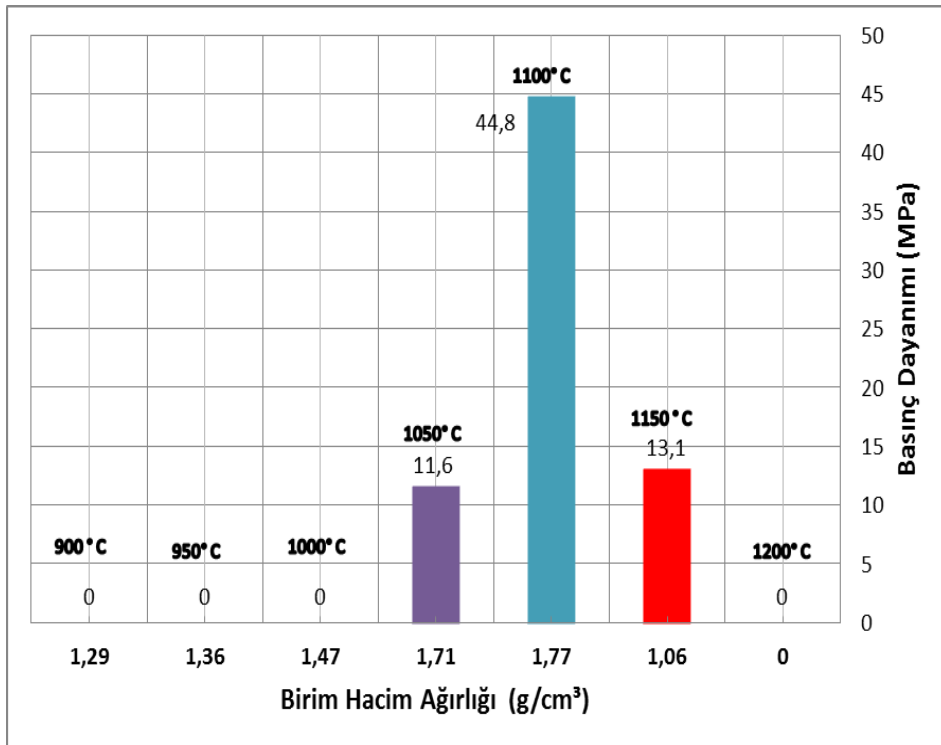
Şekil 4.22-4.25 grafiklerine göre; Birim hacim ağırlığı 1,70-1,90 g/cm³ arasındaki 1100 °C’de 120 dkpişirilen numunelerin 40-45 MPa ortalama basınç dayanımına ulaştığı görülmektedir. 1150 °C’de 120 dkpişirilen numunelerin birim hacim ağırlıkları ortalama 1,00 g/cm³ olmasına karşılık, basınç dayanımları yaklaşık 12 MPa olarak tespit edilmiştir.



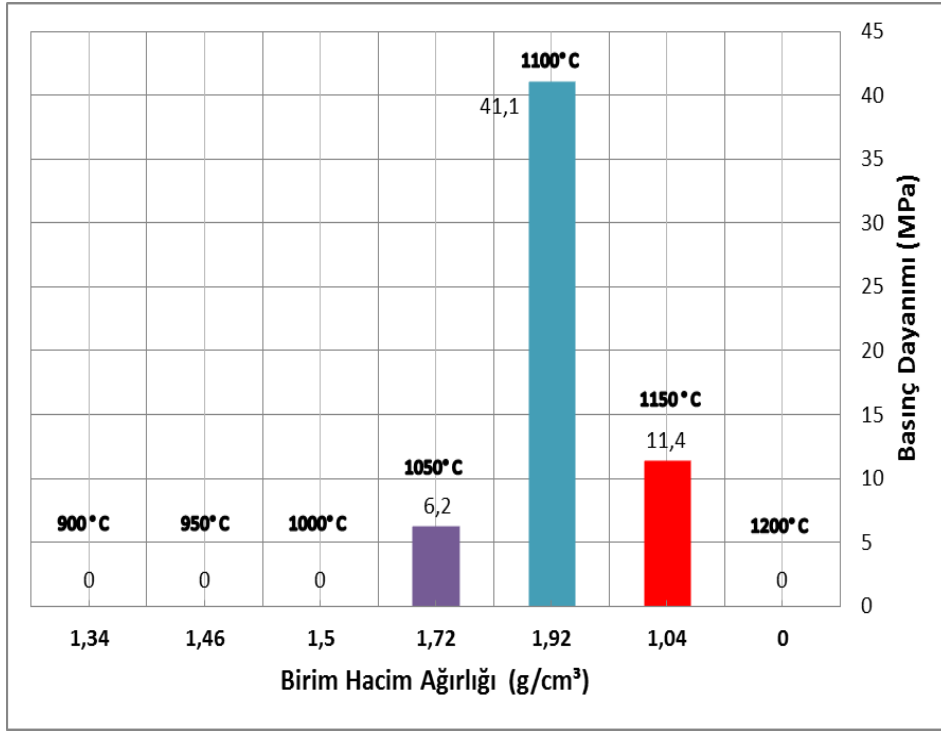
Şekil 4.21. 120 dk pişirilen numunelerin alçı oranı ve basınç dayanımı ilişkisi



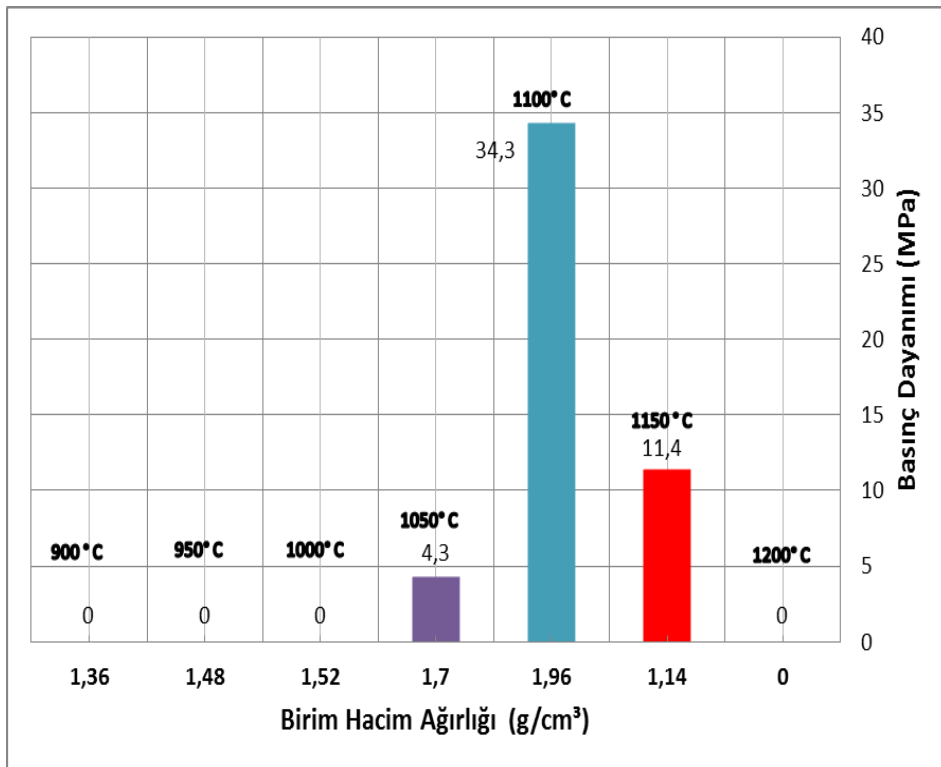
Şekil 4.22. % 5 Alçılı ve 120 dk pişirilen numunenin BHA-basınç dayanımı ilişkisi



Şekil 4.23. % 10 Alçılı ve 120 dk pişirilen numunenin BHA-basınç dayanımı ilişkisi



Şekil 4.24. % 15 Alçılı ve 120 dk pişirilen numunenin BHA-basınç dayanımı ilişkisi



Şekil 4.25. % 20 Alçılı ve 120 dk pişirilen numunenin BHA-basınç dayanımı ilişkisi

4.2. İkinci Aşama Bulguları

4.2.1. Ön performans değerini seçimi

İkinci aşamaya esas alınmasında birinci aşamadaki denemelerden birim hacim ağırlık ve basınç dayanımına bağlı olarak seçilen alçı %'si, pişirme sıcaklığı ve pişirme süresi Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Alçıyla hazırlanan ve fırınlanan numunelerin; BHA ve basınç dayanımları

Num. no	Pişirme sıcaklığı (°C)	Alçı (%)	Pişirme Süresi (dk)	BHA (g/cm ³)	BHA Ort. (g/cm ³)	Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Day.ort (MPa)	Enerji Sarfıyatı (KW)
133	1100	5	30'	1,92	1,88	35,3	33,6	22,66
134				1,92		35,0		
135				1,80		30,5		
217	1100	5	60'	2,01	2,01	30,2	29,6	24,1
218				2,04		31,4		
219				1,98		27,2		
301	1100	5	90'	1,95	1,94	35,9	34,8	25,43
302				1,93		34,2		
303				1,93		34,4		
373	1100	5	120'	1,80	1,87	46,9	46,8	26,962
374				1,83		44,6		
375				1,97		48,9		
376	1100	10	120'	1,89	1,77	46,9	44,8	26,962
377				1,70		42,8		
378				1,72		44,7		
64	1150	10	1'	2	1,99	44,0	43,1*	23,51
65				1,99		41,0		
66				1,99		44,2		
145	1150	5	30'	1,73	1,71	46,5	46,7	25,32
146				1,77		48,4		
147				1,63		45,3		
154	1150	20	30'	1,90	1,88	39,7	39,4	25,32
155				1,90		39,1		
156				1,86		39,6		

* Seçilen ön performans değeri

Yapılan ön performans değerlendirmesinde; numunelerin basınç dayanımı, alçı malzeme maliyetleri, pişirmede harcanan enerji maliyeti ve döküm, kalıplama gibi işlenebilirlik kriterler dikkate alınmıştır.

Bu kriterlerin tamamını göz önüne alarak bütün deney çizelgelerinden, Çizelge 4.6.'da performansı yüksek olan numuneler görülmektedir. Seçilen bu değerden basınç dayanımı olarak daha yüksek değerler elde edilmesine rağmen; enerji ve alçı maliyeti, zaman ve işlenebilirlik gibi faktörler dikkate alındığında “ 1150 °C % 10 alçılı ve 1 dkpişirme”sonucu elde edilen numune ön performans değerolarak seçilmiştir.

4.2.2. Optimum deney aralıklarının ve basınç dayanımlarının tespiti

Başlangıç deneyleri sonucunda ön performans değer 1150 °C % 10 alçılı ve 1 dk seçilmiştir. Tespit edilen bu sıcaklık aralığına ilave olarak, bu sıcaklığın ± 25 °C sıcaklık aralıklarında olmak üzere üç ayrı sıcaklıkta yeniden, her bir guruptan üçer adet numuneler üretilmiş ve bu numuneler üzerinde birim ağırlık ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Elde edilen veriler Çizelge 4.7'de gösterilmiştir. Başlangıç deneylerinden en uygun alçı yüzdesi olarak % 10 alçı oranı, pişirme süresi için 1 dk süre seçilmiştir. Bu detay aralık çalışmasından hedeflenen, gerek dayanım yönünden, gerekse enerji sarfıyatı yönünden en optimum sıcaklık aralığını tespit etmektir. Optimizasyon pişirme aralıkları;

1125 °C % 10 alçılı ve 1 dkpişirme,

1150°C %10 alçılı ve 1 dkpişirme,

1175 °C %10 alçılı ve 1 dkpişirme,

Çizelge 4.7. Alçılı numunelerin; BHA ve basınç dayanımları (optimum değer)

Num. no	Piştirme sıcaklığı (°C)	Alçı (%)	Piştirme Süresi (dk)	BHA (g/cm ³)	BHA Ort. (g/cm ³)	Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Day.ort (MPa)	Enerji Sarfiyatı (KW)
52	1100	10	1'	1,80	1,81	9,2	9,80 **	21,23
53				1,79		9,3		
54				1,85		10,8		
400	1125	10	1'	1,99	1,95	20,76	21,10	21,53
401				1,92		21,80		
402				1,94		20,75		
403	1150	10	1'	2,09	2,09	45,02	42,56	24,03
404				2,08		42,05		
405				2,09		40,61		
406	1175	10	1'	1,84	1,90	58,74	57,90 *	24,65
407				1,95		55,14		
408				1,91		59,83		
76	1200	10	1'	1,59	1,58	37,00	32,30 **	25,77
77				1,56		26,90		
78				1,58		33,00		

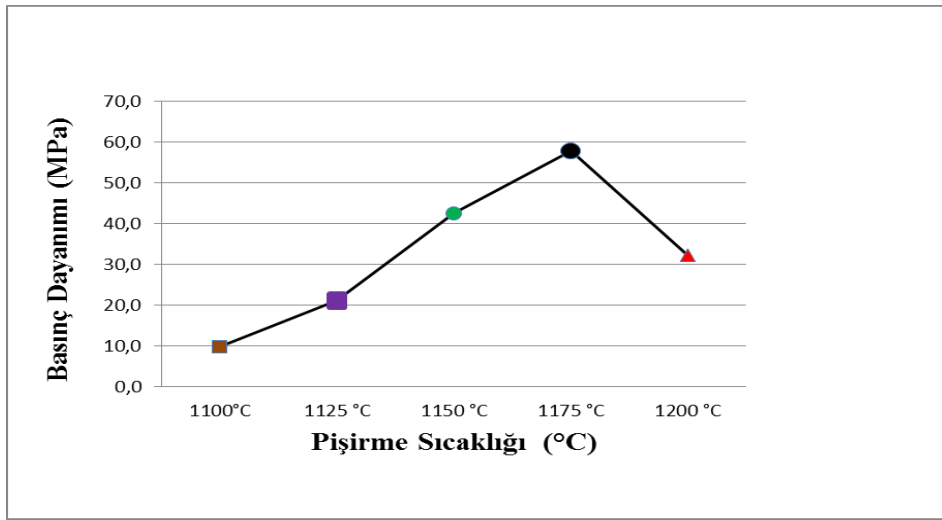
*Başlangıç deneylerinden tespit edilen % 10 alçılı, 1150 °C'de 1 dk ön performans değerini; 25 °C'lik altında ve üstünde (1125 °C- 1150°- 1175 °C) üretilen numunelerden elde edilen en uygun optimum değerdir. Bu değer: **% 10 alçılı, 1175 °C'de 1 dk** fırınlama sonucu elde edilen üründür.

** Bu değerler başlangıç deneylerindeki çizelgelerden alınarak yazılmıştır.

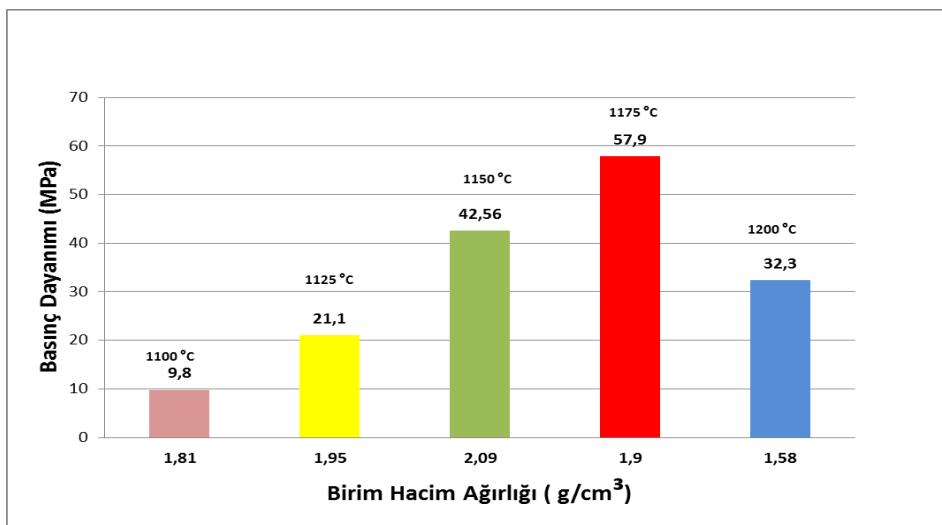
Yapılan optimizasyon deneylerinde Şekil 4.26 ve Şekil 4.27'ye göre; % 10 alçılı, 1125 °C 'de, 1 dkpiştirme sonucunda; birim hacim ağırlığın 1,95 g/cm³, basınç dayanımının 21,10 MPa olduğu tespit edilmiştir.% 10 Alçılı, 1150 °C 'de, 1 dkpiştirme sonucunda; birim hacim ağırlığın 2,09 g/cm³ olmasına karşılık, basınç dayanımının 42,56 MPa olduğu tespit edilmiştir. % 10 Alçılı, 1175 °C 'de, 1 dkpiştirme sonucunda ise; birim hacim ağırlığın 1,90 g/cm³, basınç dayanımının ise 57,90 MPa olduğu tespit edilmiştir.% 10 Alçılı, 1200 °C 'de, 1 dkpiştirme sonucunda numunenin birim hacim ağırlığının 1,58 g/cm³, basınç dayanımının ise 32,30 MPa olduğu başlangıç deneylerinde tespit edilmiştir. Bu durum sıcaklığa bağlı olarak

malzemenin erime sıcaklığına yaklaşarak boşluklu bir yapıya bürünerek dayanımının düşmesine neden olmaktadır.

Optimizasyon deneylerinin sonuçları irdelendiğinde, pişirme derecesi olarak en yüksek dayanımı veren ve optimum değer olarak; 1175 °C % 10 alçılı ve 1 dk pişirme seçilmiştir.



Şekil 4.26. %10 Alçılı ve 1 dk farklı pişirme sıcaklığı - basınç dayanımı ilişkisi



Şekil 4.27. %10 Alçılı ve 1 dk farklı pişirme sıcaklığında; BHA- basınç dayanımı ilişkisi

4.2.3. Fiziksel özellikler

Piştirme derecesi, alçı oranı ve piştirme süresi olarak, basınç dayanımı yönünden optimum değeri 1175 °C %10 alçılı ve 1 dkpiştirme aralığı vermiştir. Ayrıca aşağıdaki optimizasyon aralıkları için diğer fiziksel ve mekanik deneyler yapılmıştır. Üretilen bu numuneler üzerinde birim ağırlık, özgül ağırlık, su emme, porozite ve kompasite testleri ayrı ayrı yapılmıştır. Deneylerde TS 699 “Doğal yapı taşları - İnceleme ve laboratuvar deney yöntemleri” standardı esas alınarak yapılmıştır. Optimizasyon deneyleri kapsamında Çizelge 4.7.’de 1125 °C, 1150 °C ve 1175 °C’lerinde her üç piştirme aralığı için yapılan testlerde birim hacim ağırlığı ve basınç dayanımı deneyleri yapılarak değerleri tespit edilmiştir.

Çizelge 4.8’ de numuneler üzerine yapılan ağırlıkça ve hacimce su emme deney sonuçları görülmektedir. Hacimce su emme yüzdeleri ağırlıkça su emme yüzdelerinin yaklaşık olarak iki katı olarak tespit edilmiştir. Numunelerin su emme değerlerine göre en uygun değeri, ağırlıkça % 0,15 ve hacimce % 0,30 ortalamayla 1175°C’ de piştirilen numuneler vermiştir.

Çizelge 4.8. % 10 Alçılı, 1 dk pişirmeli numunelerinde su emme tespiti

Num. no	Piştirme sıcaklığı (°C)	Ağır.Su Emme (%)	Ağırlıkça SuEmme Ort. (%)	Hacimce SuEmme (%)	Hacimce SuEmme (%) Ort.
400	1125	5,28	5,45	10,22	10,50
401		5,14		9,98	
402		5,93		11,30	
403	1150	1,56	1,32	3,25	2,78
404		1,24		2,61	
405		1,16		2,48	
406	1175	0,06	0,15	0,13	0,30
407		0,19		0,40	
408		0,19		0,38	

Çizelge 4.9’da yoğunluk deney sonuçları 1125 °C, 1150°C ve 1175 °C’ de pişirilen numuneler için ayrı ayrı tespit edilmiştir. Deney sonuçları her üç gurubun yoğunluklarının ortalama 2,42 g/cm³ olduğunu göstermektedir. Kısaca pişirilme sıcaklıklarının malzeme yoğunluğuna önemli bir etkisi olduğu söylenemez.

Çizelge 4.9. % 10 Alçılı, 1 dk pişirilen numunelerde yoğunluk tespiti

Num. no	Piştirme sıcaklığı (°C)	Yoğunluk (g/cm ³)	Yoğunluk Ortalaması (g/cm ³)
400	1125	2,40	2,41
401		2,41	
402		2,42	
403	1150	2,42	2,42
404		2,41	
405		2,42	
406	1175	2,42	2,42
407		2,40	
408		2,43	

Numunelerin gözeneklilik ve doluluk hesapları, birim hacim ağırlığı ve yoğunluk değerleri üzerinden yapılmıştır. Çizelge 4.10’ te görüldüğü gibi 1125 °C’ de pişirilen numunelerin ortalama gözeneklilik oranı % 19, doluluk oranı ise % 81 olarak tespit edilmiştir. 1150 °C’ de pişirilen numunelerin gözeneklilik oranı % 14, doluluk oranı ise % 86 civarında olduğu görülmektedir. 1175 °C’ de pişirilen numunelerin ise gözeneklilik oranı % 21, doluluk oranı ise % 79 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.10. %10 Alçılı, 1 dkpişirilen numunelerin fiziksel özellikleri

Num no	Piştirme sıcaklığı(°C)	Birim Hacim Ağırlığı (g/cm ³)	Birim Hacim Ağırl. Ort. (g/cm ³)	Yoğunluk (g/cm ³)	Yoğunluk Ort. (g/cm ³)	Porozite (%)	Porozite (%)	Kompasite (%)	Kompasite Ort. (%)
400	1125	1,99	1,95	2,40	2,41	17,08	19,08	82,92	80,92
401		1,92		2,41		20,33		79,67	
402		1,94		2,42		19,83		80,17	
403	1150	2,09	2,09	2,42	2,42	13,64	13,66	86,36	86,34
404		2,08		2,41		13,69		86,31	
405		2,09		2,42		13,64		86,36	
406	1175	1,84	1,90	2,42	2,42	24,00	21,38	76,03	78,62
407		1,95		2,40		18,75		81,25	
408		1,91		2,43		21,40		78,60	

Çizelge 4.10'da 1125 °C, 1150 °C ve 1175 °C' de piştirilen numunelere TS 699 standardı esas alınarak uygulanan, fiziksel deney sonuçları; numunelerin tek tek sonuçları verildiği gibi, aynı grup numunelerin ortalama sonuçları da sunulmuştur.

4.2.4. Mekanik özellikler

Çizelge 4.11'den anlaşılacağı gibi üretilen bu numuneler üzerinde TS 2824 EN 1338 standardına göre yapılan dikey aşınma deney sonuçları irdelendiğinde piştirme sıcaklığı arttıkça aşınma miktarı azalmaktadır. Yani aşınma direncide aynı yönde artmaktadır.

Çizelge 4.11. % 10 Alçılı, 1 dkpiştirilen numunelerin dikey aşınma değeri

Num. no	Piştirme sıcaklığı (°C)	Dikey Aşınma (mm)	Dikey Aşınma Değeri (mm)
410	1125	26	26
411		24	
412	1150	21	22
413		22	
414	1175	20	20
415		19	

*Aynı cins numunelerin aşınma değerinden yüksek olanı, aşınma dayanımı olarak kabul edilir.

Çizelge 4.12. % 10 Alçılı, 1 dk pişirilen numunelerin dona dayanıklılık tespiti

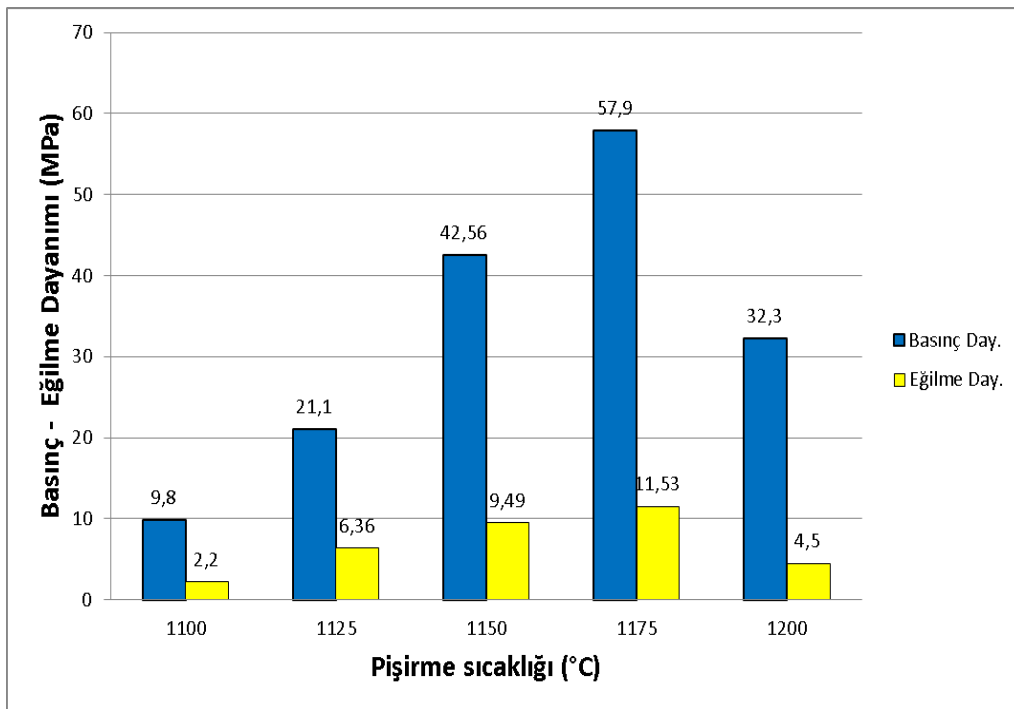
Num. no	Piştirme sıcaklığı (°C)	Deneş Öncesi Ağırlık (g)	Deneş Sonu Ağırlık (g)	Deneş Öncesi Basınç Dayanımı (MPa)	Deneş Önce. Bas. Day. Ort. (MPa)	Deneş Sonu Bas. Day. (MPa)	Basınç Dayanım Ort. (MPa)	Deneş Sonu Day. Kaybı Ort. (%)
400	1125	151,6	151,2	20,76	21,10	20,60	20,85	0
401		163,3	162,8	21,8		21,50		
402		153,5	153,0	20,75		20,45		
403	1150	147,8	147,6	45,02	42,56	45,20	42,70	0
404		161,5	161,4	42,05		41,70		
405		154,6	154,5	40,61		41,20		
406	1175	157,3	157,3	58,74	57,90	59,20	57,63	0
407		152,4	152,4	55,14		54,10		
408		160,2	160,2	59,83		59,60		

Dona dayanıklılık deney sonuçları Çizelge 4.12' teki verilere göre irdelendiğinde her üç sıcaklık gurubu (1125 °C, 1150°C ve 1175 °C) numunelerin TS 699 standardına göre don dayanım performansının yüksek olduğu tespit edilmiştir. Deney sonucunda bütün numunelerin yapısını koruduğu ve fiziksel kayba uğramadığı görülmektedir. Numunelerde kırılma, dökülme ve kütle kaybının yok denecek kadar az olduğu görülmüştür. Bütün numunelere don deneyi sonrası uygulanan basınç testleri sonucunda dayanım kaybına uğramadığı, numunelerin deney öncesi basınç dayanım değerlerini koruduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.13. % 10 Alçılı, 1 dk pişirilen numunelerinin mekanik özellikleri

Num no	Piştirme sıcaklığı (°C)	Eğilme Day. Ort (MPa)	Basınç Day. Ort (MPa)	Don Sonu Bas. Day. Ort. (MPa)	Don Dayn. Azalması (%)	Dikey Aşınma Day. (mm)
400	1125	6,36	21,10	20,85	0	26
401						
402						
403	1150	9,49	42,56	42,70	0	22
404						
405						
406	1175	11,53	57,90	57,63	0	20
407						
408						

Çizelge 4.13'te 1125 °C, 1150 °C ve 1175 °C' de pişirilen numunelere TS 699 ve TS 2824 EN 1338 standartları esas alınarak uygulanan, fiziksel ve mekanik deney sonuçları sunulmuştur. Şekil 4.28'de görüldüğü gibi numunelerin pişirme sıcaklığı 1175 °C 'ye kadar arttıkça basınç ve eğilme dayanımları da doğru orantılı olarak artmaktadır. 1200 °C'de ise basınç ve eğilme dayanımının azaldığı görülmektedir. Numunelerin eğilme dayanımları basınç dayanımlarının yaklaşık % 20 kadar olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.28. %10 Alçılı, 1 dk ve farklı pişirme sıcaklığında; Basınç dayanımı-eğilme dayanımı ilişkisi

4.2.5. Optimum değer seçimi

1125 °C' de % 10 alçılı, 1 dk pişirilen birinci grup numuneler, 1150 °C' de % 10 alçılı, 1 dk pişirilen ikinci grup numuneler ve 1175 °C' de % 10 alçılı, 1 dk pişirilen üçüncü grup (1175 °C) numuneler üzerinde yapılan fiziksel ve mekanik deneylerin genel değerlendirmesi için; üretim yönünden, fiziksel ve mekanik özellikleri yönünden karşılaştırılması yapılmıştır.

Üretim yönünden karşılaştırma

Numune üretiminde her gurup için malzeme ve alçı girdi oranları aynıdır. Numune hazırlamada optimizasyon deneyleri için 75-600 µm öğütülmüş ham perlite ağırlığının % 10 oranınca alçı katılmıştır. Plastik kıvamı verecek şekilde su ilavesiyle hazırlanan harç kalıplandıktan sonra kalıplardan çıkartılarak 24 saat açık hava da kürlendikten sonra; 1125 °C, 1150 °C ve 1175 °C’ de üç ayrı gurupta 1 dk pişirilmiştir. Bütün numuneler aynı malzeme girdisine, aynı kürelemeye ve hedef sıcaklığa ulaştığında aynı pişirme süresine sahiptir.

Aynı miktarda numune pişirilmesinde harcanan elektrik enerjisi de kayıt altına alınmıştır. Bu kayıtlar göreceli olarak karşılaştırıldığında;

1125 °C % 10 alçılı ve 1 dkpişirme için; 21,53 KW,

1150°C %10 alçılı ve 1 dkpişirme için; 24,03 KW

1175 °C%10 alçılı ve 1 dkpişirme için; 24,65 KW enerji harcanmıştır.

Enerji harcamalarının 1125 °C’lik numunelerde 1150 ve 1175 °C’ lik numunelerden daha az olmasına karşılık, dayanım değerlerinin diğer guruplardan yaklaşık üç katı kadar düşük olduğu Çizelge 4.7’ de görülmektedir. Bu durum her üç gurup (1125 °C, 1150 °C ve 1175 °C) numunenin pişirme sıcaklığında harcanan enerjinin üretim dizaynında dayanım değerleri esas alınmasına neden olacaktır.

Fiziksel ve mekanik özellikleri yönünden karşılaştırma

1125 °C’lik birinci gurup numunelerin ortalama birim hacim ağırlığı 1,95 g/cm³ iken, 1150 °C’lik ikinci gurup numunelerde 2,09 g/cm³’e çıktığı; 1175 °C’lik üçüncü gurup numunelerde ise 1,90 g/cm³’e indiği görülmektedir. Buna karşılık her üç numunenin yoğunluğu ortalama 2,42 g/cm³ olarak tespit edilmiştir. Gözeneklilik değeri olarak birinci gurup (1125 °C) numunelerin ortalama % 19, ikinci gurup (1150 °C) numunelerin % 13, üçüncü gurup (1175 °C) numunelerin ise % 21’ e

çıktığı tespit edilmiştir. Ağırlıkça su emme oranlarında ise; birinci grup 1125 °C' li numunelerde % 5,45, ikinci grup 1150 °C'li numunelerde% 1,32' ye düştüğü, 1175 °C'li üçüncü grup numunelerde ise ortalama % 0,15 gibi çok küçük bir değerde kaldığı hesaplanmıştır.

1125 °C' lik birinci grup numunelerin basınç dayanım ortalaması 21, 10 MPa, 1150 °C'lik ikinci grup numunelerin basınç dayanım ortalaması birinci gruptan (1125 °C) yaklaşık iki kat artarak 42,56 MPa, 1175 °C'lik üçüncü grup numunelerin basınç dayanım ortalaması ise birinci grup (1125 °C) numunelerin dayanımından üç kat daha fazla artarak ortalama 57,90 MPa olarak elde edilmiştir. Numunelerin eğilme dayanımları da benzer lineer dayanım artışını göstermiştir. Çizelge 4.7 'den de anlaşılacağı gibi 1175 °C' de dayanımın maksimum seviyeye çıkmasından sonra 1200 °C, % 10 alçılı ve 1 dkpişirmeli numunelerde dayanımın 32,30 MPa' a düştüğü tespit edilmiştir.Çizelge 4.8' de görüldüğü gibi her üç sıcaklık gurubu (1125 °C, 1150°C ve 1175 °C) numunenin üretim girdileri aynı olmasına, enerji harcamaları birbirine yakın olmasına rağmen; 1175 °C' de üretilen numunelerde özellikle düşük su emme oranıyla, fiziksel özellikleri bakımından daha performanslı olduğu görülmektedir. Mekanik özellikleri bakımından 1175 °C' de üretilen numunelerin 1125 °C' de üretilen numunelerden yaklaşık % 300' ü kadar, 1150 °C' de üretilen numunelerden ise % 50 kadar daha fazla dayanım değerlerine ulaştığı belirlenmiştir.

Sonuç olarak, deneysel çalışmaların sonunda elde edilen bütün verilerin göstergeleri dikkate alındığında 1175 °C ,%10 alçılı ve 1 dkpişirme aralığında elde edilen numunelerin sonuçları optimumdeğerler olarak seçilmiştir. Bu çalışmada optimum değer olarak seçilen numunelerin fiziksel ve mekanik değerleri aşağıda gösterilmiştir.

Birim hacim ağırlığı

Yapılan ölçümler sonucu, optimum numunelerin ortalama birim hacim ağırlığı, 1,90 g/cm³ olarak tespit edilmiştir.

Yoğunluk

Piknometre yöntemiyle yapılan deney sonucunda optimum numunelerin ortalama yoğunluğu $2,42 \text{ g/cm}^3$ olarak tespit edilmiştir.

Su emme

Seçilen optimum numunelerin ağırlıkça su emme oranı % 0,15 olarak, hacimce su emme oranı % 0,30 olarak tespit edilmiştir.

Porozite (gözeneklilik)

Optimum numunelerin ortalama porozitesi % 21,38 olarak bulunmuştur.

Komposite

Optimum numunelerin ortalama kompositesi % 78,62 olarak hesaplanmıştır.

Eğilme dayanımı

Optimum numunelerin ortalama eğilme dayanımı 11.53 MPa olarak tespit edilmiştir.

Basınç dayanımı

Serbest basınç dayanımı sonucunda optimum numunelerin ortalama basınç dayanımı 57,90 MPa olarak belirlenmiştir.

Aşınma dayanımı

Numuneler üzerinde yapılan 75 devirlik düşey aşınma sonunda, ortalama aşınma dayanım değeri 20 mm'dir.

Donma-çözölmeye dayanıklılık

Dona dayanıklılık deney sonucunda optimum değer olarak seçilen 1175 °C' lik numunelerde gözle görülür hiçbir deformasyona rastlanmamıştır. Deney sonucunda numunelerde herhangi bir kırılma, çatlama ve döküntü oluşmamıştır. Don deneyi sonucu numuneler üzerinde yapılan serbest basınç dayanımı ortalaması 57,63 MPa olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlar don deneyi sonucunda numunelerde basınç dayanımı kaybı olmadığını göstermektedir.

4.2.6. Mikro yapı özellikleri

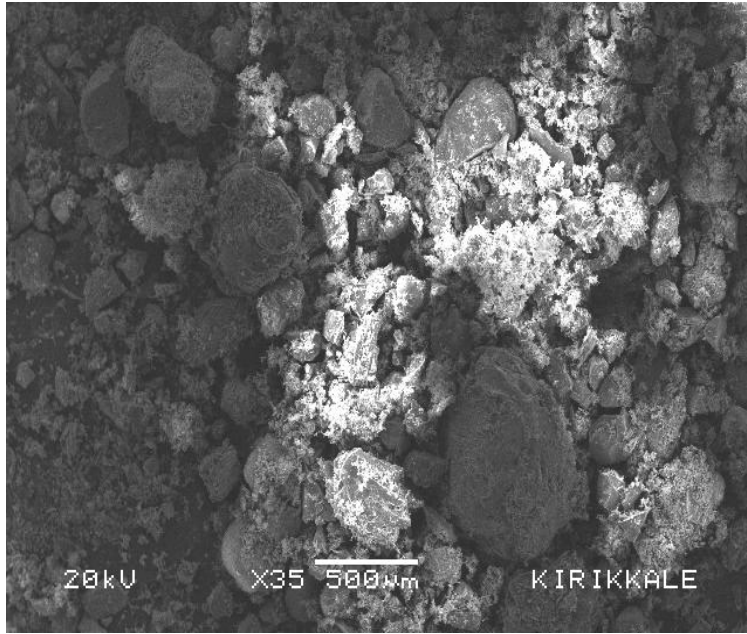
Yüksek sıcaklık etkisinde kalan numunelerin mikro yapısal özellikleri

Çalışmada ham perlit ve işlem görmüş perlitin mikro yapısal özellikleri araştırılmıştır. Yüksek sıcaklık görmeyen (referans, ham) örneklerle, yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan örneklerin (1125°C, 1150°C, 1175°C ve 1200°C) SEM görüntülerinin mikro yapısal özellikleri Tarayıcı Elektron mikroskopu ile değerlendirilmiştir. Elde edilen verilerde, alçıyla hazırlanan ve fırınlanan numunelerin SEM görüntülerinde, ısıl işlemin etkisi, net olarak görülebilmektedir. Farklı ısıl işlem görmüş masif ürünler yaklaşık 35 ve daha büyük görüntülerde net olarak görülebilmektedir.

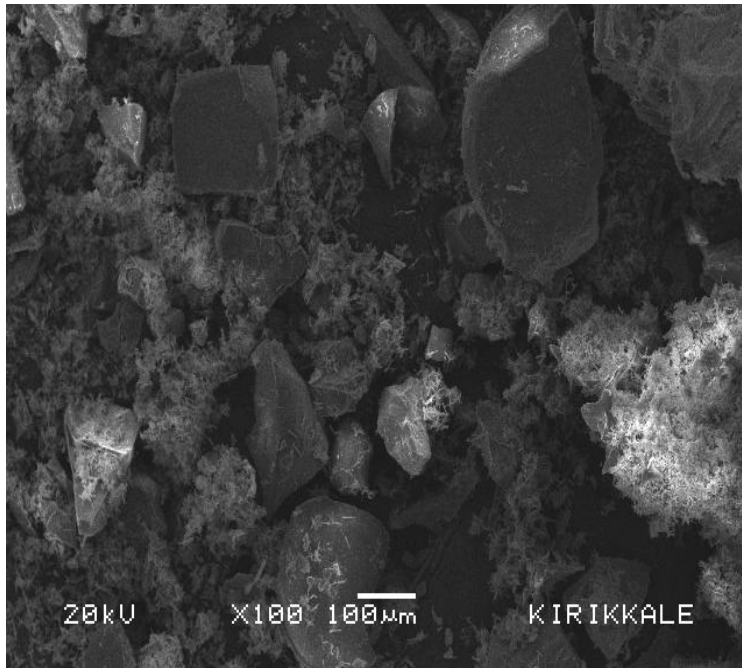
Referans numunelerinin iç yapısı

Referans numune olarak baz alınan ham perlitin SEM görüntüleri farklı ölçeklerde alınmış ve Şekil 4.29- 4.46' de verilmiştir.

Şekil 4.29'a göre; referans örneklerinde yüksek sıcaklık olmaması harçların genel yapısında değişiklik oluşturmamıştır. Harçlarda boşluklu bir yapı oluştuğu görülmektedir. Referans örneklerinde aderans bağlarının oluştuğu bir oluşumda çok az görülmektedir.

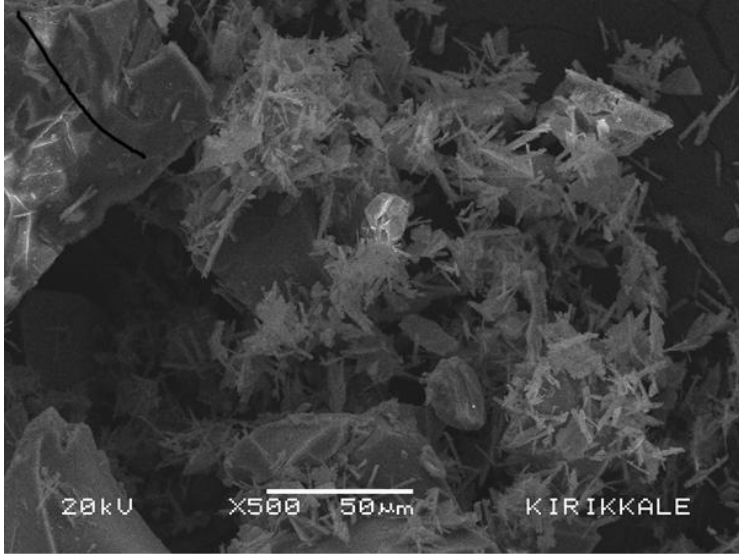


Şekil 4.29. Isıl işlem görmemiş numunenin 35x büyütülmüş SEM görüntüsü



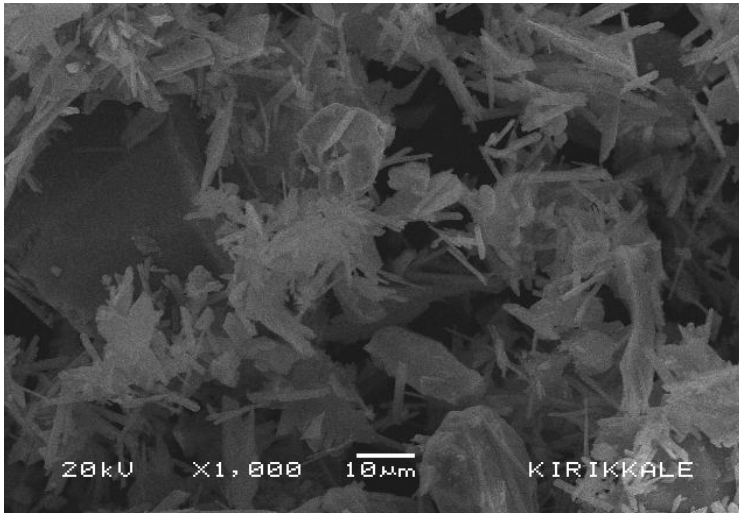
Şekil 4.30 . Isıl işlem görmemiş 100x büyütülmüş SEM görüntüsü

Şekil 4.30'a göre; referans numunenin yüksek sıcaklık olmaması harçları yapısında değişiklik oluşturmamıştır. Harçlarda boşluklu bir yapı olduğu görülmektedir. Referans numunelerin aderans bağlarını olduğu bir oluşumda çok az görülmektedir.



Şekil 4.31 . Isıl işlem görmemiş numunenin 500x büyütülmüş SEM görüntüsü

Şekil 4.31'a göre; referans numunelerde yüksek sıcaklık olmaması harçlarda sağlam yapıyı oluşumlar oluşturmadığı görülmektedir. Ayrıca boşluklu bir yapı oluştuğu görülmektedir.

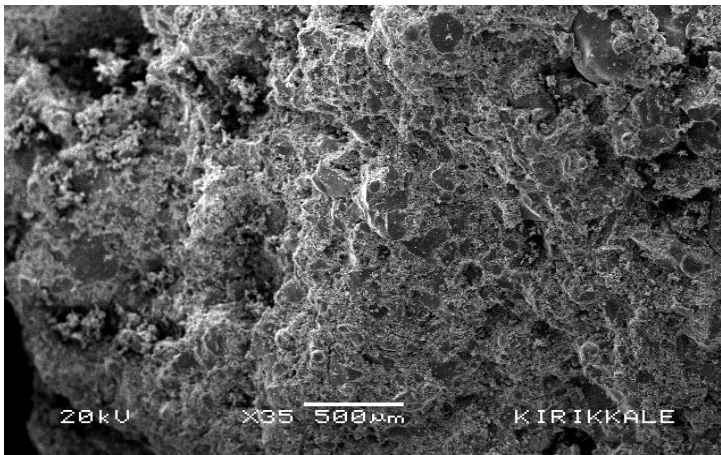


Şekil 4.32 . Isıl işlem görmemiş numunenin 1000x büyütülmüş SEM görüntüsü

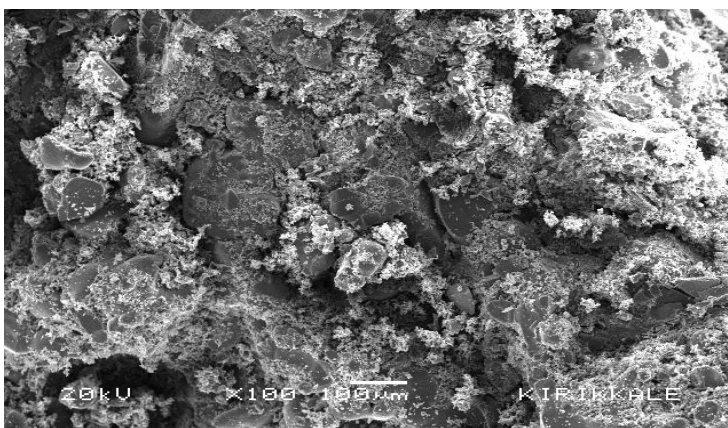
Şekil 4.32'e göre 1000 büyütülmeli SEM görüntüsünde boşluklu yapı daha net olarak görülmektedir.

Isıl işlem görmüş numunelerinin iç yapısı

Farklı ısılarda pişirilmek suretiyle ürün haline getirilen numunelerin SEM görüntüleri şekil 4.33- 4.46 de verilmiştir. Şekil 4.33'ye göre; 1125°C de ısıl işlemlili 35x büyütülmüş SEM görüntüsünde yüksek sıcaklığı etkisi, referans örneklerine göre harçları yapısında değişiklik oluşturmuştur. Bu etki sıcaklığın artması ile harçların yoğunluk artışı şeklinde oluşmuştur. Yoğunluk artışı ile harçların boşluk yapısının azaldığı görülmektedir.



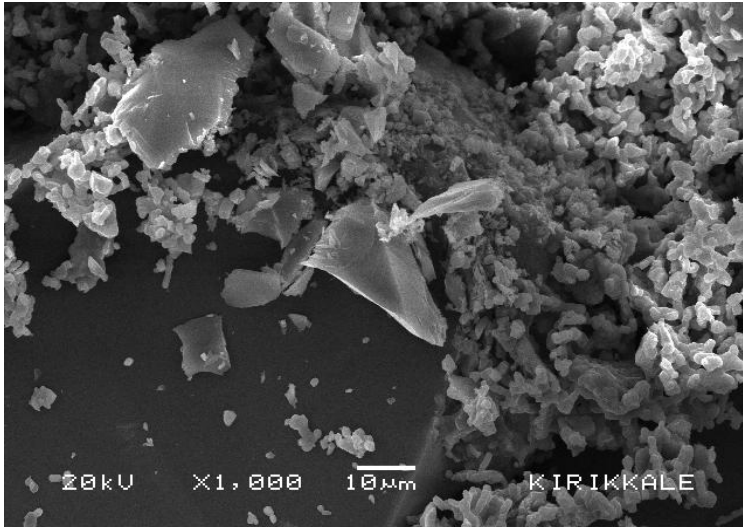
Şekil 4.33. 1125°C' de ısıl işlemlili numunenin 35x büyütülmüş SEM görüntüsü.



Şekil 4.34. 1125°C' de ısıl işlemlili numunenin 100x büyütülmüş SEM görüntüsü.

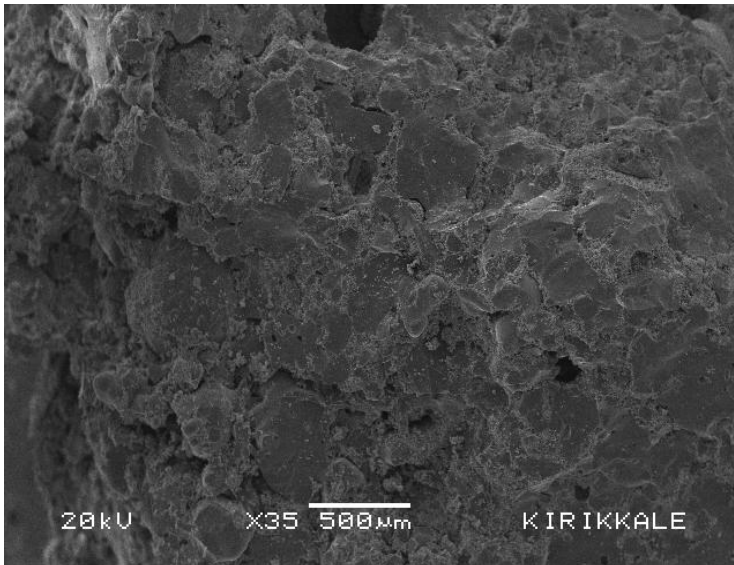
Şekil 4.34'e göre; 1125°C de ısıl işlemlili 100x büyütülmüş SEM görüntüsünde 1125°C sıcaklığı etkisi ile ergime yapmıştır. Bu ergime sonucu harçların yoğunluk

artışının gerçekleştiği söylenebilir. Bu durum sonucu harçların boşluk yapısının azaldığı görülmektedir.



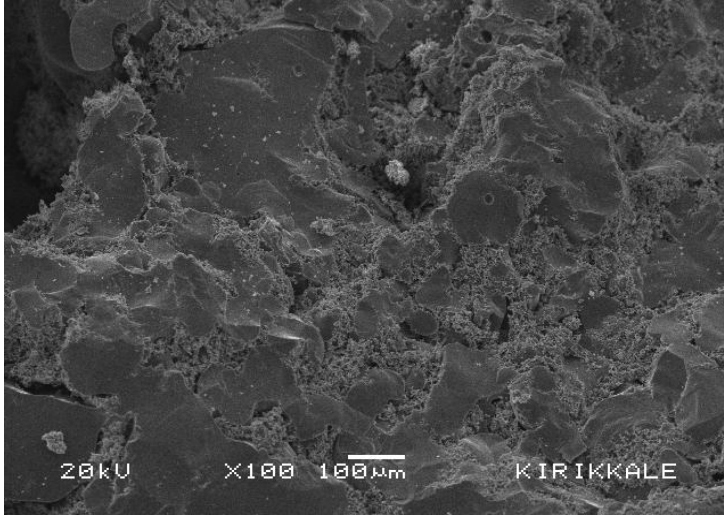
Şekil 4.35 . 1125°C' de ısıl işlemlenmiş numunenin 1000x büyütülmüş SEM görüntüsü.

Şekil 4.35'ye göre; 1125°C' de ısıl işlemlenmiş 1000x büyütülmüş SEM görüntüsünde 1125°C sıcaklığı etkisi, harçların yoğunluğunun artması şeklinde olmuştur. Harçların yoğunluk yapısının arttığı görülmektedir.



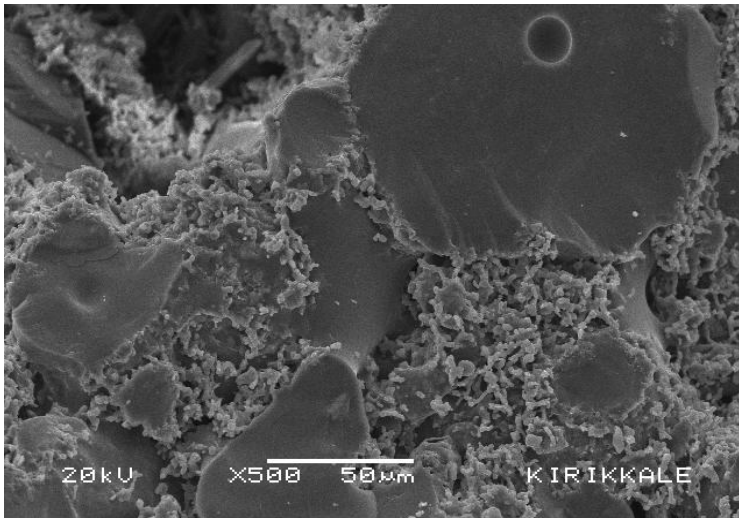
Şekil 4.36 . 1150°C'de ısıl işlemlenmiş numunenin 35x büyütülmüş SEM görüntüsü.

Şekil 4.36'ya göre; 1150°C de ısıl işlemlili 35x büyütölmüş SEM görüntüsünde yüksek sıcaklığı etkisi, referans örneklerine ve 1125°C de ısıl işlemlili 35 büyötmeli SEM görüntüsüne göre harçları yapısında değışiklik oluşturmuştur. Bu etki harçların boşluk yapısını oldukça azaltmıştır.



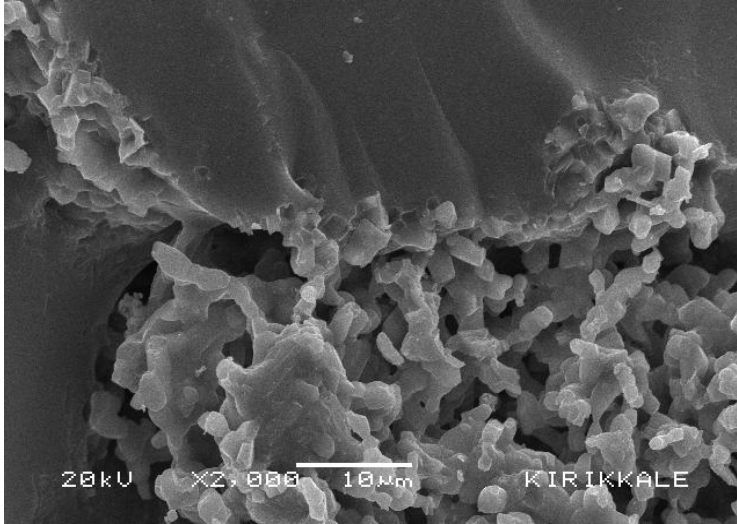
Şekil 4.37. 1150°C' de ısıl işlemlili numunenin 100x büyötmüş SEM görüntüsü.

Şekil 4.37'ye göre; Alçıyla hazırlanarak fırınlanan doğal perlit 1150°C de ısıl işlemlili 100x büyötmüş SEM görüntüsünde yüksek sıcaklığı etkisi ile malzemede düzgün yüzeyli bir bütönlük meydana getirdikleri görölmektedir.



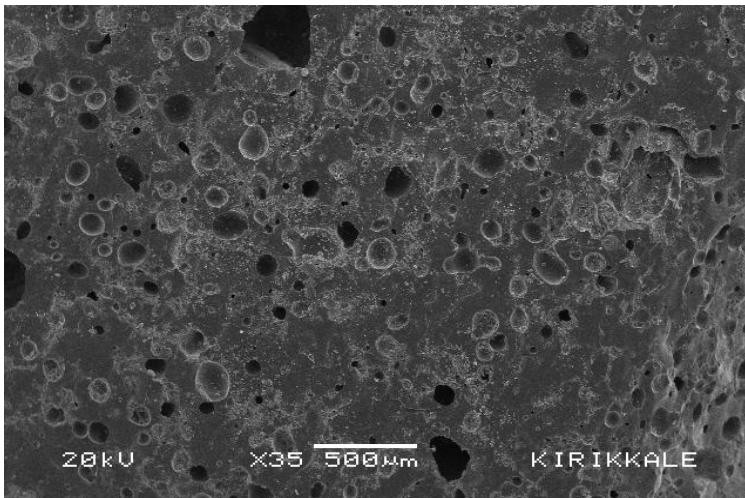
Şekil 4.38. 1150°C'de ısıl işlemlili numunenin 500x büyötmüş SEM görüntüsü.

Şekil 4.38'e göre; Alçıyla hazırlanarak fırınlanan doğal perlit 1150°C de ısıl işlemlili 500x büyütülmüş SEM görüntüsünde yüksek sıcaklığın etkisi ile birbirlerine kaynama yapan bir görünümün yanı sıra erimeyi tamamlamayan perlitli kısımlar görülmektedir.



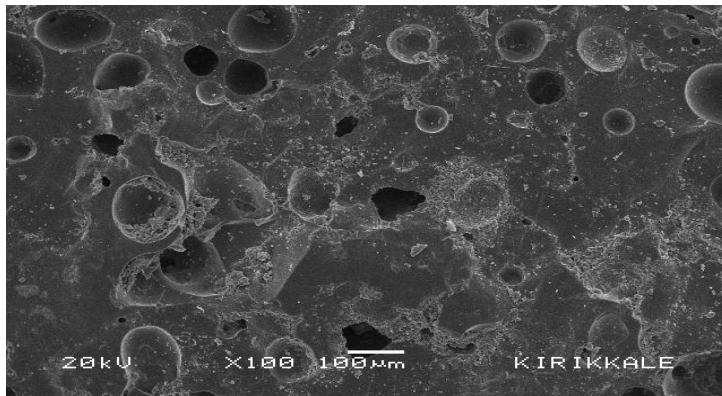
Şekil 4.39.1150°C'de ısıl işlemlili numunenin 2000x büyütülmüş SEM görüntüsü.

Şekil 4.39'a göre; Alçıyla hazırlanarak fırınlanan doğal perlit 1150°C de ısıl işlemlili 2000x büyütülmüş SEM görüntüsünde yüksek sıcaklığın etkisi ile birbirlerine kaynama yapan bir perlit yapısı net olarak görülmektedir.



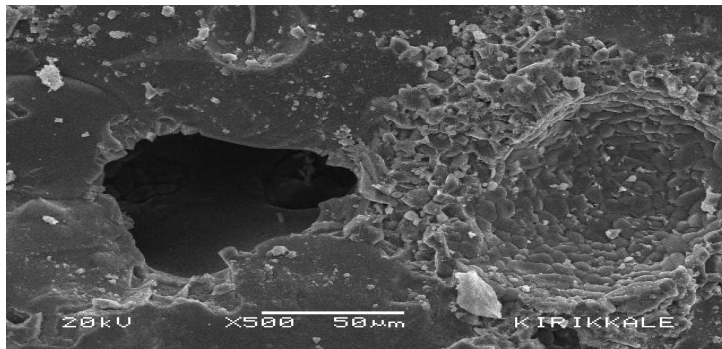
Şekil 4.40. 1175°C' de ısıl işlemlili numunenin 35x büyütülmüş SEM görüntüsü

Şekil 4.40'a göre; 1175°C de ısıtılmış 35x büyütülmüş SEM görüntüsünde yüksek sıcaklığı etkisi, referans örneklerine ve 1150°C de ısıtılmış 35 büyütülmüş SEM görüntüsüne göre harçları yapısında değişiklik oluşturmuştur. Bu etki harçların boşluk yapısını arttırdığı görülmektedir. Bunun sebebinin ise 1175°C de boşluk yapısını doldurması ve sıcaklığın etkisi ile yeniden birbirlerinden bağımsız boşlukların oluştuğu söylenebilir.



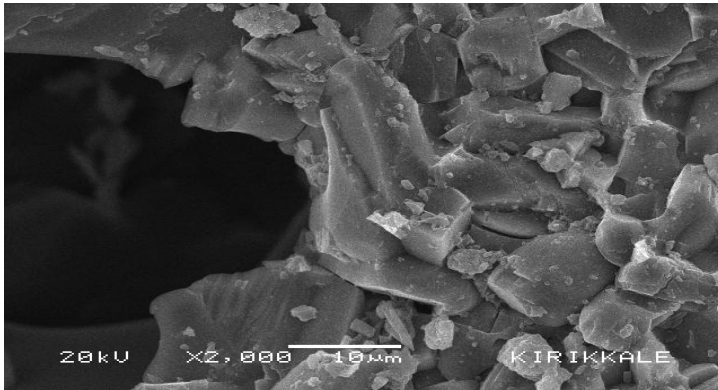
Şekil 4.41. 1175°C'de ısıtılmış numunenin 100x büyütülmüş SEM görüntüsü

Şekil 4.41'e göre; 1175°C'de ısıtılmış 100x büyütülmüş SEM görüntüsünde yüksek sıcaklık, harçların ergimesi şeklinde harçların yapısında değişiklik oluşturmuştur. Bu etki sonucu harçların yapısında dolu kısımların yoğunluğunun yanında az sayıda boşluk oluşturduğu net olarak görülebilmektedir. Bu durum sıcaklık etkisi ile kaynama yaparak boşluk yapısını doldurması ve sıcaklığın etkisi ile yeniden birbirlerinden bağımsız boşlukların oluşturması şeklinde açıklanabilir.



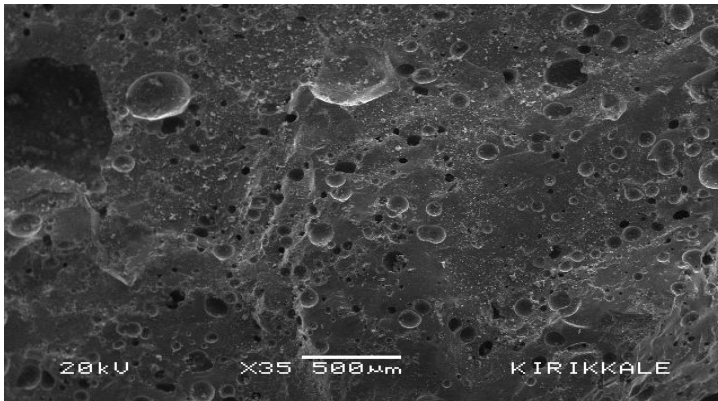
Şekil 4.42. 1175°C'de ısıtılmış numunenin 500x büyütülmüş SEM görüntüsü

Şekil 4.42'ye göre; 1175°C'de ısıl işlemlili 500x büyütülmüş SEM görüntüsünde yüksek sıcaklığı etkisi, ile malzeme eriyerek viskos bir yapı oluşturmuş soğuması sonucu olarak ise bu yapıda çok az boşluklar oluşturduğu görülmektedir.



Şekil 4.43. 1175°C'de ısıl işlemlili numunenin 2000x büyütülmüş SEM görüntüsü

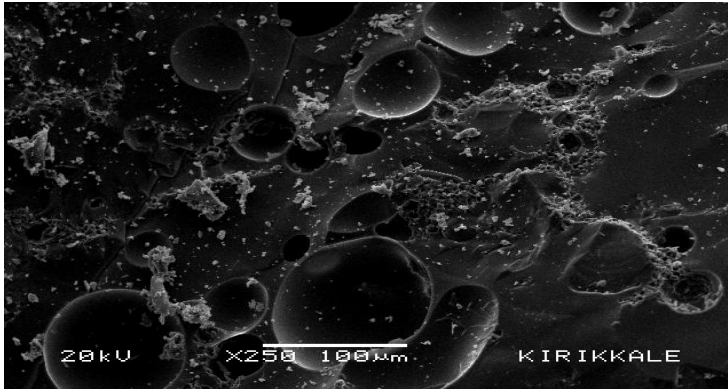
Şekil 4.43'e göre; 2000x büyütülmüş SEM görüntüsünde 1175°C'de yüksek sıcaklığı etkisi, ile malzemenin eriyip soğuması sonucu az boşluklu kristalleşmeler olduğu görülmektedir.



Şekil 4.44. 1200°C'de ısıl işlemlili numunenin 35x büyütülmüş SEM görüntüsü

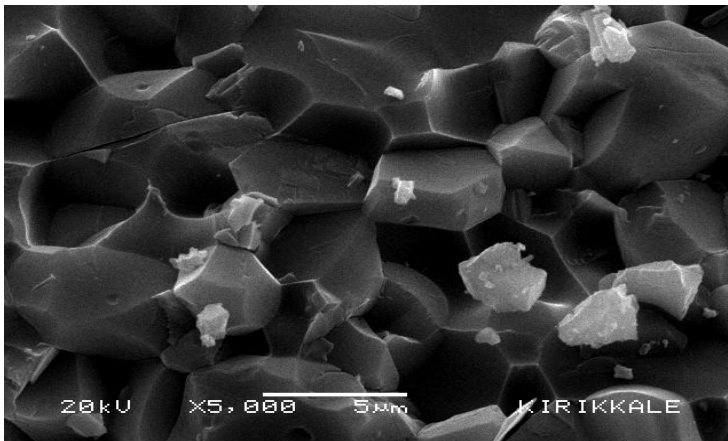
Şekil 4.44'e göre; 1200°C'de ısıl işlemlili 35x büyütülmüş SEM görüntüsünde yüksek sıcaklığı etkisi, 1150°C ve 1175°C'de ısıl işlemlili 35 büyütülmeli SEM görüntüsüne göre harçlarda mikro ve makro boyutta boşluk miktarını arttırdığı görülmektedir. Bu etki harçların boşluk yapısını arttırdığı görülmektedir. Bunun sebebinin ise 1200°C'de boşluk miktarının artma sebebi ise sıcaklığın belli bir artışından sonra

viskos yapı içerisine boşluk oluşturmaktadır. Bu boşluklar birbirlerinden bağımsız olduğu görülmektedir.



Şekil 4.45. 1200°C’de ısıtılmış numunenin 250x büyütülmüş SEM görüntüsü

Şekil 4.45’e göre; 1200°C’de ısıtılmış 250x büyütülmüş SEM görüntüsünde yüksek sıcaklık, harçların kaynaması şeklinde harçların yapısında değişiklik oluşturmuştur. Bu etki sonucu harçların yapısında dolu kısımların yoğunluğunun yanında mikro ve makro boyutta birbirlerinden bağımsız boşluk artışı olduğu net olarak görülebilmektedir.



Şekil 4.46. 1200°C’de ısıtılmış numunenin 5000x büyütülmüş SEM görüntüsü

Şekil 4.46’ya göre; 5000x büyütülmüş SEM görüntüsünde 1200°C’de yüksek sıcaklığı etkisi, ile malzemenin eriyip soğuması sonucu boşluklu kristalleşmeler olduğu görülmektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, ham perlitin çağdaş üretim teknikleriyle yeni bir yapı malzemesi üretiminde kullanılması hedeflenmiş ve “ısıtım işlem görmüş ham perlit ile yeni nesil yapı malzemesi geliştirilmesi” araştırılmıştır. Deneysel bulgularından faydalanılarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. Numunelerin 900 °C, 950 °C, 1000 °C ve 1050 °C sıcaklıkta ve 1, 30, 60, 90 ve 120 dk pişirme sürelerinde basınç dayanımı değerleri ölçülemedi.
2. 1100 °C’ de 1 dk pişirmede dayanım ölçülmemiş, 30 dk pişirme süresinde ve malzemedeki alçı oranına bağlı olarak 16-33 MPa arasında basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir.
3. 1150 °C’ de en uygun pişirme aralığı; % 10 alçı, 1 dk pişirmeyle ortalama birim hacim ağırlığı 1,99 g/cm³ ve basınç dayanımı 43 MPa olarak tespit edilmiştir.
4. 1200 °C’ de 1 dk pişirme süresinde 1,65 g/cm³ birim hacim ağırlığı, 30 MPa basınç dayanımı tespit edilmiştir. 1200 °C’ de 30 dk pişirmede ortalama 1,50 g/cm³ birim hacim ağırlığına, basınç dayanımının ise 25 MPa’ a düştüğü belirlenmiştir. Numunelerin 1200 °C, 60 dakikada eridiği tespit edilmiştir.
5. Yapılan mikro yapı çalışmasında; 1125°C, 1150°C, 1175°C ve 1200°C sıcaklıklarda yapılan çalışmada perlit agregalar sıcaklık etkisi ile erime yaprak viskoz bir oluşum gösterdiği anlaşılmaktadır. Bu erime sonucu numunelerde yoğunluk artışının yanında mikro ve makro boyutta birbirlerinden bağımsız boşluklar oluşturduğu gözlemlenmiştir. Boşluk miktarındaki artış özellikle 1200°C de olduğu görülmüştür. Fakat bu oluşum sadece 1200°C de değil diğer sıcaklıklarda da olduğu gözlemlenmiştir. 1125°C, 1150°C, 1175°C ve 1200°C sıcaklıklarda yapılan çalışmada optimum boşluk miktarının 1175°C de olduğu görülmüştür.

6. Yapılan optimizasyon deneyleri sonucunda 1175 °C, % 10 alçılı, 1 dkpişirme aralığı optimum değer olarak tespit edilmiştir.
7. Optimum değer olarak seçilen numunelerinden elde edilen fiziksel ve mekanik deney sonuçlarına göre;
 - a- Numunelerin ortalama birim hacim ağırlığı 1,90 g/cm³ olmasına karşılık, yoğunluğu 2,42 g/cm³ tespit edilmiştir.
 - b- Aynı numunelerin ortalama porozitesi % 21,38, kompasitesi % 78,62 olarak hesaplanmıştır.
 - c- Elde edilen optimum elemanın eğilme dayanımı 11,53 MPa, ortalama basınç dayanımı ~58 MPa ve dikey aşınma değeri 20 mm ile beton elemanların en üst değerine ulaşmıştır.
 - d- Üretilen optimum numunenin% 0,15 düşük su emmesi oranıyla ve don tesirlerinden etkilenmemesi nedeniyle zemin döşemesi için kaplama blokları ve zemin döşemelerinde kullanılmak açısından, beton bordür taşlarının % 6'lık su emme limitiyle karşılaştırıldığında, üretilen yeni ürünü daha avantajlı bir konumdadır.
8. Çalışmada elde edilen elemanın özelliklerinin, TS 2824 EN 1338 zemin döşemesi için kaplama blokları ve TS 436 EN 1340 zemin döşemesi için beton bordür taşları standartlarındaki beton elemanların özelliklerinden üstün performansa sahip olduğu görülmektedir.
9. Beton elemanların ortalama birim hacim ağırlığı 2,40 g/cm³, basınç dayanımı ortalama 30-40 MPa değerine karşılık, çalışmadan elde edilen numunenin birim hacim ağırlığı 1,90 g/cm³, basınç dayanımı ~58 MPa olması yeni ürünün inşaat sektöründe kabulünü kolaylaştıracaktır.
10. Beton elemanların standarttaki dayanımına ulaşmak için 28 günlük uzun kürleme süresine karşı, üretilen yapı elemanının 1 günlük süre sonunda nihai dayanımına ulaşip kullanıma hazır hale gelmesi yeni ürün için önemli bir avantajdır.

11. Elde edilen ürününün 1200 °C, % 10 alçıyla 1 dkpişirme sonunda, ortalama birim hacim ağırlığının 1,65 g/cm³, ortalama basınç dayanımının 30 MPa'ın üzerinde olması bu ürünü taşıyıcı duvar blok elemanı olarak kullanılmasına mümkün kılmaktadır.

Sonuç olarak; üretilen yeni ürünün, ham perlitin sadece öğütülmek suretiyle doğrudan kullanım kolaylığına sahip olması, Türkiye'de bol rezervinin bulunması, girdi ve üretim maliyetinin inşaat sektöründeki muadili elemanların maliyetlerinden daha düşük olmasına karşılık teknolojik yönden daha üstün performansa sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu durum perlitten elde edilen ürünün yeni ve kapsamlı çalışmalarla endüstriyel üretim boyutuna taşınabileceğini göstermektedir.

5.2. Öneriler

İleriki çalışmalarda, ham perlitin jeopolimer beton üretiminde alçı bağlayıcıya ilave olarak, alkali tuzların karışımı ile elde edilecek ürünün performans değerleri belirlenebilir.

KAYNAKLAR

1. DPT, “Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Yapı Malzemeleri III (Pomza-Perlit-Vermikülit-Flogopit-Genleşen Killer) Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu”, **Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı, DPT:2530-ÖİK:546**, (2001).
2. Web : Perlite Institute, ” Perlite development process”, www.perlite.org (2011).
3. İnternet: Tuğla ve Kiremit Sanayicileri Derneği “Tuğlanın tarihçesi,” http://www.tukder.org/foto_galeri/1392010174427%C4%B0.pdf(2010).
4. Lingling, X., Wei, G., Tao, W. and Nanru, Y., “Study on Firebricks With Replacing Clay By Fly Ash in High Volume Ratio”, **Construction and Building Materials**, 19: 243-247, (2005).
5. Onche, E.O., Ugheoke, B. I., Lawal, S.A., Dickson, U. M., “Effect of Rice Husk and Diatomite on The Insulating Properties of Kaolin-Clay Firebricks”, **Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies**, 11: 81-90(2007).
6. Şimşek, O., “Yapı Malzemeleri 2”, **Seçkin Yayınevi**, Ankara, 2007.
7. Zeybek, O., “Uçucu Kül Esaslı Tuğla Üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, **Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, (2009).
8. Lochonic, K., ” Lightweight CMU weight off our shoulders”, **Masonry Institute of Michigan 1989**, 2009.
9. Hodul, Y., “Genleştirilmiş Perlit Üretimi Sanayi Profili”, **Sanayi ve Ticaret Bakanlığı**, Ankara, 2009.
10. Topçu, İ. B., Işıkdag, B., “Manufacture of high heat conductivity resistant clay bricks containing perlite”, **Building and Environment**, 42: 3540-3546(2007).
11. Türkmen, İ., Kantarcı, A., “Effects of expanded perlite aggregate and different curing conditions on the physical and mechanical properties of self-compacting concrete”, **Building and Environment**, 42: 2377-2383(2007).
12. Topçu, İ. B., Işıkdag, B., “Effect of expanded perlite aggregate on the properties of lightweight concrete”, **Journal of Materials Processing Technology**, 204: 34-38(2008).
13. Demirboğa, R., Örüng, İ., Gül, R., “Effects of expanded perlite aggregate and mineral admixtures on the compressive strength of low density concretes”, **Cement and Concrete Research**, 31: 1627-1632(2001).

14. Demir, İ., Başpınar, M. S., “Mermer tozu artıklarının (Havuz çökeltisi) hafif yapı blokları üretiminde kullanılması”, *Türkiye IV. Mermer Sempozyumu*, Afyon,213-220(2003).
15. Yu, L., H., Ou, L., Lee, L., L., “Investigation on pozzolanic effect of perlite powder in concrete”, *Cement and Concrete Research*, 33: 73-76(2003).
16. Erdem, T. K., Meral, Ç., Tokyay, M., Erdoğan, T. Y., 2006, “Use of perlite as a pozzolanic addition in producing blended cements”, *Cement and Concrete Composites*, (2006).
17. Demirboğa, R., Gül, R., “Thermal conductivity and compressive strength of expanded perlite aggregate concrete with mineral admixtures”, *Energy and Buildings*, 35: 1155-1159(2003).
18. Tokcan, G., “Etibank Cumaovası Perlit Tesisleri”, *I. Ulusal Perlit Kongresi*, Ankara, 169-174(1977).
19. Ceylan, A.,Uz, V., Taşcı, E., “Ham Perlit ve Patlatılmış Perlit İlavesinin Terra Cotta Bünyesi Üzerine Etkileri”, *4. Uluslararası Eskişehir Pişmiş Toprak Sempozyumu*, Eskişehir, 199-215(2010).
- 20- Şimşek, O., Gökçe, H.S., “Perlit Agregasının Pesimum Reaktif Agrega Oranının Farklı Yöntemlerle İncelenmesi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25 (4): 839-846 (2010).
21. Davidovits, J., “Geopolymer Chemistry and Applications”,*Saint Quantin*, France (2008).
22. Kim D.,Ting H.L.,Chilingar G.V.,Yen F.Y., “Geopolymer formation and its uniqueProperties” *Environ.Geol.*,51: 103-111(2000).
23. Brady, J.E., Holum, J.R., “Chemistry, The Study Of Matter And Its Changes,2nd ed.”,*John Wiley & Sons Canada*, 138 page(1996).
24. Keyte, L. M., Deventer, S. J. V., “The Effect Of Coal Ash Composition OnProperties Of Waste Based Geopolymer” *Advances in geopolymer science andtechnology Springer Science*, (2006).
25. Pinto, A.T., Viera, E., “Repairing of damaged stone in monumentsand stone buildings” , *Proceedings of world congress geopolymer*, France, (2005).
26. Latella, B.A., Perera, D.S., “Adhesion of glass to steel using geopolymer”,*J Matter SCI*, 1261-1264(2006).
27. Rangan, B.V., Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, M.J. “Studies on fly ash-basedgeopolymer concrete”, *Proceedings of world congress geopolymer*, France, (2005).

28. Duxson, P., Provis, J. L., “The role of inorganic polymer technology in the development of green concrete”, *Langmuir*, 21(7): 3028-3036(2005).
29. Web:Geopolymer of institute, “What is geopolymer” www.geopolymer.org (2011).
30. Davidovits, J., “They built the pyramids” ,*Institute Geopolymer*, Saint Quentin , France, (2008).
31. Davidovts, J., Legrand, J.-J., *French Patent FR 2,324,427* , (1974).
32. Davidovts, J., “La bible avait raison l’archeologie revele l’existence des Hebreux enEgypte sold”, *Jean Cyrille GodeFroy*, Paris, France, (2005).
33. Davidovts J.,SawyerJ.L., ‘early high strength mineral polymer’,*US patent4,509,985,198522* (1984).
34. Davidovts, J., Comrie, D.C., “Long term durability of hazardous toxic and nuclear wastedisposalss” *Geopolymer’88 Proceedings*,125-134 (1985).
35. Sullivan, A., Hill, R.G., “inexpensive glass polialkenoate Cement based on waste gasifierslag”, *Proceedings of the european union thematic progress workshop* ,Morella, (2001).
36. Silverstrim T.,Rotsami H., Larralde J.C., Samadi Maybodi H. “fly ash cementitiousmaterial and method of making a product”, *US Patent5, 601-643,USA*,(1997).
37. Barsoum, M.W, Ganguly, A., Hug, G., “microstructural evidence of reconstituted lime stone blocks in the great pyramids of Egypt”, *J. American Ceramic society*,12.: 3788-3796 (1989).
38. Kim, D.,Petrisor, I.G.,Yen, T.F., “Geopolymerisation of biopolymer a preliminary inquiry” *carbohyd geopolymer*, 56: 213-217(2004).
39. Emma Clarke “Essay Climate Change Corp.”,*The Truth About Concrete*(2009).
40. Jannie S.J. van Deventer a,b,c, John L. Provis a, Peter Duxson ba Department of Chemical & Biomolecular Engineering, *University of Melbourne*, Victoria, (2006).
41. Topçu, İ.B., Toprak, M.U., “ Alkalilerle Aktive Edilen Taban KüllüHafif Harç Üretimi” ,*Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, XXII (2):(2009).
42. Jaturapitakkul, C., Cheerarat, R., “Development of bottom ash as pozzolanic material”,*Journal of Materials in Civil Engineering*, 15: 48-53(2003).

43. Jimenez, F., Palomo, A., “Composition and microstructure of alkali activated flyash binder: effect of the activator”, *Cement and Concrete Research*, 35: 1984-1992(2005).
44. Davidovits, J., “30 Years of Successes and Failures in geopolymer Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs” *Geopolymer 2002 Conference*, Melbourne, 28-29(2002).
45. Zhaohui, X., Yunping, X., “Hardening mechanisms of an alkaline activated class F flyash”, *Cement and Concrete Research*, 31: 1245-1249(2001).
46. Cioffi, R., Maffucci, L., Santoro, L., “Optimization of geopolymer synthesis by calcination and polycondensation of a kaolinitic residue”, *Resources Conservation and Recycling*, 40: 27-38(2003).
47. I. Lecomte, C. Henrist, M. Liégeois, F. Maseri, A. Rulmont, R. Cloots, “(Micro)-structural comparison between geopolymers, alkali-activated slag cement and Portland cement”, *Journal of the European Ceramic Society*, 26 3789–3797(2006).
48. Aruntaş, H.Y., ”Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli”, *Gazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Der.*, 21(1): 193-203(2006).
49. J., Temuujin, A., van Riessen, K.J.D., MacKenzie, “Preparation and characterisation of fly ash based geopolymer mortars”, *Construction and Building Materials*, 24(10):1906-1910 (2010).
50. E., Vasconcelos, S., Fernandes, J.L., Barroso de Aguiar, F., Pacheco-Torgal, “Concrete retrofitting using metakaolin geopolymer mortars and CFRP”, *Construction and Building Materials*, 25: 3213–3221(2011).
51. DPT, “Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Taş ve Toprağa Dayalı Ürünler Sanayii Özel İhtisas Komisyonu Raporu”, *Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı*, DPT:2530-ÖİK:546 (2000).
52. Boutterin, C., Davidovits, J., “Reticulation géopolymérique (ltgs) et matériaux de construction”, *Geopolymer’88 proceedings*, France, 79-88(1988).
53. Bouterrin, C., Davidovits, J., “LTGS of ceramics fabrication of black surfaced ceramics”, *Proceedings of the 22nd archeometry symposium*, University of Bradford UK, 213-216(1982).
54. He, J., “Synthesis And Characterization Of Geopolymers For Infrastructural Applications”, *The Department of Civil and Environmental Engineering, PhD thesis*, Nottingham University, UK, (2005).

55. D., Panias, I., P., Giannopoulou, T., Perraki, “Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-based geopolymers”, *National Technical University of Athens*, 301:246-254 (2007).
56. O.,B., Diaz, J., I., Garcia, A., Gorokhovskiy, “Geopolymers based on a coarse low-purity kaolin mineral: Mechanical strength as a function of the chemical composition and temperature”, *Cement and Concrete Composites*, , 18–24 (2012).
57. Temuujin, J., A. Van Riessen, and R. Williams. “Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes.”, *Journal of Hazardous Materials*, 167: 82-88 (2009).
58. Daniel L.Y. Kong, Jay G. Sanjayan, “Fly Ash-Based Geopolymer Concrete”, Department of Civil Engineering, *Monash University*, Clayton, Victoria 3800, (2008).
59. Jaclyn, F., “Geopolymer Concrete”, www.homeimprovementpages.com.au., (2010).
60. Van Deventer, J.S.J., “Opportunities and obstacles in the commercialisation of geopolymers,” *CD Proceedings of Geopolymers*, Melbourne, Australia, 28-29 October (2002).
61. Morris, J., Hodges, S., “Corrosion of metals in fly ash based geopolymers”, *Proceedings of world congress geopolymer*, France, (2005).
62. Kumar, S., Alex, T.C., Mehrotra, S.P., “Effect of mechanically activated fly ash on the properties of geopolymeric Cement.”, *Proceedings of world congress geopolymer*, France, (2005).
63. Gourley, J.T., Johnson, G.B., “Developments in geopolymer precast concrete” *Proceedings of world congress geopolymer*, France, (2005).
64. P. Duxson, John L. Provis, Grant C., Lukey, Jannie S.J. van Deventer, “The role of inorganic Polymer technology in the development of green concrete”, *Cement and Concrete Research* 37, 1590-1597(2007).
65. T., Bakharev, “Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions,” *Cement and Concrete Research* 35, 1233– 1246(2005).
66. Erdoğan, S.T., “Öğütülmüş Ferrokrom Cürufu Kullanarak Jeopolimer Harç ve Hamur Yapımı”, *8.Ulusal Beton Kongresi*, 631-640 (2011).
67. R. Arellano Aguilar, O. Burciaga Diaz, J.I. Escalante Garcia, “Lightweight concretes of activated metakaolin-fly ash binders, with blast furnace slag aggregates,” *Construction and Building Materials* 24, 1166-1175(2010).

68. Konstantinos A. Komnitsasaa, "Assessing the Risk of Soil Pollution Around An Industrialized Mining Region Using A Geostatistical Approach", *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, (2011).
69. V. Vaou, D. Panias, Laboratory of Metallurgy, "Thermal insulating foamy geopolymers from perlite", *Minerals Engineering* **23**, 1146–1151(2010).
70. Maden Tetkik Arama, "Nevşehir ili Detay Perlit Etüdü", *MTA, Ankara*, (1971)
71. TS EN 13279-1 "Yapı ve Sıva Alçıları" *Türk Standardları Enstitüsü, Ankara*, (2009).
72. Erciyes Üniversitesi Tekmer, "Nevşehir Bölgesi saha Perlitinin Kimyasal Analiz Raporu", *E. Ü. Tekmer, Kayseri*, (2011).
73. Erciyes Üniversitesi Tekmer, "Ak Kartonpiyer Alçısının Kimyasal Analiz Raporu", *E. Ü. Tekmer, Kayseri*, (2013).
74. Kayseri Su ve Kanalizasyon İdaresi Laboratuvarları, "Su Analiz Raporu", *Kaski, Kayseri*, (2013).
75. TS EN 196-1 "Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini", *Türk Standardları Enstitüsü, Ankara*, (2009).
76. TS 699 "Doğal yapı taşları - İnceleme ve laboratuvar deney yöntemleri", *Türk Standardları Enstitüsü, Ankara*, (2009).
77. TS 2824 EN 1338 "Zemin Döşemesi İçin Beton Kaplama Blokları -Gerekli Şartlar ve Deney Metotları" *Türk Standardları Enstitüsü, Ankara*, (2005).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : YEŞİLYURT, Ergün
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : 15.03.1963 Gemerek/SİVAS
Telefon : 0 (352) 2076666/40712
Faks : 0 (352) 4375267
e-mail : yesile@erciyes.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü/ Yapı Eğitimi Anabilimdalı	1989
Lisans	G.Ü.Teknik Eğitim Fakültesi/ Yapı Eğitimi Bölümü	1986
Lise	Kayseri Mimarsinan Teknik Lisesi	1981

İş Deneyimleri

Yıl	Yer	Görev
1991-	Erciyes Üniversitesi	Öğretim Görevlisi
1988-1991	Cumhuriyet Üniversitesi	Öğretim Görevlisi
1987-1988	İnşaat Taşeronluğu	Büro-Şantiye

Yabancı Dil

İngilizce

YAYINLAR:

- Yeşilyurt, E., "Emiç'ce (Ankara-Haymana) Bölgesi Mermerinin Mühendislik ve Teknolojik Özellikleri" , Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ocak 1989, Ankara.

2. Yeşilyurt, E., Kılıç, R., “Haymana (Ankara) Doğusundaki Kireçtaşlarının Mühendislik ve Teknolojik Özellikleri”, Mühendislik Jeoloji Türk Milli Bülteni, Sayı:13, Mayıs 1992, İstanbul.
3. Yeşilyurt, E., Kılıç, R., 1991, “Haymana (Ankara) Doğusundaki Kireçtaşlarının Mühendislik ve Teknolojik Özellikleri”, Suat ERK Jeoloji Sempozyumu, A.Ü.Fen Fakültesi, 2-5 Eylül 1991, Ankara (Bildiri).
4. Yeşilyurt, E., “Mermer Yataklarımız”, Tokat Kültür ve Araştırma Dergisi, Sayı: 1, Mart 1991, Tokat.
5. Bilgil, A., Yeşilyurt, E., Yıldırım, A., Sülev, İ., “Yeni Enerji Kaynağının Sistem Planlamasında Evsel Atık Sular”, Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Ekim 2003, Kayseri.
6. Bilgil, A., Koç, Ö., Yeşilyurt, E., Ardıçlıoğlu, M., “Erciyes Dağı Kar Sularının Hidroelektrik Enerji Üretiminde Değerlendirilmesi Üzerine Sistem Planlaması”, Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Ekim 2003, Kayseri.
7. Bilgil, A., Yeşilyurt, E., Sülev, İ., “İçme Suyu Tesislerinden Elektrik Enerjisi Üretiminde Yöntem Araştırması”, Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Ekim 2003, Kayseri.
8. Bilgil, A., Yeşilyurt, E., Kök, K.G., “Kayseri İli Yerleşim Alanlarındaki Hidroelektrik Yeni Enerji Potansiyelinin İncelenmesi”, Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Ekim 2003, Kayseri.
9. Taplak, H., Bilgil, A., Yeşilyurt, E., Ardıçlıoğlu M., "Atık Suların Arıtılmasında Yeni Bir Sistem Tasarımı ve Deneysel Uygulaması", **6.Kentsel Altyapı Sempozyumu**, 2011, Antalya.
10. Bilgil, A., Yeşilyurt, E., “TR 2009 05753 B” nolu Patent, **Türk Patent Enstitüsü**, 2009, Ankara.

Hobiler

Kayak, dağ yürüyüşü, kitap okumak ve seyahat.