

T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
DOKTORA TEZİ

ISI YALITIM KABİLİYETİNE SAHİP PERLİT ESASLI GEOPOLİMER
BAĞLAYICILI HARÇLARIN GELİŞTİRİLMESİ

SELAHATTİN GÜZELKÜÇÜK

OCAK 2020

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında Selahattin GÜZELKÜÇÜK tarafından hazırlanan ISI YALITIM KABİLİYETİNE SAHİP PERLİT ESASLI GEOPOLİMER BAĞLAYICILI HARÇLARIN GELİŞTİRİLMESİ adlı Doktora Tezinin Ana Bilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Orhan DOĞAN
Ana Bilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Doktora Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. İlhami DEMİR
Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Mustafa ŞAHMARAN _____

Üye (Danışman) : Prof. Dr. İlhami DEMİR _____

Üye : Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK _____

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Murat GÖKÇE _____

Üye : Dr. Öğr. Üyesi H. Süleyman GÖKÇE _____

...../...../2020

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. Recep ÇALIN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

ISI YALITIM KABİLİYETİNE SAHİP PERLİT ESASLI GEOPOLİMER BAĞLAYICILI HARÇLARIN GELİŞTİRİLMESİ

GÜZELKÜÇÜK, Selahattin

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Ana Bilim Dalı, Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. İlhami DEMİR

Ocak 2020, 133 Sayfa

İnşaat endüstrisi dünyada sürekli büyümeye devam eden en büyük endüstrilerden biridir. Bu sebeple inşaat endüstrisinin enerji tüketiminin büyük kısmından sorumlu olduğu söylenebilir. Söz konusu enerji tüketiminin büyük bir kısmı da çimento üretiminden kaynaklanmaktadır. Çimento üretimi esnasında CO₂ salınımı ve yüksek enerji tüketiminin en aza indirilmesi amacı ile bu çalışmada perlit içeren geopolimer harçlar üretilmiştir. Çimento üretimi ile çevreye verilecek zararın en aza indirilmesi, perlitin ekonomiye kazandırılması ve çimento bağlayıcılı hafif malzemeler ile kıyaslandığında ise dayanımı yüksek, hafif, yalıtım özellikleri iyi ve kullanılabilir bir malzeme elde edilmesi amaçlanmıştır.

Bu çalışmanın birinci aşamasında; perlitin geopolimer harçlarda kullanılabilirliğini belirleyebilmek için perlit madenlerinden elde edilen malzemenin dayanıma etkisi incelenmiştir. Aktivatör olarak da farklı oranlarda sodyum hidroksit kullanılmıştır. İkinci aşamada; geopolimer örneklerin ısı iletkenlik katsayılarını ve birim hacim ağırlıklarını düşürebilmek için genişletilmiş perlit, standart kumun yerine ikame edilerek üretilen geopolimer örnekler üzerinde testler gerçekleştirilmiştir. Üçüncü aşamada ise; dayanımları belli seviyede tutulan geopolimer örneklerin birim hacim ağırlıkları, ısı iletkenlikleri, cıvalı porozimetre deneyi ile boşluk miktarları ve mikro yapıları incelenerek elde edilen değerler karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Sonuç olarak; öğütölmüş ham perlitin geopolimer harçlarda bağlayıcı olarak kullanılabileceği, genleştirilmiş perlitin de hafif kompozit malzeme üretmek için uygun bir malzeme olduğu belirlenmiştir. Ayrıca genleştirilmiş perlit kullanımı, basınç dayanımını düşürmekle birlikte birim hacim ağırlık değerini ve ısı iletkenlik katsayısı değerini de düşürdüğu sonucuna varılmıştır. Üretilen geopolimer kompozit malzemenin optimum değerleri ise, basınç dayanımı 1,67 MPa, birim hacim ağırlığı 0,63 g/cm³ ve ısı iletkenlik katsayısı ise 0,09 W/mK olarak elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: “Perlit, basınç dayanımı, geopolimer, ısı iletkenlik, mikroyapı, cıvalı porozimetre”



ABSTRACT

DEVELOPMENT OF PERLITE-BASED GEOPOLYMERIC MORTARS WITH THERMAL INSULATION CAPABILITY

GÜZELKÜÇÜK, Selahattin

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering, Ph. D. Thesis

Supervisor: Prof. Dr. İlhami DEMİR

January 2020, 133 pages

The construction industry is one of the largest industries in the world and continues to grow. Therefore, it can be said that the construction industry is responsible for most of the energy consumption. A large part of this energy consumption is due to cement production. In this study, geopolymer composites containing perlite were produced in order to minimize CO₂ emission and high energy consumption during cement production. It is aimed to obtain a material with high strength, lightweight, good insulation properties and usable compared to lightweight cementitious composites, minimize the damage to the environment by cement production and bring perlite to the economy.

In the first stage of this study; the effect of the mechanical strength of materials obtained from perlite mines was investigated to determine the usability of perlite in geopolymer composites. Different ratio of sodium hydroxide was used as activators as well. In the second stage; tests were performed on the samples produced by replacing expanded perlite with sand to improve the thermal conductivity and to reduce the specific bulk density of the samples. In the third stage; the specific bulk density, thermal conductivity, pore structure and microstructure of samples that have strength in the defined level were investigated and all results were compared.

As a result; it was determined that ground raw perlite can be used as binder in geopolymer composites and that expanded perlite is a suitable material to produce lightweight composite material. In addition, it was concluded that the use of expanded perlite reduces the specific bulk density and thermal conductivity coefficient, decreasing the compressive strength as well. The optimum values of the produced geopolymer composite material were obtained as 1,67 MPa for compressive strength, 0,63 g / cm³ for bulk density and 0,09 W / mK for thermal conductivity coefficient.

Keywords: “Perlite, compressive strength, geopolymer, thermal conductivity, microstructure, mercury porosimeter”

TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlanması esnasında hiçbir yardımı esirgemeyen ve biz genç araştırmacılara büyük destek olan, bilimsel deney imkânlarını sonuna kadar bizlerin hizmetine veren tez yöneticisi hocam, Sayın Prof. Dr. İlhami DEMİR'e, bana her konuda destek olan eşim ve kızıma, desteğini esirgemeyen arkadaşım Ahmet Filazi'ye, teşekkür ederim.

Doktora tez çalışmalarım süresince ilk andan itibaren değerli fikirlerini, yardımlarını, bilgilerini esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Mustafa ŞAHMARAN'a; tezimin izlenmesi ve değerlendirilmesi süresince desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK'e ve tez jürime katılarak değerli fikirlerini sunan Sayın Dr. Öğr. Üyesi Murat GÖKÇE ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi H. Süleyman GÖKÇE'ye teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
SİMGELER DİZİNİ	xiv
KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Geopolimer Beton	4
1.1.1. Geopolimer Oluşumunu Sistematiik Tasarımı	5
1.1.2. Geopolimer Betonun Gelişimi ve Sınıflandırması.....	6
1.2. Perlit	8
1.2.1. Genleştirilmiş Perlitin İnşaat Sektöründeki Kullanım Alanları	9
1.2.2. Ham Perlitin İnşaat Sektöründeki Kullanım Alanları	10
1.2.3. Türkiye’de Perlitin Durumu.....	10
1.2.4. Perlitin Çevre Koşulları	11
1.2.5. Perlitin Üretim Süreci	11
1.2.6. Türkiye’de Perlit Rezervleri	11
1.2.7. Perlitin Kullanılabilirliği.....	12
1.3. Termal İletkenlik	13
1.4. Literatür Özetleri	15
2. MATERYAL VE METOT	30
2.1. Materyal.....	30
2.1.1. Perlit.....	30

2.1.2. Sodyum Hidroksit (NaOH).....	32
2.1.3. CEN Referans Kumu (Standart Kum)	33
2.1.4. Çalışmada Kullanılan Su	33
2.1.5. Genleştirilmiş Perlit	33
2.2. Metot	35
2.2.1. DeneySEL Çalışmalar	37
2.2.2. Geopolimer Deney Örneklerinin Hazırlanması	37
2.2.3. Geopolimer Örneklerin Deney Kalıbına Doldurulması.....	40
2.2.4. Geopolimer Örneklerin Basınç Dayanım Testi	43
2.2.5. Geopolimer Örneklerin Birim Hacim Ağırlıklarının Belirlenmesi.....	43
2.3. Geopolimer Örneklerin Kodlandırılması.....	43
2.3.1. Standart Kum Agregalı Geopolimer Örneklerin Kodlandırılması.....	44
2.3.2. Agregasız Geopolimer Örneklerin Kodlandırılması.....	46
2.3.3. Genleştirilmiş Perlit Agregalı 1. Grup Geopolimer Örneklerin Kodlandırılması	46
2.3.4. Genleştirilmiş Perlit Agregalı 2. Grup Örneklerin Kodlandırılması.....	48
2.4. Isıl İletkenliklerin Ölçülmesi.....	49
2.5. Cıvalı porozimetre Deneyleri	51
2.6. Mikro Yapı Analizleri	52
3. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	54
3.1. Basınç Dayanımlarının Belirlenmesi.....	54
3.1.1. Standart Kum Agregalı Geopolimer Harçların Basınç Dayanımı	54
3.1.2. Agregasız, Geopolimer Hamurlarda Basınç Dayanımları	61
3.1.3. Genleştirilmiş Perlit Agregalı Geopolimer Örneklerin Basınç Dayanımları	62
3.1.4. Genleştirilmiş Perlit Agregalı Geopolimer Örneklerin Basınç Dayanımları ve Birim Hacim Ağırlıklarının Çözelti Molaritesine Göre Değerlendirilmesi ...	69

3.2. Genleştirilmiş Perlit Agregalı Geopolimer Harçların Dayanım, Birim Hacim Ağırlık ve Isıl İletkenlik Değerlendirme Sonuçları	72
3.3. Genleştirilmiş Perlit Agregalı Geopolimer Harçların Özelliklerinin Karşılaştırılması.....	77
3.4. Geopolimer Örneklerin Mikro Yapı Analizleri.....	80
3.5. Geopolimer Örneklerin Cıvalı Porozimetre Analizleri	102
4. TARTIşMA VE SONUÇLAR	111
KAYNAKLAR	120
ÖZGEçMİş.....	130



ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Türkiye perlit rezervi.....	12
2.1. Toz perlitin kimyasal özellikleri	30
2.2.Toz perlitin parçacık boyut analizi.....	31
2.3. NaOH'un kimyasal kompozisyonu	32
2.4. Referans kumunun tane dağılımı	33
2.5. Genleştirilmiş perlitin kimyasal ve fiziksel özellikleri	34
2.6. Geopolimer örneklerin kodlandırılması	44
2.7.Standart kum agregalı geopolimer örneklerin kodlandırılması.....	45
2.8. Agregasız geopolimer örneklerin kodlandırılması.....	46
2.9. Genleştirilmiş perlit agregalı 1. grup örneklerin kodlandırılması.....	47
2.10. Genleştirilmiş perlit agregalı 2. grup örneklerin kodlandırılması.....	48
3.1.Standart kum agregalı 90 °C kür sıcaklığında S/B oranı 0,45 olan örneklerin basınç dayanımları.....	54
3.2.Standart kum agregalı 100 °C kür sıcaklığında S/B oranı 0,45 olan örneklerin basınç dayanımları	56
3.3. Standart kum agregalı 110 °C kür sıcaklığında S/B oranı 0,45 olan örneklerin basınç dayanımları	57
3.4. Standart kum agregalı 100 °C kür sıcaklığında S/B oranı 0,50 olan örneklerin basınç dayanımları	59
3.5. Agregasız geopolimer hamurlarda 90 °C ve 110 °C kür sıcaklığında bekletilen geopolimer örneklerin basınç dayanımları.....	61
3.6. Genleştirilmiş perlit agregalı 110 °C kür sıcaklığında S/B oranı 0,50-0,55-0,60 olan geopolimer örneklerin basınç dayanımları	63

3.7. Genleştirilmiş perlit agregalı 90 °C kür sıcaklığında S/B oranı 0,45 olan geopolimer örneklerin basınç dayanımları.....	65
3.8. Genleştirilmiş perlit agregalı 80 °C ve 110 °C kür sıcaklığı S/B oranı 0,50 olan geopolimer örneklerin basınç dayanımları.....	66
3.9. Genleştirilmiş perlit agregalı 110 °C kür sıcaklığı S/B oranı 0,50-0,55 olan geopolimer örneklerin basınç dayanımları.....	68
3.10. 110 °C Kür sıcaklığında bekletilen genleştirilmiş perlit agregalı geopolimer örneklerin basınç dayanımları ve birim hacim ağırlıkları	70
3.11. GPADI-1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11 kodlu geopolimer örneklerin birim hacim ağırlıkları.....	72
3.12. GPADI-1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 kodlu geopolimer örneklerin basınç dayanımları.....	74
3.13. GPADI-1, 2, 3, 4, 5,6, 7, 8, 9, 10, 11 kodlu geopolimer örneklerin ısı iletkenlik katsayıları	75
3.14. Geopolimer örneklerin basınç dayanımları, birim hacim ağırlığı, ısı iletkenlik katsayıları ve çözelti molariteleri değerlerinin karşılaştırılması	77
3.15. GPADI-1 örneği 50x (a) ve 5000x(b) büyütme EDX analizi oksit miktarları..	83
3.16. GPADI-2 örneği 50x (a) ve 2000x(b) büyütme EDX analizi oksit miktarları..	84
3.17. GPADI-3 örneği 50x (a) ve 2000x (b) büyütme EDX analizi oksit miktarları.	86
3.18. GPADI-4 örneği 50x (a) ve 2000x (b) büyütme EDX analizi oksit miktarları.	88
3.19. GPADI-5 örneği 50x (a) ve 1000x (b) büyütme EDX analizi oksit miktarları.	90
3.20. GPADI-6 örneği 50x (a) ve 2000x (b) büyütme EDX analizi oksit miktarları.	92
3.21. GPADI-7 örneği 50x (a) ve 2000x (b) büyütme EDX analizi oksit miktarları.	94
3.22. GPADI-8 örneği 50x (a) ve 2000x (b) büyütme EDX analizi oksit miktarları.	96
3.23. GPADI-9 örneği 50x (a) ve 2000x (b) büyütme EDX analizi oksit miktarları.	98
3.24. GPADI-10 örneği 50x (a) ve 5000x (b) büyütme EDX analizi oksit miktarları	100

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Geopolimer oluşumunun sistematik diagramı	6
1.2. Geopolimer betonun gelişimi ve sınıflandırması	7
2.1. Toz perlitin parçacık boyutanalizi.....	31
2.2. Ham (a) ve öğütülmüş perlitin (b) görüntüsü.....	32
2.3. Genleştirilmiş perlitin görüntüsü.....	34
2.4. Çalışma planı.....	36
2.5. Harç hazırlanmasında kullanılan ekipmanlar.....	38
2.6. Etüv içerisindeki geopolimer örnekler	39
2.7. Genleştirilmiş perlit agregalı geopolimer örneklerin kalıp içindeki görüntüsü ..	41
2.8. Çalışmanın şekilsel özeti.....	42
2.9. Etüvden çıkarılmış 50x50x50 mm boyutlu geopolimer örneklerin görüntüsü ...	43
2.10. Isıl iletkenlik ölçüm cihazı görüntüsü	49
2.11. Isıl iletkenlik ölçümü yapılacak geopolimer örneklerin kalıpları	50
2.12. Isıl iletkenlik ölçümü yapılacak örneklerin kalıptan çıkmış görüntüsü	51
2.13. Cıvalı porozimetre ölçüm cihazı görüntüsü	52
2.14. SEM analiz cihazı görüntüsü	53
3.1. Standart kum agregalı 90 °C kür sıcaklığında S/B oranı 0,45 olan örneklerin basınç dayanımları.....	55
3.2. Standart kum agregalı 100 °C kür sıcaklığında S/B oranı 0,45 olan örneklerin basınç dayanımları	56
3.3. Standart kum agregalı 110 °C kür sıcaklığında S/B oranı 0,45 olan örneklerin basınç dayanımları	58
3.4. Standart kum agregalı 100 °C kür sıcaklığında S/B oranı 0,50 olan geopolimer örneklerin basınç dayanımları	59

3.5. Agregasız geopolimer hamurlarda 90 °C ve 110 °C kür sıcaklığında bekletilen geopolimer örneklerin basınç dayanımları.....	62
3.6.Genleştirilmiş perlit agregalı 110 °C kür sıcaklığında S/B oranı 0,50-0,55-0,60 olan geopolimer örneklerin basınç dayanımları.....	64
3.7. Genleştirilmiş perlit agregalı 90 °C kür sıcaklığında S/B oranı 0,45 olan geopolimer örneklerin basınç dayanımları.....	65
3.8. Genleştirilmiş perlit agregalı 80 °C ve 110 °C kür sıcaklığı S/B oranı 0,50 olan geopolimer örneklerin basınç dayanımları.....	67
3.9. Genleştirilmiş perlit agregalı 110 °C kür sıcaklığı S/B oranı 0,50-0,55 olan geopolimer örneklerin basınç dayanımları.....	68
3.10. 110 °C Kür sıcaklığında bekletilen genleştirilmiş perlit agregalı geopolimer örneklerin basınç dayanımları ve birim hacim ağırlıkları	71
3.11. GPADI-1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10,11 kodlu geopolimer örneklerin birim hacim ağırlıkları	73
3.12. GPADI-1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 kodlu geopolimer örneklerin basınç dayanımları.....	74
3.13. GPADI-1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 kodlu geopolimer örneklerin ısı iletkenlik katsayıları	76
3.14. Geopolimer örneklerin basınç dayanımlarının ve çözelti molaritelerinin karşılaştırılması	78
3.15. Geopolimer örneklerin birim hacim ağırlığı ve ısı iletkenlik katsayıları karşılaştırılması	79
3.16. GPADI-1 örneği 50x (a) ve 5000x(b) büyütme SEM görüntüsü.....	81
3.17. GPADI-1 örneği 50x (a) ve 5000x(b) büyütme EDX analizi	82
3.18. GPADI-2 örneği 50x (a) ve 2000x(b) büyütme SEM görüntüsü.....	83
3.19. GPADI-2 örneği 50x (a) ve 2000x(b) büyütme EDX analizi	84
3.20. GPADI-3 örneği 50x (a) ve 2000x (b) büyütme SEM görüntüsü.....	85
3.21. GPADI-3 örneği 50x (a) ve 2000x(b) büyütme EDX analizi	86
3.22. GPADI-4 örneği 50x (a) ve 2000x (b) büyütme SEM görüntüsü.....	87

3.23. GPADI-4 örneği 50x (a) ve 2000x (b) büyütme EDX analizi	88
3.24. GPADI-5 örneği 50x (a) ve 1000x (b) büyütme SEM görüntüsü.....	89
3.25. GPADI-5 örneği 50x (a) ve 1000x (b) büyütme EDX analizi	90
3.26. GPADI-6 örneği 50x (a) ve 2000x (b) büyütme SEM görüntüsü.....	91
3.27. GPADI-6 örneği 50x (a) ve 2000x (b) büyütme EDX analizi	92
3.28. GPADI-7 örneği 50x (a) ve 2000x (b) büyütme SEM görüntüsü.....	93
3.29. GPADI-7 örneği 50x (a) ve 2000x (b) büyütme EDX analizi	94
3.30. GPADI-8 örneği 50x (a) ve 2000x (b) büyütme SEM görüntüsü.....	95
3.31. GPADI-8 örneği 50x (a) ve 2000x (b) büyütme EDX analizi	96
3.32. GPADI-9 örneği 50x (a) ve 2000x (b) büyütme SEM görüntüsü.....	97
3.33. GPADI-9 örneği 50x (a) ve 2000x (b) büyütme EDX analizi	98
3.34. GPADI-10 örneği 50x (a) ve 5000x (b) büyütme SEM görüntüsü.....	99
3.35. GPADI-10 örneği 50x (a) ve 5000x (b) büyütme EDX analizi	100
3.36. GPADI-1 geopolimer örneği toplam boşluk hacmi-boşluk çapı grafiği.....	102
3.37. GPADI-3 geopolimer örneği toplam boşluk hacmi-boşluk çapı grafiği.....	103
3.38. GPADI-5 geopolimer örneği toplam boşluk hacmi-boşluk çapı grafiği.....	104
3.39. GPADI-6 geopolimer örneği toplam boşluk hacmi-boşluk çapı grafiği.....	105
3.40. GPADI-7 geopolimer örneği toplam boşluk hacmi-boşluk çapı grafiği.....	106
3.41. GPADI-10 geopolimer örneği toplam boşluk hacmi-boşluk çapı grafiği.....	107
3.42. GPADI-1-3-5-6-7-10 geopolimer örneği toplam boşluk hacmi-boşluk çapı karşılaştırması	108
3.43. Cıvalı porozimetre deneyi, basınç dayanımı, ısı iletkenlik ve birim hacim ağırlık değerleri karşılaştırması	109

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER DİZİNİ

°C	Santigrat derece
%	Yüzde
Mm	Mikrometre
Ph	Çözeltinin asitlik veya bazlık derecesinin tarifi
λ	Isı iletkenlik katsayısı
W/mK	Isı iletkenlik katsayısı birimi
m	Metre

KISALTMALAR DİZİNİ

Al ₂ O ₃	Alüminyum Oksit
CaO	Kalsiyum Oksit
CO ₂	Karbondiyoksit
Fe ₂ O ₃	Demir Oksit
K ₂ O	Potasyum Oksit
MgO	Magnezyum Oksit
Na ₂ O	Sodyum Oksit
NaCl	Sodyum Klorür
NaOH	Sodyum Hidroksit
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SiO ₂	Silisyum Oksit
SO ₃	Kükürt
SO ₄	Sülfat
UK	Uçucu Kül
YFC	Yüksek Fırın Cürufu

SAD	Standart Kum Agregalı Örneklerin Dayanımı
PTD	Agregasız (Perlit Tozlu) Örneklerin Dayanımı
GPAD	Genleştirilmiş Perlit Agregalı Örneklerin Dayanımı
GPADI	Dayanım ve Isıl İletkenliği Ölçülen Genleştirilmiş Perlit Agregalı Örnekler
PT	Perlit Tozu
D	Dayanım
PÇ	Portland Çimentosu
M	Mol
S/B	Su / Bağlayıcı
OPC	Geleneksel Portland Çimentolu
W / C	Su / Çimento
LWA	Hafif Ağırlıklı Agregat
GGBS	Öğütölmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu
Si	Silisyum
Al	Alüminyum
LWA	Hafif Agregat
PU	Poliüretan Köpük
WEP	Genleştirilmiş Atık Perlit

1. GİRİŞ

İnşaat sektörü, dünyada sürekli büyümeye devam eden en büyük ve önemli endüstrilerden biridir. Bu sebeple, küresel enerji tüketiminin büyük bir kısmından sorumlu olduğunu söylemek de mümkündür. Söz konusu enerji tüketiminde ise çimento sektörünün payı oldukça önemlidir. Çimento üretimi esnasında gereken bu enerji ihtiyacının ve açığa çıkan sera gazı salınımlarının azaltılması, inşaat sektörünün sürdürülebilirliği açısından önem taşımaktadır. Bu sebeple, tez çalışmasında geliştirilmiş perlit kullanılarak üretilen üstün dayanım ve yalıtım özellikleri olan kompozit malzemelerin, perlit tozu esaslı geopolimer bağlayıcılar ile çimentosuz olarak geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Geride bıraktığımız yüzyılda, dünyada portland çimentosu ile üretilen beton en fazla üretilen ürün ve bununla birlikte en fazla kullanılan yapı malzemesi olmuştur. Dünya çapındaki bu talebi karşılamak üzere gerekli beton üretimi çok yüksek miktarlarda ham madde ve enerji tüketimine, dolayısıyla büyük miktarlarda sera gazı emisyonlarına yol açmaktadır [1]. Endüstriyel yan ürünlerin kullanılması nedeniyle geopolimer beton, portland çimentosu betonuna sürdürülebilir bir alternatif olarak görülmektedir [2].

Geopolimer betonlar, beton üretiminin çevresel olumsuz etkilerini azaltma ve yüksek miktarda endüstriyel atık malzeme kullanma potansiyeline sahip yeni mühendislik malzemeleri olarak ortaya çıkmıştır [3].

Beton endüstrisi ve mevcut inşaat uygulamaları, enerji tüketimi ve doğal kaynaklara yüksek bağımlılık açısından sürdürülebilir görülmemektedir. Geopolimerler ve alkali aktive cüruflar gibi geleneksel çimentoya alternatif bağlayıcıların kullanılması bir alternatif olarak görülmektedir. Ayrıca, alternatif bağlayıcıların kullanılması ile inşaat sektöründe endüstriyel yan ürünlerin ve atık malzemelerin yeniden kullanılması da arttırılabilir. Bu önlemler, endüstriyel atık imha sorununu çözmenin yanı sıra, karbon emisyonlarını ve tüketilen enerjiyi de büyük ölçüde azaltabilir [4].

Çimento üretiminde kullanılan temel ham madde marndır ve bu ham madde 1450°C’de kalsine edilir. Çimento fabrikalarında üretilen 1 ton klinker için yaklaşık 0,93 ton CO₂

açığa çıkmaktadır. Bu emisyonun yaklaşık 0,39 tonu ısıtma amaçlı karbon temelli yakıtların kullanılmasından, 0,54 tonu ise kireçtaşının dekarbonizasyonundan kaynaklanmaktadır. Çimento üretimi için öğütme işlemleri esnasında ise elektrik üretimine bağlı olarak her bir ton çimento için 0,1 ton CO₂ salınımı daha ortaya çıkmaktadır [5-8]. Böylece 1 ton çimento üretebilmek için toplamda 1,03 ton CO₂ açığa çıkmaktadır [9].

Geopolimer beton üretiminin en önemli amaçlarından biri, dünyada artan çevre duyarlılığı ile birlikte CO₂ emisyonunu, enerji tüketimini ve buna bağlı olarak çimento üretimi esnasında çevreye verilen olumsuz etkiyi en aza indirmektir ve bu amaçla alternatif bağlayıcı kompozit malzemeler üretilmiştir.

Ülkemiz, perlit kaynakları açısından zengin bir coğrafi yapıya sahiptir [10]. Bu sebeple perlit kullanım alanlarının genişletilmesi ülkemiz açısından önemlidir. Türkiye'de perlit üzerindeki çalışmaların tarihçesi 1960'lı yılların başlarında olup ilk üretim ve yurt dışına ihracat 700 tonluk bir miktarda yapılmıştır. 1968-1970 yıllarında özellikle Batı Anadolu Bölgesi perlitleri üzerinde jeolojik ve çok sınırlı olarak da teknolojik değerlendirme çalışmaları sürdürülmüştür [11].

Perlitin volkanik kökenli bir mineral olması sebebi ile son dönemlerde yapılan çalışmalarda öğütülmüş perlitin puzolanik malzeme olarak kullanılabileceği özellikle belirtilmektedir [12].

Günümüzde üretilen perlitin yaklaşık %65'i inşaat sektörü tarafından tüketilmektedir. Hafifliği, ısı ve ses yalıtımı özellikleri geliştirilmiş perlitin beton üretiminde hafif agrega olarak kullanılmak üzere mükemmel bir malzeme adayı olmasını sağlamış olup bugüne kadar yapılan araştırmalar genel olarak geliştirilmiş perlitin hafifliği ve yalıtım özellikleri üzerine olmuştur [13].

Dünya maden potansiyeli içerisinde 2004 yılı verileri ile ülkemizin maden rezerve durumuna bakıldığında perlit, pomza, bor, zeolit, mermer, toryum (basnazit), linyit, manyezit, nadir toprak elementleri, trona, barit, feldspat, sodyum sülfat gibi madenlerde fazla miktarlarda rezerve sahip olduğumuz görülmektedir. Bu sebeple bahsi geçen ürünlerde ülkemizin rekabet gücünün yüksek olduğu

değerlendirilmektedir [14]. Dolayısıyla bu doğal kaynakların değerlendirilmesi ülke madenciliğinin öncelikli konularından birisini oluşturmaktadır. Bu sebeplerle yaptığımız çalışmada perlit kullanımı ülkemiz madenciliği açısından da oldukça önemlidir.

Ülkemiz, dünyanın en zengin perlit ve pomza rezervlerine sahip ülkelerinden birisi olmasına rağmen bugüne kadar söz konusu perlit ve pomza varlığının değerlendirilmesi konusunda çok fazla gelişme sağlanamamıştır. Türkiye bir deprem ülkesidir ve birçok bölgesinde yoğun kış ikliminin hüküm sürdüğü bilinmektedir. Dayanıklılık, hafiflik, ve ısı yalıtımı açısından önemli üstünlükleri olan perlit ve pomzanın inşaat sektöründe değerlendirilmesinin ülke ekonomisine önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir. Ayrıca 9. Kalkınma Planı'nda da ülkemizde, perlit ve pomza esaslı hafif yapı elemanları üretecek tesislerin kurulması önerilmektedir [14].

Perlit 750-1200 °C arasında ani olarak ısıtıldığında bünyesinden çıkan buharın etkisiyle genişir ve camsı tanelerden oluşan bir köpük agregası halini alır ve baştaki hacminin 20 katına kadar genişleme potansiyeline sahiptir [15]. Bu hâli ile de ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılabilir bir malzemedir.

Bu çalışmanın amacı, ısı yalıtım katsayısı düşük bir malzeme üreterek yapılarda ısı kayıplarının önüne geçmek ve ısınma maliyetlerini en aza indirmektir. Bunun yanında hafif kompozit malzeme üretimi ile yapıların ölü yüklerini en aza indirerek hem taşıyıcı elemanların kesitlerini küçültmek hem de deprem etkilerini azaltmaktır. Ham madde açısından bakıldığında ise perlit gibi ülkemizde ham madde kaynağı çok fazla olan ham ve genişleştirilmiş perlitin kullanımını endüstriye kazandırmaktır. Özellikle malzeme yataklarına yakın bölgelerde perlit kullanımını artırarak çimentoya alternatif bağlayıcılar ile geopolimer hafif kompozit malzeme üretmek amaçlanmaktadır. Bunlara ek olarak CO₂ emisyonunu, enerji tüketimini ve buna bağlı olarak çimento üretimi esnasında çevreye verilen olumsuz etkiyi en aza indirmek öngörülmektedir.

1.1. Geopolimer Beton

Geopolimer betonlar, son yıllarda sanayi yan ürünleri kullanımından kaynaklanan CO₂ salınımını en aza indirebilmek amacı ile sürdürülebilir inşaat malzemelerine alternatif olarak araştırılmaktadır. Geopolimer beton üzerine yapılan daha önceki araştırmalar, uygulanabilir bir çökme ve sıradan portland çimentolu beton ile karşılaştırılabilir bir dayanım derecesi ile yapısal uygulamalar için de uygun olabileceğini göstermektedir [16].

Bir başka deyişle geopolimerler; çevresel açıdan sürdürülebilir, yapı ve inşaat malzemeleri endüstrisinin en önemli yapıtaşlarını oluşturma potansiyeli ile ortaya çıkmış malzemeleridir. Aynı zamanda bu malzemeler geleneksel betonla kıyaslandığında çok daha az sera gazı emisyonuna sahiptir [9,17-19].

Son yıllarda, geopolimer ürünlerin geliştirilmesi ve uygulamalarında büyük ilerlemeler kaydedilmiştir. Geopolimer uygulamaları detaylı olarak incelenmiş ve maliyeti düşük, istenen özelliklerde geopolimer ürünlerin üretimi hayata geçirilmiştir. Geopolimer betonun küresel çevre koruma, enerji tasarrufu, atık su arıtımı, katı atık yönetimi gibi faydaları bulunmaktadır. Bunun yanı sıra yüksek performanslı geopolimer beton üreterek uygun çözümler sunan çevre dostu ve sürdürülebilir malzemeler olarak kullanılması için çalışmalar devam etmektedir [20].

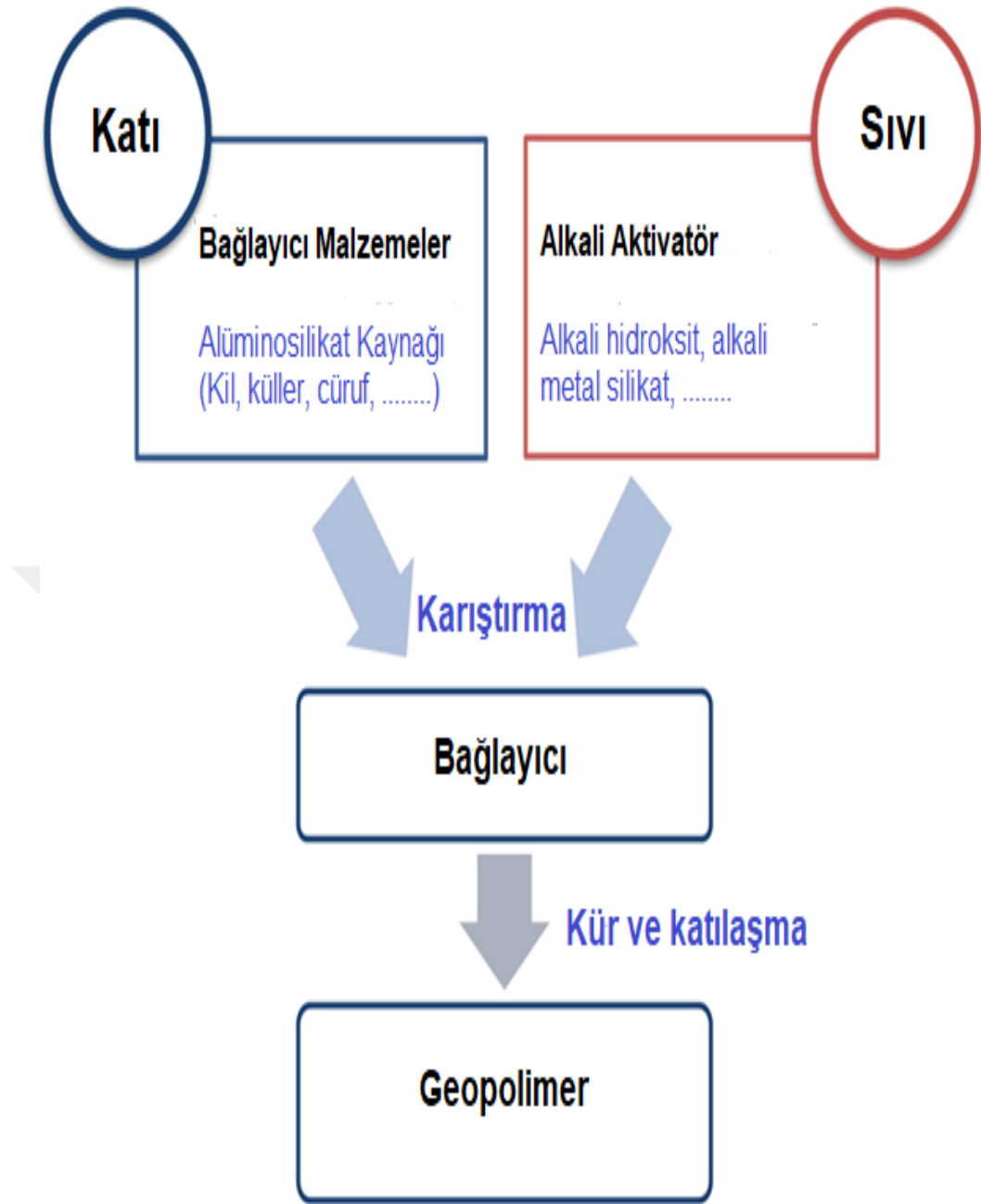
Ham madde ve ortam koşullarına bağlı olarak hızlı veya yavaş priz alma, yüksek basınç dayanımı, düşük ısıl iletkenlik, düşük büzülme, klor geçirgenliğine karşı direnç, kimya ve nükleer endüstrileri için atıkların tutulması, asit dayanıklılığı, yüksek sıcaklık ve ateşe dayanıklılık konularında alternatif işlemlere çözüm olma gibi çeşitli özellikler gösterebilirler. Bütün bu özellikler her geopolimerin özellikleri arasında bulunmayabilir. Ancak istenen özellikler doğru karışımlar kullanılarak ve işlem koşulları tasarlanarak sağlanabilir [21].

Herhangi bir puzolanik bileşik veya alkali çözelti içinde kolayca çözünen bir silika ve alümina kaynağı, bir geopolimer türünün kaynağı olarak kullanılabilir ve geopolimerizasyona uğrayabilir. Geopolimerizasyon sırasında oluşan bir Al - O - Si polimerik yapısı, geopolimerik yapının ana yapı taşı oluşturur. Polimer oluşum hızı

birçok parametreden etkilenir. Puzolanik reaksiyonlar, su içeriği, başlangıçtaki katı madde içeriği, kür sıcaklığı, alkali konsantrasyonu, silikat ve alüminat oranı, pH ve kullanılan aktivatör tiplerinin geopolimerlerin nihai özellikleri üzerinde önemli etkiye sahip olmasıyla reaksiyonların hızı değişebilir. Kür sıcaklığı, geopolimer için önemli bir faktör olup 48 saatin üzerindeki dayanım artışı çok önemli değildir. Bu davranış, OPC (Geleneksel Beton) davranışının aksinedir. Su / bağlayıcı oranı arttıkça dayanım azalır; bu eğilim, OPC'deki basınç dayanımında su / çimento oranına benzerdir. Dayanım, malzemenin hem Si: Al hem de Na: Al oranlarına büyük ölçüde bağlıdır. Yüksek reaktif silika içeriği, yüksek miktarda alkali alümino-silikat jeli oluşumunu içerir ve sonuçta ortaya çıkan malzemede yüksek bir mekanik mukavemet geliştirilir [22].

1.1.1. Geopolimer Oluşumunu Sistemik Tasarımı

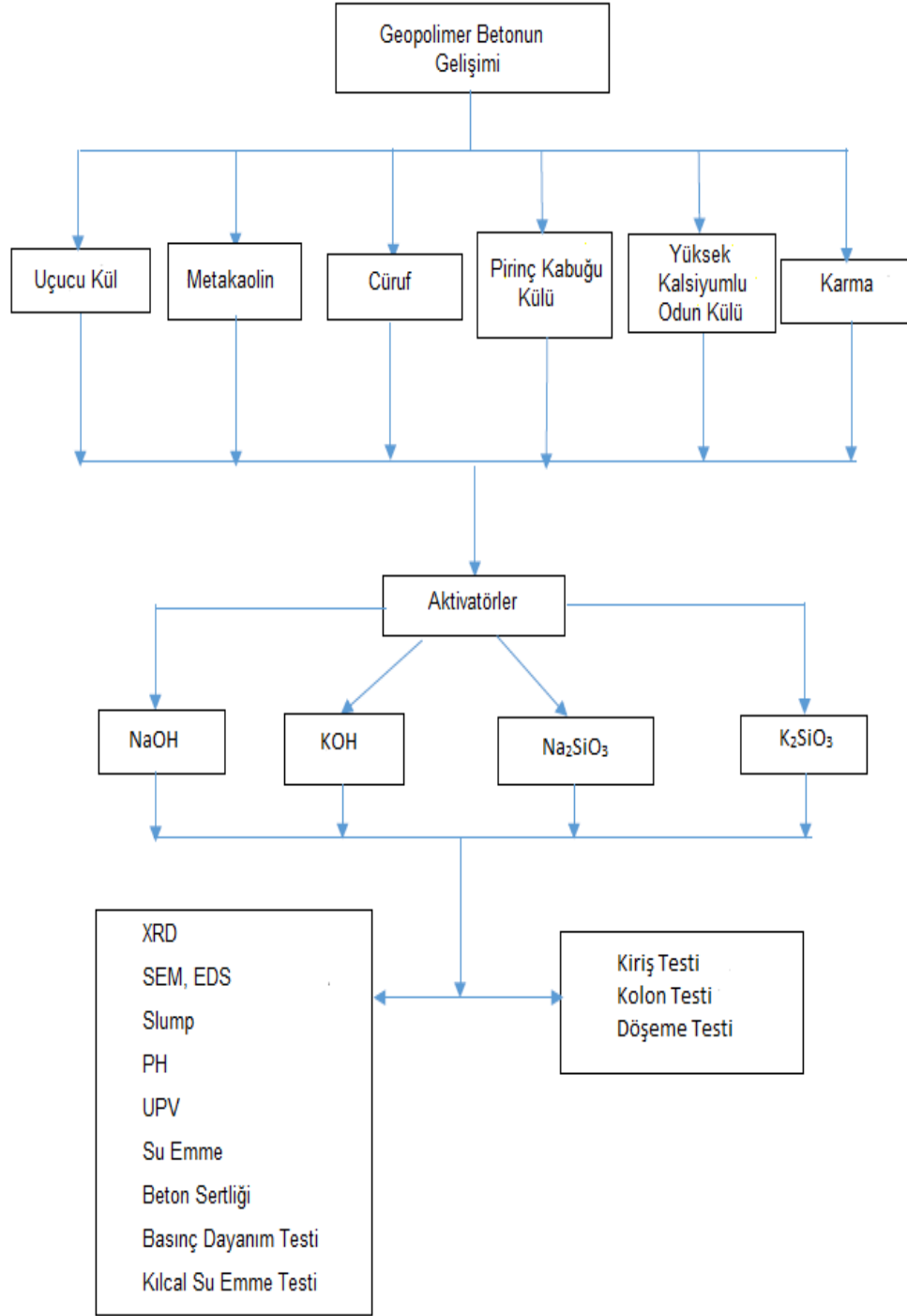
Şekil 1.1'de geopolimer betonun oluşumunun sistemik tasarımı verilmiştir. Bu malzeme, bağlayıcı malzemeler ile alkali aktivatörün karıştırılmasıyla belli bir kür ve katılaşma sürecinde oluşmuş kompozit bir malzemedir [23].



Şekil 1.1. Geopolimer oluşumunun sistematik diagramı

1.1.2. Geopolimer Betonun Gelişimi ve Sınıflandırması

Şekil 1.2’de geopolimer betonun gelişimi ve sınıflandırması şematik olarak verilmiştir [24].



Şekil 1.2. Geopolimer betonun gelişimi ve sınıflandırması

1.2. Perlit

Asidik karakterli volkanik bir cam olan perlit, “inci” anlamına gelen “perle” kelimesinden türemiştir. Bu adı, bazı perlit tiplerinin kırılması sonucu oluşan inci parlaklığında elde edilen küçük kürelerden alır. Perlit, ısıyla genleşen, genleştiğinde de çok hafif ve gözenekli hâl alan bir kayadır. Perlit kelimesi hem ham perlit hem de bunun genleştirilmesiyle elde edilen ürün için kullanılır. Perlit kayaları, yapı ve renk itibarıyla birbirinden farklılıklar gösterebilmektedir. Ham perlitin rengi, saydam açık griden parlak siyaha kadar değişebilmektedir. Genleştiğinde renk tamamen beyaza döner. Perlitin en önemli özelliği, hidratasyona uğramış camsı silika yapısındaki %2,5 arasında bileşik hâlinde içerdiği sudur ve bu su, perlitin kararlılığını sağlamaktadır. Perlit, 750-1200 °C arasında ani olarak ısıtıldığında bünyesinden çıkan buharın etkisiyle hacmini arttırır ve camsı tanelerden oluşan bir köpük agregasına dönüşür ve ilk hacminin 20 katına kadar genleşebilir ve bu ürüne de genleşmiş perlit denir. Perlit, özel dokulu, iç yapısında belli oranda su içeren, asit bileşimli volkanik bir camdır yani fibrik yapılı değildir. Nitrat fosfor, sülfat, radyoaktif element, ağır metal, ve organik madde içermez. Bu nedenle kimyasal yapısı oldukça saftır [15].

Ham perlit, alüminyumlu ve silisli bileşikler içerdiğinden kalsiyum esaslı bağlayıcılar ile kimyasal reaksiyona girerek hidrolik aktivite gösterir. Bu özelliği onun inşaat sektöründe büyük çapta kullanılmasını sağlamıştır. Perlit, çimentoya ikame edildiğinde dayanıklılık kazandırmaktadır. Ham perlit kayası, kırılıp elenerek kullanıldığı gibi doğal olarak agrega hâlinde de kullanılmaktadır. Ülkemizde doğal agrega hâlinde bulunan perlitin geniş rezervleri vardır [15].

Genleşmiş perlit ve pomza; düşük yoğunluğa sahip olmaları, ses ve ısı yalıtkanlığı özelliklerinin bulunması sebebiyle benzer alanlarda kullanılır. Dünyada değişik ülkelerde 7,7 milyar ton perlit rezervi vardır. Dünyada üretilen 1,8 milyon ton perlitin % 60’ı beton ve sıva agregası olarak, % 23’ü filtre malzemesi, % 8’i yalıtım malzemesi üretiminde, % 4’ü ise tarım alanında kullanılmaktadır [10].

Ülkemizde 5,7 milyar tonluk değişik genleşme oranlarına sahip büyük bir perlit potansiyeli bulunmaktadır. Orta-iyi kalite perlit yataklarımız; Ankara- Çubuk, Kızılcahamam, Balıkesir-Savaştepe ve Sındırgı, Çankırı-Orta, Erzincan-Mollaköy, Erzurum- Pasinler, Bitlis-Tatvan, İzmir-Bergama, Cumaovası, Dikili ve Foça, Kars-Sarıkamış, Van-Erciş, NevşehirAcıgöl ve Derinkuyu ve Malatya-Pötürge’de bulunmaktadır. Son yıllarda tüvenan perlit üretimimiz 480 bin ton/yıl civarında seyretmektedir. Ülkemizdeki talep darlığı nedeni ile üretilen perlit büyük oranda ihraç edilmektedir [10].

Deprem kuşağı üzerinde olan ülkemizde karasal iklim koşulları hâkimdir. Buna rağmen ülkemizde perlit ve pomzaların önemi yeterince anlaşılamamıştır ve bu ürünler inşaat sektöründe yeterli oranda kullanılmamaktadır. Perlit ve pomzanın kullanıldığı beton agregaları ve hafif yapı elemanları daha çok modern inşaat teknolojilerinin kullanıldığı birinci sınıf inşaatlarda tercih edilmektedir. Bu malzemelerin kullanıldığı inşaatlarda %17 oranında demir tasarrufunun yanı sıra önemli düzeyde ısı ve ses izolasyonu sağlanmaktadır. İnşaat sektöründe bu malzemelerin kullanımı arttırılmalı, teşvik edilmeli ve/veya zorunlu kılınmalıdır [10].

1.2.1. Genleştirilmiş Perlitin İnşaat Sektöründeki Kullanım Alanları

- Şekillendirilmiş izolasyon malzemeleri (çatı ve zemin izolasyonlarında)
- Perlitli Sıvalar
- Perlit agregalı hafif yalıtım betonu (alçı veya çimento bağlayıcı)
- Perlit agregalı hafif yapı elemanları boru izolasyonları, tavan kiremitleri vs.
- Gevşek dolgu malzemesi olarak (zemin, tavan araları ve duvar boşluklarında yalıtım malzemesi olarak silikonla özel bir işleme tabi tutularak köpük hâlinde)
- Yüzey döşemelerinde (ses ve ısı yalıtım malzemesi olarak)
- Çimento ve alçı dışındaki bağlayıcılarla yapılan özel amaçlı perlit betonları [15].

1.2.2. Ham Perlitin İnşaat Sektöründeki Kullanım Alanları

Ham perlit, kırılıp öğütüldükten sonra tane boyutlarına ayrılmış olarak

- Asit ve bazlara karşı dayanıklı olması sebebi ile kanalizasyon borularının üretiminde,
- İç ve dış inşaat sıvalarında,
- Dona karşı dayanıklı olması sebebi ile su alan inşaatlarda,
- Terasların ve çatıların su izolasyonlarında,
- Yüzme havuzların yapımında,
- Isı izolasyonunda sıva olarak veya briket kiremit gibi izolasyonla hafif yapı elemanı üretiminde,
- Demir yollarında patinaj kumu olarak,
- Abresif sanayiinde aşındırıcı olarak,
- Filtre kumu ve /veya çakıllı olarak su arıtma tesislerinde,
- Kara yollarında asfalt dolgu malzemesi olarak,
- Dökümhanelerde atık koyulaştırıcı, metal temizleyici ve silis kaynağı olarak kullanılabilmektedir [25].

1.2.3. Türkiye’de Perlitin Durumu

Ülkemizdeki perlit rezervleri, Tersiyer-erken orta kuvaterner yaşlı volkanik bölgelerde yoğunlaşmıştır. Doğu Anadolu’daki Sarıkamış perlitleri; genç neojen riyolitik volkanizmaları ile teşekkül etmiş ve riyolitik tüf, riyolit lavların ve diğer volkanik tortular içerisinde geniş alanlara yayılmıştır. Güneydeki Mescitli Köyü civarından başlayıp Keklik Deresi’nin her iki tarafında yayılarak Sarıkamış yakınlarına kadar 15 km’lik bir uzanım gösterir. İç Anadolu’daki Nevşehir perlitleri ünlü Acıgöl krateri civarında plio-kuvaternere ait tali domlar şeklindedir. Ege Bölgesi perlitleri, Menderes ve Karaburun masifleri arasında kalan mesozoik bir kıvrımın miyosen riyolitik volkanizmaları ile ilgilidir. Menderes (Cuma Ovası) perlitleri Murattepe ile Karadağ arasında yer yer kesintili olarak 10 km boyunca uzanır. Cevher yataklarının derinliği 25-90 m arasındadır [25].

1.2.4. Perlitin Çevre Koşulları

Perlit ocaklarının yerleştiği alanlar yerleşim yerlerinden oldukça uzaktadır ve sayıları azdır. Bu nedenle perlit madenciliği ciddi bir çevre sorunu yaratmaz. Açığa çıkan tozlar, filtreler tarafından tutulduğundan herhangi bir çevre kirliliği oluşturmaz. Perlitin üretim prosesi anında kimyasal işlem değil fiziksel işlemler uygulanır, bu nedenle de üretimden kaynaklanan atıklar bulunmaz [25].

1.2.5. Perlitin Üretim Süreci

Ham perlit üretim tesislerinde sırasıyla aşağıdaki işlemler uygulanır.

- Kırma
- Ön öğütme
- Kurutma
- Öğütme
- İnce öğütme
- Eleme, sınıflandırma, boyutlama
- Depolama

Genleştirilmiş perlitin elde ediliş süreci: Öğütülmüş, boyutlanmış ham perlit 400 °C'ye kadar bir ön ısıtmaya tabi tutulur. Ardından 700-1200°C arasında sıcaklıkta ısıtılır. Bu ısıtmadan sonra perlitin içindeki su buhar hâlinde çıkar. Kısa sürede mısır gibi patlayarak hacmi 4-30 kat artar. Böylece şekilde gözenekli, hafif ve camsı bir yapıya sahip ürün elde edilmiş olur [25].

1.2.6. Türkiye’de Perlit Rezervleri

Türkiye perlit rezervi 4,5 milyar ton düzeylerindedir. Bu rakam dünya rezervlerinin önemli bir bölümünü oluşturur. Türkiye perlit rezervinin dağılımı Çizelge 2.1’de verilmiştir [25].

Çizelge 1.1. Türkiye perlit rezervi

Bölge	Rezerv (mümkün) 1x10³ ton
Ankara-Çamlıdere	8.000
Ankara-Çubuk	32.000
Ankara-Kızılcahamam	34.200
Balıkesir-Evrindi	25.000
Balıkesir-Savaştepe-Sındırğa	47.000
Bitlis-Adilcevaz-Tatvan-(Van-Erciş)	1.400.000
Çankırı-Orta	30.000
Çanakkale-Biga	3.400
Eskişehir-Seyitgazi	20.000
Erzincan-Merkez	27.000
Erzurum-Pasinler	100.000
İzmir-Bergama	16.500
İzmir-Dikili	8.000
İzmir-Foça	16.500
İzmir-Menderes (Cuma Ovası)	60.000
Kars-Sarıkamış	1.500.000
Manisa-Demirci-Soma	18.600
Manisa-Saruhanlı	18.000
Nevşehir-Acıgöl	862.000
Nevşehir-Derinkuyu (Niğde-Gölcük)	350.000
Toplam	4.576.200

1.2.7. Perlitin Kullanılabilirliği

Perlit, doğal bir alüminosilikat kaynağıdır ve çimento esaslı yapı malzemelerinin özelliklerini geliştirme potansiyeline sahiptir. Perlit içeren çimentolu birleşimler ile silika dumanı ve uçucu kül içeren çimentolu birleşimlerin karşılaştırıldığı çalışmada; perlit tanecikli örneklerin 28 günlük dayanımlarının, aynı uçucu kül değişim

seviyelerine sahip numunelerden daha yüksek olduğu ve bu değerlerin kontrol numunesininkilerle karşılaştırılabileceği sonucuna varılmıştır [26].

Yapılan çalışmada perlit tozunun puzolanik özelliğinin bulunduğu ve beton için iyi bir aktif katkı maddesi olduğu sonucuna varılmıştır [12].

İnce perlit atıkları %10, %20 ve %40 ikame oranlarında kullanılarak incelendiği çalışmada; %10 ve %20 ikame oranlarının, mukavemet aktivite endeksi ölçümlerine dayanarak ASTM standartlarına uygun olduğu saptanmıştır. Bununla birlikte, %40'lık bir ikame oranında dayanım açısından uygun sonuçlar vermediği fakat ayrışmayı azalttığı, böylece portland çimentosu karışımında işlenebilirliğe yardımcı olduğu belirtilmiştir [27].

1.3. Termal İletkenlik

Görünür yoğunluktaki farklılıklar ve betonların etkin termal iletkenliği, gözenekliliklerindeki farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Başka bir deyişle, hava ile doldurulmuş boşlukların betonun ağırlığına hiçbir katkısı bulunmazken gözenekli bir betonun genel iletkenliği, silikat yapısının ve içinde bulunan havanın termal iletkenliğinin bir sonucudur. Bu nedenle betonun ısı iletkenliğinin görünen yoğunluk ile ilişkili olduğu açıktır. Betonun ısı iletkenliği, nem içeriği arttıkça artar. Su, havanın yaklaşık 25 katı iletkenliğe sahip olduğundan gözeneklerdeki havanın kısmen su veya nem ile yer değiştirmesi durumunda betonun daha yüksek iletkenliğe sahip olması gerektiği açıktır [28].

Yalıtımın ısıtma ve soğutma maliyetleri üzerindeki önemi son yıllarda Türk toplumunda da daha iyi anlaşılmıştır ve ülkedeki mevcut birçok binanın yalıtımı iyileştirilmektedir. Sıradan tuğla duvarlar gerekli ısı özellikleri karşılamadığından ısı yalıtım malzemeleri hem mevcut binalar hem de yeni yapılar için dış duvarlara dış cephede uygulanır. Bu yaklaşım, işçilik, iskele ve yeni inşaatlar için maliyet artışı demektir. İşçilik maliyetini düşürmek ve bina duvarlarının termal özelliklerini iyileştirmek için birçok yenilikçi ürün piyasaya sürülmüştür. Bu ürünler, hafif betonla doldurulmuş içi boş tuğlalar, tuğladan hafif betonlar sandviçi veya hafif betonlardan

paneller gibi malzemeleri içerir. Bu ürünlerin hemen hemen hepsinin ortak özelliği, farklı agrega veya yöntemlerle elde edilen hafif beton içermeleridir. Hafif betonların temel özelliği gözenekliliğinin daha yüksek olmasıdır. Gözeneklerin çoğu, yüksek ısı yalıtımı sağlayan kapalı gözeneklerdir. Sonuç olarak hafif beton, yapıların ısı yalıtımı için uygun bir malzemedir [29].

Betonun ısı iletkenliğini azaltan bir teknik, çimento matrisine farklı tipte izolasyon agregaları eklemektir. Betonun ısı iletkenliği, öncelikle kullanılan ham maddelerin ısı iletkenliği ve karışım oranlarından etkilenir [30].

Beton, heterojen ve geçirgen bir katı maddedir. Beton malzemesinde, normal çalışma sıcaklıklarında ısı aktarımı esasen iletkenliktir. Betonun özellikleri; agrega, su, çimento ve boşluklar gibi elementlerin hacim oranından etkilenir. Betonun içindeki boşluklar, betonun mekanik ve ısı özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [31].

Yapılan bir çalışmada; farklı yedi faktörün çimento hamuru, harç ve betonun termal iletkenliği üzerindeki etkisi incelenerek değerlendirmeler yapılmıştır. Bu yedi parametre; yaşlık, nem durumu, sıcaklık, su-çimento (w / c) oranı, ince agrega değişimi, karışım tipi ve toplam agrega hacim değişimidir. Toplam hacim değişimi ve örneğin nem durumu, betonun ısı iletkenliği üzerindeki ana etkili faktörler olarak ortaya çıkmıştır. Bununla birlikte, harç ve çimento macununun ısı iletkenlik katsayısı değeri üzerindeki en etkili faktörlerin, w / c oranı ve karışımın tipi olduğu belirtilmiştir [32].

Agrega tipi ve miktarı betonun ısı iletkenliği üzerinde önemli etken faktörlerdir. Beton gözenekliliğindeki artış nedeniyle LWA ve / veya köpük kullanılırken betonun k (termal iletkenlik) değeri azalır. Beton gözenekliliği %1 oranında artırıldığında betonun ısı iletkenliği yaklaşık %0,6 azalır. Ayrıca, portland çimentosunun çimentolu malzemelerle değiştirilmesi; beton, harç ve çimento hamurunun ısı iletkenliğini azaltabilir [33].

1.4. Literatür Özetleri

“Isı Yalıtım Kabiliyetine Sahip Perlit Esaslı Geopolimer Bağlayıcı Harçların Geliştirilmesi” başlıklı yapılan çalışma ile ilgili literatür çalışmaları:

Bergamonti v.d. (2018) tarafından yapılan çalışmada; metakaolin ile aktive edilmiş 6 M sodyum hidroksit, 2,5 M sodyum silikat çözeltisi ile oluşturulmuş ve PU (poliüretan) köpük atıkları eklenerek elde edilen hibrid geopolimer kompozitlerin binaların ısıl direncini artıran ve aynı zamanda düşük yalıtım maliyetlerine katkıda bulunan kompozit malzemeler olduğu belirtilmiştir. Ayrıca çevre ve enerji kaygıları nedeniyle poliüretan köpüklerinin endüstriyel atıklardan tekrar kullanılmasının, atık depolama veya yakmaya alternatif olarak sürdürülebilir bir atık geri dönüşüm süreci sunduğu için yenilikçi bir çözüm olduğu belirtilmiştir [34].

Colangelo v.d. (2017) yaptığı çalışmada; sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltisi hazırlayarak metakaolin ile aktive edilmiş ve bir miktar epoksi reçinesi, mermer tozu ve hafif agrega olarak da atık genişmiş polistiren kullanarak hazırladığı termal olarak yalıtıcı geopolimer kompozitlerin özelliklerini araştırmıştır. Geopolimer genişmiş polistiren kompozitin, daha yüksek mukavemet ve düşük ısı iletkenliği ile portland çimentosu bazlı malzemelere kıyasla daha gelişmiş özelliklere sahip olduğunu ayrıca atık genişmiş polistiren kullanılarak sürdürülebilir, hafif, termal olarak yalıtıcı geopolimer kompozitlerin üretiminin yapılabileceğini belirtmişlerdir [35].

Albitar v.d. (2017) yaptığı çalışmada; sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltisi ile aktive edilmiş uçucu kül ve cüruf kullanarak ürettiği geopolimer betonların performansını değerlendirmiştir. Sonuçlar, genel olarak geopolimer betonun dayanıklılık performanslarını belirlenmiş ve (Geleneksel Portland Çimentolu) OPC betonundan daha üstün olduğunu göstermiştir. Sodyum sülfata maruz bırakılan betonlarda; OPC betonunda % 15,4 bozulma olurken uçucucu küllü geopolimer betonlarda % 13,4 ve cürufllu betonlarda ise % 12,3 olmuştur. Sülfirik aside maruz bırakılan OPC betonlarındaki basınç dayanımı azalması %26,6 olurken uçucu küllü geopolimer betonlarda %10,9 ve cürufllu betonlarda %7,3 olmuştur [36].

Elyamany v.d. (2018) yaptığı çalışmada; geopolimer harçlarda kür sıcaklığı, sodyum hidroksit çözeltisi molaritesi, alkalın çözeltisi / bağlayıcı oranı ve bağlayıcı tipinin magnezyum sülfat direnci üzerindeki etkisini incelemiştir. OPC (Geleneksel Portland Çimentolu) harcı ile çeşitli geopolimer harçlar arasında bir karşılaştırma yapmıştır. %50 uçucu kül, %35 öğütülmüş granül cürufu (GGBS) ve % 15 silis dumanı içeren karışımlarda magnezyum sülfat çözeltisi etkisinde en iyi performansın elde edildiğini ve genel olarak çeşitli geopolimer harçların, magnezyum sülfat çözeltisinde OPC harçlarına kıyasla daha iyi performans gösterdiğini belirtmiştir [37].

Elyamany v.d. (2018) yaptığı bir diğer çalışmada; kür sıcaklığının ve sodyum hidroksit solüsyonu molaritesinin artırılması ayrıca alkali solüsyonu / bağlayıcı oranının düşürülmesi çeşitli bağlayıcılarla birlikte geopolimer harçların mekanik özelliklerini iyileştirmiştir. Kür sıcaklığının 30 °C'den 90 °C'ye yükseltilmesinin, NaOH molaritesinin 10 M'den 16 M'ye yükseltilmesinin ayrıca alkali solüsyonu / bağlayıcı oranının 0,35'ten 0,5'e yükseltilmesinin 7 gün sonundaki tüm basınç dayanımlarını arttırdığını belirtmiştir [38].

Firdous v.d. (2018) tarafından yapılan derleme çalışması sonucunda; alkalın ortamda elde edilen taze ve sertleştirilmiş doğal puzolan bazlı geopolimer üzerinde analitik tekniklerin başarılı bir şekilde uygulandığı belirtilmiş olup doğal puzolan bazlı geopolimerin sürdürülebilir yapı malzemeleri olarak kullanılma potansiyeline sahip olduğu belirtilmiştir. Ancak geniş çaplı kullanımı için ortaya çıkabilecek büyük çaplı zorlukları ele almak maksadıyla pilot tesiste üretim sürecini yükseltmek gerektiği belirtilmiştir [39].

Hu v.d. (2018) tarafından yapılan çalışmada; kırmızı çamur ve C sınıfı uçucu kül ile elde edilen geopolimerin, ortam sıcaklığında kür sonucu 15,2 MPa'lık bir basınç mukavemeti elde edildiği, buna karşılık kırmızı çamur ve F sınıfı uçucu külden elde edilen geopolimerlerin sadece NaOH çözeltisi ile aktive edildiğinde uygun bir dayanım elde edilemediği görülmüştür. Yüksek sıcaklıkta kürün veya bileşik aktivatör kullanımının, bu sorunun çözümü olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada, kırmızı çamurun yüksek alkaliliğinin geopolimerizasyona katkıda bulunduğu ancak maksimum basınç mukavemeti için ilave NaOH'un gerekli olduğu belirtilmiştir [40].

Ibrahim v.d. (2017) yaptığı çalışmada; bağlayıcı olarak doğal puzolan, aktivatör olarak ise sodyum silikat ve sodyum hidroksitin kullanıldığı geopolimer betonlarda, bağlayıcı içeriğinin ve alkalin aktivatörlerinin bileşiminin, (alkali aktive beton) AAC'nin taze ve sertleşmiş özellikleri üzerinde önemli bir rol oynadığını belirtmiştir. Ayrıca Sodyum Silikat / Sodyum Hidroksit oranının 2.5, bağlayıcı içeriğinin 400 kg / m³, alkalin aktivatör / bağlayıcı oranının ise 0.525 olduğunu, betonların üstün mukavemet ve mikroyapısal özellikler elde etmek için uygun olduğu ortaya koymuştur [41].

Gallardo v.d. (2018) tarafından yapılan çalışmada; geopolimerin klinkerden %54 daha az CO₂ ürettiği ve dayanımlarının da yeterli olması ile birlikte geopolimerlerin sıradan çimentoların yerine uygun alternatifler olabileceği belirtilmiştir [42].

Kaur v.d. (2018) tarafından yapılan çalışmada; alkali aktivatör bağlayıcı (AAB) oranı ve alkalin aktivatörünün pirinç kabuğu külü bazlı geopolimer üzerindeki molaritesinin etkisi araştırılmıştır. Basınç dayanımı, AAB oranı 0,5 ile 0,7 arasında ve alkali aktivatör çözeltisinin molaritesi oranı ise 12 M ile 16 M arasında değiştirilmiştir. 28 gün sonra maksimum basınç dayanımının 39,95 N / mm²'ye kadar çıktığı ortaya konmuştur. Basınç dayanımının hem AAB oranı hem de alkali aktivatör çözeltisinin molaritesi ile doğru orantılı olduğu gözlenmiştir. Molaritenin arttırılmasıyla mikro yapının oldukça yoğun hâle gelmesinin, yüksek °C'de geopolimerizasyona bağlı olduğu belirtilmiştir [43].

Li v.d. (2018) tarafından yapılan ve bağlayıcı olarak jeotermal kil ve silis kumu, aktivatör olarak ise sodyum silikat ve sodyum hidroksitin kullanıldığı çalışmada; % 0, 1, 2, 3 oranına kadar çelik lif kullanılmıştır. Sonuç olarak çelik lif kullanılmayan örneklerin basınç dayanımı 35,33MPa iken çelik lif kullanımı basınç dayanımını 34,01 MPa'ya kadar düşmüştür. Çelik lif kullanımının, eğilme dayanımını ise 3,1MPa'dan 3,6 MPa'ya yükselttiği belirtilmiştir [44].

Palacios v.d. (2018) tarafından alkaliler ile aktive edilmiş uçucu küller üzerine yapılan çalışmada; 65 °C'nin üzerindeki kür sıcaklıklarında daha iyi verim alındığı belirtilmiştir [45].

Yun-Ming v.d. (2016) tarafından yapılan çalışmada; geopolimerin optimum performansını belirleyen ana parametrelerin; alkali konsantrasyonu, karışım oranları ve kür şekilleri olduğunu belirtilmiştir [23].

Ma v.d. (2018) tarafından yapılan ve geopolimer betonun malzeme ve yapısal performanslarının gözden geçirildiği çalışmada; geopolimer betonun, daha iyi mekanik özellikler, daha yüksek dayanıklılık ve geleneksel betonla karşılaştırıldığında daha fazla istenen yapısal performans sunması nedeniyle geleneksel betonun yerini alabileceği belirtilmiştir. Ayrıca pratik tasarım standartları için daha fazla çalışmaya ihtiyaç olduğu ve pratikte uygulanabilirliği sağlamak için yapısal elemanlar üzerine tam ölçekli çalışmalar yapılması gerektiği belirtilmiştir [24].

Punurai v.d. (2018) tarafından yapılan çalışmada; aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır. Hibrit uçucu kül ve bazalt fiberin geopolimer hamurlar üzerindeki mekanik özellikleri, kür süresi ve kuruma büzülmesi değerlendirilmiş olup bu kapsamda uçucu kül yerine % 0, 10, 20, 30, 40, 100 oranlarında bazalt fiber kullanılmıştır. Geopolimer hamurlarda uçucu külün bazalt elyaf ile değiştirilmesi, kür sürelerinin ve dayanımın artmasıyla ayrıca kuruma büzülmesinin azalmasıyla sonuçlanmıştır. Basınç dayanımı % 100 uçucu küllü karışımda 28 gün sonunda 35 MPa civarında elde edilirken % 100 bazalt fiberli karışımlarda 90 MPa civarında elde edilmiştir [46].

Papa v.d. (2018) tarafından yapılan çalışmada; bağlayıcı olarak genleştirilmiş toz perlit, aktivatör olarak ise potasyum hidroksit kullanılmıştır. Elde edilen örnekler üzerinde termal ve mekanik özellikler incelenmiştir. Sonuç olarak; 0,467 g/cm³ birim hacim ağırlığında, 30x30x30 mm boyutlardaki örneklerde 1,6 MPa basınç dayanımı ve 0,087 m⁻¹ K⁻¹ termal iletkenliğe sahip numuneler elde edilmiştir [47].

Reddy v.d. (2018) tarafından yapılan çalışmada; ortam sıcaklığında kür edilen uçucu kül ve öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu (GGBS) bazlı geopolimer beton üretmek için aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır; alkali aktivatör içeriği (AAC) / katı bağlayıcı (BS) oranı için sırasıyla 0,4 ila 0,8 arasında oranlar

kullanılmıştır. Elde edilen örneklerin 28 gün sonundaki basınç dayanımları 66-32 MPa aralığında elde edildiği belirtilmiştir [48].

Rocha v.d. (2018) tarafından yapılan çalışmada dört tip harç üretilmiştir. Aralarındaki tek farkın alkali aktive edici çözelti olduğu çalışmada potasyum ve alkalın sodyum silikatlar, potasyum ve sodyum hidroksitler alkalın aktifleştirici çözeltiler olarak kullanılmıştır. 28 gün sonunda 80 MPa üstü dayanımlara ulaşılmış ve bu dört tip karışımın basınç dayanımlarının birbirine yakın seviyelerde olduğu belirtilmiştir [49].

Salas v.d. (2018) tarafından yapılan çalışmada; sodyum hidroksit ile elde edilen geopolimer betonların küresel ısınma potansiyeli karakterizasyonunun geleneksel betonlara göre % 64 daha düşük olduğu belirtilmiştir [50].

Sun v.d. (2018) tarafından yapılan çalışmada; bağlayıcı olarak alkalilerle aktive edilmiş cüruf, metakaolin geopolimeri ve metakaolin-cüruf geopolimeri ve aktivasyon için ise sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır. Agrega boyutunun artması ile geçirgenliğin arttığı birim hacim ağırlığı ve basınç dayanımının düştüğü görülmüştür. Ayrıca basınç dayanımları açısından en yüksek dayanımını metakaolin-cüruf geopolimeri daha sonra metakaolin geopolimeri ve en küçük dayanımı ise alkalilerle aktive edilmiş cürufda elde edilmiş olup tüm geopolimer dayanımları geleneksel çimento bağlayıcılarından yüksek olduğu belirtilmiştir [51].

Zhang v.d. (2018) tarafından yapılan literatür çalışmasında; farklı bağlayıcılar, aktivatör tipleri, kür koşullarında hazırlanan farklı tipteki geopolimer harçların taze hâldeki performans (işlenebilirlik, priz süresi ve taze beton sıcaklığı), fiziksel özellikler, mekanik özellikler (basınç dayanımı, çekme dayanımı, elastik özellikler, eğilme performansı, kırılma davranışı gibi), dayanıklılık özellikleri (asit direnci, yüksek sıcaklığa direnç, don direnci, su emme ve büzülme özellikleri) ve mikro yapı analizleri incelenmiştir. Mevcut çalışma sonuçları, geopolimer harcın, gelecekte geleneksel çimento harcı yerine uygun bir alternatif olabilecek çevre dostu bir yapı malzemesi olarak kullanılmak üzere önemli fizibilite ve uygulama beklentisi sergilediğini gösterdiği belirtilmiştir [52].

You v.d. (2018) tarafından yapılan çalışmada; geopolimerin ısı direncinin geleneksel betondan daha iyi olduğu, bununla birlikte, yüksek demir oksit içeriğinin, geopolimerin asit direncini geleneksel betona göre düşürdüğü belirtilmiştir. Ayrıca geopolimer betonların fiyat analizinde ise ana giderlerin alkali aktivatörler olduğu belirtilmiştir [53].

Madhav v.d. (2018) tarafından yapılan çalışmada; öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve uçucu kül karışımı, sodyum hidroksit çözeltisi ve sodyum meta silikat çözeltisinin bir kombinasyonu olan alkalın çözeltisi kullanılarak aktive edilmiştir. Ayrıca alkali akışkanın bağlayıcıya oranı, alkali sıvının molaritesi (12 M) ve sodyum hidroksit sodyum meta silikat oranı da sabit olarak tutulmuştur (1/2). Sonuçlar, çözelti / bağlayıcı oranının, yüksek fırın cürufu yüzdesinin ve kür süresin artması ile birlikte dayanımın arttığını göstermiştir [54].

Wongsa v.d. (2018) tarafından yapılan çalışmada; yüksek kalsiyumlu uçucu kül, sodyum silikat ve sodyum hidroksit karışımı ile aktive edilerek pomza agregalı ve ezilmiş kil tuğlası agregalı hafif betonlar ve normal agregalı geopolimer betonlar üretilmiştir. Üretilen hafif betonlarda işlenebilirlik, basınç dayanımı, kopma mukavemeti, yüzey aşınma direnci, yoğunluk, ısı iletkenlik ve yangın dirençleri karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Sonuçlar hem ezilmiş kil tuğlasının hem de pomza agregalı geopolimer betonların, doğal agregalar içeren geopolimerlere kıyasla daha iyi ısı yalıtımı ve yangına dayanıklılık özellikleri sergilediğini göstermiştir. Ayrıca kırılmış kil tuğlası agregası ile üretilen betonların yapısal hafif beton olarak uygun olduğu belirtilmiştir. Pomza agregası ile üretilen betonlar için basınç dayanımının önemli ölçüde daha düşük olduğu fakat ısı iletkenliklerinin de diğer betonlara göre düşük olduğu ve beton blokların üretimi için uygun olduğu görülmüştür. Ezilmiş kil tuğlası agregalı ve pomza agregalı betonların birim hacim ağırlıkları 1011–1749 kg / m³ arasında olurken basınç dayanımları ise 2.7-18.3 MPa olmuştur [55].

Wonga v.d. (2018) tarafından yapılan bir diğer çalışmada; dere agregası yerine agrega olarak % 100 lastik atığı içeren yüksek kalsiyum uçucu kül esaslı geopolimer harçların mekanik ve termal özellikleri deneysel olarak belirlenmiştir. Alkali çözeltinin uçucu

kül oranına etkisi (AS / FA), sodyum hidroksit (SH) çözeltisinin konsantrasyonu, sodyum silikatın sodyum hidroksit oranı (SS / SH) derişimi ve lastik atığı içeren geopolimer harcın mekanik ve termal özellikleri ile kür sıcaklıkları incelenmiştir. Sonuç olarak, %100 dere agregası içeren kontrol geopolimer harçları ile lastik atığı içeren geopolimer harçlar karşılaştırılmıştır. Çalışmada geliştirilen hafif uçucu kül bazlı geopolimer harçlar, 1067-1275 kg / m³'lük bir yoğunluğa, 2.07-3.29 MPa'lık basınç dayanımına, 0.98-1.89 MPa'lık eğilme dayanımına ve 0.237-0.298 W / mK'lık ısı iletkenliğe sahip olduğu belirtilmiştir. Geliştirilmiş lastik atıklı geopolimer harçlar, oldukça düşük ısı iletkenliği ile daha hafif ve çevre dostu olan tuğlaların / blokların imalatı için son derece uygun olduğu, böylece portland çimentosu ve doğal kumdan yapılan geleneksel tuğlalar / bloklarla karşılaştırıldığında üstün yalıtım özellikleri sağladığı belirtilmiştir [56].

Bakharev v.d. (1999) tarafından yapılan çalışmada; alkalilerle ile aktive edilmiş karışımlarda bağlayıcı olarak cüruf, aktivatör olarak ise sodyum hidroksit, sodyum silikat, sodyum karbonat ve sodyum fosfat kullanmıştır. Sonuç olarak kür sıcaklığı 60 °C olarak belirtilmiş ayrıca elde edilen örneklerin basınç dayanımlarının 20 ila 40 MPa arasında olduğu ve en etkili aktivatörün sodyum silikat olduğu ileri sürülmüştür [57].

Chi v.d. (2013) tarafından yapılan çalışmada; alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufu/uçucu küllü bağlayıcıların Na₂O oranı %4 ve %6 oranında tutulmuş, kuruma büzülmesi, basınç ve eğilme dayanımı ayrıca su emme deneyleri yapılmış, kuruma büzülmesi değerleri hariç diğer deneyler olumlu sonuçlar vermiştir [58].

Puertas v.d. (2000) tarafından yapılan çalışmada; uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun eşit miktarda kullanıldığı ve 10 M NaOH solüsyonu ile aktive edilen karışımlarda, 25 °C kür yapılan numunelerden elde edilen 28 günlük basınç dayanım değeri 50MPa olarak bulunmuştur [59].

Jimenez v.d. (2003) tarafından alkalilerle aktive edilen uçucu küllerin reaktivitesi üzerinde yapılan araştırmada; en önemli parametrelerin, reaktif silika içeriği, amorf faz miktarı, tane dağılımı ve kalsiyum içeriği olduğu belirtilmektedir [60].

Ng v.d. (2018) tarafından yapılan derleme makale çalışmasında; portland çimentosu kullanımının azaltılması konusunun birçok araştırmacı tarafından ciddi şekilde yapıldığı belirtilmektedir. Geopolimer matrisini oluşturmak için malzeme ve aktivatör çözeltisi kullanan geopolimerizasyon teknolojisi, portland çimentosu bazlı beton ile ilgili bazı sorunların azaltılmasına da yol açabileceği belirtilmektedir. Birçok çalışmada da geopolimer betonun, normal betondan daha yüksek basınç dayanımı, daha yüksek asit direnci ve daha düşük büzülme değerini aldığı belirtilmiştir. Ayrıca yapılan derleme makalesinde, geopolimer numunelerinin mikro yapı analizleri ve geopolimerlerin çeşitli bağlayıcılarla karşılaştırılması ele alınmaktadır. Kullanılan çeşitli bağlayıcıların ve bunların mikro yapısal incelemelerinin, farklı sodyum hidroksit veya fosforik asit çözeltisi molaritesinin, sıvı-bağlayıcı oranının, kür sıcaklığının ve süresinin farklı özelliklerde geopolimerler verdiğini ortaya koymaktadır. Geopolimerizasyonun daha yoğun geopolimer jel matrisi oluşumu nedeniyle mikro gözeneklerin birbirine bağlanmasını önlediği belirtilmiş olup genellikle 12M sodyum hidroksit çözeltisi, düşük sıvı-bağlayıcı oranı (yaklaşık 0.4) ve en az 24 saat boyunca yaklaşık 70 ° C'deki kürleme sıcaklığının kullanılması ile yüksek mukavemetli geopolimerlerin elde edilebileceği belirtilmiştir [61].

Kwasny v.d. (2018) tarafından yapılan çalışmada; oda sıcaklığında sertleşen geopolimer harçlar, kalsine litomar ve potasyum silikat aktivatörü kullanılarak formüle edilmiştir. Karışım oranı parametrelerinin geopolimer beton üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Geopolimer betonların davranışı, portland çimentosu bazlı harçların (PCM) davranışıyla karşılaştırılmıştır. İstatistiksel olarak tasarlanan deneyler, su / katı (w / s) oranındaki bir artışın, geopolimer betonların basınç mukavemetini azaltırken işlenebilirliği ve kür süresini artırmada baskın bir etkisi olduğunu ortaya koyulmuştur [62].

Koushkbaghi v.d. (2019) tarafından yapılan çalışmada; alüminosilikat kaynağı olarak metakaolin (MK) ve doğal agreganın kısmi ikame maddesi olarak geri dönüştürülmüş beton agregası (RCA) olarak kullanılması ile elde edilen geopolimer betonun özellikleri belirtilmiştir. Sodyum silikat (SS) ve sodyum hidroksit (SH) oranlarına ve RCA'nın farklı oranlarda geopolimer betonun mekanik ve dayanıklılık özellikleri üzerine etkileri belirlenmiştir. Geopolimerlerin mikro yapı değişiklikleri taramalı

elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri ile değerlendirilmiş olup her ne kadar RCA kullanımı basınç dayanımını% 28'e kadar azaltsa da inşaat uygulamaları için dayanımın yeterli olduğu belirtilmiştir. Ek olarak SS / SH oranının arttırılması, klorid iyon geçirgenliğini ve geopolimer betonun emilimini azaltmıştır. Morfoloji sonuçları, RCA ve bağlayıcı arasındaki ara yüzey geçiş bölgesi (ITZ) genişliğinin SS / SH oranının artmasıyla azaldığını göstermiştir. Ayrıca geri dönüştürülmüş inşaat ve yıkıntı atıklarının inşaat endüstrisinin teknik, ekonomik ve çevresel açıdan sürdürülebilirliğine önemli ölçüde katkıda bulunabileceği sonucuna varılmıştır [63].

Long v.d. (2019) tarafından yapılan çalışmada; alkali ile aktive olan cürufllu kompozitlerin (AASC) üretiminde genellikle büyük miktarda cürufun gerektiği ve geliştirilmiş atık perlitin de (WEP) çevre döngüsünde kullanılabilecek bir tür endüstriyel atık olduğu belirtmiştir. Yapılan çalışmada, geliştirilmiş atık perlitin alkali aktivasyonda bağlayıcı olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Sonuçlar, geliştirilmiş atık perlitin alkali aktivasyon ile imha maliyetlerini azaltabileceği ve daha sonra inşaat sektörü için yeşil ve sürdürülebilir kompozitlerin üretimini teşvik edebileceğini göstermiştir [64].

Top v.d. (2019) tarafından yapılan çalışmada; sırasıyla alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum metasilikat (Na_2SiO_3) kullanılmıştır. Geopolimer beton üretim prosesinde ise hafif agrega içeren uçucu kül atıkları kullanılmıştır. Üretimi yapılan örneklerin kür sıcaklığına, katı / sıvı oranına ve alkali aktivatörlerin konsantrasyonuna bağlı olarak geopolimer beton üretimi araştırılmıştır. Kür sıcaklığı ve alkali aktivatör konsantrasyonunun geopolimerizasyonda etkili parametreler olduğu belirtilmiştir. Ayrıca hafif geopolimer betonlarının üretimi ile geliştirilmiş perlit (EP) ve asidik pomza (AP) agregalarının etkileri araştırılmıştır. Hafif geopolimer betonların tek eksenli basınç dayanımları 10-50 MPa aralığında ve birim ağırlıkları ise 1250 ila 1700 kg / m³ arasında değiştiği belirtilmiş olup asidik pomza agregasından ziyade geliştirilmiş perlit agregalarının eklenmesiyle daha hafif betonların elde edildiği belirtilmiştir [65].

Abhijeet v.d. (2013) tarafından kendiliğinden yerleşen betonlar üzerinde yapılan çalışmada; çimento yerine uçucu kül ikame edilmiş ve ince agrega yerine ise toz perlit

kullanılmıştır. Optimize edilmiş uçucu kül ve toz perlit kullanılan çalışmada uçucu kül ve perlit ilavesinin karışımın yoğunluğunu düşürdüğü ve ısı iletkenlik değerlerinin ise tüm sıcaklık aralıklarında yoğunluğun azalması ile azaldığı belirtilmiştir [66].

Wongkeo v.d. (2019) tarafından yapılan çalışmada; bağlayıcı olarak uçucu kül, aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi ve sodyum silikat (Na_2SiO_3), hafif beton üretimi için ise hacim genleşmesi sağlamak amacıyla alüminyum tozu kullanılmıştır. Basınç dayanımı, birim hacim ağırlık ve su emme miktarının test edildiği çalışmada aynı zamanda ısı iletkenlik değerleri de incelenmiştir. İlk önce, NaOH konsantrasyonunun geopolimer hafif betonun özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. 7.5, 10 ve 12.5 M'de NaOH konsantrasyonu ve 0.5'te sıvı / bağlayıcı oranı tasarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar; 633 ila 763 kg / m³ aralığında birim hacim ağırlığı ve % 22 ila 31 aralığında su emme değerleri elde edilmiştir. Maksimum basınç dayanımı 1.7 MPa ve ısı iletkenlik değeri ise 0.31 W / m.K olarak elde edilmiştir. İkinci olarak Na_2SiO_3 'ün NaOH'a oranının 1, 1.5 ve 2 olduğu geopolimerin hafif beton özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Maksimum basınç dayanımı 4.4 MPa olurken birim hacim ağırlık değeri ise 1.428 kg / m³ elde edilmiştir. Ayrıca, %16 ila 18 aralığında su emme ve 0.15 ila 0.3 W / m.K aralığında termal iletkenlik elde edilmiştir. Sonuçlar, Na_2SiO_3 ile birleştirilen NaOH kullanılması, geopolimer hafif betonun basınç dayanımını ve kütle yoğunluğunu arttırdığını, su emme ve ısı iletkenliğinin azaldığını göstermiştir [67].

Ghina v.d. (2019) tarafından beton üretimindeki karbon emisyonlarını azaltmak ve sürdürülebilirlik gereksinimlerini karşılamak ve sıradan portland çimentosunun (OPC) yerini alacak yeni bir bağlayıcı malzemeye ihtiyaç duyulması sebebi ile yapılan çalışmada; ortam koşulunda kürlenmiş geopolimer beton karışımlarını hazırlamak için tipik olarak iki aktivatör yerine sadece bir aktivasyon çözeltisi kullanılmıştır. Uçucu kül, öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu (GGBS) ve silis dumanı, mekanik özellikler, mikroyapısal performans ve çevresel etki açısından değerlendirmeler yapabilmek amacıyla farklı beton karışımlarını üretmek için kullanılmıştır. Çalışmada yedi farklı karışım hazırlanmış olup kullanılan malzemeler; geopolimer bağlayıcıları aktive etmek için 10 M konsantrasyonunda aktive edici çözelti, kaba agrega, ince agrega, F sınıfı uçucu kül, öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu GGBS, silis dumanı, çimento ve

NaOH'dur. Sodyum hidroksit (NaOH) topakları (% 99 saflıkta), her bir karışımdan bir gün önce kostik çözeltiyi yapmak için laboratuvarında musluk suyunda çözülmüştür. Aktive edici çözelti, karışımda kullanılmadan önce oda sıcaklığına soğumaya bırakılmıştır. Aktive edici çözeltinin bu araştırmada kullanılan reaktif katılara oranı 0.35'tir. Sadece OPC içeren kontrol beton karışımında hem geopolimer hem de normal beton karışımlarında aynı özellikleri korumak için su / çimento (w / c) oranı da 0.35'tir. %100 çimento yerine GGBS ile değiştirilen geopolimer betonda, numunelere ısı kürü uygulanmadan 28 günde 36 MPa basınç dayanımı sağlamıştır. Yeni geopolimerin basınç dayanımının normal betona göre %12 arttığı, ayrıca geopolimer betonun karbon emisyonlarını %60'tan fazla azaltma potansiyeline sahip olduğu belirtilmiştir [68].

Shekhovtsova v.d. (2014) tarafından yapılan çalışmada; sodyum oksit konsantrasyonunun, su/bağlayıcı oranının, sıcaklığın ve yüksek sıcaklıkta kür süresinin alkali ile aktive edilmiş uçucu kül çimento hamurunun basınç dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Alkali konsantrasyonu uçucu kül kütlelerinin %3 ila % 15 Na₂O arasında değiştirilmiştir. Na₂O'da % 3'ten % 9'a çıkan artış, 28 günde hamurların basınç mukavemetini 26,1 MPa'dan 50,8 MPa'ya artırmıştır. Na₂O 'da % 15'e kadar artış, mukavemette bir artış sağlamadığı, % 9 Na₂O ile aktif hâle getirilen hamurun 28 günde en yüksek mukavemete sahip olduğu belirtilmiştir. Sıcaklık ve yüksek sıcaklıkta kür süresi, erken yaşta basınç mukavemetini etkileyen kritik faktörler olarak belirtilmiştir. Ayrıca su/bağlayıcı katı oranı, basınç dayanımını önemli ölçüde etkilemiştir. Hamurların su/bağlayıcı katı oranının 0.18'den 0.29'a yükselmesi, basınç mukavemetinde 49.3 MPa'dan 21.3 MPa'ya düşüşe neden olmuştur [69].

Ryu v.d. (2013) tarafından yapılan çalışmada; bağlayıcı olarak % 100 uçucu kül kullanarak çimentosuz alkali aktif betonun geliştirilmiştir. Yapılan çalışma, alkali aktivatörlerin kimyasal değişikliklerinin harcın basınç dayanımı üzerindeki etkilerini incelemeyi ve harcın mikro yapısını analiz etmeyi amaçlamaktadır. Yapılan deneysel çalışmalar, alkali aktivatörlerin daha yüksek molariteye sahip olmasının erken dayanım üzerinde önemli bir etkisinin olduğunu göstermiştir. Ek olarak yapının SEM ve EDS ile analizi, harcın yapısı üzerinde önemli etkiye sahip bileşenlerin Al ve Si bileşenleri olduğunu göstermiştir. Ayrıca gözeneklilik analizinde ise mekanik performansı doğrulayan sonuçlar elde edilmiştir [70].

Aliabdo v.d. (2016) tarafından, bağlayıcı olarak uçucu kül ve portland çimentosu, aktivatör olarak ise sodyum hidroksit ve sodyum silikatın kullanıldığı geopolimer beton karışımları üzerinde yapılan çalışmada; uçucu kül içeriğinin artırılması, uçucu kül bazlı geopolimer betonun işlenebilirliğini artırmıştır. Buna ek olarak uçucu kül içeriğinin artırılması, basınç dayanımı da arttırmıştır. Ayrıca uçucu kül içeriğinin artırılması su emilimini ve gözenekliliğini de azalttığı belirtilmiştir. Uçucu kül bazlı geopolimerde ilave portland çimentosu kullanılması betonun işlenebilirliğini azaltmış ancak basınç dayanımını artırmıştır. Ayrıca portland çimentosu eklenmesinin su emilimini ve gözenekliliği azalttığı belirtilmiştir. Kür sırasında sıcaklığının 70 °C'ye kadar yükseltilmesi, geopolimer beton özelliklerini iyileştirmiş, su emilimini ve gözenekliliği azaltmıştır. Düşük kür sıcaklığında bile kür süresinin artırılmasının, basınç dayanımını artırdığı, su emilimini ve gözenekliliğini de azalttığı belirtilmiştir [71].

Şengül v.d. (2011) tarafından, birim hacim ağırlığı 700 ile 2000 kg/m³ arasında değişen genleştirilmiş perlitin doğal agregaya ile yer değiştirdiği betonlar üzerinde yapılan çalışmada, basınç dayanımının ve elastisite modülünün perlit içeriğinin artmasıyla azaldığı, su emme miktarının ise perlit içeriği arttıkça arttığı belirtilmiştir. Test sonuçlarının, termal iletkenliğin, perlit kullanımıyla büyük ölçüde iyileştirildiğini ve termal iletkenlik ile birim hacim ağırlık arasında güçlü bir ilişki elde edildiğini gösterdiği belirtilmiştir [72].

Topçu v.d. (2008) tarafından, genleştirilmiş perlit agregasının normal agregaya ile % 0 ila % 60 aralığında yer değiştirilmesi suretiyle yapılan çalışmada; beton karışımlarında minimum birim ağırlığın 300 dozajda 1800 kg / m³ elde edildiği ayrıca çimento tiplerine göre genleştirilmiş perlitin % 30'luk yer değiştirme oranlarında 20 ila 30MPa arasında basınç dayanımları elde edildiği belirtilmiştir. Mekanik özelliklerde bazı kayıplara rağmen genleştirilmiş perlit agregalı betonların yeterli değişim oranına sahip hafif beton olarak kullanılabileceği belirtilmiştir [73].

Demir v.d. (2018) tarafından yapılan çalışmada; uçucu kül, kireç, alçı ve genişletilmiş perlite birlikte kullanarak bir karışım oluşturulmuştur. Bu karışım sonucu oluşan

malzemenin; birim hacim ağırlığı $0,61 \text{ kg/dm}^3$ iken 28 günlük basınç dayanımının ise $1,40 \text{ MPa}$ olarak elde edildiği belirtilmiştir [74].

Erdem v.d. (2007) tarafından yapılan çalışmada; öğütölüp çimentoya ikame edilen toz perlitin, çimento ve beton endüstrisinde kullanılacak yeterli puzolanik özelliğe sahip olduğu belirtilmiştir. Ayrıca erken mukavemet kayıplarına rağmen perlitlerin harmanlanmış çimentolarda kullanılmasının, öğütme verimliliğine bağlı olarak portland çimentosu tüketimini azaltmaya yardımcı olacağı ve bu sebeple de fayda sağlayacağı belirtilmiştir [75].

Demirboğa v.d. (2001) tarafından yapılan çalışmada; %100 pomza agregası (PA) kullanılan örneklerle göre %40 pomza agregası (PA) + %60 genleştirilmiş perlit agregası (GPA) kullanılan örneklerin birim hacim ağırlıklarının daha düşük olduğu belirtilmiştir. Ayrıca basınç dayanımlarında da %40 (PA) + %60 (GPA) kullanılan karışımların %100 (PA) agregası kullanılan karışımlara göre daha yüksek basınç dayanımı verdiği belirtilmiştir [76].

Yu v.d. (2003) tarafından yapılan çalışmada; öğütölmüş perlit çimento yerine % 0'dan % 40 oranına kadar ikame edilmiştir. Perlit tozu katkılı betonların 3. gündeki dayanımları katkısız betonlara oranla daha düşük elde edilmiştir. 28. gün ve 91. gün dayanımlarına bakıldığında ise genel olarak basınç dayanımlarının katkısız betonlara göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir [12].

Liang v.d. (2018) tarafından genleştirilmiş perlit agregası ile yapılan çalışmada; su / çimento oranı 0,5 ile 0,7 aralığındadır. Agregası olarak ise boyutsal optimizasyonu yapılmış %100 hacim içeriğine sahip genleştirilmiş perlit agregası kullanılmıştır. Sonuç olarak aerjel malzemesi ile doldurulmuş genleşmiş perlit içeren betonlarda 0.098 W / (m K) iletkenlik ve 3.71 MPa 'lık basınç dayanımına ulaşılmıştır [77].

Demirboğa v.d. (2001) tarafından yapılan çalışmada; genleştirilmiş perlit agregası ve pomza agregaları kullanılarak oluşturulan beton karışımlarının, termal iletkenlik katsayıları ölçülmüştür. Ayrıca çalışmada, silis dumanı ve C sınıfı uçucu külün hafif agregalı betonun ısı iletkenliği üzerindeki etkisinin de belirlemek için silis dumanı ve uçucu kül çimento yerine %10, % 20 ve % 30 oranlarda çimento yerine ikame

edilmiştir. Yalnızca çimento ve pomza agregası içeren örneklerde 0,3178 W / mK termal iletkenlik katsayısı değeri elde edilmiştir. Agregası olarak sadece genişletilmiş perlit agregası ve çimento yerine %30 uçucu külün kullanıldığı örneklerde ise 0.1472 W / mK olan en düşük termal iletkenlik değerine ulaşılmıştır. Ayrıca pomza agregası yerine genişletilmiş perlit agregası kullanımının betonun ısı iletkenliğinde düşüşe neden olduğu belirtilmiştir [28].

Bu amaçlarla daha önceki yapılmış olan çalışmalardan da faydalanılarak;

1. Aşamada öğütölmüş ham perlitin geopolimer betonda bağlayıcı olarak kullanılabilirliğini araştırmak amacı ile standart kum agregalı örnekler üzerinde basınç dayanım testleri yapılacaktır. Bunun için farklı çözelti molariteleri, kür sıcaklıkları, kür süreleri ve su/bağlayıcı oranlarının basınç dayanımları üzerindeki etkileri incelenecektir.
2. Aşamada agrega olarak standart kum yerine genişletilmiş perlit agregası kullanılacak ve genişletilmiş perlit agregalı örneklerin dayanım ve birim hacim ağırlıkları belirlenerek optimum dayanım ve birim hacim ağırlıklar belirlenecektir.
3. Aşamada optimum dayanım ve birim hacim ağırlıklarındaki genişletilmiş perlit agregalı örneklerin ısı iletkenlik katsayıları belirlenecektir.
4. Aşamada ısı iletkenlik katsayısı belirlenen örneklerin mikro yapıları incelenerek iç yapıdaki oluşumlar değerlendirilecektir.
5. Aşamada cıvalı porozimetre deneyleri ile örnekler içerisindeki boşluk hacimleri ve boşluk çapları belirlenecektir.
6. Aşamada örnekler üzerinde elde edilen sonuçlar değerlendirilecektir. Ayrıca örneklerin, daha önce yapılan çalışmalar ile benzeyen ve ayrılan yönleri karşılaştırmalı olarak verilecektir.

Yapılan çalışma ile birlikte; perlitin ekonomiye kazandırılması ile birlikte çimento bağlayıcılı hafif malzemeler ile kıyaslandığında ise hafif, dayanımı yüksek, yalıtım özellikleri daha iyi ve kullanılabilir bir malzeme elde etmek; bununla birlikte çimento üretimi esnasında çevreye verilecek zararı en aza indirmek amaçlanmıştır. Bu

amaçlarla örnekler üzerinde deneysel çalışmalar yapılarak sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilecektir.



2. MATERYAL VE METOT

2.1. Materyal

2.1.1. Perlit

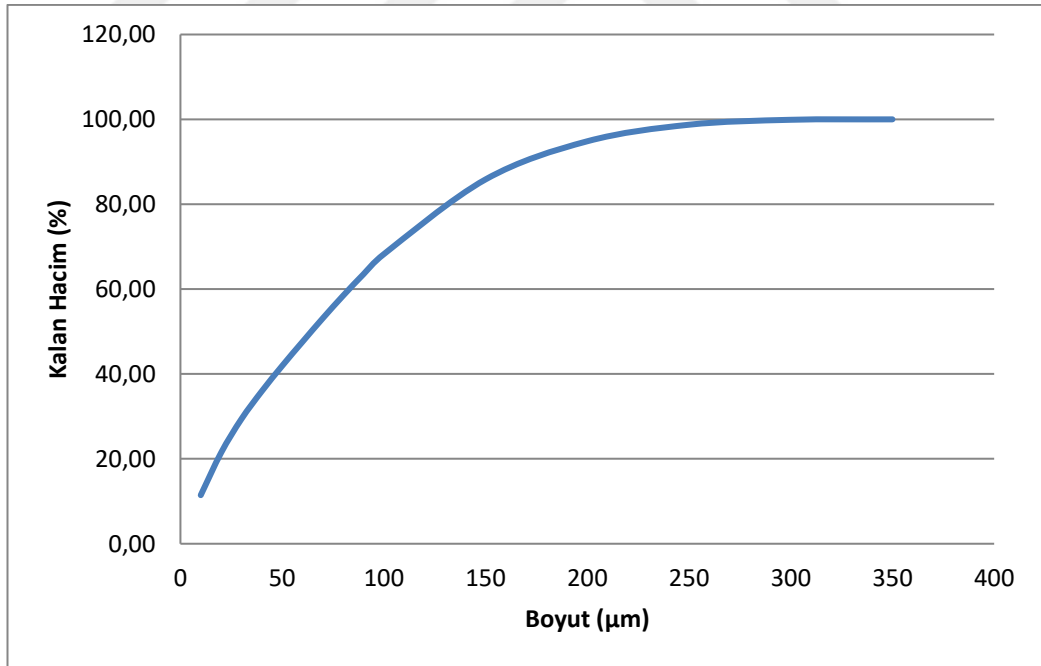
Yapılan çalışmada kullanılan perlit Çankırı-Orta maden rezervinden elde edilmiştir. Ham perlit toz hâline getirmek için dakikada 60 devir dönen bilyeli öğütücüde 60 dakika boyunca öğütme işlemi uygulanmıştır. Ham perlitin öğütülmeden önceki boyutları 0,60 mm ile 1,20 mm arasında olup ham perlit fabrikasından bu şekilde elde edilmiştir. Öğütülmüş perlitin yoğunluğu 1,95 g/cm³tür. Karışımlarda kullanılan perlitin kimyasal özellikleri Çizelge 2.1’de, boyutsal özellikleri ise Çizelge 2.2. ve Şekil 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Toz perlitin kimyasal özellikleri

Kimyasal Bileşim	Oran (%)
CO ₂	0,03
Na ₂ O	3,63
Al ₂ O ₃	15,67
SiO ₂	73,91
P ₂ O ₅	0,29
SO ₃	0,11
K ₂ O	5,25
CaO	0,77
Fe ₂ O ₃	0,34

Çizelge 2.2.Toz perlitin parçacık boyut analizi

Boyut (μm)	Kalan Hacim (%)
10	11,45
20	21,45
30	29,40
40	35,94
50	41,91
60	47,58
70	53,14
80	58,47
90	63,52
100	68,24
150	85,86
200	94,84
250	98,74
300	99,90
350	100



Şekil 2.1. Toz perlitin parçacık boyutanalizi

Ham ve öğütülmüş perlitin görünüşü Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2. Ham (a) ve öğütülmüş perlitin (b) görüntüsü

2.1.2. Sodyum Hidroksit (NaOH)

NaOH alkali çözeltisi oluşturmak için kullanılan kimyasal minimum %98 NaOH içermektedir. NaOH' un kimyasal özellikleri Çizelge 2.3'te verilmiştir.

Çizelge 2.3. NaOH'un kimyasal kompozisyonu

Kimyasal Adı	Sodyum Hidroksit (Kostik)
Kimyasal Formülü	NaOH
Molekül Ağırlığı	40 gr / mol
Asidimetrik	$\geq \% 97$
Na ₂ CO ₃	$\leq \% 1$
Cl	$\leq \% 0,01$
SO ₄	$\leq \% 0,01$
Ağır Metal	$\leq 0,002$
Al	$\leq 0,002$
Fe	$\leq 0,002$

2.1.3. CEN Referans Kumu (Standart Kum)

Çalışmada kullanılan standart kum Limak Trakya Çimento Fabrikasında üretilen TS EN 196-1 standartlarında belirtilen CEN referans kumudur. Referans kumun tane dağılımı Çizelge 2.4’de verilmiştir [78].

Çizelge 2.4. Referans kumunun tane dağılımı

Kare göz açıklığı (mm)	Yığılımlı kalan (%)
2.00	0
1.60	7 ± 5
1.00	33 ± 5
0.50	67 ± 5
0.16	87 ± 5
0.08	99 ± 1

2.1.4. Çalışmada Kullanılan Su

Çalışmada kullanılan su, şebeke suyu olarak da bilinen içme suyudur.

2.1.5. Genleştirilmiş Perlit

Çalışmada kullanılan genleştirilmiş perlitin fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 2.5’te, görünüşü ise Şekil 2.3’te verilmiştir.

Çizelge 2.5. Genleştirilmiş perlitin kimyasal ve fiziksel özellikleri

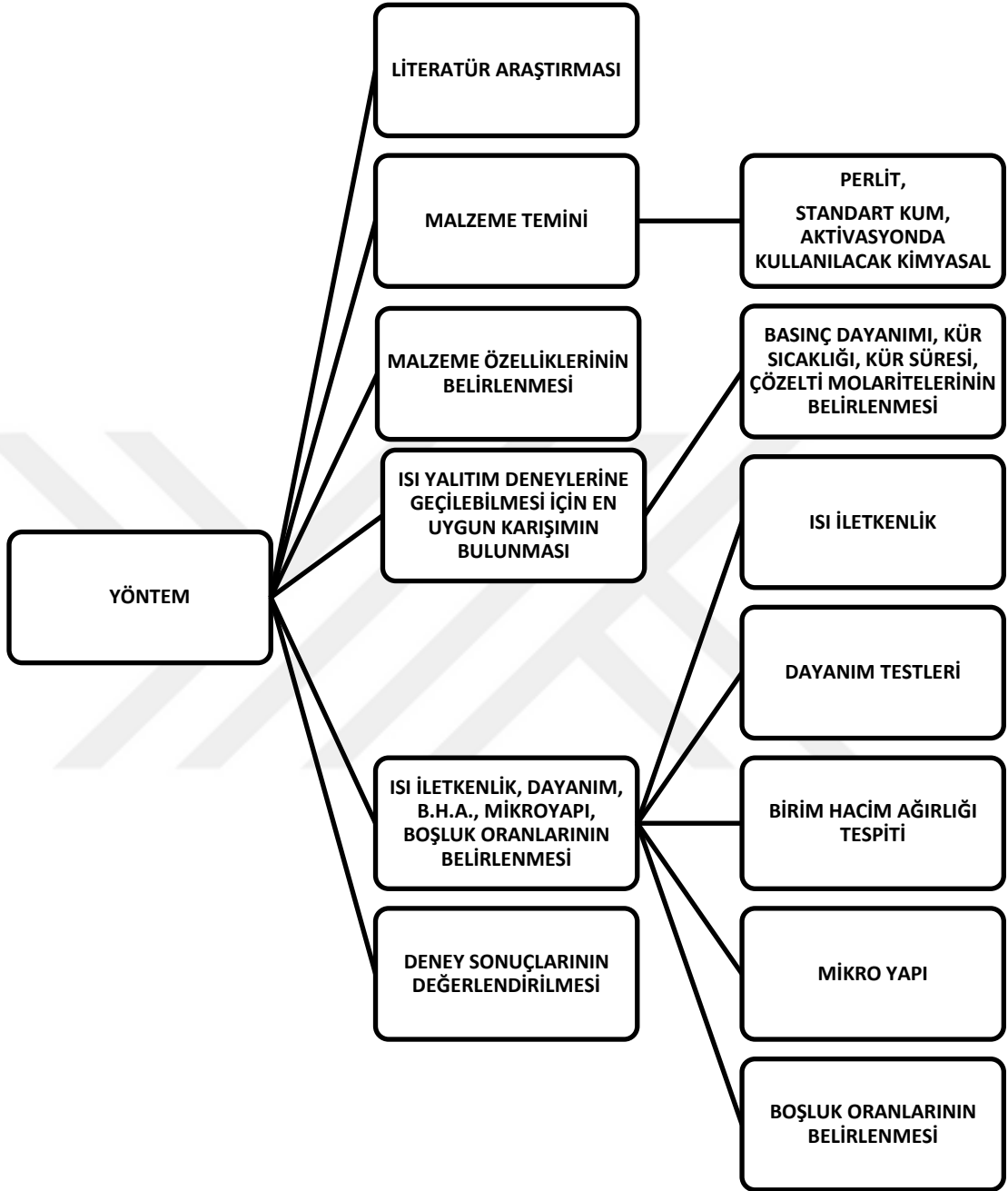
Kimyasal Bileşim	Oran (%)
MgO	0,1-0,2
Na ₂ O	3-4
Al ₂ O ₃	12-14
SiO ₂	71-74
TiO ₂	0,09-0,012
K ₂ O	5-6
CaO	0,1-0,8
Fe ₂ O ₃	0,5-1
Fizksel Özellikler	
Boyut: 0 – 2,5 mm	
Renk: Beyaz	
Nem: %1	
Yoğunluk: 55-65 kg/m ³	
Ph: 6-8,5	



Şekil 2.3. Genleştirilmiş perlitin görüntüsü

2.2. Metot

Çalışmanın planı Şekil 2.4'te verilmiş olup birinci aşamada literatür taraması yapılarak çalışmanın yapılabilirliği kararı verilmiştir. İkinci aşamada, malzeme temini yapılmıştır. Üçüncü aşamada, deneysel çalışmaların başlangıcı olarak malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlenmiştir. Dördüncü aşamada, geopolimer örneklerin dökümleri gerçekleştirilerek birim hacim ağırlıkları belirlenip basınç dayanım testleri yapılmıştır. Beşinci aşamada ısı iletkenlik katsayılarının ölçülmesi için özel olarak hazırlanan kalıplara daha önce basınç dayanım testleri için kullanılan karışım oranları doğrultusunda dökümler gerçekleştirilmiş ve ölçümler yapılmıştır. Altıncı aşamada, mikro yapıları incelenen örneklerin, yedinci aşamada ise cıvalı porozimetre deneyi ile boşluk çapları ve boşluk hacimleri tayin edilmiştir. Son olarak araştırma bulguları ile birlikte değerlendirmeler yapılmıştır.



Şekil 2.4. Çalışma planı

2.2.1. Deneysel Çalışmalar

İlk aşamada; dayanım açısından yapılan değerlendirmelerde optimum su/bağlayıcı oranı, optimum kür süresi ve optimum kür sıcaklığı belirlenmeye çalışılmıştır. Geopolimer harçlarda silis kaynağı olarak ham perlit, çimento inceliğine getirilerek bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Agregada olarak ilk aşamada standart kum kullanılan geopolimer harçlar, NaOH alkali çözeltisi kullanılarak hazırlanmıştır. Burada çözelti molaritesi hesabının değişkenleri su ve sodyum hidroksit miktarı olmuştur. Standart kum kullanılarak dökümleri gerçekleştirilen örneklerin basınç dayanımlarını hedeflenen seviyelere çıkarmak için su / bağlayıcı oranları, çözelti molariteleri, kür süreleri ve kür sıcaklıkları değiştirilmiştir.

İlk olarak perlit yataklarından elde edilen malzemenin dayanıma etkisi incelenmiştir. Aktivatör olarak ise farklı oranlarda sodyum hidroksit kullanılmıştır. İkinci aşamada ısı iletkenlikleri geliştirmek için hafif ve ısı yalıtım özelliğine sahip geliştirilmiş perlit, standart kumun yerine konarak birim hacim ağırlıkları ve bunun yanında dayanım kontrolü yapılmıştır. Üçüncü aşamada; dayanımları belli seviyede tutulan örneklerin birim hacim ağırlıklarının, ısı iletkenlik katsayılarının, boşluk miktarlarının ve mikro yapılarının incelenmesi işlemleri gerçekleştirilmiştir.

2.2.2. Geopolimer Deney Örneklerinin Hazırlanması

Geopolimer harçlarda silis kaynağı olarak ham perlit çimento inceliğine getirilmiş ve bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Agregada yerine farklı miktarlarda standart kum ve geliştirilmiş perlit, aktivatör olarak ise farklı miktarlarda sodyum hidroksit kullanılmıştır. Geopolimer harç örnekleri ASTM C109'da belirtilen [79] 50x50x50 mm boyutlarındaki kalıplara yerleştirilmiş ve NaOH alkali çözeltisi kullanılarak dökülmüştür. Sodyum hidroksit (NaOH) (% 98 saflıkta), her bir karışımdan bir gün önce kostik çözeltiyi yapmak için laboratuvarında musluk suyunda çözülmüştür. Aktive edici çözelti, karışımda kullanılmadan önce oda sıcaklığına soğumaya bırakılarak örneklerin dökümleri gerçekleştirilmiştir. Örnekler ilk olarak 24 ve 48 saat süreyle 80, 90, 100 ve 110 °C aralığında etüv kürü olmak üzere farklı kür durumları incelenmiştir. Ayrıca örnekler hazırlanıp direk sıcaklık kürüne tabi tutulmuştur. Örneklerin basınç

dayanımları belirlenerek dayanım açısından en uygun kür süresi, çözelti molarite oranı, su/bağlayıcı oranı ve kür sıcaklığı belirlenmiştir. Malzeme miktarları ve örneklerin adlandırılması ise Çizelge 2.6, Çizelge 2.7, Çizelge 2.8, Çizelge 2.9, Çizelge 2.10'da verilmiştir. Yapılan çalışmada öncelikle optimum kür süresi ve optimum kür sıcaklığı belirlenmeye çalışılmıştır.



Şekil 2.5. Harç hazırlanmasında kullanılan ekipmanlar

Şekil 2.5'te geopolimer harç hazırlamada kullanılan çimento mikseri, hassas terazi, 50*50*50 kalıp, çimento presi, sarsma tablası, dereceli mezür görüntüleri verilmiştir.



Şekil 2.6. Etüv içerisindeki geopolimer örnekler

Şekil 2.6'da etüv içerisindeki örneklerin görünüşü verilirken Şekil 2.7'de ise genişleştirilmiş perlit agregalı örneklerin kalıp içindeki görüntüsü verilmiştir.

Örnekler hazırlanırken ilk aşamada standart kum agregalı örnekler hazırlanmış olup malzeme miktarları ve isimlendirmeler Çizelge 2.7'de verilmiştir. Burada bağlayıcı miktarı agregat miktarının üçte biri olup TS EN 196-1'de belirtildiği gibidir. Standart kum agregalı örneklerin hazırlanmasındaki amaç dayanımı en yüksek seviyeye çıkarmak olmuştur. Bunun içinde Çizelge 2.7'den anlaşılacağı üzere çözelti molariteleri, kür sıcaklıkları ve su/bağlayıcı oranlarında değişiklikler yapılmıştır. İkinci aşamada agregasız yani geopolimer hamuru şeklinde örnekler hazırlanmıştır. Çizelge 2.8'de belirtildiği üzere sabit su/bağlayıcı ve sabit çözelti molaritesinde örnekler üzerinde kür sıcaklıklarının etkisi incelenmiştir. Üçüncü aşamada agregat olarak standart kum yerine genişleştirilmiş perlit agregası kullanılmış olup karışım oranları malzeme davranışına göre belirlenmiştir. Burada da amaç birim hacim ağırlık, basınç dayanımı ve ısı iletkenlik açısından en optimum örneği bulmak olmuştur.

Çizelge 2.9 ve 2.10’da belirtildiği üzere örnekler hazırlanırken hedeflenen birim hacim ağırlıkları elde etmek için su/bağlayıcı, su/agrega ve çözelti molaritelerinde değişiklikler yapılmıştır. Basınç dayanımlarını arttırmak için ise NaOH miktarlarını arttırarak çözelti molaritelerinin artması sağlanmıştır. Böylelikle en düşük birim hacim ağırlık değeri ve ısı iletkenlik değeri için en yüksek basınç dayanımı değerine ulaşmak amaçlanmıştır. Dördüncü aşamada, ısı iletkenlik katsayılarının belirlenmesi için Çizelge 2.10’daki miktarlar ve kür sıcaklığına bağlı kalarak Şekil 2.11 ve Şekil 2.12’deki örnekler hazırlanmıştır. Hazırlanan kalıplar özel olarak yaptırılmış olup örneklerin çapı 60 mm, yükseklikleri ise 10 mm olacak şekilde hazırlanmıştır. Beşinci aşamada, ısı iletkenlik katsayılarının ölçülmesi için hazırlanan örneklerin ölçümleri yapılmış ve aynı örneklerden kesilerek parçalar alınmıştır. Alınan parçaların bir kısmı mikro yapı incelemeleri için bir kısmı da cıvalı porozimetre deneyleri için kullanılmıştır.

Geopolimer harçların hazırlanması: Karıştırıcı çalışır durumda iken karıştırma kabına önceden soğutulmuş NaOH çözeltisi konmuş ve bağlayıcı malzeme eklenmiştir. Karıştırıcı 30 saniye süre ile çalıştırılmış ve karıştırıcı çalışır durumda iken agrega 30 saniye içerisinde eklenmiştir. Karıştırıcı yüksek hıza ayarlanarak 60 saniye karıştırma işlemine devam edilmiştir. Daha sonra karıştırıcı durdurularak 15 saniye süreyle kabın çeperleri ve tabanına sıyırma işlemi uygulanmıştır. Daha sonra yüksek hızda çalıştırılan karıştırıcı 300 saniye boyunca çalıştırılmış ve 50x50x50 mm boyutlarındaki kalıplara doldurmaya hazır hâle gelmiştir.

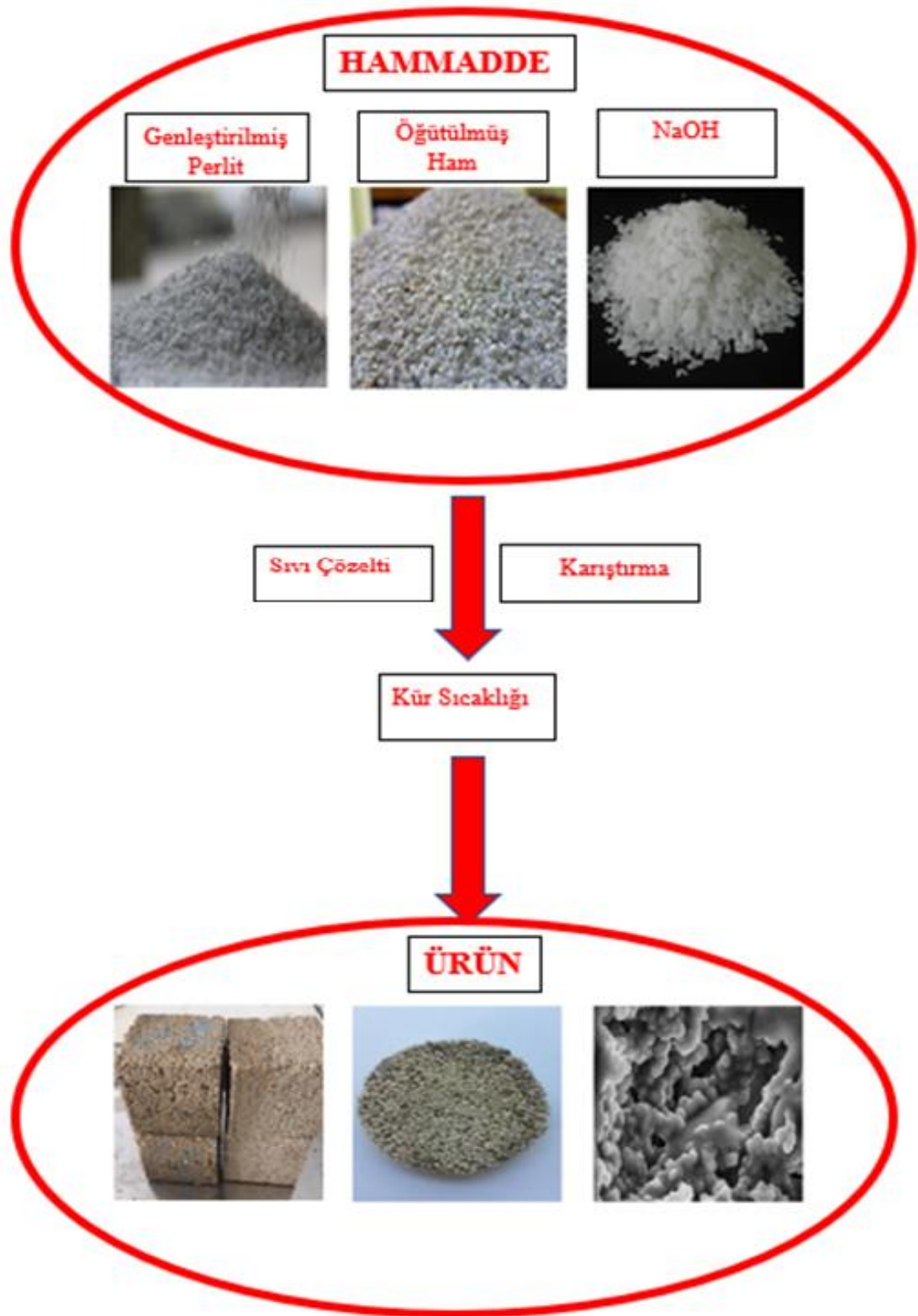
2.2.3. Geopolimer Örneklerin Deney Kalıbına Doldurulması

50x50x50 mm’lik prizmatik kalıplar için hazırlanan harçlar hazırlandıktan hemen sonra uygun bir kaşık ile karıştırma kabından doğrudan bir veya birkaç defada, her bir bölüm iki kısımda dolacak şekilde kalıplara doldurulmuştur. Harç tabakası, büyük yayıcı ile kenarlarından dik pozisyonda tutularak ve kalıp başlığıyla temas hâlinde olmak üzere, kalıbın her bölmesinde bir kez olmak üzere ileri geri hareket ettirilerek düzgün şekilde yayılmıştır [78].

Kalıp ve kalıp başlığı sarsma tablasına sıkıca tutturularak birinci tabaka 60 sarsma ile sıkıştırılmıştır. İkinci tabaka harç kalıba doldurularak küçük bir yayıcı ile düzeltilmiş ve 60 sarsma ile sıkıştırılmıştır. Kalıp dikkatli bir şekilde sarsma tablasından kaldırılmış ve kalıp başlığı çıkartılmıştır. Harcın fazlası hemen hemen dik tutulan bir metal masterla sıyrılmış, sağ ve sol yöne doğru enine testere hareketleri ile çekmek suretiyle yavaş yavaş hareket ettirilmiştir. Prizmaların yüzeyi, aynı master ile düz tutularak düzleştirilmiştir.



Şekil 2.7. Genleştirilmiş perlit agregalı geopolimer örneklerin kalıp içindeki görüntüsü



Şekil 2.8. Çalışmanın şekilsel özeti

2.2.4. Geopolimer Örneklerin Basınç Dayanım Testi

Basınç dayanım testleri ASTM C109'a göre 50x50x50 mm boyutunda küp numune kalıpları kullanılarak yapılmıştır. Basınç dayanımı cihazı deney için uygun kapasitede ve TS EN 196-1'e uygun (2400±200) N/s yükleme hızında ayarlanmış olup prizma kırılana kadar yükleme yapılmıştır [78]. Basınç dayanımı deneyinin sonucu, dökümü yapılan 6 adet geopolimer harcı basınç deneyi sonucunun aritmetik ortalaması olarak ifade edilmiştir.

2.2.5. Geopolimer Örneklerin Birim Hacim Ağırlıklarının Belirlenmesi

Boyutları 50 x 50 x 50 mm olan örnekler etüvden çıkarıldıktan sonra bir miktar soğumaya bırakılmıştır. Daha sonrasında örneklerin birim hacim ağırlıkları bulunmuş olup örneklerin etüv küründen sonra kalıptan çıkarılmış hâlleri Şekil 2.9'da verilmiştir.



Şekil 2.9. Etüvden çıkarılmış 50x50x50 mm boyutlu geopolimer örneklerin görüntüsü

2.3. Geopolimer Örneklerin Kodlandırılması

Geopolimer örneklerin kodlandırılması Çizelge 2.6'da verilmiş, adlandırmalar sözcüklerin ilk harfleri referans alınarak gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 2.6. Geopolimer örneklerin kodlandırılması

Uzun Ad	Kısa Ad
Standart Kum Agregalı Örneklerin Dayanımı	SAD
Agregasız (Perlit Tozlu) Örneklerin Dayanımı	PTD
Genleştirilmiş Perlit Agregalı Örneklerin Dayanımı	GPAD
Dayanım ve Isıl İletkenliği Ölçülen Genleştirilmiş Perlit Agregalı Örnekler	GPADI
Perlit Tozu	PT
Dayanım	D

2.3.1. Standart Kum Agregalı Geopolimer Örneklerin Kodlandırılması

Çizelge 2.7’de standart kum agregalı örneklerin, 90 °C, 100 °C, 110 °C kür sıcaklığındaki farklı su/bağlayıcı ve çözelti molaritesi oranlarındaki adlandırmaları verilmiştir. Burada SAD kısaltmasının anlamı Çizelge 2.6’da verilmiştir. Yanındaki rakam ise örnek sıralamasını göstermektedir.

Çizelge 2.7. Standart kum agregalı geopolimer örneklerin kodlandırılması

Örnek	Kür Sıcaklığı (°C)	Kür Süresi (Saat)	Molarite	Su/Bağlayıcı
SAD-1	90	24	7,72	0,45
SAD-2	90	48	7,72	0,45
SAD-3	90	24	11,59	0,45
SAD-4	90	48	11,59	0,45
SAD-5	90	24	15,45	0,45
SAD-6	90	48	15,45	0,45
SAD-7	100	24	7,72	0,45
SAD-8	100	48	7,72	0,45
SAD-9	100	24	11,59	0,45
SAD-10	100	48	11,59	0,45
SAD-11	100	24	15,45	0,45
SAD-12	100	48	15,45	0,45
SAD-13	110	24	7,72	0,45
SAD-14	110	48	7,72	0,45
SAD-15	110	24	11,59	0,45
SAD-16	110	48	11,59	0,45
SAD-17	110	24	15,45	0,45
SAD-18	110	48	15,45	0,45
SAD-19	100	24	6,95	0,5
SAD-20	100	48	6,95	0,5
SAD-21	100	24	10,43	0,5
SAD-22	100	48	10,43	0,5
SAD-23	100	24	13,91	0,5
SAD-24	100	48	13,91	0,5

2.3.2. Agregasız Geopolimer Örneklerin Kodlandırılması

Çizelge 2.8’de agregasız geopolimer örneklerin, 90°C, 110°C kür sıcaklığındaki adlandırmaları verilmiştir. Burada PTD kısaltmasının anlamı Çizelge 2.6’da verilmiştir. Yanındaki rakam ise örnek sıralamasını ifade etmektedir. Agregasız örneklerin hazırlanmasının sebebi; sadece silis kaynağı olan ham perlit tozu ve NaOH çözeltisinin geopolimer hamurlardaki dayanımını incelemek içindir. Ayrıca agregalı dökülen örneklerin farklı kür sıcaklıklarındaki davranışını teyit etmek için de agregasız örnekler hazırlanmıştır.

Çizelge 2.8. Agregasız geopolimer örneklerin kodlandırılması

Örnek	Kür Sıcaklığı (°C)	Kür Süresi (Saat)	Molarite	Su/Bağlayıcı
PTD-1	90	24	11,59	0,3
PTD-2	90	48	11,59	0,3
PTD-3	110	24	11,59	0,3
PTD-4	110	48	11,59	0,3

2.3.3. Genleştirilmiş Perlit Agregalı 1. Grup Geopolimer Örneklerin Kodlandırılması

Çizelge 2.9’da genleştirilmiş perlit agregalı 1. grup örneklerin, 80°C, 90°C, 100°C, 110°C kür sıcaklığındaki adlandırmaları verilmiştir. Burada GPAD kısaltmasının anlamı Çizelge 2.6’da verilmiş olup yanındaki rakam ise örnek sıralamasını ifade etmektedir.

Çizelge 2.9. Genleştirilmiş perlit agregalı 1. grup örneklerin kodlandırılması

Örnek	Kür Sıcaklığı (°C)	Kür Süresi (Saat)	Su / Agrega	Molarite	Su/Bağlayıcı
GPAD-1	110	24	4,27	11,59	0,5
GPAD-2	110	24	4,69	12,64	0,55
GPAD-3	110	24	5,12	13,91	0,6
GPAD-4	110	48	4,27	11,59	0,5
GPAD-5	110	48	4,69	12,64	0,55
GPAD-6	110	48	5,12	13,91	0,6
GPAD-7	90	24	3,84	15,45	0,45
GPAD-8	90	24	3,84	11,59	0,45
GPAD-9	90	24	3,84	7,72	0,45
GPAD-10	90	48	3,84	15,45	0,45
GPAD-11	90	48	3,84	11,59	0,45
GPAD-12	90	48	3,84	7,72	0,45
GPAD-13	80	48	3,55	13,91	0,5
GPAD-14	80	48	3,55	12,17	0,5
GPAD-15	80	48	3,28	13,91	0,5
GPAD-16	110	24	3,55	13,91	0,5
GPAD-17	110	24	3,55	12,17	0,5
GPAD-18	110	24	3,28	13,91	0,5
GPAD-19	110	48	3,05	13,91	0,5
GPAD-20	110	48	3,13	15,45	0,55
GPAD-21	110	24	3,05	13,91	0,5
GPAD-22	110	24	3,13	15,45	0,55
GPAD-23	110	24	1,93	10,03	1,3
GPAD-24	110	24	1,85	12,04	1,3
GPAD-25	110	24	1,76	12,17	1,5
GPAD-26	110	24	1,95	15,07	1,5

Çizelge 2.9’da genişletilmiş perlit agregalı 1. grup örneklerin adlandırılması yapılmış olup burada örneklerin molariteleri, su / bağlayıcı oranları, kür sıcaklıkları, su / agrega oranları ve kür süreleri verilmiştir.

2.3.4. Genleştirilmiş Perlit Agregalı 2. Grup Örneklerin Kodlandırılması

Çizelge 2.9’da genişletilmiş perlit agregalı 2. grup örneklerin, 110°C kür sıcaklığındaki adlandırmaları verilmiştir. Burada GPADI kısaltmasının anlamı Çizelge 2.6’da verilmiş olup yanındaki rakam ise örnek sıralamasını ifade etmektedir.

Çizelge 2.10. Genleştirilmiş perlit agregalı 2. grup örneklerin kodlandırılması

Örnek	Kür Sıcaklığı (°C)	Kür Süresi (Saat)	Su/Agrega	Molarite	Su/Bağlayıcı
GPADI-1	110	24	1,79	10,27	1,1
GPADI-2	110	24	2,05	9,85	1,5
GPADI-3	110	24	1,67	15,07	1,5
GPADI-4	110	24	1,50	15,07	1,5
GPADI-5	110	24	1,15	15,07	1,5
GPADI-6	110	24	1,05	16,23	1,5
GPADI-7	110	24	1,08	14,32	1,7
GPADI-8	110	24	1,07	12,17	2
GPADI-9	110	24	1,11	16,3	1,6
GPADI-10	110	24	1,21	10,14	2,4
GPADI-11	110	24	1,24	13,23	2,3

Çizelge 2.10’da genişletilmiş perlit agregalı 2. grup örneklerin kodlandırılması yapılmış olup burada örneklerin molariteleri, su / bağlayıcı oranları, su / agrega oranları, kür sıcaklıkları ve kür süreleri verilmiştir.

2.4. Isıl İletkenliklerin Ölçülmesi

Isıl iletkenlik değeri, Afyon Kocatepe Üniversitesi birimi olan Teknoloji Uygulama Araştırma Merkezinde gerçekleştirilmiştir. TCI- Thermal Conductivity Analyzer model termal iletkenlik katsayısı ölçüm analizi cihazı ile polimer, köpük ve seramik olarak üç farklı grup malzeme çeşitlerinin termal iletkenlik sabiti (k) oda sıcaklığında belirlenebilmektedir. Cihaz 3 cm çapa sahip hassas sensörü ile sensör üzerine konulan malzemenin termal iletkenlik sabiti (k) W/mK cinsinden belirlenmektedir. Ölçümü yapılacak malzemenin uygun bir yüzeyi (düz ve pürüzsüz) cihazın sensörü ile temas ettirilir; tek taraflı, ara yüzeyli ısı yansıtma sensörü, numuneye anlık bir sabit ısı kaynağı uygular. Cihaz sensör ile numune arasındaki sıcaklık etkileşiminden yola çıkarak malzemenin termal iletkenlik katsayısını(k) W/mK cinsinden belirlemektedir [80].

Çizelge 2.10’da belirtilen, basınç dayanımları ve birim hacim ağırlıkları belirlenen örneklerin tekrar aynı şartlarda dökümü gerçekleştirilmiştir. Ölçümler (TCI- Thermal Conductivity Analyzer Model) termal iletkenlik katsayısı ölçüm analizi cihazı ile ölçülmüş olup bu cihaz ASTM D 7984 standardı doğrultusunda çalışmaktadır [81].



Şekil 2.10. Isıl iletkenlik ölçüm cihazı görüntüsü



Şekil 2.11. ısı iletkenlik ölçümü yapılacak geopolimer örneklerin kalıpları

Şekil 2.11 ve Şekil 2.12’de ısı iletkenlikleri ölçülecek geopolimer örneklerin kalıp görüntüleri ve kalıptan çıkmış hâlleri gösterilmiştir. Kalıptan çıkarılan örneklerin Şekil 2.9’da verilmiş olan ısı iletkenlik katsayısını ölçüm cihazı ile ısı iletkenlik katsayıları belirlenmiştir.



Şekil 2.12. Isıl iletkenlik ölçümü yapılacak örneklerin kalıptan çıkmış görüntüsü

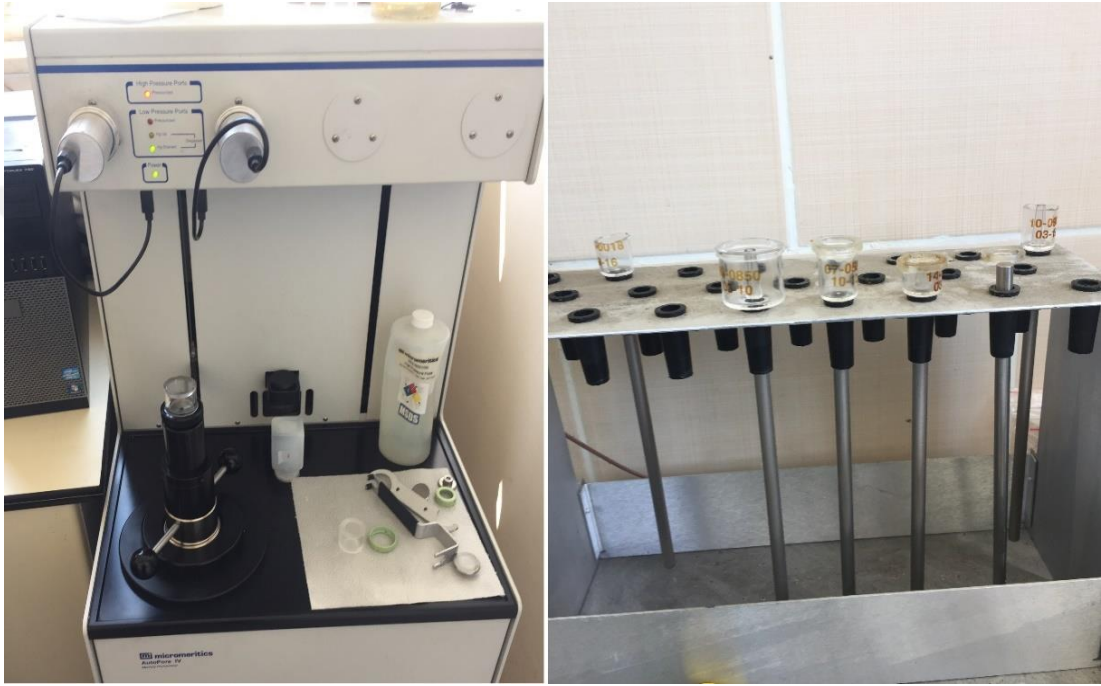
2.5. Cıvalı porozimetre Deneyleri

Cıvalı porozimetre deneyinde, deney için hazırlanan numune kapalı bir kap içerisine yerleştirildikten sonra hazneye cıva doldurulmuş ve bu cıvanın giderek artan basınç ile numuneye nüfuz etmesi sağlanmıştır. Deney sistemine ait bir yazılım ile numune içerisindeki boşluk dağılımları numuneye nüfuz eden cıva hacmine bağlı olarak (ml/gr) tespit edilmiştir. Boşluk dağılımı tayini, Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde (TUAM) bulunan AutoPore IV 9500 V1.09 cıvalı porozimetre cihazı ile yapılmıştır.

Cıva porozimetresi, yığınsal veya toz numunelerde por boyutu, por boyut dağılımı ve yüzey alanı ölçümleri ile kütsel yoğunluk tayininde kullanılmaktadır. Ölçüm, cıva gibi reaktif ve ıslatıcı olmayan bir sıvının, yeterli basınç uygulanmadığı takdirde ince porlara giremeyeceği prensibi üzerine kuruludur. Cihaz, uygulanan basınca karşı hücrede azalan cıva miktarını, hücre uçları arasındaki kapasitans değişiminden tayin eder. Por boyutu ise basıncın fonksiyonu olarak hesaplanır. Cıva porozimetresi katalizör, sinterlenmiş materyal, seramikler, mineral ve maden ürünleri, metalurjik

tozlar, yapı malzemeleri, membranlar, biyolojik implantlar, adsorbanlar, zeolit, aktif karbon, ilaç ham maddeleri, aşındırıcılar ve polimerler gibi malzemelerin gözeneklilik ve boyutsuz hacim dağılımlarının hesaplanmasında kullanılmaktadır [82].

Şekil 2.13'te cıvalı porozimetre ölçüm cihazı görüntüsü verilmiştir. Ayrıca ölçümlerde kullanılan örnekler ısıl iletkenlik ölçümü yapılan örneklerden kesilerek alınmıştır.



Şekil 2.13. Cıvalı porozimetre ölçüm cihazı görüntüsü

2.6. Mikro Yapı Analizleri

Mikro yapıların incelenmesi Afyon Kocatepe Üniversitesi birimi olan Teknoloji Uygulama Araştırma Merkezinde bulunan taramalı elektron mikroskobu ile yapılmış olup LEO 1430 VP model SEM cihazı W (Tungsten) filament ile çalışmaktadır. Cihaz üzerinde ikincil elektron (secondary electron), geri yansıyan elektron (backscattered electron) ve X ışınları (EDX- Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) detektörü bulunmaktadır. Cihaz görüntü üzerinde nokta, çizgi, alan ve haritalama yöntemleri ile kalitatif ve semi-kantitatif olarak elementer analizleri yapabilmektedir. [83].

Geopolimerlerin mikro yapısını incelemek için farklı NaOH çözeltisi molariteleri, farklı agrega miktarları ve su/bağlayıcı oranları kullanılarak elde edilen geopolimerler 110°C kürde etüvde bekletilmiş ve örneklerin Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile mikro yapı incelemesi yapılmıştır. Örneklerin 50, 2000 ve 5000 büyütmedeki görüntüleri incelenmiş ayrıca aynı görüntülerin EDX analizleri gerçekleştirilerek oksit miktarları belirlenmiştir.



Şekil 2.14. SEM analiz cihazı görüntüsü

Ölçümler ısı iletkenlik ölçümü yapılan örneklerden keserek alınan parçalar üzerinde yapılmış olup öncelikle örneklerin karbon kaplama işlemleri gerçekleştirilmiş daha sonrasında Şekil 2.14'te SEM Analiz Cihazı Görüntüsü verilmiş olan cihaz ile mikro yapı incelemeleri yapılmıştır.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1. Basınç Dayanımlarının Belirlenmesi

3.1.1. Standart Kum Agregalı Geopolimer Harçların Basınç Dayanımı

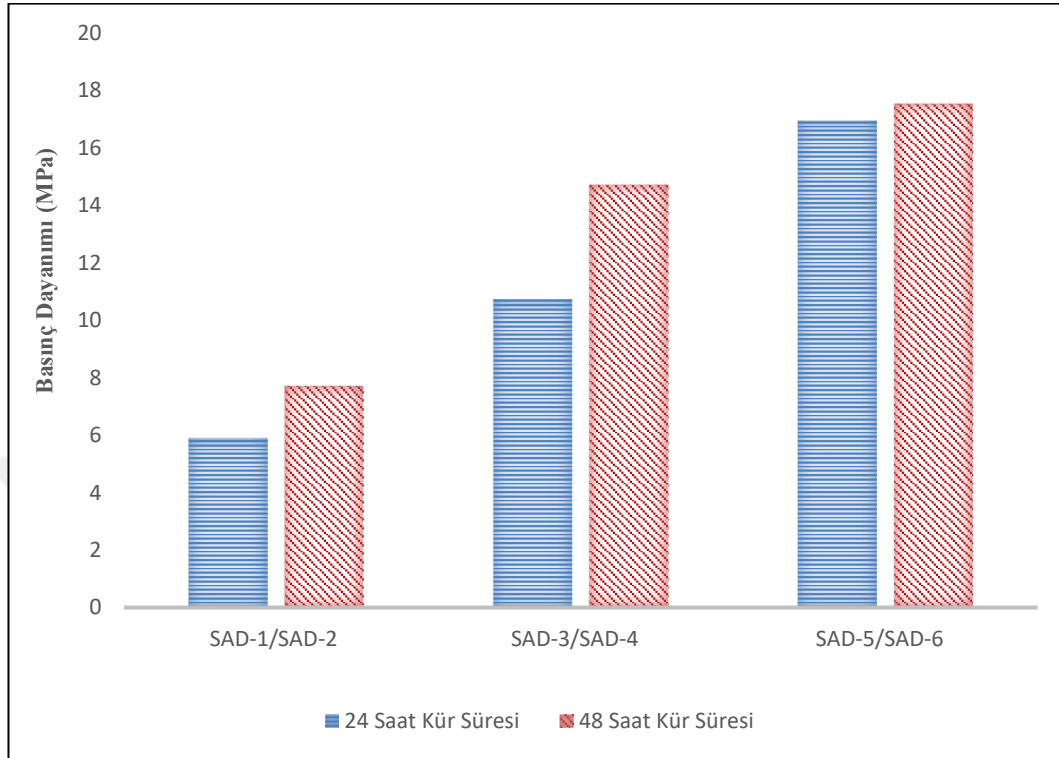
Deneysel çalışmaların başlangıcında standart kum agregalı örneklerin basınç dayanımları belirlenmiştir. Burada amaç standart bir agregata ile çalışarak ilk başta kür süresini molarite oranlarını ve kür sıcaklıklarını belirlemek olmuştur. Bu amaçla 80 °C, 90 °C, 100 °C, 110 °C kür sıcaklıkları, 24 ve 48 saat kür süresi ve molarite olarak 7 ile 15 aralığındaki molarite oranları kullanılarak optimum değerler elde edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca deneysel çalışmalara s/b oranı 0,3 ve 0,4 değerleri ile başlanmış olup yeterli işlenebilirlik olmadığı için dayanım açısından değerlendirme yapılmamıştır.

Çizelge 3.1. Standart kum agregalı 90 °C kür sıcaklığında S/B oranı 0,45 olan örneklerin basınç dayanımları

	SAD-1	SAD-3	SAD-5
	SAD-2	SAD-4	SAD-6
24 Saat Kür Süresi (MPa)	5,9	10,74	16,94
48 Saat Kür Süresi (MPa)	7,71	14,71	17,53

Çalışmalara kür sıcaklığının örnekler üzerindeki etkilerini değerlendirmek için Çizelge 3.1 ve Şekil 3.1’de incelenen, 90° kür sıcaklığında bekletilen örneklerin incelemesi ile başlanmıştır. 24 saat sonunda 90° kür sıcaklığında bekletilen SAD-1, SAD-3 ve SAD-5 örneklerinin, molariteleri 7,72–11,59-15,45 ve örneklerin basınç dayanımları sırası ile 5,9 MPa, 10,74 MPa ve 16,94 MPa’dır. Kür sıcaklıkları ve çözelti molariteleri sırası SAD-1,3,5 örnekleri ile aynı olan ve kür süresi 48 saat olan

SAD-2, SAD-4 ve SAD-6 örneklerinin basınç dayanımları ise sırası ile 7,71 MPa, 14,71 MPa ve 17,53 MPa'dır.



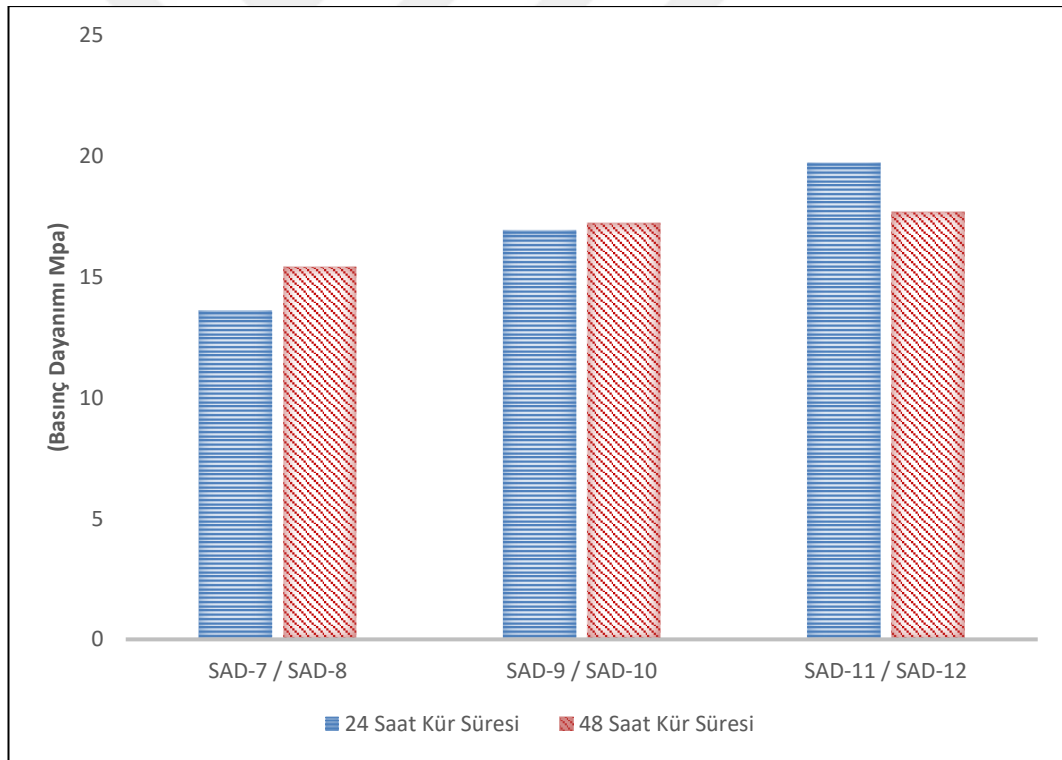
Şekil 3.1. Standart kum agregalı 90 °C kür sıcaklığında S/B oranı 0,45 olan örneklerin basınç dayanımları

Sonuç olarak en yüksek basınç dayanımını 15,45 çözelti molaritesine sahip olan SAD-6 örneği verirken en düşük dayanımı ise 7,72 çözelti molaritesine sahip SAD-1 örneği vermiştir. Bu sonuç; aynı kür sıcaklığı, su/bağlayıcı oranı ve aynı kür süresi içerisinde çözelti molaritesinin artması ile basınç dayanımının arttığını göstermektedir. Ayrıca tüm çözelti molarite oranlarında 48 saat sonundaki basınç dayanımlarının 24 saatten daha yüksek olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.2. Standart kum agregalı 100 °C kür sıcaklığında S/B oranı 0,45 olan örneklerin basınç dayanımları

	SAD-7	SAD-9	SAD-11
	SAD-8	SAD-10	SAD-12
24 Saat Kür Süresi (MPa)	13,62	16,93	19,72
48 Saat Kür Süresi (MPa)	15,42	17,22	17,68

Aktivatör olarak NaOH kullanılan ve 100 °C kür sıcaklığında 24 ve 48 saat kürde bekletilen örneklerin su/bağlayıcı oranı ise 0,45'tir.



Şekil 3.2. Standart kum agregalı 100 °C kür sıcaklığında S/B oranı 0,45 olan örneklerin basınç dayanımları

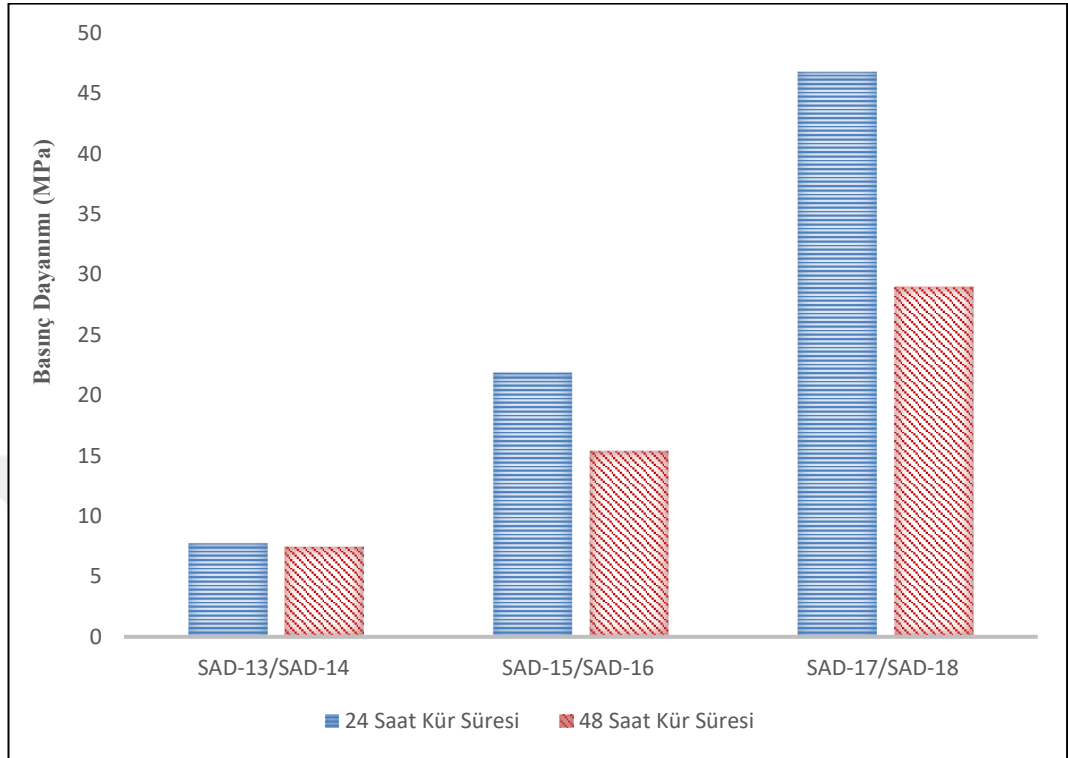
Çizelge 3.2 ve Şekil 3.2 incelendiğinde 24 saat sonunda, 100° kür sıcaklığında bekletilen SAD-7, SAD-9, SAD-11 örneklerin çözelti molariteleri 7,72–11,59-15,45 olup örneklerin basınç dayanımları sırası ile 13,62 MPa, 16,93 MPa ve 19,72MPa'dır. 48 saat sonunda ise örneklerin basınç dayanımları ise sırası ile 15,42 MPa, 17,22 MPa ve 17,68 MPa'dır. Sonuç olarak en yüksek dayanımı çözelti molaritesi 15,45 olan ve 100 °C kür sıcaklığında 24 saat bekletilen örnek verirken en düşük sonucu ise çözelti molaritesi 7,72 olan ve 100 °C kür sıcaklığında 24 saat bekletilen numune vermiştir. Bu sonuç aynı kür sıcaklığı, su/bağlayıcı oranı ve aynı kür süresi içerisinde çözelti molaritesinin artması ile basınç dayanımının arttığını göstermektedir. Ayrıca 11,59 çözelti molaritesinin altında 100 °C kür sıcaklığında 24 saatten 48 saate kadar geçen sürede basınç dayanımının arttığı ve bu çözelti molaritesi değerinden sonraki molarite oranındaki artış ile basınç dayanımında düşüş meydana geldiği görülmüştür. Bunun yanında çözelti molarite oranı arttıkça kür süresinin azaltılması gerektiği görülmektedir.

Çizelge 3.3. Standart kum agregalı 110 °C kür sıcaklığında S/B oranı 0,45 olan örneklerin basınç dayanımları

	SAD-13	SAD-15	SAD-17
	SAD-14	SAD-16	SAD-18
24 Saat Kür Süresi (MPa)	7,74	21,86	46,76
48 Saat Kür Süresi (MPa)	7,44	15,37	28,95

Çalışmalara farklı kür sıcaklıklarında değerlendirmeler yapabilmek için Çizelge 3.3 ve Şekil 3.3'te incelenen 110°C kür sıcaklığında bekletilen örneklerin dayanım incelemesi ile devam edilmiştir. 24 saat sonunda 110°C kür sıcaklığında bekletilen SAD-13, SAD-15 ve SAD-17 örneklerinin molariteleri 7,72–11,59-15,45 ve örneklerin basınç dayanımları sırası ile 7,74 MPa, 21,86 MPa ve 46,76 MPa'dır. 110 °C kür sıcaklığında bekletilen çözelti molariteleri sırası SAD-13,15,17 örnekleri ile

aynı olan SAD-14, SAD-16 ve SAD-18 örneklerinin basınç dayanımları ise sırası ile 7,44 MPa, 15,37 MPa ve 28,95 MPa'dır.



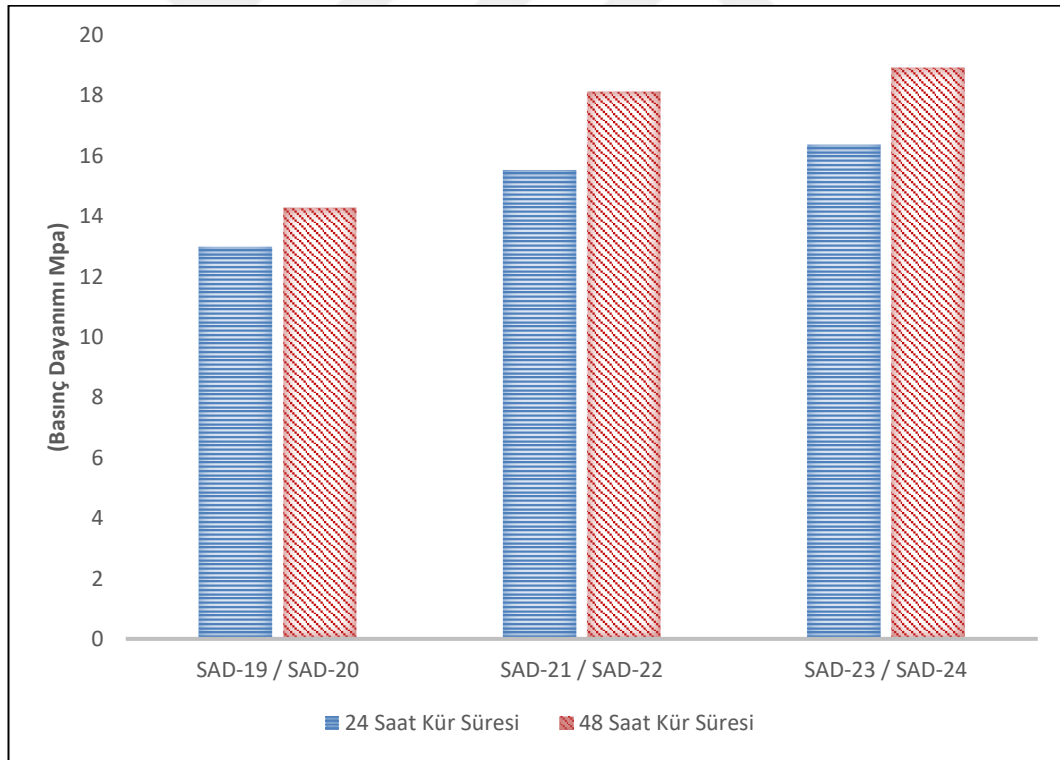
Şekil 3.3. Standart kum agregalı 110 °C kür sıcaklığında S/B oranı 0,45 olan örneklerin basınç dayanımları

Sonuç olarak en yüksek basınç dayanımı 24 saat sonunda 15,45 çözelti molaritesine sahip 110 °C kür sıcaklığında bekletilen SAD-17 örneği verirken en düşük basınç dayanımı ise 48 saat sonunda 7,72 çözelti molaritesine sahip 90 °C kür sıcaklığında bekletilen SAD-14 örneği vermiştir. Bu sonuçlara göre Çizelge 3.3 ve Şekil 3.3 incelendiğinde 90° kür sıcaklığında 24 saatte 48 saate kadar basınç dayanımlarında artma görülürken 110° kür sıcaklığında ise 48 saat kürde bekletilen geopolimer örneklerde dayanımda azalma meydana geldiği açıkça görülmektedir.

Çizelge 3.4. Standart kum agregalı 100 °C kür sıcaklığında S/B oranı 0,50 olan örneklerin basınç dayanımları

	SAD-19	SAD-21	SAD-23
	SAD-20	SAD-22	SAD-24
24 Saat Kür Süresi (MPa)	12,98	15,51	16,36
48 Saat Kür Süresi (MPa)	14,27	18,12	18,92

Aktivatör olarak NaOH kullanılan ve 100 °C kür sıcaklığında 24 ve 48 saat kürde bekletilen SAD-19, SAD-21 ve SAD-23 geopolimer örneklerin çözelti molariteleri sırası ile 6,95–10,43–13,91 ve su/bağlayıcı oranı ise 0,50’dir.



Şekil 3.4. Standart kum agregalı 100 °C kür sıcaklığında S/B oranı 0,50 olan geopolimer örneklerin basınç dayanımları

24 saat sonunda 100° kür sıcaklığında bekletilen çözelti molariteleri 6,9 –10,43-13,91 olan örneklerin basınç dayanımları sırası ile 12,98 MPa, 15,51 MPa ve 16,36 MPa'dır. 48 saat sonunda ise örneklerin basınç dayanımları ise sırası ile 14,27 MPa, 18,12 MPa ve 18,92 MPa'dır. Bu sonuçlara göre en yüksek basınç dayanımını 13,91 çözelti molaritesi değerinde, 100 °C kür sıcaklığında 48 saat bekletilen geopolimer örnek verirken en düşük basınç dayanım değerini ise 6,95 çözelti molarite oranındaki 100 °C kür sıcaklığında 24 saat bekletilen geopolimer örnek vermiştir. Aynı kür sıcaklığı, su/bağlayıcı oranı ve aynı kür süresi içerisinde çözelti molaritesinin artması ile basınç dayanımının arttığı gözlemlenmiş olup aynı zamanda kür süresi arttıkça dayanımların da arttığı görülebilmektedir. Bu sonuçlar Çizelge 3.2 ve Şekil 3.2'deki sonuçlar ile karşılaştırıldığında ise aynı kür sıcaklığında ve aralık olarak hemen hemen benzer çözelti molaritelerinde su/bağlayıcı oranındaki artışa bağlı olarak kür süresinin de artabileceği ayrıca basınç dayanımlarında da düşüşler meydana geldiği sonucuna varılabilmektedir.

Yapılan çalışmaların sonuçları:

En iyi sonucu veren karışım; 15,45 molarite oranına sahip, 24 saat sonunda, 110 °C kür sıcaklığında elde edilmiş olup bu değer 46,76 MPa'dır.

90 °C kür sıcaklığında 24 saat sonunda geopolimer örneklerin reaksiyonunu tamamlanmadığı buna bağlı olarak da 48 saat sonunda basınç dayanımının arttığı, 110 °C kür sıcaklığında ise 24 saat sonunda geopolimer örneklerin basınç dayanımının 48 saat sonundaki basınç dayanımlarından yüksek olduğu ve 110 °C bekletilen geopolimer örneklerin 24 saatten sonra oluşan bağlara zarar verdiği ve basınç dayanımını düşürdüğü görülmüştür. Yüksek sıcaklıklarda ve daha uzun süreli kür sürelerinde basınç dayanımlarındaki düşüşlerin suyun buharlaşmasına bağlı olarak geopolimerin yapısında meydana gelen boşluklardan kaynaklanabileceği düşünülmektedir [9]. Ayrıca 24 saat ile 48 saat kürde bekletilen numuneler karşılaştırıldığında molarite oranları yüksek olan geopolimer örneklerin dayanım artışının daha fazla olduğu gözlemlenebilmektedir. Bunun sebebi ise molaritenin arttırılmasıyla mikro yapı oldukça yoğun hâle gelmekte ve dolayısı ile yüksek derecede geopolimerizasyon meydana gelmekte [43] ve basınç dayanımlarını arttırmaktadır. Ayrıca su/bağlayıcı

oranları açısından değerlendirildiğinde ise bu orandaki artışın kür süresini arttıracak ya da basınç dayanımını düşürecek görülmüştür.

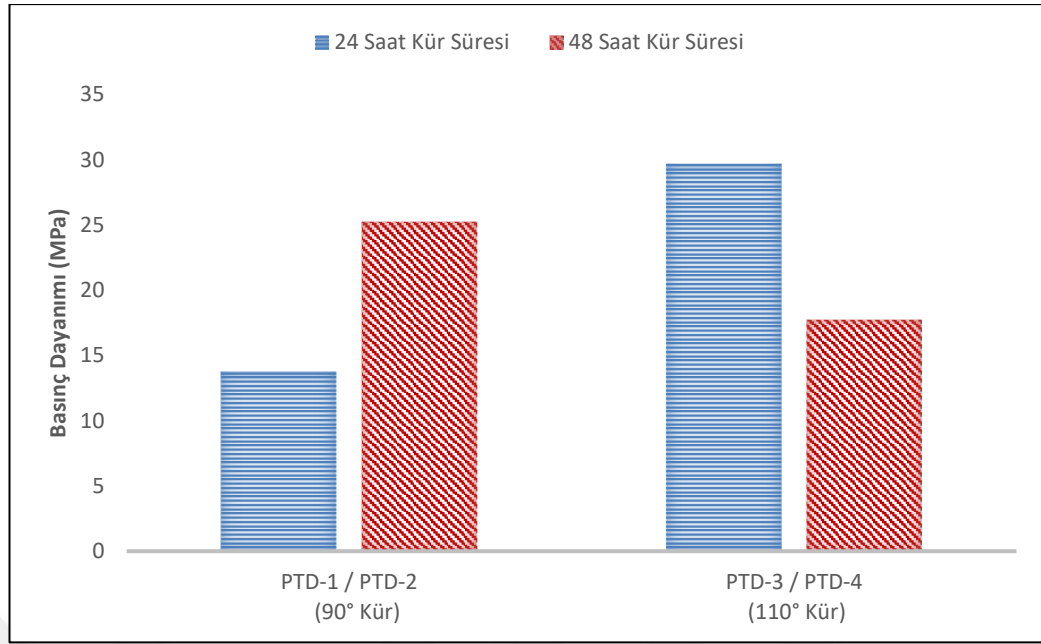
3.1.2. Agregasız, Geopolimer Hamurlarda Basınç Dayanımları

Agrega olarak standart kum kullanılan geopolimer örneklerin hazırlanmasındaki amaç; kür sıcaklıklarının, kür süresinin ve çözelti molaritesinin belirlenerek basınç dayanımlarının da belli değerlere ulaşmasını sağlamak olmuştur. Agregasız geopolimer örneklerin test edilmesindeki amaç ise perlit tozu ve NaOH etkisini agregasız olarak da net bir şekilde görmektir.

Çizelge 3.5. Agregasız geopolimer hamurlarda 90 °C ve 110 °C kür sıcaklığında bekletilen geopolimer örneklerin basınç dayanımları

	PTD-1	PTD-3
	PTD-2	PTD-4
24 Saat Kür Süresi (MPa)	13,77	29,68
48 Saat Kür Süresi (MPa)	25,23	17,74

Çizelge 3.5 ve Şekil 3.5'te verilen geopolimer örneklerde S/B oranı 0,30 ve çözelti molarite değeri ise 11,59 olan numuneler hazırlanmıştır.



Şekil 3.5. Agregasız geopolimer hamurlarda 90 °C ve 110 °C kür sıcaklığında bekletilen geopolimer örneklerin basınç dayanımları

24 saat sonunda 90 °C kür sıcaklığında bekletilen örneğin basınç dayanımı 13,77 MPa iken 110 °C kür sıcaklığında bekletilen örneğin basınç dayanımı ise 29,68 MPa'dır. 48 saat sonunda ise 90°C kür sıcaklığında bekletilen örneğin basınç dayanımı 25,23 MPa iken 110 °C kür sıcaklığında bekletilen örneğin basınç dayanımı ise 17,74 MPa'dır. Agregasız geopolimer örneklerden de anlaşılabileceği üzere 90°C kür sıcaklığında geopolimer örneklerin reaksiyonu tamamlayamadığı için dayanımlar düşük çıkmış ve 24 saatten 48 saate kadar da dayanım artışı sağlanmıştır. 110°C kür sıcaklığında ise 24 saat sonunda reaksiyon tamamlanmış 48 saat beklenildiğinde dayanımda düşmeler meydana gelmiştir.

3.1.3. Genleştirilmiş Perlit Agregalı Geopolimer Örneklerin Basınç Dayanımları

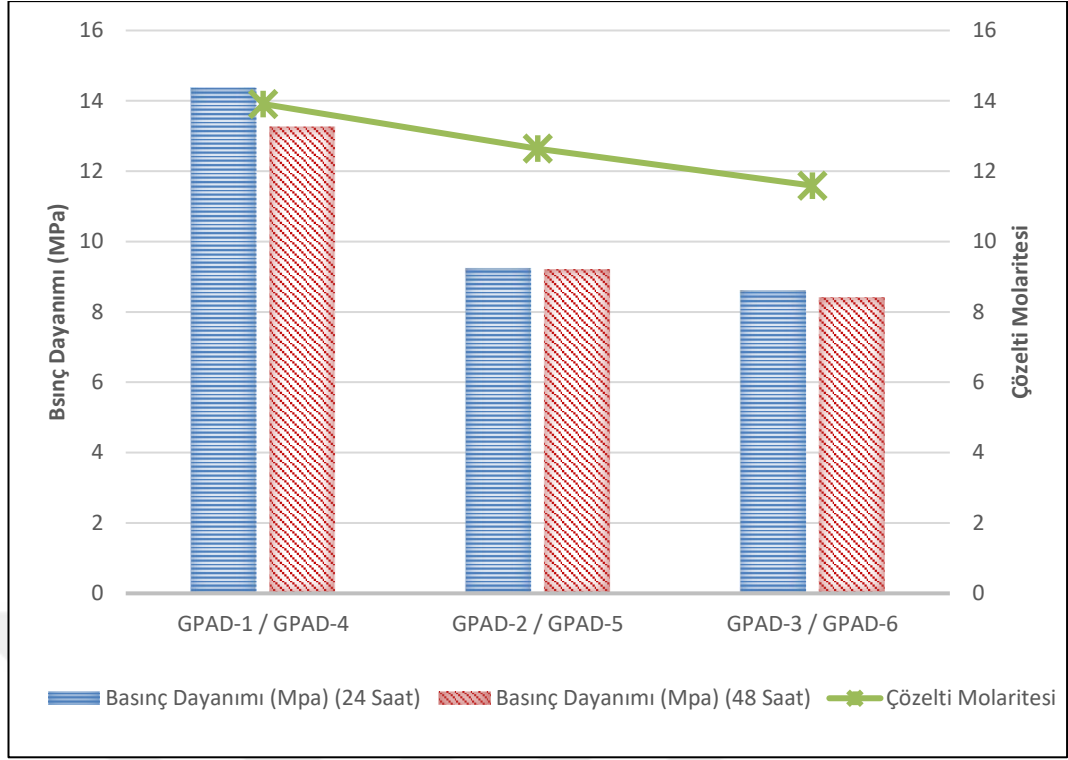
Agrega olarak genleştirilmiş perlit kullanılan geopolimer örneklerde ilk amaç, basınç dayanımlarını belli bir noktada tutup daha sonra birim hacim ağırlığının olabildiğince düşürülmesi şeklinde olmuştur.

Çizelge 3.6. Genleştirilmiş perlit agregalı 110 °C kür sıcaklığında S/B oranı 0,50-0,55-0,60 olan geopolimer örneklerin basınç dayanımları

	GPAD-1	GPAD-2	GPAD-3
	GPAD-4	GPAD-5	GPAD-6
Basınç Dayanımı (24 Saat) (MPa)	14,38	9,24	8,62
Basınç Dayanımı (48 Saat) (MPa)	13,27	9,22	8,42

Genleştirilmiş perlit agregalı geopolimer örneklerin basınç dayanım testlerine 110 °C kür sıcaklığı ile başlanmıştır. GPAD-1, GPAD-2, GPAD-3, GPAD-4, GPAD-5, GPAD-6 geopolimer örneklerin molariteleri sırası ile 11,59, 12,64, 13,91, 11,59, 12,64, 13,91'dir. Ayrıca tüm geopolimer örneklerdeki genleştirilmiş perlit agregası miktarı eşit olup S/B oranları sırası ile 0,5, 0,55, 0,60, 0,5, 0,55, 0,60' dır.

Çizelge 3.6 ve Şekil 3.6'da verilen GPAD-1, GPAD-2, GPAD-3, GPAD-4, GPAD-5, GPAD-6 geopolimer örneklerinin basınç dayanımları ise sırası ile 14,38 MPa, 9,24 MPa, 8,62, 13,27 MPa, 9,22 MPa ve 8,42MPa'dır.



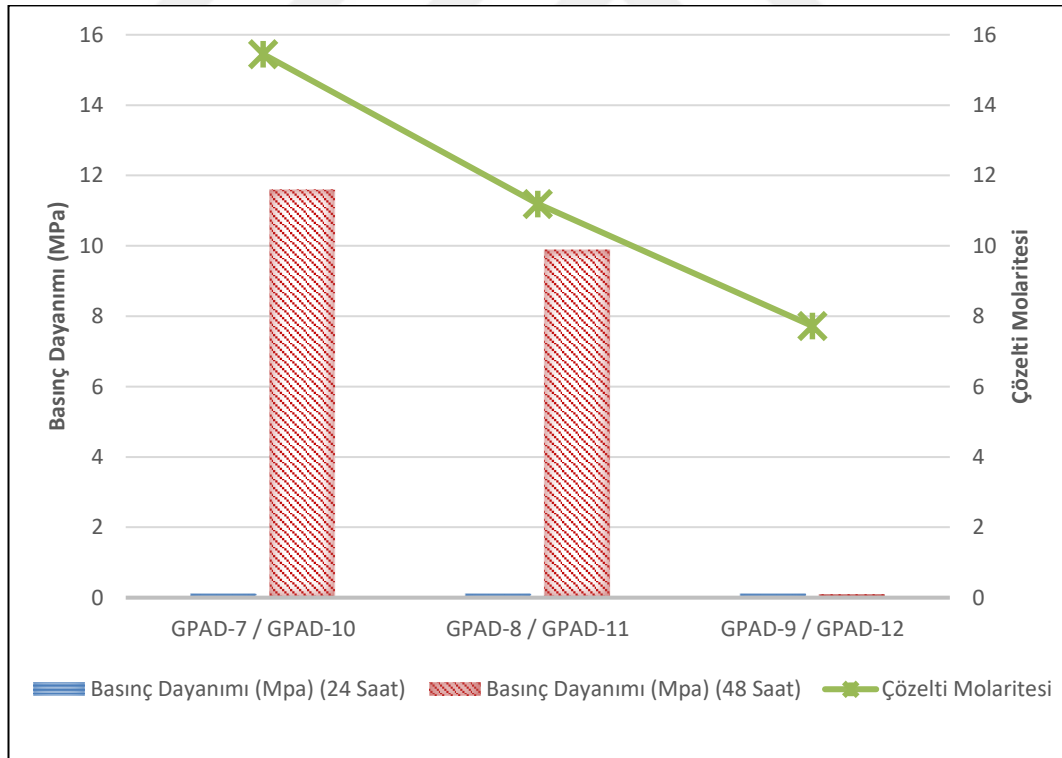
Şekil 3.6. Genleştirilmiş perlit agregalı 110 °C kür sıcaklığında S/B oranı 0,50-0,55-0,60 olan geopolimer örneklerin basınç dayanımları

En yüksek basınç dayanımını 24 saat sonunda 14,38 MPa ile GPAD-1 örneği vermiştir. Aynı kür sıcaklığında en düşük dayanımı ise 8,42 MPa ile GPAD-6 örneği vermiştir. Ayrıca GPAD-1 örneği ile GPAD-4 örneği karşılaştırıldığında 24 saatten 48 saate kadarki dayanım kaybı yaklaşık % 8 olmuştur. Bu sonuçlara göre çözelti molaritelerinin artması ile basınç dayanımlarının arttığı ayrıca çözelti molaritesi arttıkça kür süresinin de azaldığı, başka bir deyişle aynı basınç dayanımına ulaşmak için daha yüksek çözelti molaritelerinde daha az kür süresi uygulanabileceği sonucuna varılmaktadır.

Çizelge 3.7. Genleştirilmiş perlit agregalı 90 °C kür sıcaklığında S/B oranı 0,45 olan geopolimer örneklerin basınç dayanımları

	GPAD-7	GPAD-8	GPAD-9
	GPAD-10	GPAD-11	GPAD-12
Basınç Dayanımı (24Saat) (MPa)	0,1	0,1	0,1
Basınç Dayanımı (48Saat) (MPa)	11,60	9,89	0,1

Genleştirilmiş perlit agregalı geopolimer örneklerin incelemelerine 90°C kür sıcaklığı ile devam edilmiştir. GPAD-7, GPAD-8, GPAD-9, GPAD-10, GPAD-11, GPAD-12 geopolimer örneklerin molariteleri sırası ile 15,45, 11,59, 7,72, 15,45, 11,59 ve 7,72 olup S/B oranları 0,45'tir.



Şekil 3.7. Genleştirilmiş perlit agregalı 90 °C kür sıcaklığında S/B oranı 0,45 olan geopolimer örneklerin basınç dayanımları

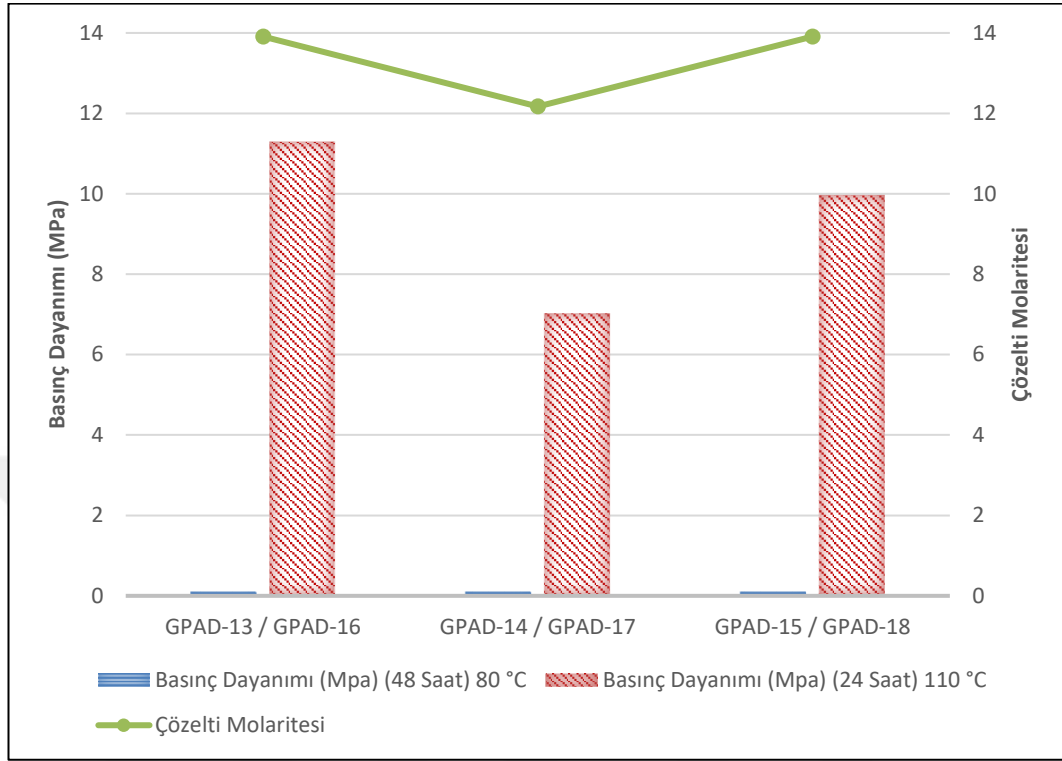
Çizelge 3.7 ve Şekil 3.7’de verilen GPAD-7, GPAD-8, GPAD-9, GPAD-10, GPAD-11, GPAD-12 geopolimer örneklerinin basınç dayanımları ise sırası ile 0,1 MPa, 0,1 MPa, 0,1MPa, 11,60MPa, 9,89 MPa ve 0,1MPa’dır. En yüksek basınç dayanımını 48 saat sonunda 10,60 MPa ile GPAD-10 numunesi vermiştir. 90 °C kür sıcaklığında 24 saat sonunda geopolimer örnekler dayanım kazanmazken 48 saat sonunda çözelti molaritesine bağlı olarak basınç dayanımında artış gözlenmiştir. Bu sonuç; 90 °C kür sıcaklığında çözelti molaritesi düşük ise geopolimer örneklerin 24 saat hatta 48 saat sonunda bile fazla dayanım kazanmadığını göstermektedir. Bu sonuçlar standart kum agregalı geopolimer örneklerin sonuçları ile karşılaştırıldığında malzemenin kür süresi ve kür sıcaklığı karşısındaki davranışı açısından benzer özellikler taşıdığını göstermektedir.

Çizelge 3.8. Genleştirilmiş perlit agregalı 80 °C ve 110 °C kür sıcaklığı S/B oranı 0,50 olan geopolimer örneklerin basınç dayanımları

	GPAD-13	GPAD-14	GPAD-15
	GPAD-16	GPAD-17	GPAD-18
Basınç Dayanımı			
(48 Saat) (MPa)	0,1	0,1	0,1
80 °C			
Basınç Dayanımı			
(24 Saat) (MPa)	11,29	7,021	9,96
110 °C			

Genleştirilmiş perlit agregalı geopolimer örnekler üzerinde yapılan incelemelere 80°C ve 110°C kür sıcaklığı ile devam edilmiştir. GPAD-13, GPAD-14, GPAD-15, GPAD-16, GPAD-17, GPAD-18 geopolimer örneklerin molariteleri sırası ile 13,91, 12,17, 13,91, 13,91, 12,17 ve 13,91 olup S/B oranları 0,50 dir. GPAD-13, GPAD-14, GPAD-15 geopolimer örnekleri 48 saat 80 °C etüv küründe bekletilmiş olup herhangi bir dayanım kazanmamıştır. GPAD-16, GPAD-17, GPAD-18 geopolimer örnekleri ise

24 saat 110 °C kür sıcaklığında bekletilmiş olup basınç dayanımları Çizelge 3.8'deki gibi ölçülmüştür.



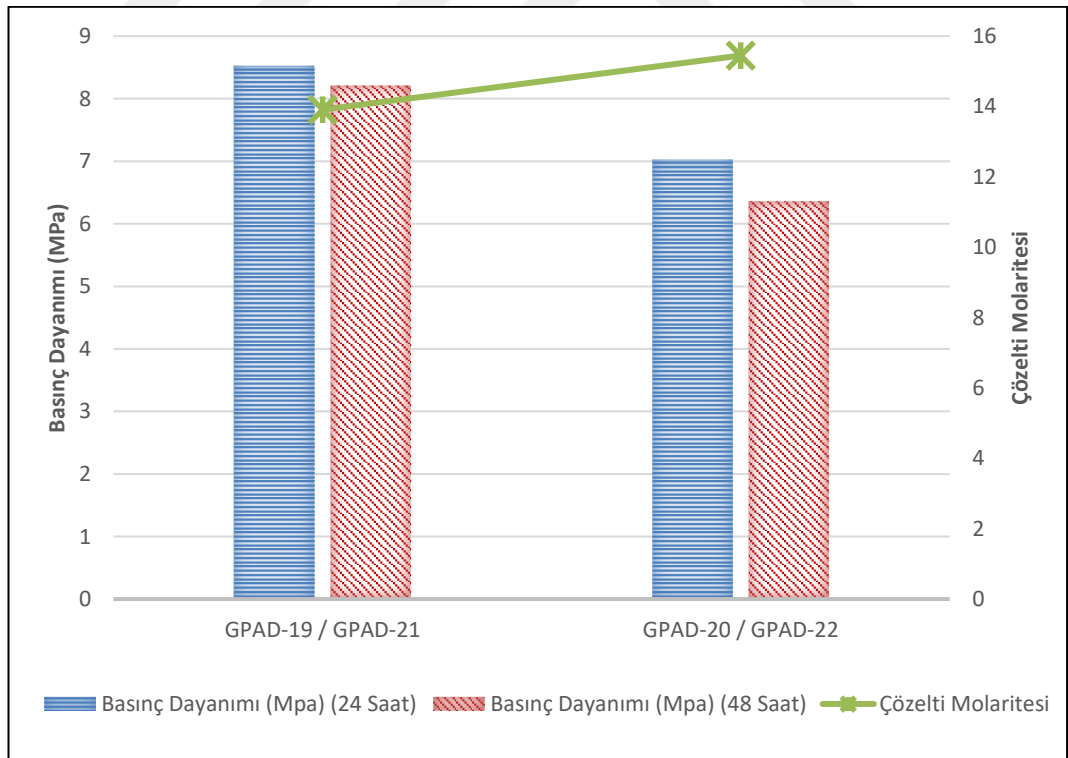
Şekil 3.8. Genleştirilmiş perlit agregalı 80 °C ve 110 °C kür sıcaklığı S/B oranı 0,50 olan geopolimer örneklerin basınç dayanımları

GPAD-13, GPAD-14, GPAD-15, GPAD-16, GPAD-17, GPAD-18 geopolimer örneklerinin basınç dayanımları ise sırası ile 0,1 MPa, 0,1 MPa, 0,1 MPa, 11,29 MPa, 7,02 MPa ve 9,96 MPa'dır. En yüksek basınç dayanımını 110 °C ve 24 saat sonunda 11,29 MPa ile GPAD-16 örneği vermiştir. Çizelge 3.8 ve Şekil 3.8'deki geopolimer örnekler incelendiğinde GPAD-16 örneği ile GPAD-18 geopolimer örneklerinin çözelti molaritelerinin eşit olduğu fakat GPAD-18 örneğinin basınç dayanımının GPAD-16 örneğinden yaklaşık %10 daha az olduğu görülmektedir. Bu fark Çizelge 2.9'da belirtildiği üzere GPAD-18 örneğindeki genleştirilmiş perlit agregası miktarının GPAD-16 örneğine göre yaklaşık olarak %10 oranında arttırılmasından kaynaklanmıştır. Bu durum, agregalar arasında oluşan geopolimerik bağların dayanımının agrega dayanımından yüksek olduğunu göstermektedir.

Çizelge 3.9. Genleştirilmiş perlit agregalı 110 °C kür sıcaklığı S/B oranı 0,50-0,55 olan geopolimer örneklerin basınç dayanımları

	GPAD-19	GPAD-20
	GPAD-21	GPAD-22
Basınç Dayanımı		
(24 Saat)	8,52	7,021
(MPa)		
Basınç Dayanımı		
(48 Saat)	8,21	6,36
(MPa)		

Genleştirilmiş perlit agregalı geopolimer örnekler üzerindeki incelemelere 110 °C kür sıcaklığı ile devam edilmiştir. GPAD-19, GPAD-20, GPAD-21, GPAD-22 geopolimer örneklerin molariteleri sırası ile 13,91, 15,45, 13,91 ve 15,45 olup sırası ile S/B oranları 0,50, 0,55, 0,5 ve 0,55'tir.



Şekil 3.9. Genleştirilmiş perlit agregalı 110 °C kür sıcaklığı S/B oranı 0,50-0,55 olan geopolimer örneklerin basınç dayanımları

Geopolimer örneklerin su/bağlayıcı oranlarının artması ile çözelti molaritesi de artırılarak dayanım kaybının önüne geçilmek amaçlanmıştır. Ayrıca S/B oranlarının arttırılması ile birlikte birim hacim ağırlığının düşürülmesi de hedeflenmiştir. Çizelge 3.9 ve Şekil 3.9 incelendiğinde GPAD-19, GPAD-20, GPAD-21, GPAD-22 geopolimer örneklerinin basınç dayanımları ise sırası ile 8,52 MPa, 7,02 MPa, 8,21 MPa ve 6,36 MPa'dır. En yüksek basınç dayanımını ise 110 °C ve 24 saat sonunda 8,52 MPa ile GPAD-19 örneği vermiştir. 24 saat kürde bekletilen geopolimer örneklerin basınç dayanımları 48 saate göre daha yüksek değerlerde olduğu görülmektedir. Ayrıca çözelti molaritesi arttığı hâlde dayanımda düşüş meydana gelmiştir. Bunun sebebi su/bağlayıcı oranının artması ile açıklanabilir. Başka bir deyişle karışımdaki genleştirilmiş perlit oranının arttırılması işlenebilirliği azaltmıştır. Bu durumun önüne geçebilmek için de karışımdaki su / bağlayıcı oranı arttırılarak işlenebilirlik sorunu ortadan kaldırılmıştır. Buna bağlı olarak da basınç dayanımında düşüşler meydana gelmiştir.

Sonuç olarak bu bölümde incelenen geopolimer örneklerin ilk bölümde incelenen standart kum agregalı geopolimer örneklerin davranışı ile benzer davranışlar sergilediği görülmektedir. Yani 80°C, 90°C ve 100°C kürde bekletilen çözelti molariteleri düşük olan geopolimer örneklerde 48 saate kadar dayanımın arttığı, 110°C kürde ise 24 saatte en yüksek dayanıma ulaştığı ve bu kür süresinden sonra dayanımın düştüğü görülmüştür. Ayrıca çözelti molaritesi arttıkça dayanımın arttığı, en iyi kür süresinin 24 saat en iyi kür sıcaklığının 110°C olduğu belirlenmiştir. Burada 80°C ile 110°C arasında kür sıcaklıkları uygulanmış olup 110°C'de hedeflenen basınç dayanımları elde edildiği için enerji tasarrufu açısından bu kür sıcaklığının üzerine çıkılmamıştır.

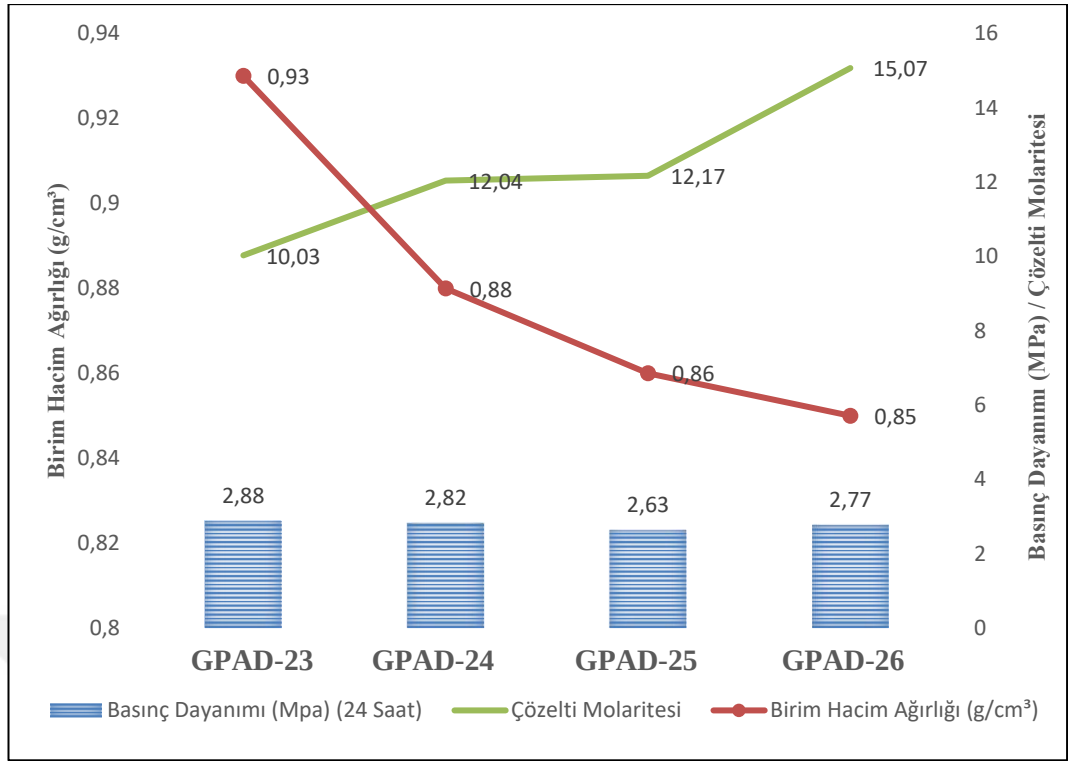
3.1.4. Genleştirilmiş Perlit Agregalı Geopolimer Örneklerin Basınç Dayanımları ve Birim Hacim Ağırlıklarının Çözelti Molaritesine Göre Değerlendirilmesi

Basınç dayanımlarında belirli dayanımların sağlanması ile birlikte birim hacim ağırlıklarının da verilerek dayanım ile değişim miktarları incelenmiştir. Ayrıca GPAD-23, 24, 25, 26 geopolimer örneklerinde S/B oranları ile birlikte su/agrega miktarlarında da iki kata varan artırımlar söz konusu olmuştur.

Çizelge 3.10. 110 °C Kür sıcaklığında bekletilen genleştirilmiş perlit agregalı geopolimer örneklerin basınç dayanımları ve birim hacim ağırlıkları

	GPAD-23	GPAD-24	GPAD-25	GPAD-26
BasınçDayanımı				
(Mpa)	2,88	2,82	2,63	2,77
(24 Saat)				
Birim Hacim				
Ağırlığı	0,93	0,88	0,86	0,85
(g/cm³)				
Molarite	10,03	12,04	12,17	15,07

Genleştirilmiş perlit agregalı geopolimer örneklere 110 °C kür sıcaklığı ile devam edilmiştir. GPAD-23, GPAD-24, GPAD-25 geopolimer örneklerin molariteleri sırası ile 10,03, 12,04, 12,17 ve 15,07'dir. Çizelge 3.10 ve Şekil 3.10'da verilen geopolimer örneklerinin basınç dayanımları sırası ile 2,88 MPa, 2,82 MPa, 2,63MPa ve 2,77 MPa'dır. Birim hacim ağırlıkları ise sırası ile 0,93 g/cm³, 0,88 g/cm³, 0,86 g/cm³ ve 0,85 g/cm³tür.



Şekil 3.10. 110 °C Kür sıcaklığında bekletilen genişletilmiş perlit agregalı geopolimer örneklerin basınç dayanımları ve birim hacim ağırlıkları

Bu sonuçlara göre geopolimer örneklerin basınç dayanımı düşerken birim hacim ağırlıklarında da düşme meydana gelmiştir. GPAD- 26 örneğinde ise birim hacim ağırlık düşmesine rağmen basınç dayanımında artış gözlenmiş olup bu artışın molarite oranındaki artıştan kaynaklandığı görülmektedir. GPAD-24 örneği ile GPAD-25 geopolimer örnekleri karşılaştırıldığında çözelti molariteleri yaklaşık eşit olan iki örneğin basınç dayanımındaki düşüşün GPAD-25 örneğinin agrega miktarının yaklaşık olarak % 5 daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır.

Sonuç:

DeneySEL çalışmalara kür sıcaklığı ve kür süresi açısından en iyi kür sıcaklığının 110°C ve kür süresinin ise 24 saat olarak devam edilmesi gerektiği molariteler arttırılıp dayanımların arttırılması ayrıca kullanılan katı madde oranları değiştirilerek hem birim hacim ağırlığının düşürülmesi hem de ısıl iletkenliğin azaltılması hedeflenmiştir.

Geopolimer örnekler üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda agrega miktarının artması ile basınç dayanımlarında düşüş meydana gelmiştir. Çözelti molaritesinin artırılması dayanım kayıplarının önüne geçmiştir. Bu duruma en iyi örnek, GPAD-1 örneği ile GPAD-16 arasında yapmak mümkündür. S/B oranları, kür sıcaklıkları ve sürelerinin aynı olduğu iki geopolimer örnekte, agrega miktarı ile çözelti molaritesi miktarları incelenmiştir. GPAD-16 örneğinin GPAD-1 örneğinden sırasıyla agrega miktarı yaklaşık % 20 fazla iken çözelti molaritesi ise yaklaşık % 20 fazladır. Bu duruma karşılık basınç dayanımlarında ise GPAD-1 örneğinin basınç dayanımı GPAD-16 örneğinden yaklaşık % 27 fazla olmuştur.

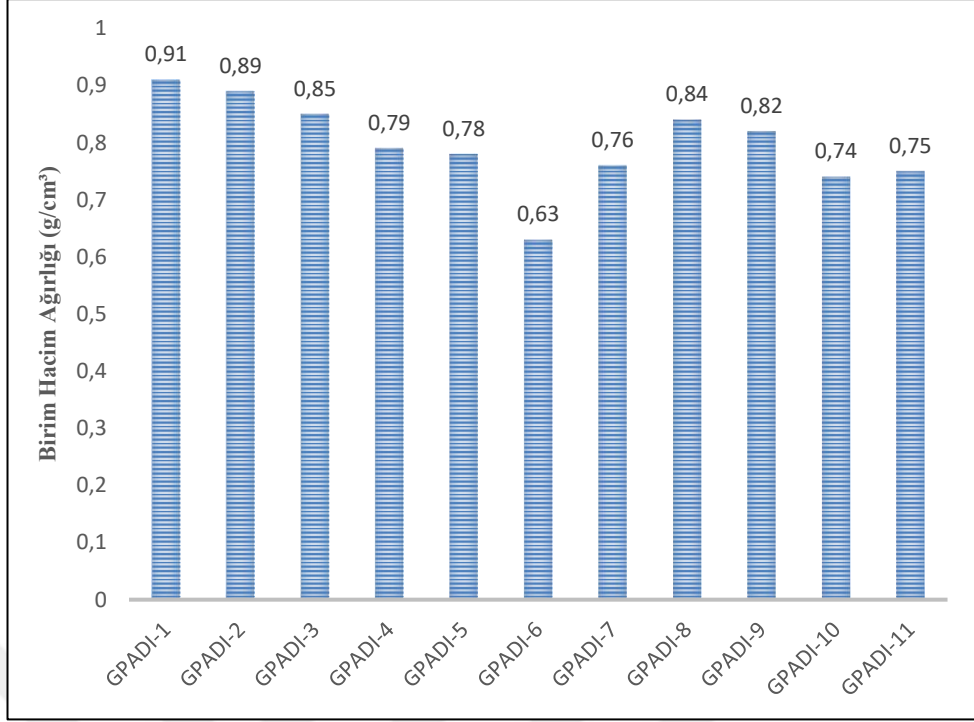
3.2. Genleştirilmiş Perlit Agregalı Geopolimer Harçların Dayanım, Birim Hacim Ağırlık ve Isıl İletkenlik Değerlendirme Sonuçları

Genleştirilmiş perlit agregalı geopolimer örneklerin basınç dayanımları ile birlikte birim hacim ağırlıkları ve ısı iletkenlik değeri de belirlenmiştir. Burada amaç en düşük birim hacim ağırlık değeri en yüksek basınç dayanımını ve en düşük ısı iletkenlik katsayısı değeri elde etmek olmuştur.

Çizelge 3.11. GPADI-1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11 kodlu geopolimer örneklerin birim hacim ağırlıkları

	GPADI-1	GPADI-2	GPADI-3	GPADI-4	GPADI-5	GPADI-6	GPADI-7	GPADI-8	GPADI-9	GPADI-10	GPADI-11
Birim Hacim Ağırlığı (g/cm³)	0,91	0,89	0,85	0,79	0,78	0,63	0,76	0,84	0,82	0,74	0,75

Geopolimer örnekler, 110 °C kür sıcaklığı ve 24 saat boyunca kürde bekletilmiş olup kalıptan çıkarılan geopolimer örneklerin öncelikle birim hacim ağırlıkları belirlenmiş ve bu değeri Çizelge 3.11 ve Şekil 3.11’de verilmiştir.



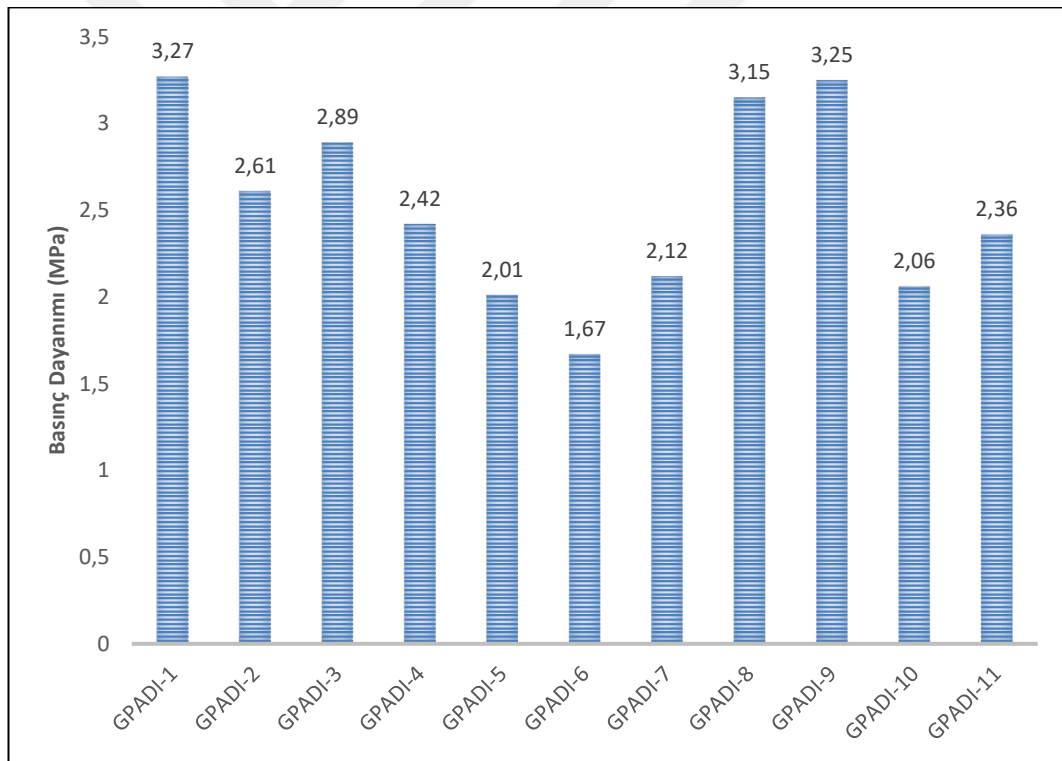
Şekil 3.11. GPADI-1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10,11 kodlu geopolimer örneklerin birim hacim ağırlıkları

Çizelge 3.11 ve Şekil 3.11’de incelenen GPADI-1, GPADI-2, GPADI-3, GPADI-4, GPADI-5, GPADI-6, GPADI-7, GPADI-8, GPADI-9, GPADI-10, GPADI-11 geopolimer örneklerinin birim hacim ağırlıkları sırası ile 0,91 g/cm³, 0,89 g/cm³, 0,85 g/cm³, 0,79 g/cm³, 0,78 g/cm³, 0,63 g/cm³, 0,76 g/cm³, 0,84 g/cm³, 0,82 g/cm³, 0,74 g/cm³, 0,75 g/cm³ olarak ölçülmüş olup en yüksek birim hacim ağırlık değerini 0,91 g/cm³ ile GPADI-1 örneği verirken en düşük birim hacim ağırlık değerini ise 0,63 g/cm³ ile GPADI-6 örneği vermiştir. Geopolimer örnekler üzerinde yapılan çalışmalar ile GPADI-1 örneğinin birim hacim ağırlığı yaklaşık olarak % 33 düşürülerek GPADI-6 örneği elde edilmiştir.

Çizelge 3.12. GPADI-1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 kodlu geopolimer örneklerin basınç dayanımları

	GPADI-1	GPADI-2	GPADI-3	GPADI-4	GPADI-5	GPADI-6	GPADI-7	GPADI-8	GPADI-9	GPADI-10	GPADI-11
Basınç Dayanımı (24 Saat) (MPa)	3,27	2,61	2,89	2,42	2,01	1,67	2,12	3,15	3,25	2,06	2,36

Birim hacim ağırlıkları belirlenmiş olan örneklerin daha sonrasında basınç dayanım testleri gerçekleştirilmiş ve bu değerler Çizelge 3.12 ve Şekil 3.12’de verilmiştir.



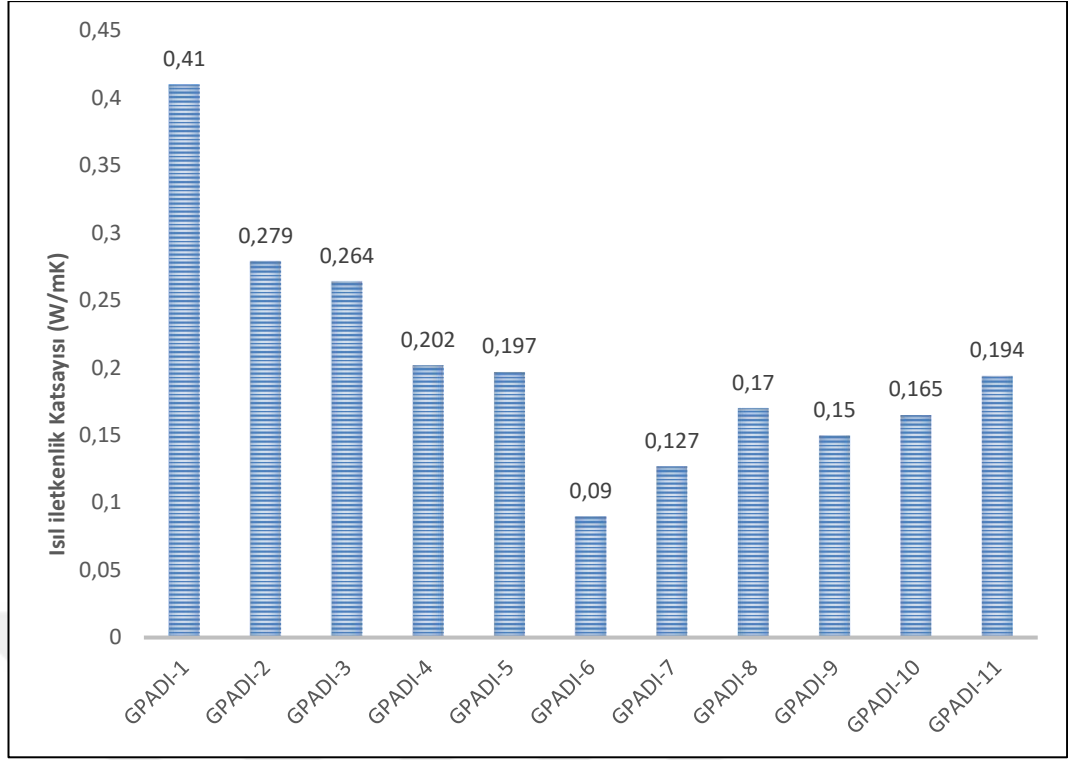
Şekil 3.12. GPADI-1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 kodlu geopolimer örneklerin basınç dayanımları

Çizelge 3.12 ve Şekil 3.12’de incelenen GPADI-1, GPADI-2, GPADI-3, GPADI-4, GPADI-5, GPADI-6, GPADI-7, GPADI-8, GPADI-9, GPADI-10, GPADI-11 geopolimer örneklerinin basınç dayanımları sırası ile 3,27 MPa, 2,61 MPa, 2,89 MPa, 2,42 MPa, 2,01 MPa, 1,67 MPa, 2,12 MPa, 3,15 MPa, 3,25MPa, 2,06MPa, 2,36MPa olarak ölçülmüş olup en yüksek dayanımı 3,27 MPa ile GPADI-1 örneği verirken en düşük dayanımı ise 1,67 MPa ile GPADI-6 örneği vermiştir. Böylece, basınç dayanımında yaklaşık olarak yarı yarıya düşüş tespit edilmiş olup bu düşüşün, birim hacim ağırlığındaki %33 oranındaki değişimden kaynaklandığı söylenebilir. Diğer bir deyişle boşluklu yapıdaki artış basınç dayanımını da düşürmüştür.

Çizelge 3.13. GPADI-1, 2, 3, 4, 5,6, 7, 8, 9, 10, 11 kodlu geopolimer örneklerin ısı iletkenlik katsayıları

	GPADI-1	GPADI-2	GPADI-3	GPADI-4	GPADI-5	GPADI-6	GPADI-7	GPADI-8	GPADI-9	GPADI-10	GPADI-11
Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0,41	0,279	0,264	0,202	0,197	0,09	0,127	0,17	0,15	0,165	0,194

Isı iletkenliklerin ölçülebilmesi için hazırlanan 60 mm çapında 10 mm yüksekliğindeki kalıplara dökülen geopolimerik harçlar 110 °C kür sıcaklığı ve 24 saat boyunca kürde bekletilmiştir.



Şekil 3.13. GPADI-1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 kodlu geopolimer örneklerin ısı iletkenlik katsayıları

Geopolimer örnekler kalıptan çıkarılarak ısı iletkenlik değeri belirlenmiş ve bu değeri Çizelge 3.13 ve Şekil 3.13'te verilmiştir. İncelenen GPADI-1, GPADI-2, GPADI-3, GPADI-4, GPADI-5, GPADI-6, GPADI-7, GPADI-8, GPADI-9, GPADI-10, GPADI-11 geopolimer örneklerinin ısı iletkenlik katsayıları sırası ile 0,41 W/mK, 0,279 W/mK, 0,264 W/mK, 0,202 W/mK, 0,197 W/mK, 0,09 W/mK, 0,127 W/mK, 0,17 W/mK, 0,15 W/mK, 0,165 W/mK, 0,194 W/mK olarak ölçülmüş olup en yüksek ısı iletkenlik değeri 0,41 W/mK ile GPADI-1 örneği verirken en düşük ısı iletkenlik değeri ise 0,09 W/mK ile GPADI-6 örneği vermiştir. Geopolimer örnekler üzerinde yapılan çalışmalar ile GPADI-1 örneğinin ısı iletkenlik katsayısı yaklaşık olarak 4,5 kat düşürülerek GPADI-6 örneği elde edilmiştir. Bu durumu basınç dayanımlarında ve birim hacim ağırlıklarındaki düşüş ile açıklamak mümkündür.

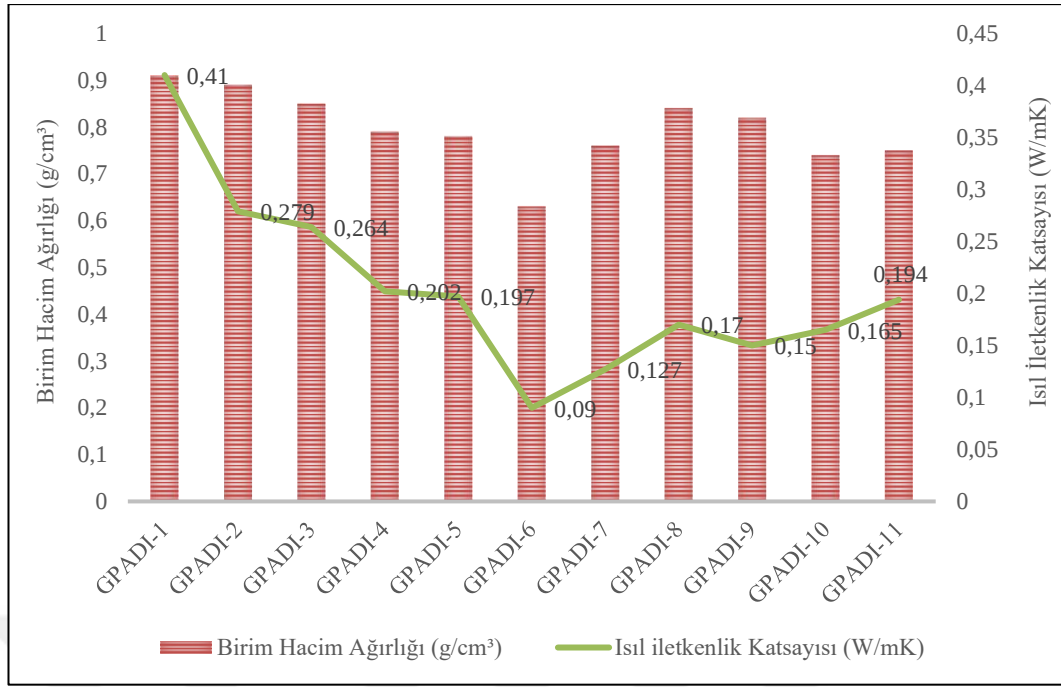
3.3. Genleştirilmiş Perlit Agregalı Geopolimer Harçların Özelliklerinin Karşılaştırılması

Hazırlanan geopolimer örneklerin çözelti molariteleri, su miktarları, bağlayıcı miktarları ve genleştirilmiş perlit agregası miktarları değiştirilerek dökümler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 3.14. Geopolimer örneklerin basınç dayanımları, birim hacim ağırlığı, ısı iletkenlik katsayıları ve çözelti molariteleri değerlerinin karşılaştırılması

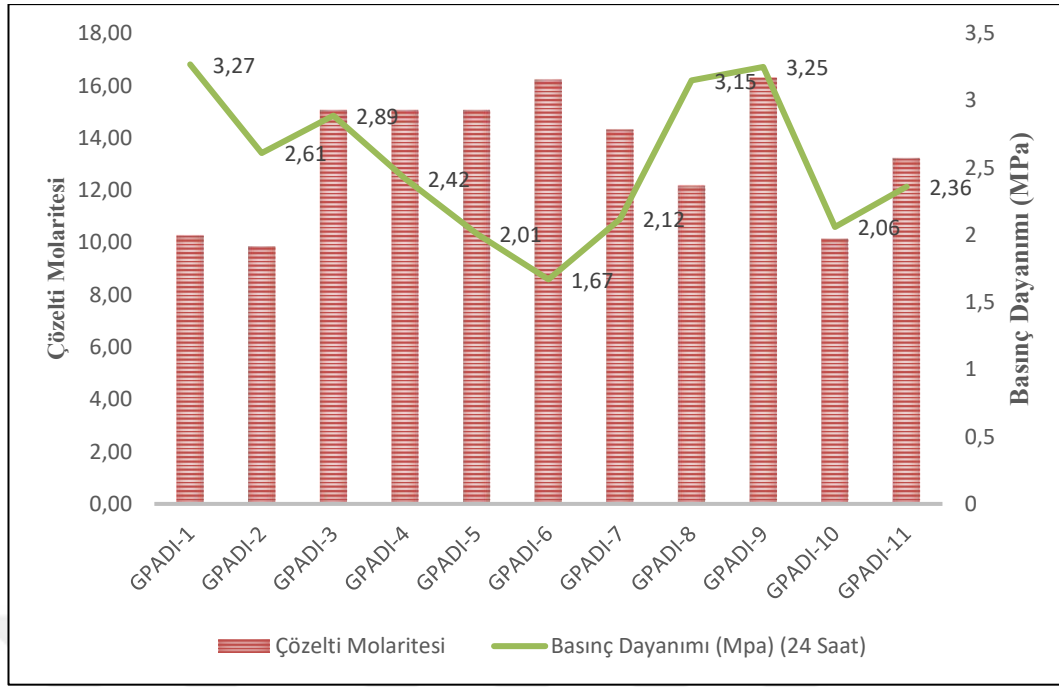
	GPADI-1	GPADI-2	GPADI-3	GPADI-4	GPADI-5	GPADI-6	GPADI-7	GPADI-8	GPADI-9	GPADI-10	GPADI-11
Basınç Dayanımı (MPa)	3,27	2,61	2,89	2,42	2,01	1,67	2,12	3,15	3,25	2,06	2,36
Birim Hacim Ağırlığı (g/cm³)	0,91	0,89	0,85	0,79	0,78	0,63	0,76	0,84	0,82	0,74	0,75
Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0,41	0,279	0,264	0,202	0,197	0,09	0,127	0,17	0,15	0,165	0,194
Çözelti Molaritesi	10,27	9,85	15,07	15,07	15,07	16,23	14,32	12,17	16,3	10,14	13,23

Çizelge 3.14, Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'te basınç dayanımları, çözelti molariteleri, birim hacim ağırlıkları ve ısı iletkenlik katsayıları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 3.14. Geopolimer örneklerin basınç dayanımlarının ve çözelti molaritelerinin karşılaştırılması

Molarite oranları eşit olan GPADI-3, GPADI-4, GPADI-5 geopolimer örnekleri incelendiğinde birim hacim ağırlık değerlerinin düşmesi ile basınç dayanımlarının azaldığı görülmektedir. Birim hacim ağırlıkları yaklaşık olarak eşit olan GPADI-2 ve GPADI-8 geopolimer örnekleri incelendiğinde ise molarite oranı yüksek olan örneğinin de basınç dayanımının yüksek olduğu açıkça görülmektedir. Sonuçta genişleştirilmiş perlit agregası miktarının arttırılması basınç dayanımlarında düşüşe neden olurken çözelti molaritelerindeki artışın ise basınç dayanımlarını arttırdığı görülmüştür.



Şekil 3.15. Geopolimer örneklerin birim hacim ağırlığı ve ısıl iletkenlik katsayıları karşılaştırılması

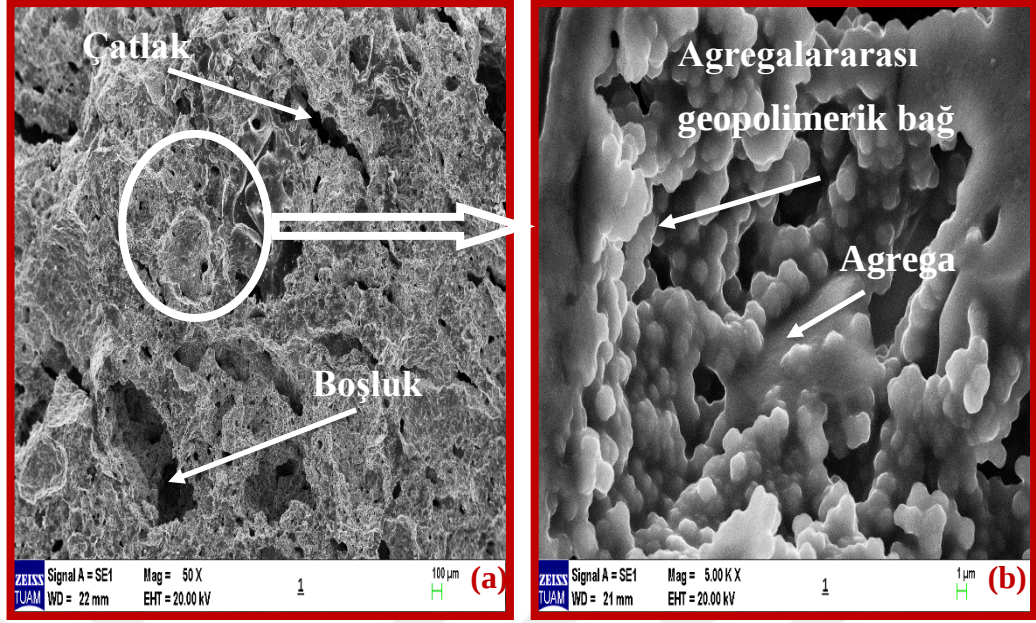
Geopolimer örnekler üzerinde yapılan çalışmalarda GPADI-1 örneğinin birim hacim ağırlığı GPADI-6 örneğine göre yaklaşık olarak % 33 fazladır. Aynı geopolimer örnekler için GPADI-6 Örneğinin GPADI-1 örneğine göre basınç dayanımında da yaklaşık olarak % 100 düşüş tespit edilmiştir. Bu düşüşü birim hacim ağırlığındaki %33 oranındaki azalış ile açıklamak mümkündür. Geopolimer örnekler üzerinde yapılan bir diğer değerlendirme ise ısıl iletkenlik katsayısı üzerinde yapılmıştır. GPADI-1 örneğinin ısıl iletkenlik katsayısı GPADI-6 örneğine göre yaklaşık olarak 4,5 kat daha fazla ölçülmüştür. Bu değerlendirme ile birlikte birim hacim ağırlık değerinin azalması ile ısıl iletkenlik katsayılarının düştüğü sonucuna varılmıştır.

Üretilen kompozit malzemelerin en önemli özelliklerinden olan basınç dayanımı, ısıl iletkenlik katsayıları ve birim hacim ağırlıkları karşılaştırıldığında molarite oranlarının artması ile basınç dayanımlarının arttığı, birim hacim ağırlıklarının azalması ile de basınç dayanımlarının düştüğü belirlenmiştir. Birim hacim ağırlıkların düşmesi ile ısıl iletkenlik katsayılarının azaldığı dolaylı olarak basınç dayanımlarının düşmesi ile de ısıl iletkenlik değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Üretimini yaptığımız geopolimer

örneklerdeki çözelti molaritesi miktarlarını da göz önünde bulundurursak birim hacim ağırlıkları düşerken çözelti molaritelerinin artırılması basınç dayanımlarındaki kayıpların önüne geçmiştir. Bir başka durum ise basınç dayanımının ve ısı iletkenlik değ erlerinin çözelti molaritesine de bağlı olarak değ işebileceğ idir. Çözelti molaritesinin artması ile oluşan geopolimerik bağların artıp boşluklu yapıyı azalttığı buna bağlı olarak da ısı iletkenlik katsayılarını arttırdığı görölmektedir. Geopolimer ö rneklerin birim hacim ağı lık değ erleri ve ısı iletkenlik katsayısı değ erleri göz önünde bulundurulduğ unda TS 825 belirtilen ve genleştirilmiş perlit agregası ile yapılan ısı yalıtım özelliğine sahip ü rünlere göre elde ettiğimiz geopolimer ö rneklerin değ erlerinin kullanılabilir olduğu görölmektedir [84].

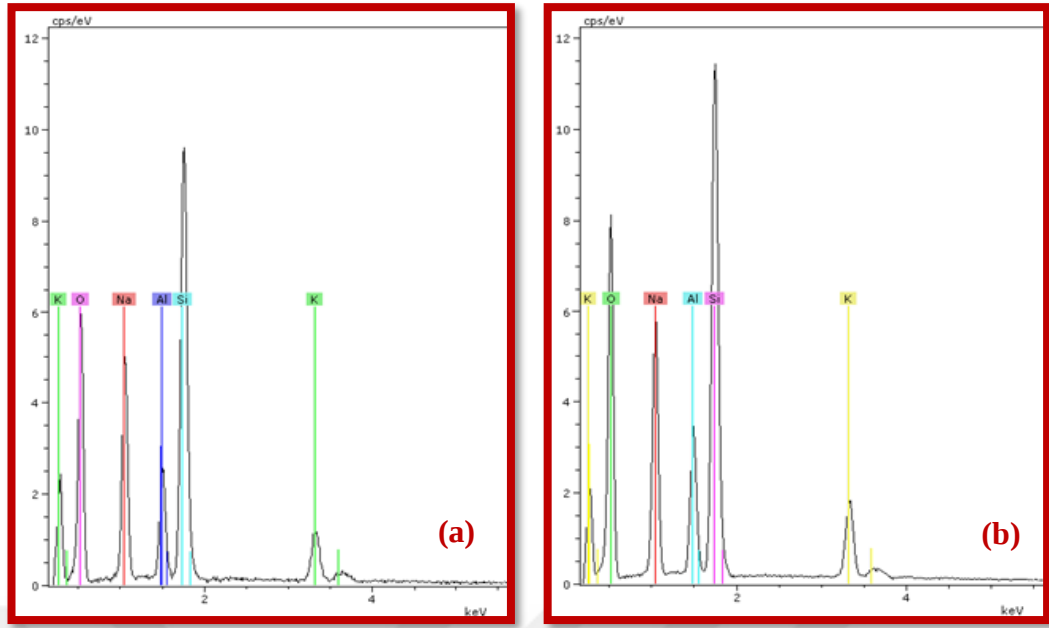
3.4. Geopolimer Ö rneklerin Mikro Yapı Analizleri

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile mikro yapı incelemesi yapılmıştır. Burada amaç; ö nceki bölümlerde verilen basınç dayanımı, birim hacim ağı rlık ve ısı iletkenlik katsayısı ölçümlerini desteklemektir. Elektron mikroskobu ile mikro yapıları incelenen geopolimer ö rnekler, ısı iletkenlik ölçümü yapılan geopolimer ö rneklerden kesilerek alınmıştır. Geopolimer ö rneklerin 50, 1000, 2000 ve 5000 büyütmedeki görüntüleri incelenmiş ayrıca aynı görüntülerin EDX analizleri gerç ekleştirilerek oksit miktarları belirlenmiştir. (a) görüntüsünde ç ember iç ine alınan bölgenin 1000, 2000 ve 5000 büyütmedeki görüntüleri (b) görüntüsünde verilmiştir. (a) görüntüsünün büyütme verilecek bölgesi tüm geopolimer ö rnek incelenerek bağların en yoğun olduğu ve görüntünün en iyi olduğu nokta esas alınarak verilmiştir.



Şekil 3.16. GPADI-1 örneği 50x (a) ve 5000x(b) büyütme SEM görüntüsü

Şekil 3.16’da (a) ve (b) görüntüsü incelendiğinde boşluklu yapılar (a) örneğinde, agregalar arası bağlar (geopolimerik jeller) ise (b) örneğinde net bir şekilde görülmüştür. Reaksiyona girmemiş perlit partiküllerinin miktarı, artan alkali konsantrasyonu ile azalmış ve matris daha sürekli görünmüştür. Bu da artan miktarda jel oluşumunu göstermektedir. Jellerin matrisin daha sürekli görünmesinin, daha yüksek basınç mukavemeti ile sonuçlanan daha büyük miktarda jelle ilişkili olduğu GPADI-1 örneğinin en yüksek basınç dayanımına sahip olması ile açıklanabilir.



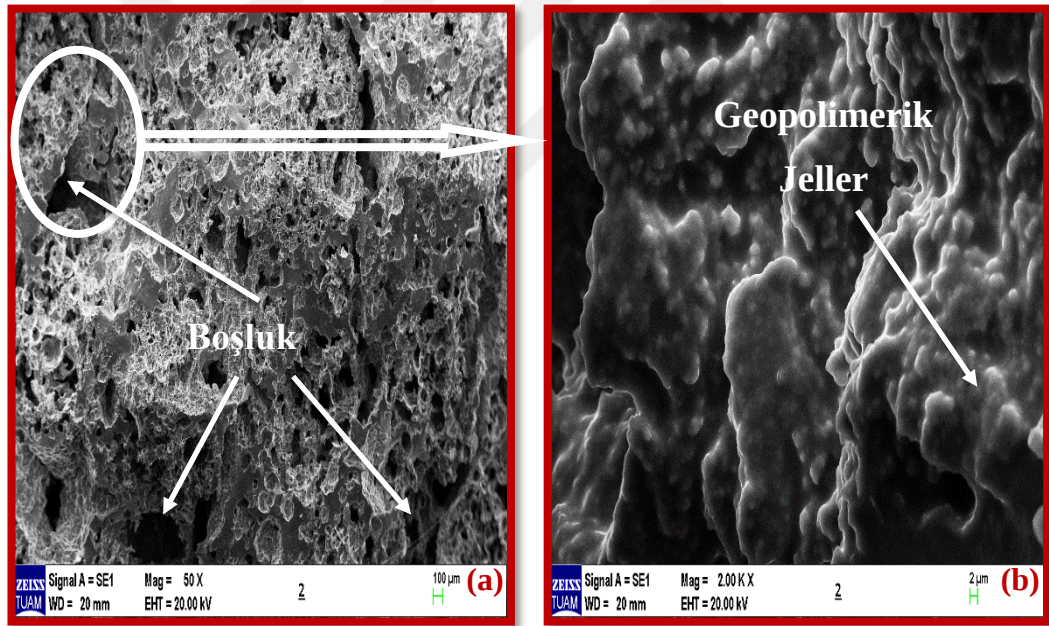
Şekil 3.17. GPADI-1 örneği 50x (a) ve 5000x(b) büyütme EDX analizi

Şekil 3.17’de (a) ve (b) görüntüsü ve Çizelge 3.14 incelendiğinde (a) görüntüsü Na_2O , Al_2O_3 , SiO_2 , K_2O oksit miktarlar sırası ile sırası %25,9, %12,37, %55,76, %5,98 iken (b) görüntüsü oksit miktarları ise sırası ile %25,71, %13,63, %54,08, %6,58 dir. Geopolimer örnekler içerisinde basınç dayanımı en yüksek olan örnek GPADI-1’dir ve EDX analizlerindeki SiO_2 miktarının diğer geopolimer örneklerden fazla olduğu göze çarpmaktadır. Geopolimer örnekteki SiO_2 miktarının daha yüksek yüzdeye sahip olması, basınç dayanımı ile doğru orantılı olması ile açıklanabilir.

Çizelge 3.15. GPADI-1 örneği 50x (a) ve 5000x(b) büyütme EDX analizi oksit miktarları

(a)		(b)	
Oksit	(%)	Oksit	(%)
Na ₂ O	25,9	Na ₂ O	25,71
Al ₂ O ₃	12,37	Al ₂ O ₃	13,63
SiO ₂	55,76	SiO ₂	54,08
K ₂ O	5,98	K ₂ O	6,58

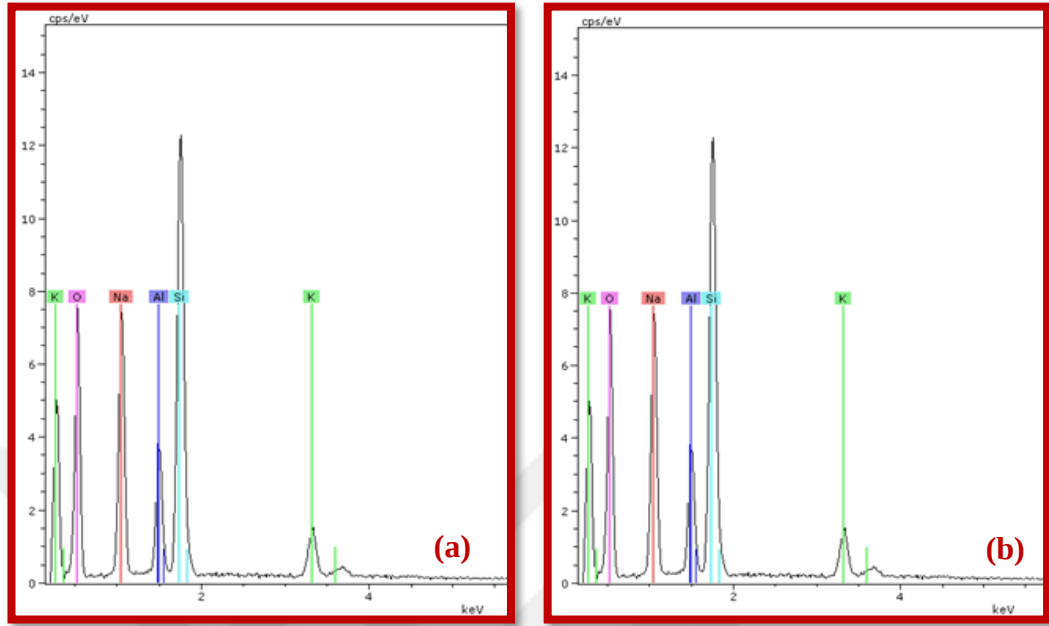
Çizelge 3.15'e göre GPADI-1 örneğinin (a) ve (b)görüntüsündeki SiO₂ miktarına bağlı olarak dayanımının arttığı görülmektedir.



Şekil 3.18. GPADI-2 örneği 50x (a) ve 2000x(b) büyütme SEM görüntüsü

Şekil 3.18'de parçacıkların yüzeylerinin, perlit tozu bulunan kabuk şeklinde reaksiyon ürünleri ve geopolimerik jeller ile kaplandığı görülmektedir. Perlit partiküllerinin birbirine tepkime ürünleri ile bağlandığı, ayrıca perlit parçacıkları arasında gözlenen

boşlukların sebebinin, boşluğu doldurmak için yeterli jelin oluşmadığı ve mikro yapının kırılğan görünmesine neden olduğu görülmektedir.



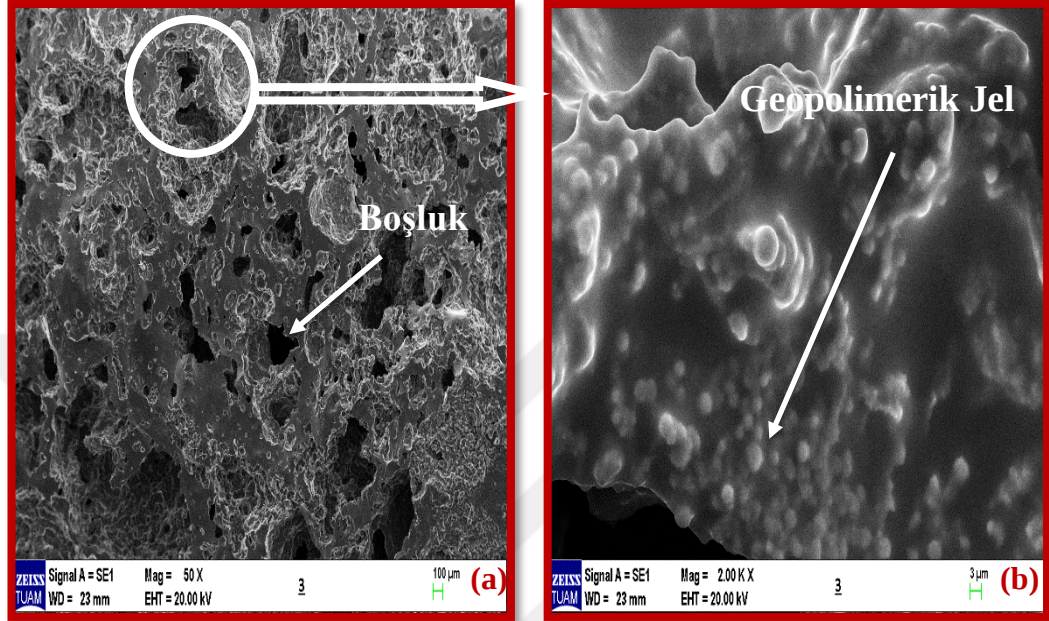
Şekil 3.19. GPADI-2 örneği 50x (a) ve 2000x(b) büyütme EDX analizi

Şekil 3.18 ve Şekil 3.19’da incelenen SEM görüntüleri ve EDX analizleri sonucunda sodium aluminosilicate hydrate (NASH) tipi jellerin oluştuğu sonucuna varılmıştır [46].

Çizelge 3.16. GPADI-2 örneği 50x (a) ve 2000x(b) büyütme EDX analizi oksit miktarları

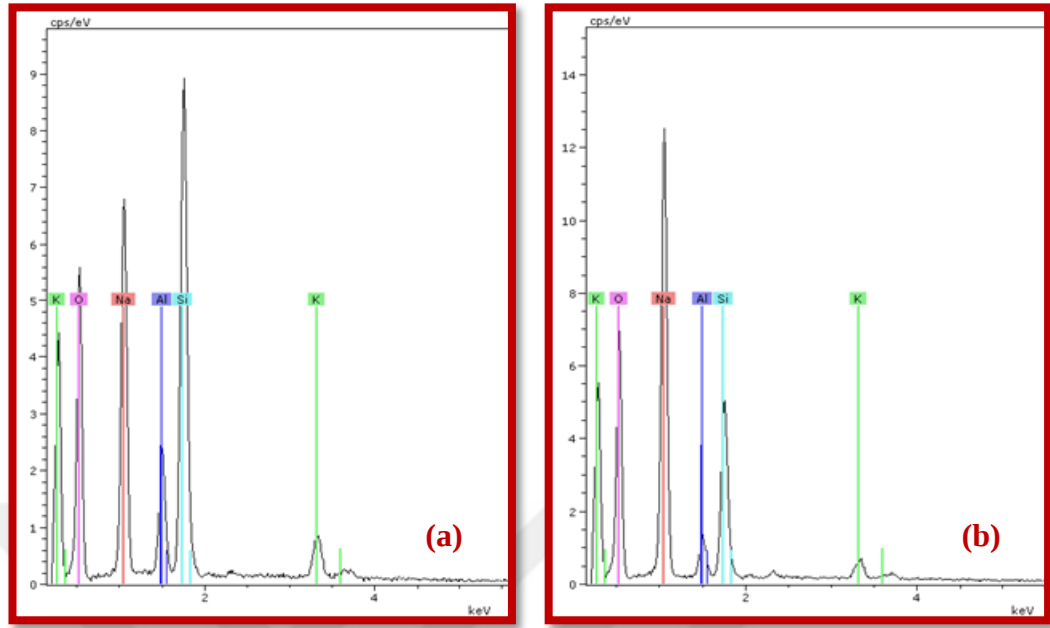
(a)		(b)	
Oksit	(%)	Oksit	(%)
Na ₂ O	35,27	Na ₂ O	36,17
Al ₂ O ₃	17,38	Al ₂ O ₃	13,47
SiO ₂	44,64	SiO ₂	45,65
K ₂ O	2,72	K ₂ O	4,7

Şekil 3.18’de(a) 50x büyütme ve (b) 2000x büyütme görüntüleri ile Çizelge 3.16 incelendiğinde 50 büyütmedeki (a) Na_2O , Al_2O_3 , SiO_2 , K_2O oksit miktarlar sırası ile sırası %35,27, %17,38, %44,64, %2,72 iken 2000 büyütmedeki (b) oksit miktarları ise sırası ile %29,17, %13,47, %52,65, %4,7’dir.



Şekil 3.20. GPADI-3 örneği 50x (a) ve 2000x (b) büyütme SEM görüntüsü

Şekil 3.20’de (a) 50x büyütme ve (b) 2000x büyütme görüntüleri incelendiğinde (a) örneğinde boşluklu yapılar, (b) örneğinde ise agregalar arası bağlar (geopolimerik jeller) net bir şekilde görülmüştür.



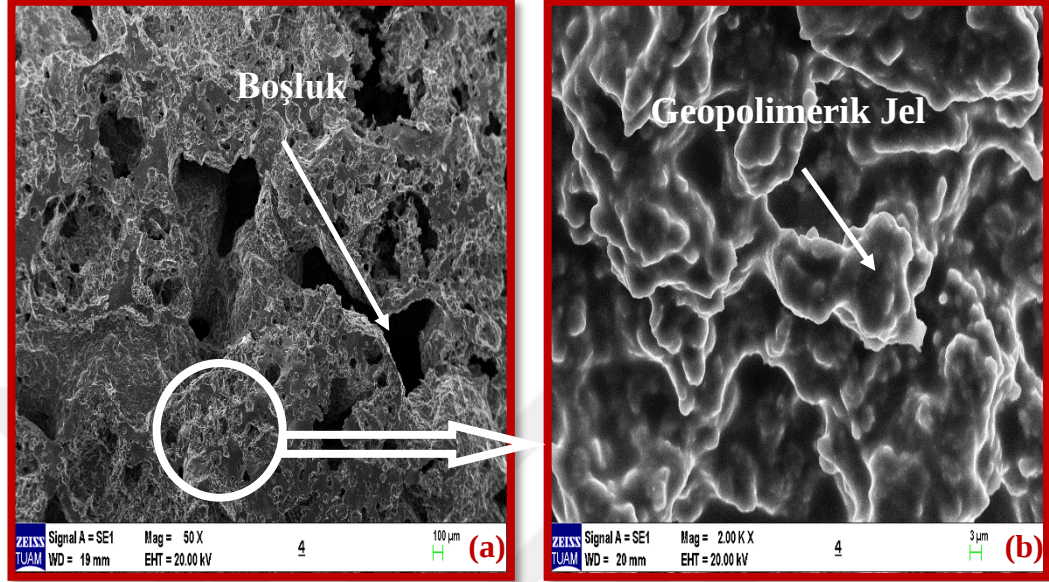
Şekil 3.21. GPADI-3 örneği 50x (a) ve 2000x(b) büyütme EDX analizi

GPADI-3 örneğinin Şekil 3.21’ de(a) 50x büyütme ve (b) 2000x büyütme görüntüleri EDX analizleri, Çizelge 3.16’da ise oksit miktarları verilmiştir.

Çizelge 3.17. GPADI-3 örneği 50x (a) ve 2000x (b) büyütme EDX analizi oksit miktarları

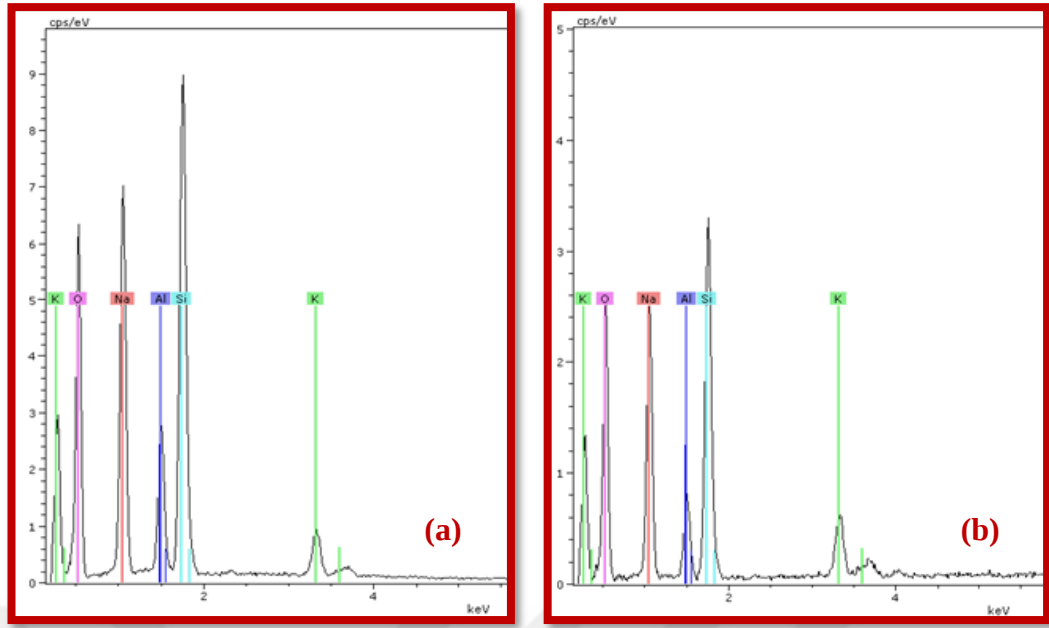
(a)		(b)	
Oksit	(%)	Oksit	(%)
Na ₂ O	35,37	Na ₂ O	49,67
Al ₂ O ₃	11,52	Al ₂ O ₃	6,72
SiO ₂	49,37	SiO ₂	41,33
K ₂ O	3,75	K ₂ O	2,29

EDX analizleri incelendiğinde yüksek miktarda Na_2O bulunması reaksiyona girmemiş NaOH aktivatörünün bulunduğunu göstermektedir. SEM görüntülerinde de reaksiyona girmemiş NaOH bulunduğu görülmektedir.



Şekil 3.22. GPADI-4 örneği 50x (a) ve 2000x (b) büyütme SEM görüntüsü

Şekil 3.22’de (a) ve (b) görüntüleri incelendiğinde (a) örneğinde boşluklu yapılar, (b) örneğinde ise agregalar arası bağlar (geopolimerik jeller) net bir şekilde görülmüştür. Bununla birlikte (a) görüntüsü incelendiğinde agregadaki boşluklu yapı göze çarpmaktadır. Agregadaki bu boşluklu yapı ürettiğimiz geopolimerik harçlardaki ısı iletkenlik katsayısındaki düşüşün en büyük sebeplerindendir.

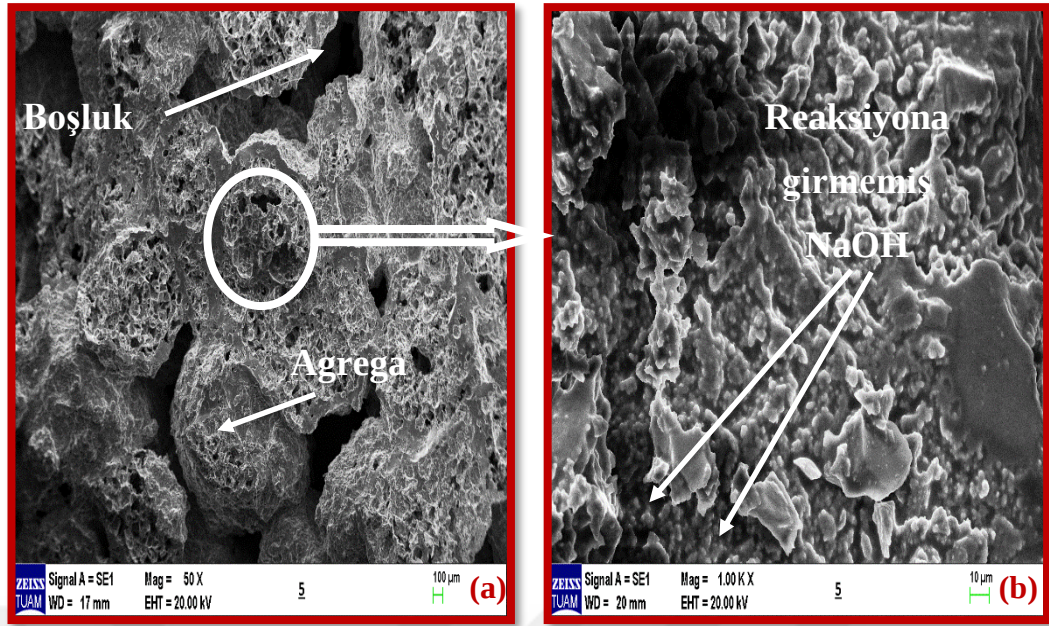


Şekil 3.23. GPADI-4 örneği 50x (a) ve 2000x (b) büyütme EDX analizi

GPADI-4 örneğinin Şekil 3.23 (a) ve (b)'de EDX analizleri, Çizelge 3.18' de ise oksit miktarları verilmiştir. 50 büyütmedeki (a) Na_2O , Al_2O_3 , SiO_2 , K_2O oksit miktarlar sırası ile %35,72, %13,36, %48,90, %3,82 iken 5000 büyütmedeki (b) oksit miktarları ise sırası ile %35,78, %10,64, %48,19, %5,39'dir.

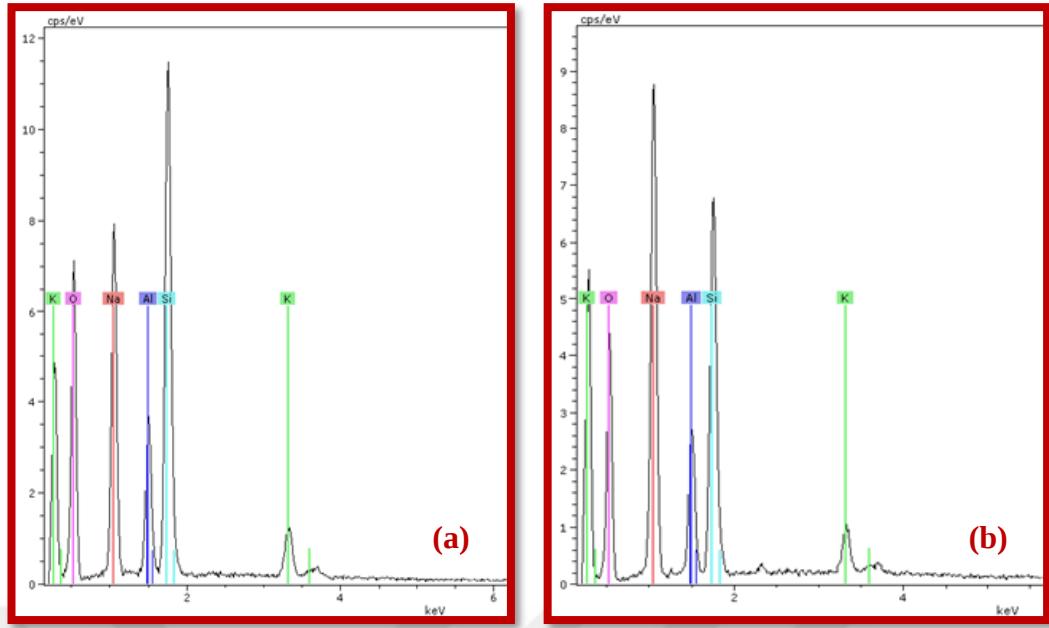
Çizelge 3.18. GPADI-4 örneği 50x (a) ve 2000x (b) büyütme EDX analizi oksit miktarları

(a)		(b)	
Oksit	(%)	Oksit	(%)
Na_2O	35,72	Na_2O	35,78
Al_2O_3	13,36	Al_2O_3	10,64
SiO_2	48,90	SiO_2	48,19
K_2O	3,82	K_2O	5,39



Şekil 3.24. GPADI-5 örneği 50x (a) ve 1000x (b) büyütme SEM görüntüsü

Şekil 3.24’de (a) görüntüsü incelendiğinde genleştirilmiş perlit agregalarının yüzeyini kaplayan perlit tozu bulunan kabuk şeklinde reaksiyon ürünleri görülmektedir. Ayrıca (b) görüntüsünde de agregalar arası geopolimerik jellerin oluşumu gözlemlenebilmektedir. 50x büyütme oranında, molarite oranları aynı olan GPADI-3, GPADI-4 ve GPADI-5 geopolimer örnekleri ile karşılaştırıldığında GPADI-5 örneğindeki boşluk oranlarının GPADI-3 ve GPADI-4 geopolimer örneklerine göre daha fazla olduğu görülebilmektedir. Bu durumu, GPADI-5 örneğinin basınç dayanımının ve birim hacim ağırlık değerinin düşük olması ile açıklamak mümkündür. Ayrıca (b) görüntüsünde reaksiyona girmemiş NaOH aktivatörüne de rastlanmıştır. Bu söylemlere ek olarak (a) görüntüsündeki agregaların boşluklu yapısı da göze çarpan bir diğer durumdur.



Şekil 3.25. GPADI-5 örneği 50x (a) ve 1000x (b) büyütme EDX analizi

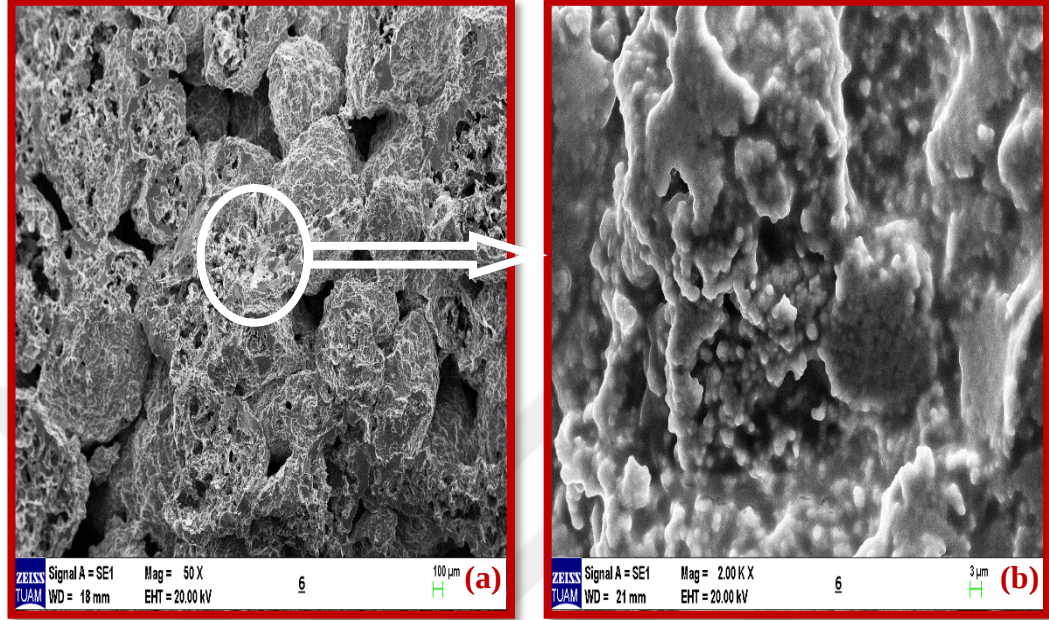
GPADI-5 örneğinin Şekil 3.24 (a) ve (b)'de EDX analizleri, Çizelge 3.19' de ise oksit miktarları verilmiştir.

Çizelge 3.19. GPADI-5 örneği 50x (a) ve 1000x (b) büyütme EDX analizi oksit miktarları

(a)		(b)	
Oksit	(%)	Oksit	(%)
Na ₂ O	31,95	Na ₂ O	36,42
Al ₂ O ₃	14,13	Al ₂ O ₃	13,15
SiO ₂	49,66	SiO ₂	46,61
K ₂ O	4,27	K ₂ O	41,54

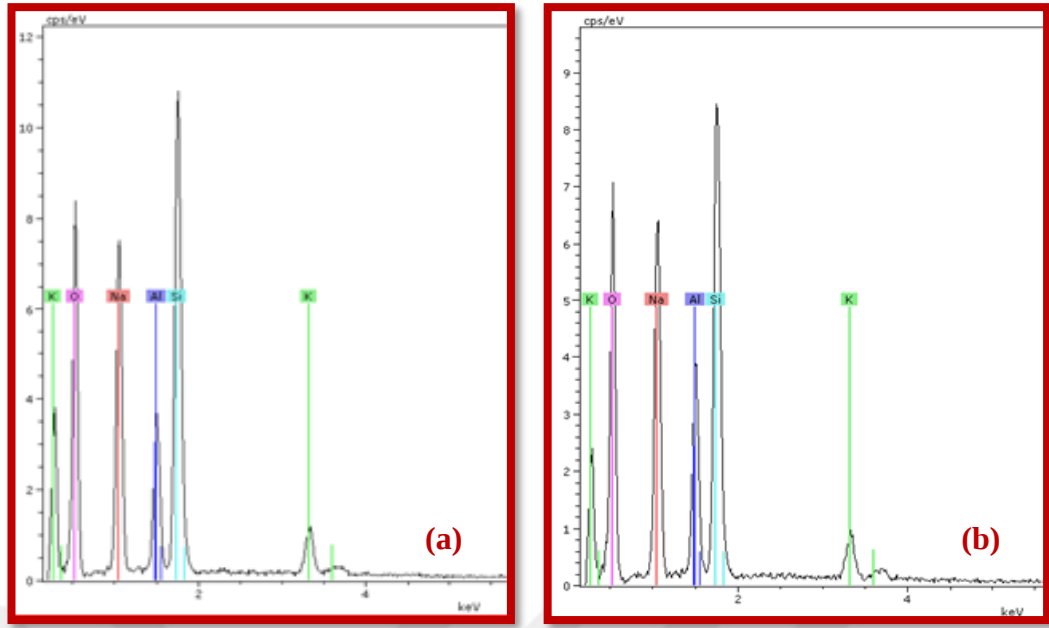
Molarite oranları aynı olan GPADI-3, GPADI-4, GPADI-5 numaralı geopolimer örneklerde Na₂O ve SiO₂ miktarlarının birbirine yakın olmasına rağmen sırası ile bu geopolimer örneklerin basınç dayanımları 2,89 MPa, 2,42 MPa ve 2,01 MPa olarak

ölçülmüştür. Bu sonuçlar, yapılan çalışmada agrega miktarının basınç dayanımı ve ısı iletkenlik üzerindeki etkisinin en az oksit miktarları kadar önemli olduğu sonucunu ortaya koymuştur.



Şekil 3.26. GPADI-6 örneği 50x (a) ve 2000x (b) büyütme SEM görüntüsü

Şekil 3.26 da(a) görüntüsü incelendiğinde mikro yapıdaki boşlukların bir hayli fazla olduğu göze çarpmaktadır. Bu boşlukların fazlalığı; basınç dayanımının, birim hacim ağırlığının ve ısı iletkenlik katsayısının düşük olması ile açıklanabilir ve yapılan deneysel çalışmaları destekler niteliktedir. Geopolimer örneklerin mikro yapısında çok sayıda gözenegın yer aldığı görülmüştür. Diğer geopolimer örneklerle karşılaştırıldığında GPADI-6 örneğinin diğer geopolimer örneklere göre kompakt olmayan bir yapıda olduğu gözlenmiştir.



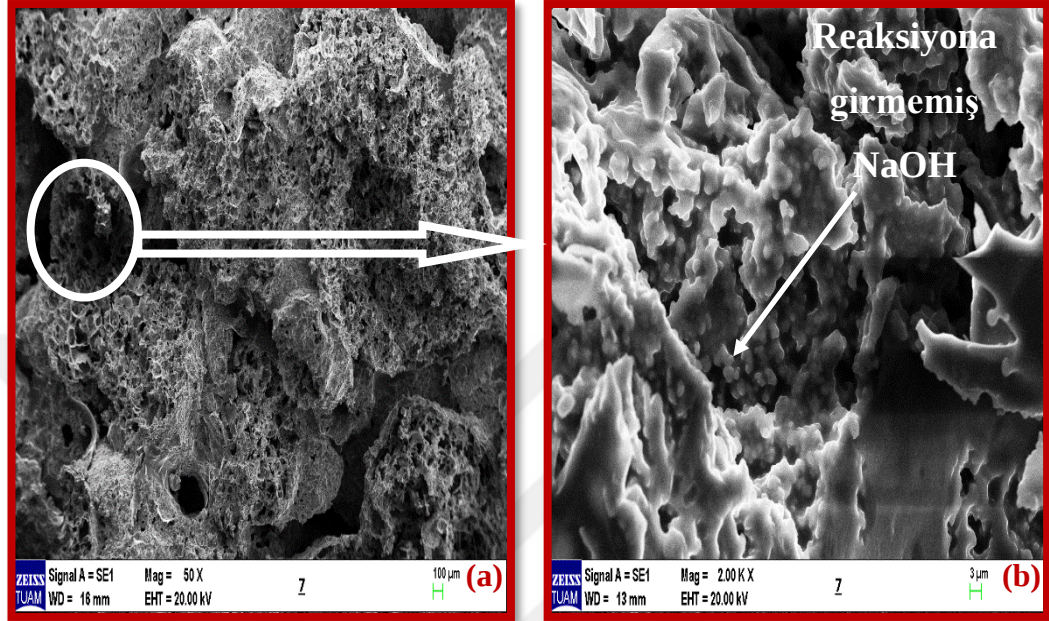
Şekil 3.27. GPADI-6 örneği 50x (a) ve 2000x (b) büyütme EDX analizi

GPADI-6 örneğinin Şekil 3.27 (a) ve (b)'de EDX analizleri, Çizelge 3.19'da ise oksit miktarları verilmiştir. SiO_2 / Na_2O oranındaki değişimin, bir alkali silikat çözeltisinde çözülmüş türlerin polimerizasyon derecesini önemli ölçüde değiştirdiği ve bunun geopolimerin yapısının ve özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynadığı bilinmektedir [16].

Çizelge 3.20. GPADI-6 örneği 50x (a) ve 2000x (b) büyütme EDX analizi oksit miktarları

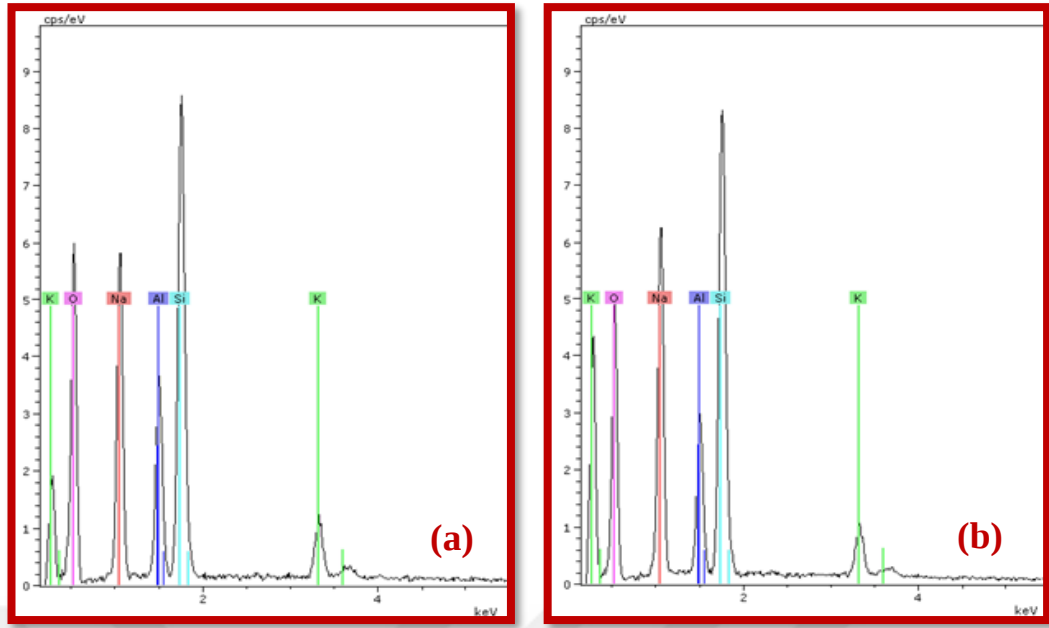
(a)		(b)	
Oksit	(%)	Oksit	(%)
Na_2O	32,85	Na_2O	32,67
Al_2O_3	17,62	Al_2O_3	18,98
SiO_2	45,02	SiO_2	44,11
K_2O	4,51	K_2O	4,25

Şekil 3.27’de (a) ve (b) görüntüsü ve Çizelge 3.20 incelendiğinde 50 büyütmedeki (a) Na_2O , Al_2O_3 , SiO_2 , K_2O oksit miktarlar sırası ile %32,85, %14,62, %48,02, %4,51 iken 5000 büyütmedeki (b) oksit miktarları ise sırası ile %32,67, %17,98, %45,11, %4,25’tir.



Şekil 3.28. GPADI-7 örneği 50x (a) ve 2000x (b) büyütme SEM görüntüsü

Şekil 3.28’de (a) ve (b) geopolimer örneklerinin SEM görüntüleri incelendiğinde boşluklu yapının yanı sıra reaksiyona girmemiş NaOH aktivatörüne de rastlanmıştır. Ayrıca genişletilmiş perlit agregasının boşluklu yapısı da (a) görüntüsünde net bir şekilde göze çarpmaktadır.



Şekil 3.29. GPADI-7 örneği 50x (a) ve 2000x (b) büyütme EDX analizi

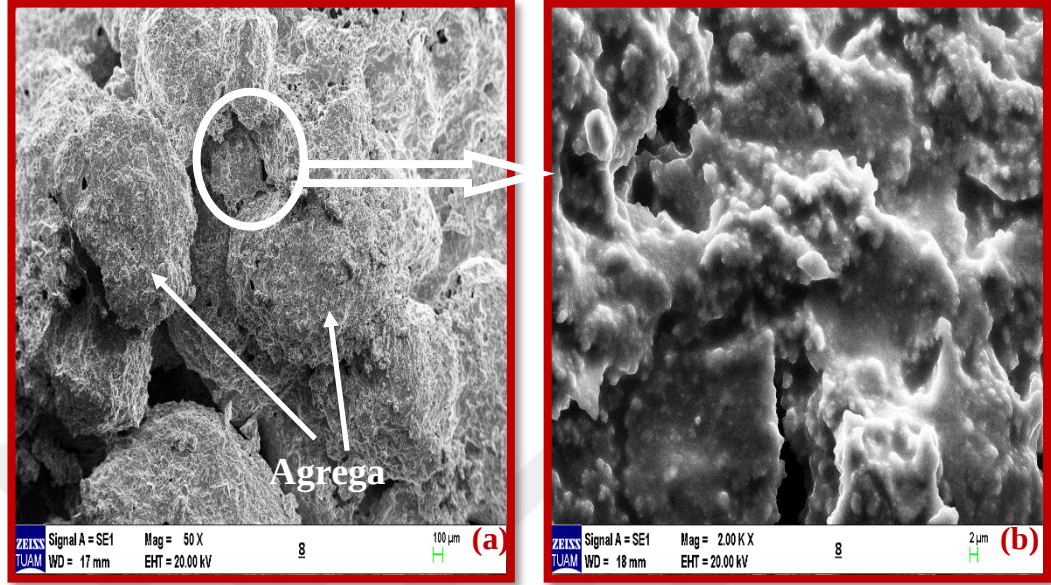
GPADI-7 örneğinin Şekil 3.29 (a) ve (b)'de EDX analizleri, Çizelge 3.20'de ise oksit miktarları verilmiştir.

Çizelge 3.21. GPADI-7 örneği 50x (a) ve 2000x (b) büyütme EDX analizi oksit miktarları

(a)		(b)	
Oksit	(%)	Oksit	(%)
Na ₂ O	28,68	Na ₂ O	33,30
Al ₂ O ₃	18,16	Al ₂ O ₃	14,08
SiO ₂	48,88	SiO ₂	47,48
K ₂ O	4,28	K ₂ O	5,14

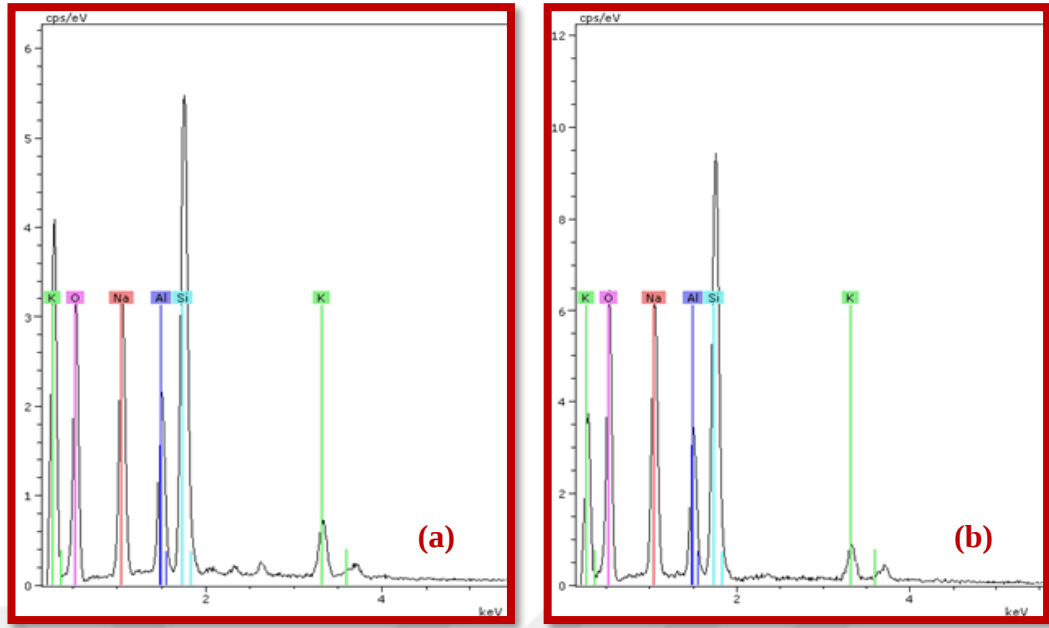
Şekil 3.29'de (a) ve (b) görüntüsü ve Çizelge 3.21 incelendiğinde 50 büyütmedeki (a) Na₂O, Al₂O₃, SiO₂, K₂O oksit miktarlar sırası ile %28,68, %18,16, %48,88, %5,14 iken

5000 büyütmedeki (b) oksit miktarları ise sırası ile %33,30, %14,08, %47,48, %5,14'tür.



Şekil 3.30. GPADI-8 örneği 50x (a) ve 2000x (b) büyütme SEM görüntüsü

Şekil 3.30(a) görüntüsünde agregaların net bir şekilde belirlenebildiği ve genişletilmiş perlit agregalarının yüzeyini kaplayan perlit tozu bulunan kabuk şeklinde reaksiyon ürünleri görülmektedir.

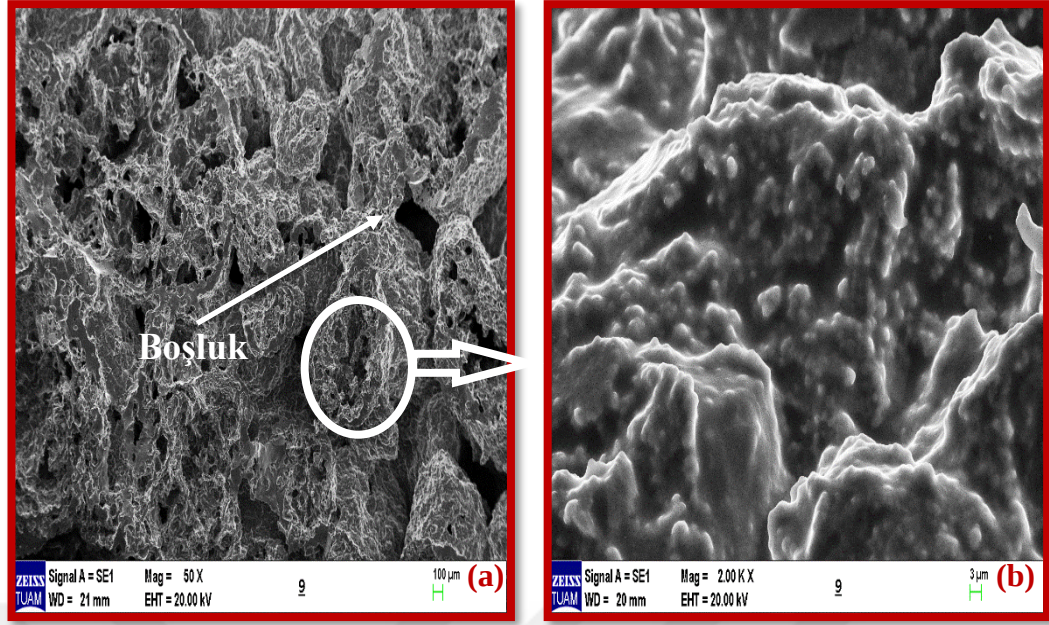


Şekil 3.31. GPADI-8 örneği 50x (a) ve 2000x (b) büyütme EDX analizi

GPADI-8 örneğinin Şekil 3.31 (a) ve (b)'de EDX analizleri, Çizelge 3.22'de ise oksit miktarları verilmiştir.

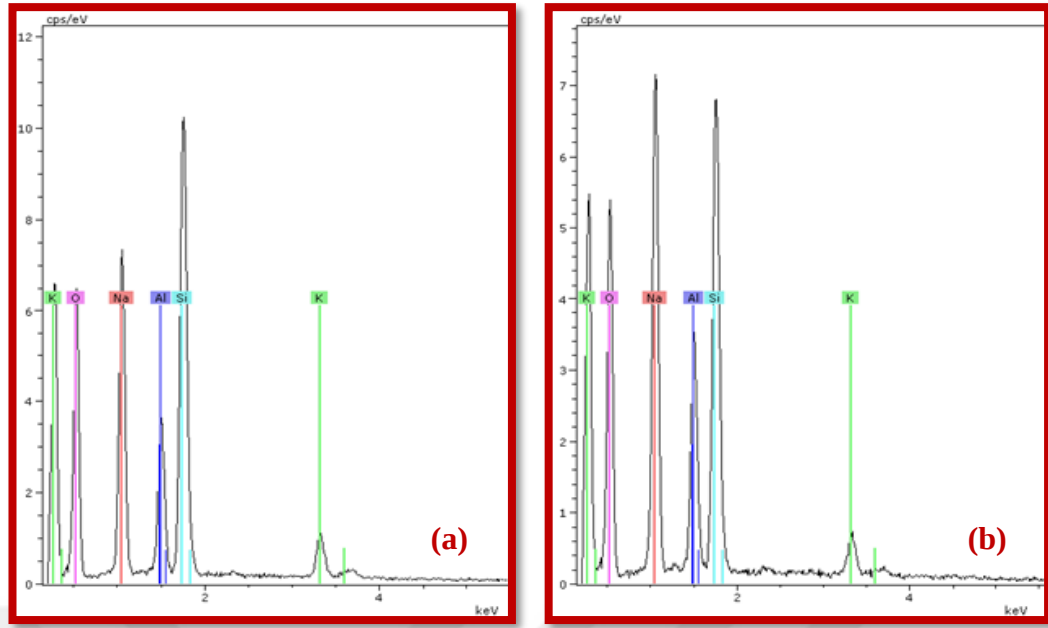
Çizelge 3.22. GPADI-8 örneği 50x (a) ve 2000x (b) büyütme EDX analizi oksit miktarları

(a)		(b)	
Oksit	(%)	Oksit	(%)
Na ₂ O	26,41	Na ₂ O	29,85
Al ₂ O ₃	16,57	Al ₂ O ₃	15,22
SiO ₂	50,88	SiO ₂	50,51
K ₂ O	4,19	K ₂ O	4,43



Şekil 3.32. GPADI-9 örneği 50x (a) ve 2000x (b) büyütme SEM görüntüsü

GPADI-9 örneği Şekil 3.32 (a) ve (b) görüntüleri incelendiğinde (a) örneğinde boşluklu yapılar, (b) örneğinde ise agregalar arası bağlar (geopolimerik jeller) net bir şekilde görülmüştür.



Şekil 3.33. GPADI-9 örneği 50x (a) ve 2000x (b) büyütme EDX analizi

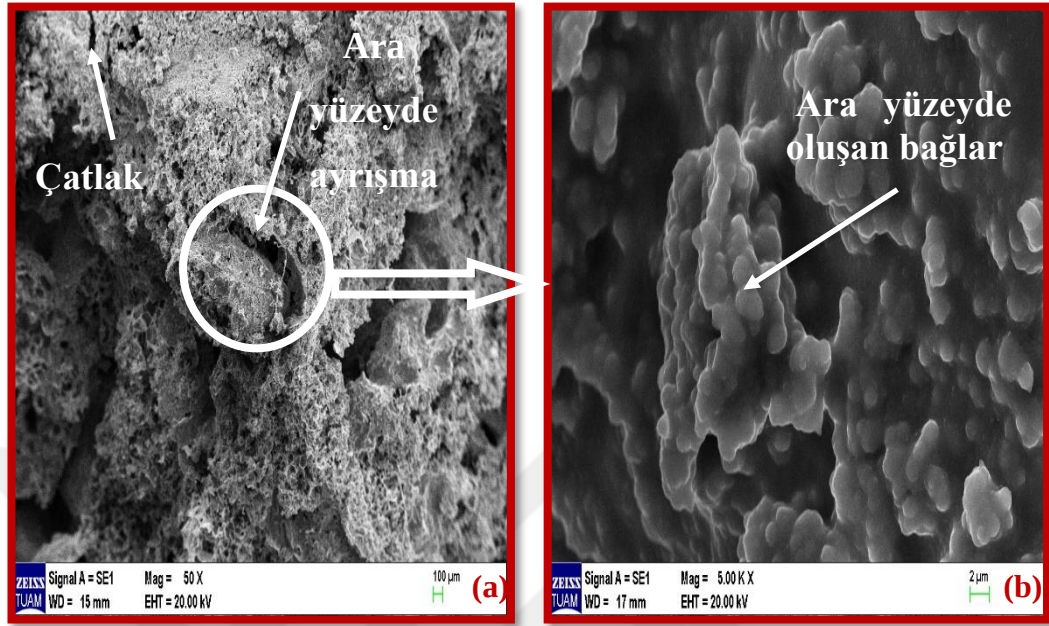
GPADI-9 örneğinin Şekil 3.33 (a) ve (b)'de EDX analizleri, Çizelge 3.23'te ise oksit miktarları verilmiştir.

Çizelge 3.23. GPADI-9 örneği 50x (a) ve 2000x (b) büyütme EDX analizi oksit miktarları

(a)		(b)	
Oksit	(%)	Oksit	(%)
Na ₂ O	32,36	Na ₂ O	38,93
Al ₂ O ₃	14,66	Al ₂ O ₃	18,18
SiO ₂	48,32	SiO ₂	39,91
K ₂ O	4,66	K ₂ O	2,97

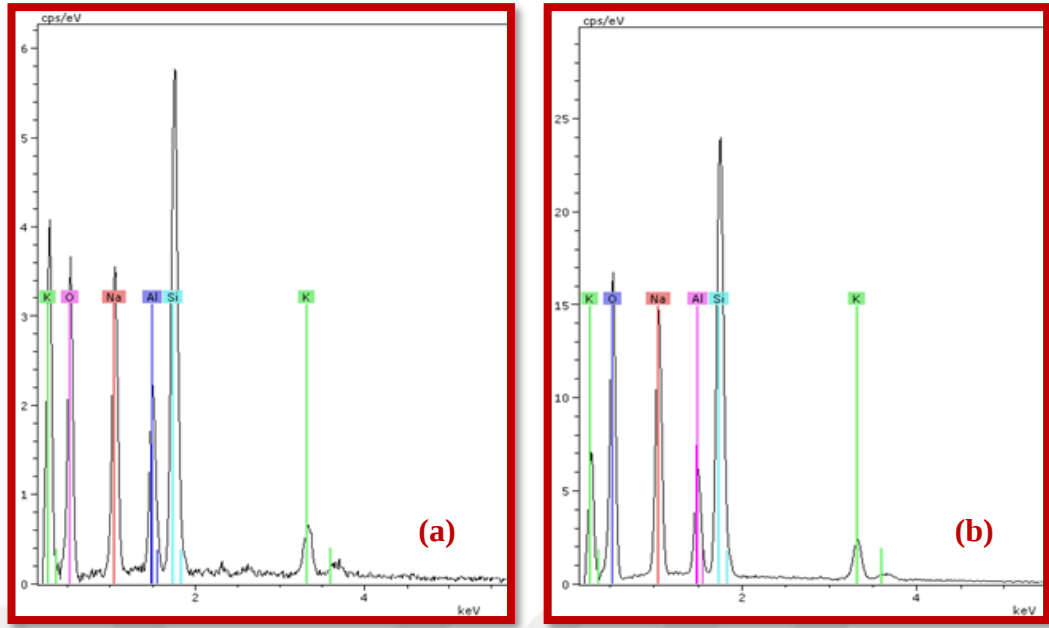
Geopolimer örneklerin oksit miktarlarının incelenmesi sonucunda daha küçük büyütme oranlarında Na₂O miktarının daha az, daha büyük büyütme oranlarında ise

Na₂O miktarının fazlalığı göze çarpmaktadır. Bunun, reaksiyona girmemiş olan NaOH' ların varlığından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 3.34. GPADI-10 örneği 50x (a) ve 5000x (b) büyütme SEM görüntüsü

Şekil 3.34 (a) görüntüsü incelendiğinde GPADI-10 örneğinde çatlak oluşumlarının var olduğu ayrıca agrega jel ara yüzey arasında da ayrışmaların bulunduğu görülmüştür. Oluşan çatlaklar; aktivasyon işlemi sırasında yüksek sıcaklıkta kürlenme veya SEM gözlemi için numune hazırlama sırasında mekanik hasar ile bağlantılı olabileceği tahmin edilmektedir. (b) görüntüsü incelendiğinde ise geopolimerik jellerin tüm agrega yüzeyini ve ara boşlukları kapattığı görülmektedir.



Şekil 3.35. GPADI-10 örneği 50x (a) ve 5000x (b) büyütme EDX analizi

GPADI-10 örneğinin Şekil 3.35 (a) ve (b)'de EDX analizleri, Çizelge 3.24'te ise oksit miktarları verilmiştir.

Çizelge 3.24. GPADI-10 örneği 50x (a) ve 5000x (b) büyütme EDX analizi oksit miktarları

(a)		(b)	
Oksit	(%)	Oksit	(%)
Na ₂ O	28,07	Na ₂ O	30,03
Al ₂ O ₃	16,57	Al ₂ O ₃	11,98
SiO ₂	50,78	SiO ₂	52,97
K ₂ O	4,58	K ₂ O	5,03

GPADI-10 örneği için Çizelge 3.24 50 (a) büyütme ve 5000 (b) büyütmedeki SiO₂ miktarına bağlı olarak dayanımın arttığı fakat Na₂O miktarının %30'lar civarında olması da reaksiyona girmemiş NaOH miktarının bulunduğunu göstermektedir.

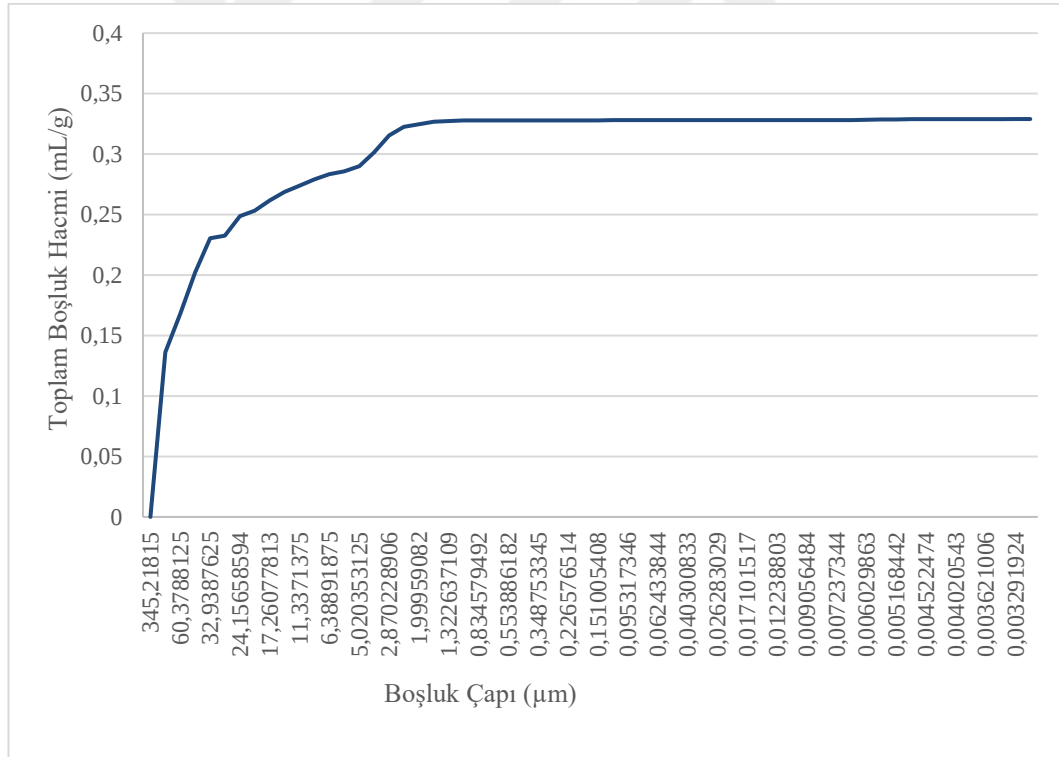
Sonuç:

Basınç miktarı arttıkça boşluk miktarının azaldığı SEM görüntülerinden anlaşılabilmekte olup GPADI-1 örneğinin SEM görüntüsü bunun en iyi örneği olmuştur. SEM görüntülerinin incelendiği bir başka çalışmada da mekanik özelliklerin iyileşmesi, mikro yapıdaki tamamen kompakt ve yapışmış bir jeopolimer matrisi ile açıklanmıştır [85].

Genleştirilmiş perlit agregalarının yüzeyini kaplayan perlit tozu bulunan kabuk şeklinde reaksiyon ürünleri ve agregalar arası geopolimerik jellerin oluşumu görölmektedir. Ayrıca çatlak oluşumlarına rastlandığı, agrega jel ara yüzey arasında da ayrışmaların bulunduğu görölmüştür. Oluşan çatlaklar; aktivasyon işlemi sırasında yüksek sıcaklıkta kürlenme veya SEM gözlemi için numune hazırlama sırasında mekanik hasar ile bağlantılı olabileceği tahmin edilmektedir. Ayrıca; geleneksel betonlarda mikro yapıdaki oluşumlar CH, C-S-H, etrenjit gibi ürünler olurken geopolimer harçlarda geopolimerik jeller ve reaksiyona girmemiş alkali aktivatör şeklinde olmuştur.

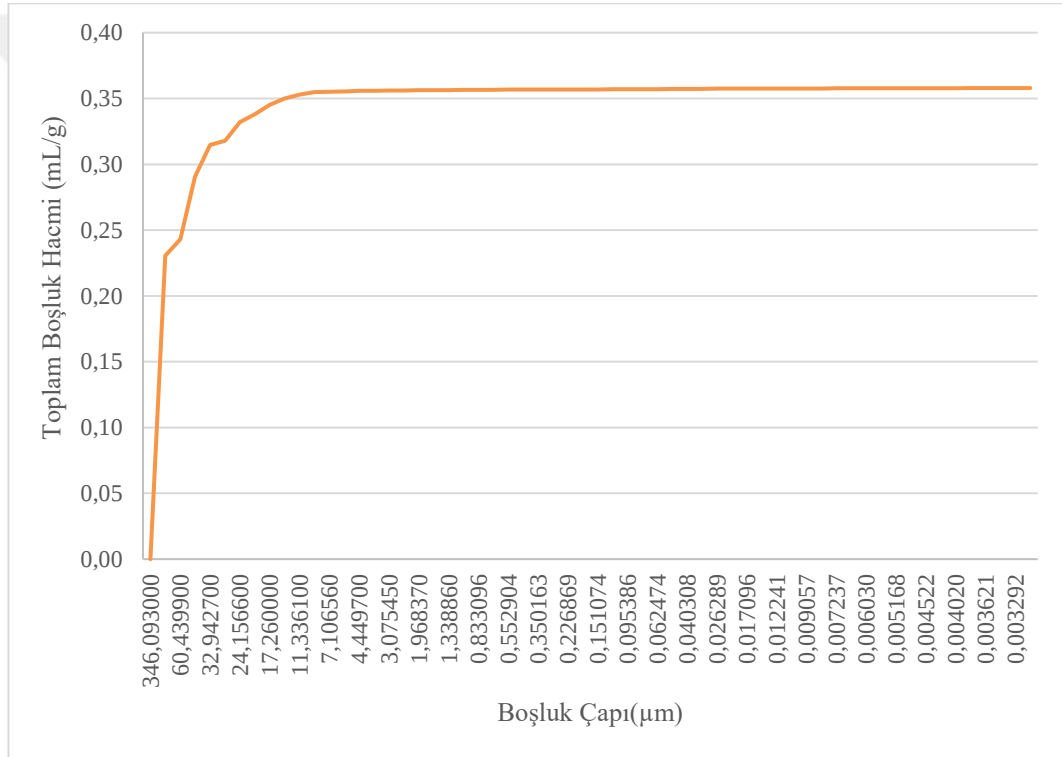
3.5. Geopolimer Örneklerin Cıvalı Porozimetre Analizleri

Şekil 3.35, Şekil 3.36, Şekil 3.37, Şekil 3.38, Şekil 3.39, Şekil 3.37’de geopolimer örneklerin toplam boşluk hacmi-boşluk çapı grafikleri ayrı ayrı verilerek boşluk miktar ve çapları incelenmiştir. Burada amaç önceki bölümlerde verilen basınç dayanımı, birim hacim ağırlık, ısıl iletkenlik katsayısı ölçümleri ve mikro yapı görüntülerini desteklemek olmuştur. Numune içerisindeki boşluklar birbirleri ile ilişkili olup sürekli bir sisteme sahip ise basıncın artmasıyla birlikte cıva, örneğin tüm boşluklarına dolabilir. Bunun yanında eğer boşluk sistemi sürekli bir sisteme sahip değilse böyle bir durum geopolimerik jellerin birbirleri ile bağlantılı olan sistemleri tıkayabilir. Eğer bu jeller yeterli dayanımına sahip değil ise bu tıkanıklıklar cıvanın basıncıyla kırılacak ve cıva, örneğin içerisine doğru ilerlemeye devam edecektir.



Şekil 3.36. GPADI-1 geopolimer örneği toplam boşluk hacmi-boşluk çapı grafiği

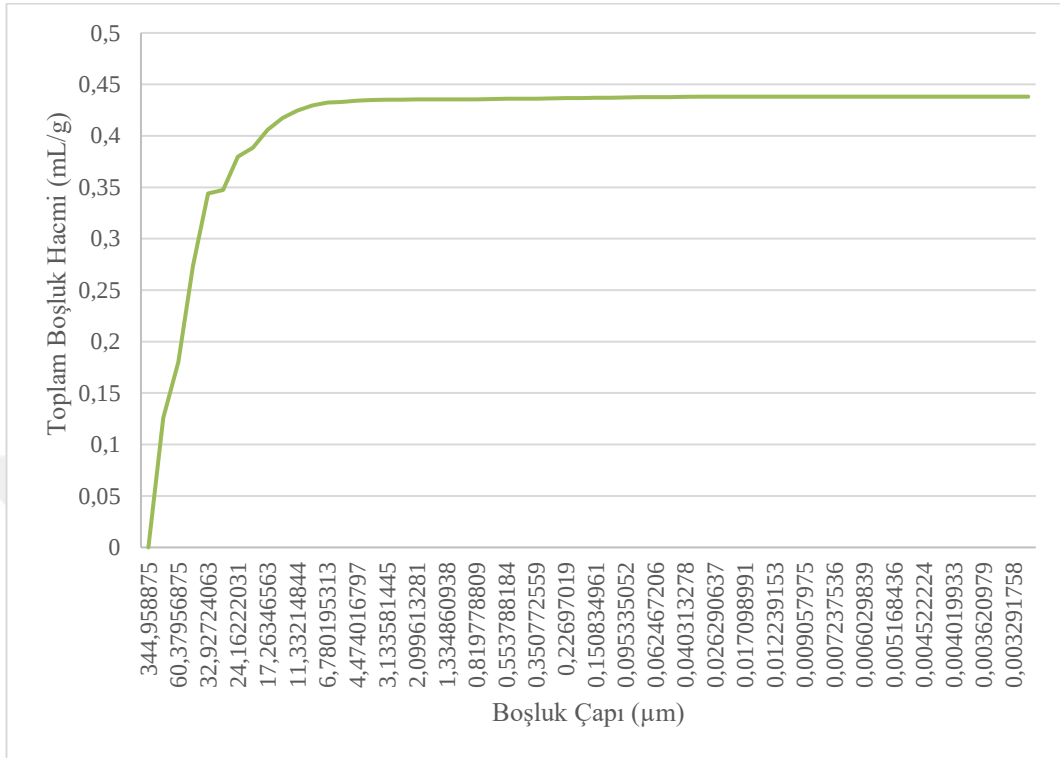
Şekil 3.36 incelendiğinde en büyük boşluk çapının 345,21 μm ve en küçük boşluk çapının ise 0,003291 μm olduğu görülür. Ayrıca en fazla toplam boşluk hacminin ise 0,3291 ml/g olduğu görülmektedir. Cıvalı porozimetre deneyinde hazırlanan numune kapalı bir kap içerisinde yerleştikten sonra hazneye cıva doldurulmuş, cıva basıncı giderek arttırılmış ve numuneye nüfuz ettirilmesi sağlanmıştır. Boşluk dağılımları numuneye nüfuz eden cıva hacmine bağlı olarak (ml/g) olarak tespit edilmiştir. Numuneye nüfuz ettirilen cıva basıncı giderek arttırılmış ve nüfuz eden cıvanın nüfuz ettiği boşluk çapı giderek küçülmüştür. Diğer yandan nüfuz eden cıva hacmi artmış ve 0,3289 ml/g değerinden sonra sabitleşmiştir. Bu değerden sonra cıva nüfuzu durmuş ve boşluk hacmi 0,3289 ml/g olarak tespit edilmiştir.



Şekil 3.37. GPADI-3 geopolimer örneği toplam boşluk hacmi-boşluk çapı grafiği

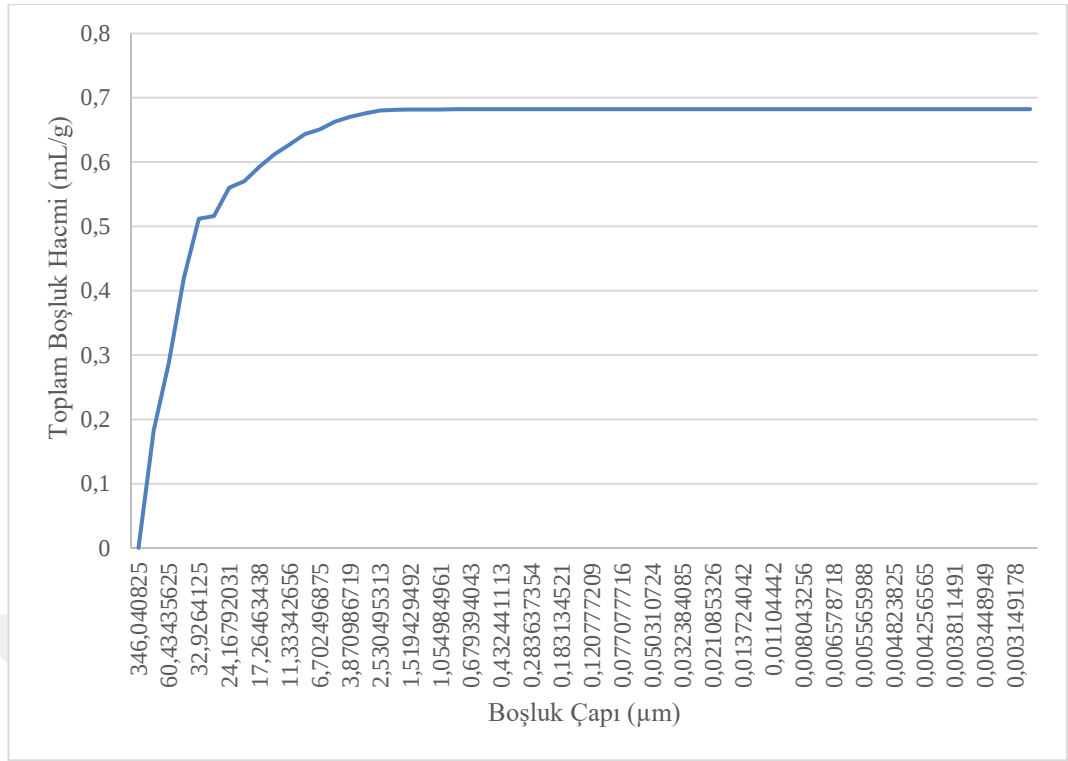
Şekil 3.37 incelendiğinde en büyük boşluk çapı 346,093 μm iken en küçük boşluk çapının ise 0,003292 μm olduğu görülür. Numuneye nüfuz ettirilen cıva basıncı giderek arttırılmış ve nüfuz eden cıvanın nüfuz ettiği boşluk çapı giderek küçülmüştür. Diğer yandan nüfuz eden cıva hacmi artmış ve 0,360 ml/g değerinden sonra

sabitleşmiştir. Bu değerden sonra cıva nüfuzu durmuş ve boşluk hacmi 0,360 ml/g olarak tespit edilmiştir.



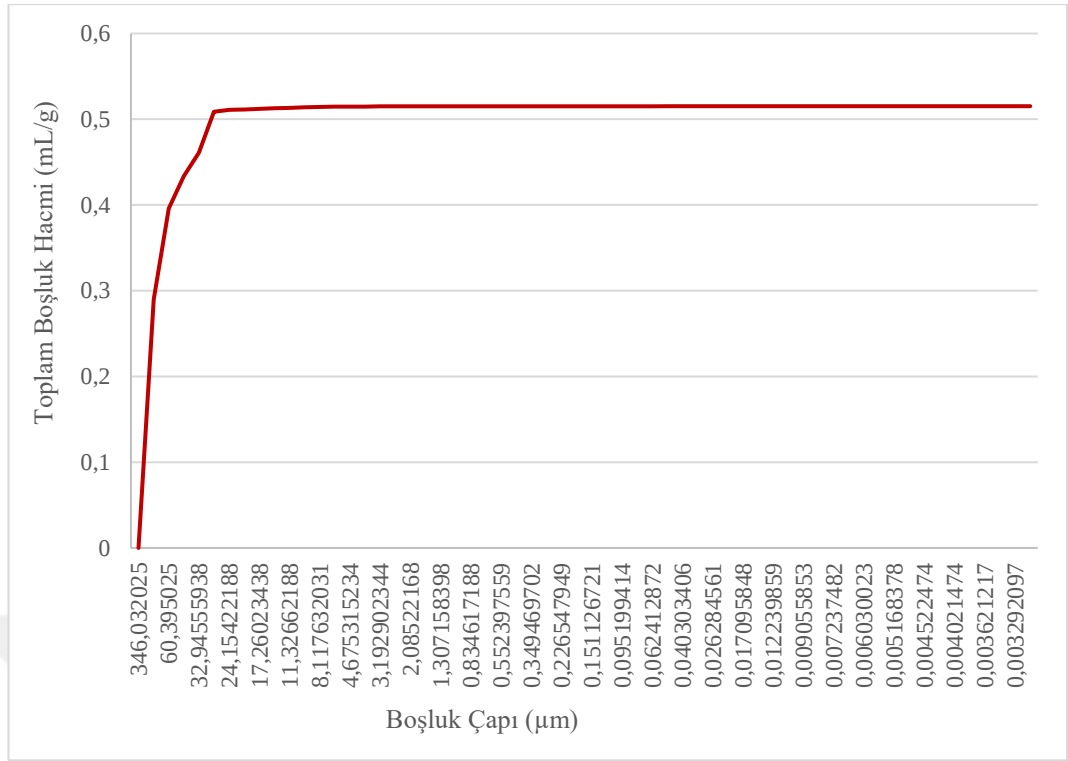
Şekil 3.38. GPADI-5 geopolimer örneği toplam boşluk hacmi-boşluk çapı grafiği

Şekil3.38 incelendiğinde en büyük boşluk çapı 344,958 µm iken en küçük boşluk çapının ise 0,003291 µm olduğu görülür. Numuneye nüfuz ettirilen cıva basıncı giderek arttırılmış ve nüfuz eden cıvanın nüfuz ettiği boşluk çapı giderek küçülmüştür. Diğer yandan nüfuz eden cıva hacmi artmış ve 0,4380 ml/g değerinden sonra sabitleşmiştir. Bu değerden sonra cıva nüfuzu durmuş ve boşluk hacmi 0,4380 m/g olarak tespit edilmiştir. İlk etapta büyük boşluklara küçük basınç değerlerinde cıva girişi fazla miktarda olmuş ve bu hacim giderek azalıp sabit bir değer almıştır.



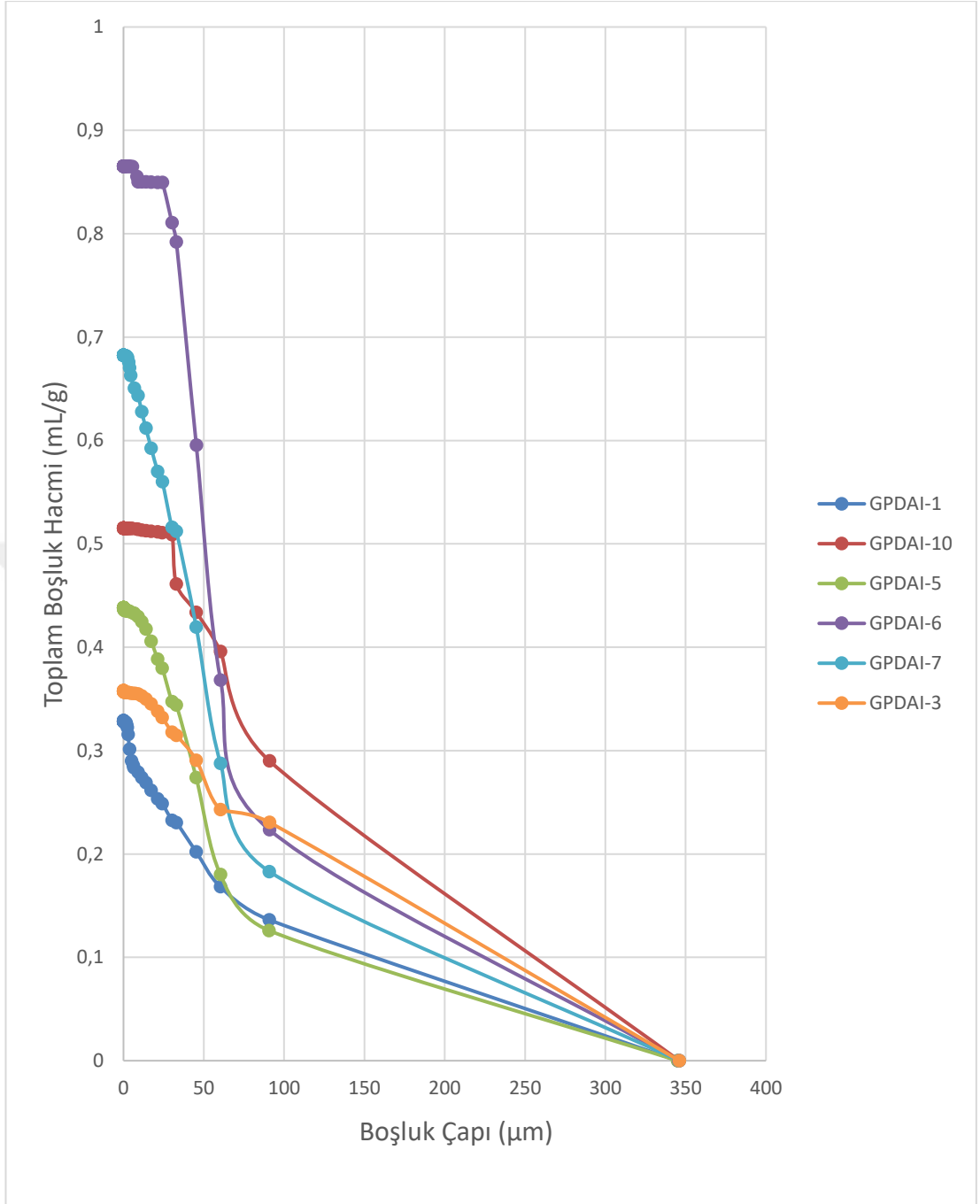
Şekil 3.40. GPADI-7 geopolimer örneği toplam boşluk hacmi-boşluk çapı grafiği

Şekil3.40 incelendiğinde en büyük boşluk çapı 346,040 μm iken en küçük boşluk çapının ise 0,003149 μm olduğu görülmüştür. Numuneye nüfuz ettirilen cıva basıncı giderek artırılmış ve nüfuz eden cıvanın nüfuz ettiği boşluk çapı giderek küçülmüştür. Diğer yandan nüfuz eden cıva hacmi artmış ve 0,6822 ml/g değerinden sonra sabitleşmiştir. Bu değerden sonra cıva nüfuzu durmuş ve boşluk hacmi 0,6822 ml/g olarak tespit edilmiştir.



Şekil 3.41. GPADI-10 geopolimer örneği toplam boşluk hacmi-boşluk çapı grafiği

Şekil 3.41 incelendiğinde en büyük boşluk çapı 346,032 µm iken en küçük boşluk çapının ise 0,003292 µm olduğu görülür. Numuneye nüfuz ettirilen cıva basıncı giderek arttırılmış ve nüfuz eden cıvanın nüfuz ettiği boşluk çapı giderek küçülmüştür. Diğer yandan nüfuz eden cıva hacmi artmış ve 0,5151 ml/g değerinden sonra sabitleşmiştir. Bu değerden sonra cıva nüfuzu durmuş ve boşluk hacmi 0,5151 ml/g olarak tespit edilmiştir. İncelenen geopolimer örnekler ile birlikte basınç dayanımı, birim hacim ağırlığı, ısı iletkenlik değerleri ve boşluk miktarı arasında güçlü ve birbirini destekler nitelikte bir bağlantının olduğu açıkça görülmektedir.

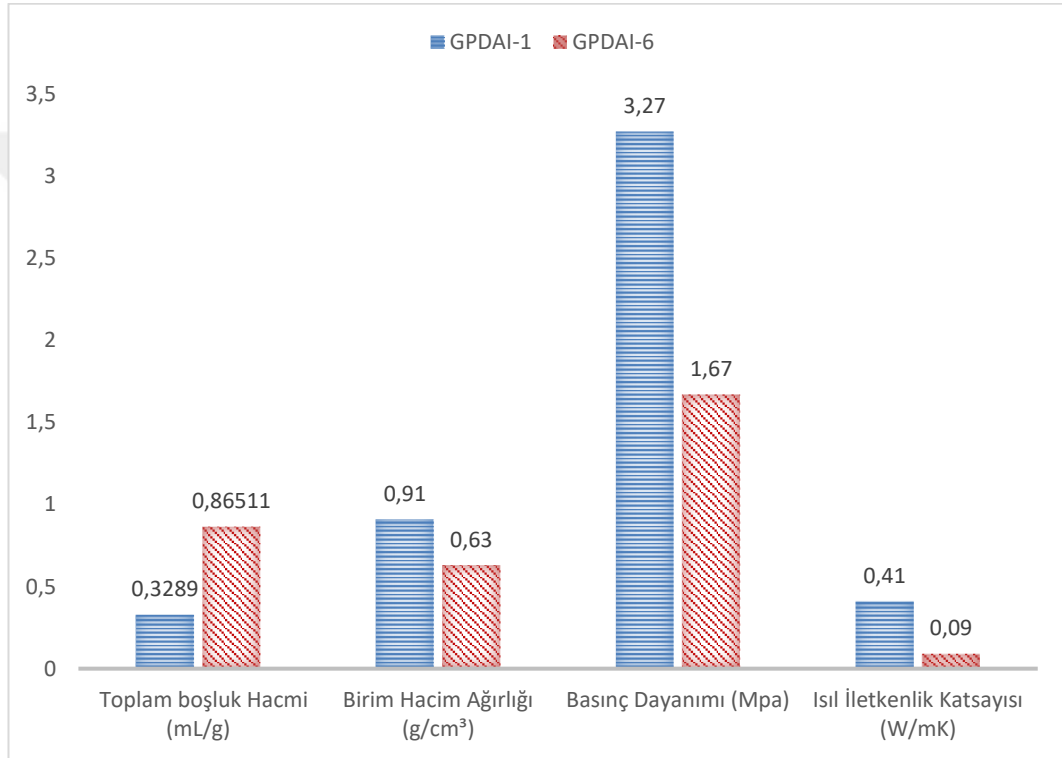


Şekil 3.42. GPADI-1-3-5-6-7-10 geopolimer örneği toplam boşluk hacmi-boşluk çapı karşılaştırması

Şekil 3.41 incelendiğinde cıvalı porozimetre deneyi sonucunda en az toplam boşluk hacmi 0,3289 mL/g ile GPADI-1 örneğinde iken en fazla toplam boşluk hacmi ise 0,86511 mL/g ile GPADI-6 örneğinde olmuştur. Geopolimer örnekler arasında en

küçük ve en büyük boşluk çapı değerleri karşılaştırıldığında ise değerlerin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Bu durumun ilk olarak cıva girişi için numunelere uygulanan basınçların eşit olması ile bağlantılı olabileceği düşünülmektedir. İkincisi ise agregalar arası boşluklar, ara yüzey boşlukları ve agreganın iç yapısındaki boşlukların da boşluk çapı açısından birbirine çok yakın olduğunu göstermektedir.

Cıvalı porozimetre deneyi; basınç dayanımı, ısı iletkenlik ve birim hacim ağırlık değerleri karşılaştırması Şekil 3.43'te verilmiştir.



Şekil 3.43. Cıvalı porozimetre deneyi, basınç dayanımı, ısı iletkenlik ve birim hacim ağırlık değerleri karşılaştırması

Şekil 3.43'teki karşılaştırma en fazla toplam boşluk hacmine sahip GPADI-6 geopolimer örneği ve en az toplam boşluk hacmine sahip GPADI-1 geopolimer örneği arasında verilmiştir. Sonuç olarak toplam boşluk hacmi arttıkça birim hacim ağırlık, basınç dayanımı ve ısı iletkenlik katsayısının düştüğü görülmektedir. SEM görüntüleri ile karşılaştırıldığında ise GPADI-6 geopolimer örneğindeki boşluk miktarının fazlalığı GPADI-1 geopolimer örneğine göre net bir şekilde göze

arpmaktadır. Toplam boşluk hacmi değeriendirildiğinde GPADI-6 geopolimer örneğindeki boşluk hacmi miktarı GPADI-1 geopolimer örneğinin yaklaşık 2,6 katıdır. Birim hacim ağırlıkları değeriendirildiğinde ise GPADI-1 örneğinin birim hacim ağırlığı GPADI-6 geopolimer örneğinin yaklaşık 1,45 katıdır. Basınç dayanımları değeriendirildiğinde ise GPADI-1 geopolimer örneğinin basınç dayanımı GPADI-6 geopolimer örneğinin yaklaşık 2 katıdır. Isıl iletkenlik değerieleri karşılaştırıldığında ise GPADI-1 geopolimer örneğindeki ısı iletkenlik katsayısı GPADI-1 geopolimer örneğinin yaklaşık 4,5 katıdır. Bu sonuçlar boşluk miktarı arttıkça ısı iletkenlik katsayısı, basınç dayanımı, birim hacim ağırlık değeriinin düştüğünü göstermektedir.



4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu çalışmada öğütölmüş ham perlitin geopolimer harçlarda kullanılabilirliğini araştırmak amacı ile öncelikle standart kum agregalı geopolimer örneklerin, farklı NaOH çözelti molariteleri, farklı kür sıcaklıkları ve farklı kür sürelerinde dayanımları incelenmiştir. İkinci bölümde ise aktivatör olarak yine NaOH kullanılmış ayrıca agrega olarak ise genişletilmiş perlit kullanılarak hafif geopolimerik kompozit malzeme üretilmiştir. Birim hacim ağırlıkları basınç dayanımları ve ısı iletkenlik katsayıları belirlenen geopolimer örneklerin, mikro yapıları da incelenerek oluşan yapılar, boşluklar ve çatlaklar incelenmiştir. Son olarak da cıvalı porozimetre deneyi ile geopolimer örnekler içerisindeki boşluk hacimleri ve boşluk çapları belirlenmiştir. Ayrıca giriş kısmında verilen çalışma amaçları doğrultusunda üretilen geopolimer harçlar üzerinde elde edilen sonuçlar da literatür ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Standart kum agregalı geopolimer örnekler üzerinde yapılan incelemeler sonucunda;

- 90° C kür sıcaklığında 48 saat bekletilen ve çözelti molarite oranı 15,45 olan örneğin en yüksek basınç dayanımı 17,53 MPa iken 100° C kür sıcaklığında 24 saat bekletilen ve çözelti molarite oranı 15,45 olan örneğin en yüksek basınç dayanımını ise 19,72 MPa olmuştur.
- 24 saat sonunda 110°C kür sıcaklığında en yüksek dayanımı veren karışım; 15,45 çözelti molarite oranına sahip, geopolimer örnekte elde edilmiş olup bu değer 46,76 MPa'dır.
- 90 °C kür sıcaklığında 24 saat sonunda geopolimer örneklerin reaksiyonunu tamamlamadığı buna bağlı olarak da 48 saat sonunda basınç dayanımının arttığı görölmüştür.
- 110 °C kür sıcaklığında ise 24 saat sonunda geopolimer örneklerin basınç dayanımının 48 saat sonundaki basınç dayanımlarından yüksek olduğu ve 110°C de bekletilen geopolimer örneklerin 24 saatten sonra oluşan bağlara zarar verdiği ve basınç dayanımını düşürdüğü görölmüştür.
- 24 saat ile 48 saat kürde bekletilen numuneler karşılaştırıldığında molarite oranları yüksek olan geopolimer örneklerin dayanım artışının daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

- Agregas kullanmadan geopolimer hamuru şeklinde hazırlanan geopolimer örneklerde 90°C kür sıcaklığında geopolimer örnekler reaksiyonu tamamlayamadığı bu sebeple 24 saatten 48 saate kadar da dayanım artışının olduğu görülmüştür. 110°C kür sıcaklığında ise 24 saatten 48 saate kadar beklendiğinde dayanımda düşmeler meydana gelmiştir.
- Standart kum ağırlıklı örneklerde s/b oranı 0,3 ve 0,4 değerleri de kullanılmış olup yeterli işlenebilirlik olmadığı için dayanım açısından değerlendirme yapılmamıştır.

Genleştirilmiş perlit agregalı geopolimer örnekler üzerinde yapılan incelemeler sonucunda;

- Genleştirilmiş perlit agregalı geopolimer örneklerin basınç dayanımları incelendiğinde 80°C ve 90°C kür sıcaklığında 24 saat sonunda yeterli dayanımlar elde edilememiştir. 110°C kür sıcaklığında ise 13,91 çözelti molaritesine sahip örneğin basınç dayanımı 11,29 MPa olarak elde edilmiştir.
- GPAD-16 örneği ile GPAD-18 geopolimer örneklerinin çözelti molaritelerinin eşit olduğu fakat GPAD-18 örneğinin basınç dayanımının GPAD-16 örneğinden yaklaşık %10 daha az olduğu görülmektedir. Bu fark GPAD-18 örneğindeki genleştirilmiş perlit agregası miktarının %10 oranında artırılmasından kaynaklanmıştır. Bu durum, agregalar arasında oluşan geopolimerik bağların dayanımının agrega dayanımından yüksek olduğunu göstermektedir.
- Genleştirilmiş perlit agregalı geopolimer örnekler üzerinde yapılan çalışmada; GPAD-23, GPAD-24, GPAD-25 geopolimer örneklerinin basınç dayanımları sırası ile 2,88 MPa, 2,82 MPa, 2,63MPa ve 2,77 MPa'dır. Birim hacim ağırlıkları ise sırası ile 0,93 g/cm³, 0,88 g/cm³, 0,86 g/cm³ ve 0,85 g/cm³dir. Bu sonuçlara göre geopolimer örneklerin basınç dayanımı düşerken birim hacim ağırlıklarında da düşme meydana gelmiştir. GPAD-26 örneğinde ise birim hacim ağırlık düşmesine rağmen basınç dayanımında artış gözlenmiş olup bu artışın molarite oranındaki artıştan kaynaklandığı görülmektedir.
- Yapılan incelemeler sonucunda GPADI-1, GPADI-2, GPADI-3, GPADI-4, GPADI-5, GPADI-6, GPADI-7, GPADI-8, GPADI-9, GPADI-10, GPADI-11

geopolimer örneklerinin birim hacim ağırlıkları $0,91 \text{ g/cm}^3$ ile $0,63 \text{ g/cm}^3$ arasında ölçülmüş olup en yüksek birim hacim ağırlık değerini $0,91 \text{ g/cm}^3$ ile GPADI-1 örneği verirken, en düşük birim hacim ağırlık değerini ise $0,63 \text{ g/cm}^3$ ile GPADI-6 örneği vermiştir.

- Yapılan incelemeler sonucunda GPADI-1, GPADI-2, GPADI-3, GPADI-4, GPADI-5, GPADI-6, GPADI-7, GPADI-8, GPADI-9, GPADI-10, GPADI-11 geopolimer örneklerinin basınç dayanımları $3,27 \text{ MPa}$ ile $1,67 \text{ MPa}$ arasında ölçülmüş olup en yüksek dayanımı $3,27 \text{ MPa}$ ile GPADI-1 örneği verirken en düşük dayanımı ise $1,67 \text{ MPa}$ ile GPADI-6 örneği vermiştir.
- Yapılan incelemeler sonucunda GPADI-1, GPADI-2, GPADI-3, GPADI-4, GPADI-5, GPADI-6, GPADI-7, GPADI-8, GPADI-9, GPADI-10, GPADI-11 geopolimer örneklerinin ısı iletkenlik katsayıları $0,41 \text{ W/mK}$ ile $0,09 \text{ W/mK}$ arasında ölçülmüş olup en yüksek ısı iletkenlik değerini $0,41 \text{ W/mK}$ ile GPADI-1 örneği verirken en düşük dayanımı ise $0,09 \text{ W/mK}$ ile GPADI-6 örneği vermiştir.
- GPADI-1, GPADI-2, GPADI-3, GPADI-4, GPADI-5, GPADI-6, GPADI-7, GPADI-8, GPADI-9, GPADI-10, GPADI-11 geopolimer örnekleri üzerinde yapılan ölçümlerde, birim hacim ağırlık değerleri ile basınç dayanımları arasında yapılan inceleme sonucunda en düşük dayanımı veren geopolimer örnek en düşük birim hacim ağırlığa, en yüksek birim hacim ağırlığa sahip örneğin ise en yüksek basınç dayanımına sahiptir. Fakat GPADI-1 örneği ile GPADI-9 örneğinin basınç dayanımları neredeyse eşit olup bu durum, çözelti molaritesinin GPADI-9 örneğinde en yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.
- Geopolimer örnekler üzerinde yapılan incelemeler sonucunda molarite oranlarının artması ile basınç dayanımlarının arttığı fakat birim hacim ağırlıklarının azalması ile basınç dayanımlarının düştüğü görülmüştür. Molarite oranları eşit olan GPADI-3, GPADI-4, GPADI-5 geopolimer örnekleri incelendiğinde birim hacim ağırlık değerlerinin düşmesi ile basınç dayanımlarının düştüğü görülmektedir. Birim hacim ağırlıkları yaklaşık olarak eşit olan GPADI-2 ve GPADI-8 geopolimer örnekleri incelendiğinde ise molarite oranı yüksek olan örneğin de basınç dayanımının yüksek olduğu açıkça görülmektedir.

- Basınç dayanımı miktarı arttıkça boşluk miktarının azaldığı elektron tarayıcı mikroskop (SEM) görüntülerinden anlaşılabilmektedir.
- Genleştirilmiş perlit agregalarının yüzeyini kaplayan perlit tozu bulunan kabuk şeklinde reaksiyon ürünleri ve agregalar arası geopolimerik jellerin oluşumu görülmektedir.
- SEM görüntülerinde çatlak oluşumlarına rastlandığı, agrega jel ara yüzey arasında da ayrışmaların bulunduğu görülmüştür. Oluşan çatlaklar; aktivasyon işlemi sırasında yüksek sıcaklıkta kürlenme veya SEM gözlemi için numune hazırlama sırasında mekanik hasar ile bağlantılı olabileceği tahmin edilmektedir.
- GPADI-6 örneğinin SEM görüntüsü incelendiğinde mikro yapıdaki boşlukların bir hayli fazla olduğu göze çarpmaktadır. Bu boşlukların fazlalığı; basınç dayanımının, birim hacim ağırlığının ve ısı iletkenlik katsayısının düşük olması ile açıklanabilir ve yapılan deneysel çalışmaları destekler niteliktedir.
- SEM görüntüleri incelendiğinde GPADI-1 örneğinin daha kompakt bir yapıya sahip olduğu anlaşılmaktadır.
- Perlit partiküllerinin birbirine tepkime ürünleri bağlandığı, ayrıca perlit parçacıkları arasında gözlenen boşluklar, boşluğu doldurmak için yeterli jel oluşturulmadığını ve mikro yapının kırılma görünmesine neden olduğu görülmektedir.
- EDX analizleri sonucu, molarite oranları aynı olan geopolimer örneklerde Na_2O ve SiO_2 miktarlarının birbirine yakın olmasına rağmen basınç dayanımında farklılıklar görülmüştür. Bu sonuç, agrega miktarının basınç dayanımı ve ısı iletkenlik üzerindeki etkisinin en az oksit miktarları kadar önemli olduğunu ortaya koymuştur.
- Geopolimer örneklerin oksit miktarlarının incelenmesi sonucunda daha küçük büyütme oranlarında Na_2O miktarının daha az, daha büyük büyütme oranlarında ise Na_2O miktarının fazlalığı göze çarpmaktadır. Bunun sebebi reaksiyona girmemiş olan NaOH 'ların varlığından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Cıvalı porozimetre deneyi sonucunda en az toplam boşluk hacmi 0,3289 ml/g ile GPADI-1 örneğinde iken en fazla toplam boşluk hacmi ise 0,86511 ml/g ile GPADI-6 örneğinde olmuştur.

- Geopolimer örnekler arasında en küçük ve en büyük boşluk çapı değerleri karşılaştırıldığında ise değerlerin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Bu durumun ilk olarak cıva girişi için numunelere uygulanan basınçların eşit olması ile bağlantılı olabileceği düşünülmektedir. İkincisi ise agregalar arası boşluklar, ara yüzey boşlukları ve agreganın iç yapısındaki boşlukların da boşluk çapı açısından birbirine çok yakın olduğunu göstermektedir.
- Karşılaştırma en fazla toplam boşluk hacmine sahip GPADI-6 örneği ve en az toplam boşluk hacmine sahip GPADI-1 örneği arasında verilmiştir. Sonuçlar, toplam boşluk hacmi arttıkça birim hacim ağırlık, basınç dayanımı ve ısı iletkenlik katsayısının düştüğünü göstermektedir. SEM görüntüleri ile karşılaştırıldığında ise GPADI-6 örneğindeki boşluk miktarının fazlalığı GPADI-1 örneğine göre net bir şekilde göze çarpmaktadır.

Gerçekleştirdiğimiz çalışmanın amaçları arasında; geopolimerler vasıtası ile çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonunu, enerji tüketimini ve buna bağlı olarak çimento üretimi esnasında çevreye verilen olumsuz etkiyi en aza indirmek olduğu belirtilmiştir. Carreño-Gallardo C. v.d. tarafından yapılan çalışmada ise geopolimerin klinkerden %54 daha az CO₂ ürettiği ve dayanımlarının da yeterli olması ile birlikte geopolimerlerin sıradan çimentoların yerine uygun alternatifler olabileceği belirtilmiştir [42]. Ayrıca Daniel A. v.d. tarafından yapılan çalışmada da benzer bir söylem gerçekleştirilmiş olup sodyum hidroksit ile elde edilen geopolimer betonların küresel ısınma potansiyeli karakterizasyonunun geleneksel betonlara göre % 64 daha düşük olduğu belirtilmiştir [50]. Dolayısı ile çevreye verilen zararlı etkileri en aza indirmek bakımından her iki çalışma da yaptığımız çalışmanın amacını destekler niteliktedir.

Yaptığımız çalışmada; 80°C, 90°C, 100°C ve 110°C kür sıcaklığında bekletilen geopolimer örneklerin basınç dayanımları incelendiğinde 110° C kür sıcaklığının en yüksek değerleri verdiği görülmüştür. Ayrıca NaOH çözelti molaritesinin artırılması ile de basınç dayanımlarının arttığı belirlenmiştir. Hafez E. v.d. tarafından yapılan çalışmada ise kür sıcaklığı ve sodyum hidroksit solisyonu molaritesinin artırılması çeşitli bağlayıcılarla birlikte geopolimer harçların mekanik özelliklerini iyileştirdiği belirtilmiş ve yaptığımız çalışma ile benzer sonuçlar elde edilmiştir [38]. Bununla

birlikte Kaur K. v.d. tarafından yapılan çalışmada ise basınç dayanımının alkali aktivatör çözeltisinin molaritesi ile doğru orantılı olduğu gözlenmiştir. Molaritenin arttırılmasıyla mikro yapının oldukça yoğun hâle gelmesinin, yüksek derecede geopolimerizasyona bağlı olduğu belirtilmiş olup [43] hem çözelti molaritesinin arttırılmasının basınç dayanımı ile doğru orantılı olduğu hem de mikro yapı analizlerinde belirtilen çözelti molaritesi arttıkça boşluklu yapının azaldığı ve genişleştirilmiş perlit agregaları arası geopolimerik jellerin oluşumu görüldüğü sonucunu da desteklemektedir.

Çalışmamızda kullanılan kür sıcaklıkları 80°C ile 110°C aralığında olmuştur. Palacios M. v.d. tarafından yapılan çalışmada alkaliler ile aktive edilmiş uçucu küller üzerine yapılan çalışmada 65 °C'nin üzerindeki kür sıcaklıklarında olumlu sonuçlar elde edildiği belirtilmiş olup [45] çalışmamızla benzer özellik göstermiştir. Ayrıca yaptığımız çalışmanın sonucunda geopolimerin dayanımı, birim hacim ağırlığı, ısıl iletkenliği, boşluklu yapısı ve mikro yapısı açısından karışım oranlarının, çözelti molaritesinin kür sıcaklıklarının önemi vurgulanmıştır. Benzer şekilde Yun-Ming L. v.d. tarafından yapılan çalışmada da geopolimerin optimum performansını belirleyen ana parametrelerin alkali konsantrasyonu, karışım oranları ve kür şekilleri olduğunu belirtmişlerdir [23].

Gerçekleştirdiğimiz çalışmada standart kum agregalı geopolimer harçlarda basınç dayanımı olarak 5 MPa ile 47 MPa arasında basınç dayanımı sonuçları elde edilmiş olup geopolimer harçlarda bağlayıcı olarak öğütülmüş ham perlit tozunun kullanılabilirliği sonucuna varılmıştır. Bu sonuç ile birlikte literatürde de perlit tozunun puzolanik malzeme olarak kullanılabileceği belirtilmiştir. Bu bağlamda Erdem T. v.d. tarafından yapılan çalışmada öğütülüp çimentoya ikame edilen toz perlitin, çimento ve beton endüstrisinde kullanılacak yeterli puzolanik özelliklere sahip olduğu portland çimentosu tüketimini azaltmaya yardımcı olacağı için faydalı olacağı belirtilmiştir [75]. Yu L.-H. v.d. tarafından yapılan çalışmada öğütülmüş perlit çimento yerine % 0 dan % 40 oranına kadar ikame edilmiştir. Perlit tozu katkılı betonların ilk gün dayanımları katkısız betonlara oranla daha düşük elde edilmiş, ileriki yaşlardaki dayanımlarına bakıldığında ise genel olarak basınç dayanımlarının katkısız betonlara göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir [12].

Birim hacim ağırlıklar ve ısı iletkenlik katsayılarında en düşük, basınç dayanımında ise en yüksek değerleri elde etmeyi hedeflediğimiz bölümde hazırladığımız geopolimer örnekler üzerinde yapılan incelemeler sonucunda en düşük birim hacim ağırlık değeri 0,63 g/cm³ olurken aynı örneğin 50x50x50 mm boyutlardaki basınç dayanımı ise 1,67 MPa değerini almıştır. Diğer yandan en yüksek basınç dayanımını ise 3,27 MPa olurken bu değere karşılık gelen birim hacim ağırlığı ise 0,91 g/cm³ değerindedir. En düşük birim hacim ağırlığa denk gelen ısı iletkenlik değeri ise 0,09 W/mK iken en yüksek basınç dayanımına denk gelen ısı iletkenlik katsayısı ise 0,41 W/mK olmuştur. Papa A. v.d. tarafından yapılan çalışmada, aktivatör olarak potasyum hidroksitin ve bağlayıcı olarak da genişletilmiş toz perlitin kullanıldığı çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiş olup 30x30x30 mm boyutlardaki geopolimer örnekler 1,6 MPa basınç dayanımına, 0,467 g/cm³ birim hacim ağırlığa ve 0,087 m⁻¹ K⁻¹ termal iletkenliğe sahip numuneler elde edilmiştir [47]. Ayrıca Wongs A. v.d. tarafından yapılan çalışmada, dere agregası yerine % 100 lastik atığı içeren yüksek kalsiyum uçucu kül esaslı geopolimer harçlar elde edilmiş ve bu harçların mekanik ve termik özellikleri incelenmiştir. Sonuç olarak 1067-1275 kg / m³ lük bir yoğunluk, 2,07-3,29 MPa'lık basınç dayanımı, 0,237-0,298 W / mK'lık ısı iletkenlik elde edilmiş [56] ve yaptığımız çalışmanın daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Başka bir çalışmada ise Wang L. Ve arkadaşları, %100 genişletilmiş perlit agregası içeriğine sahip aerjel malzemesi ile doldurulmuş betonlarda 0,098 W/(mK) iletkenlik ve 3,71 MPa'lık basınç dayanımına ulaşılmışlar [77] ve bu çalışma da yaptığımız çalışma ile benzer sonuçlar vermiştir.

Genleştirilmiş perlit agregası ile hafif geopolimer harçlar üzerinde yaptığımız dayanım çalışmaları sonucunda 15 MPa civarında basınç dayanım değeri elde edilmiş olup bu sonuç, Wongs A. v.d. tarafından yapılan bir diğer çalışmada ezilmiş kil tuğlası agregalı ve pomza agregalı hafif betonlar üretilmiş ve elde edilen sonuçların yaptığımız çalışmanın sonuçları ile benzer olduğu, bulunan sonuçların 2,7 MPa ile 18,3 MPa aralığında olduğu görülmüştür [55].

Geopolimer harç üretimi esnasında problem yaşanan konulardan biri de perlit içeriği arttıkça işlenebilirlik kaybı olmuş yani, kompozit malzemenin su emme miktarı artmıştır. Dolayısı ile geopolimer örnekler hazırlanırken su miktarı arttırılmış, bu

durum karşısında da dayanım kayıpları yaşanmıştır. Bu durumun üstesinden gelebilmek için de çözelti molaritesi arttırılmıştır. Benzer bir sonuç da Sengul O. v.d. tarafından yapılan çalışma sonucunda verilmiş olup basınç dayanımının ve elastisite modülünün perlit içeriğinin artmasıyla azaldığını, su emme miktarının ise perlit içeriği arttıkça arttığı vurgusu yapılmıştır. Aynı çalışmada bizim çalışmamızla başka bir benzer sonuç ise termal iletkenliğin, perlit kullanımı arttıkça azaldığı ve termal iletkenlik ile birim hacim ağırlığı arasında güçlü bir ilişkinin olduğudur [72].

Sonuç olarak geopolimer harçların üretimi ile hedeflenen konuların gerçekleşme durumu aşağıdaki gibi olmuştur.

- Üretilen kompozit malzeme açısından incelendiğinde literatür ile uyumlu, birim hacim ağırlığı, ısı iletkenlik katsayısı ve basınç dayanımı açısından kullanılabilir üretimi hızlı yeni bir malzeme ortaya konmuştur.
- Ham madde açısından değerlendirildiğinde ekonomiye kazandırılması açısından fayda sağlayacağı açık olan perlitin, ülkemizde ham madde rezervi yeterli miktarda bulunmaktadır. Bu özelliği göz önünde bulundurulduğunda yaptığımız çalışma ile perlitin kullanımının arttırılması açısından olumlu sonuçlara ulaşılmıştır.
- Malzeme özellikleri açısından incelendiğinde geopolimer örnekler üzerinden alınan sonuçlar doğrultusunda öğütülmüş ham perlitin geopolimer harçlarda bağlayıcı olarak kullanılabileceği, ayrıca genleştirilmiş perlitin ise hafif ve gözenekli yapısı ile ısı yalıtım uygulamalarında kullanılması açısından uygun bir malzeme olduğu sonucuna varılmıştır. Bu doğrultuda, ülkemizin deprem ülkesi olduğu ve birçok bölgesinde de yoğun kış ikliminin hüküm sürdüğü dikkate alındığında hafiflik, dayanım ve ısı yalıtımı açısından önemli üstünlükleri olan perlitin kullanımının üzerinde durulması gereken önemli konular arsında olduğu sonucuna varılmıştır.
- Aktivatör olarak kullanılan NaOH'un perlit tozunun aktivasyonunda kullanılabileceği alınan basınç dayanımı sonuçları ile ortaya konmuştur.
- CO₂ emisyonunu ve enerji tüketimi açısından incelendiğinde geopolimer kompozit malzeme üretimi ile çimento kullanımı sıfıra indirilmiş, çimento üretimi esnasında çevreye verilen olumsuz etki en aza indirilmiştir.

Önümüzdeki zamanlarda yapılacak olan çalışmalarda farklı tür atık malzemeler veya puzolanik özellik gösteren malzemeler kullanılabilir. Ayrıca genişletilmiş toz perlitin ve genişletilmiş perlitin boyutsal olarak optimizasyonu yapılarak geopolimer örnekler üzerinde yapılacak olan testler geliştirilebilir. Ayrıca farklı kür sıcaklıkları ile birlikte farklı kür sürelerinde de aynı çalışmalar gerçekleştirilebilir. Yine aynı ham maddeler ile dayanıklılık açısından çalışmalar yapılabilceğı ayrıca malzemenin ısı yalıtımına ek olarak ses yalıtımı ve yangına karşı dayanıklılıkların da incelenebileceğı düşünölmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] Zhang, Z., Provis, J.L., Reid, A., Wang, H., Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction. *Construction and Building Materials*, 56, 113-127, 2014.
- [2] Akbarnezhad, A., Huan, M., Mesgari, S., Castel, A., Recycling of geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 101, 152–158, 2015.
- [3] Albitar, M., Mohamed Ali, M.S., Visintin, P., Experimental Study On Fly Ash And Lead Smelter Slag-Based Geopolymer Concrete Columns. *Construction and Building Materials*, 141 104–112, 2017.
- [4] Bhardwaj, B., Kumar, P., Comparative study of geopolymer and alkali activated slag concrete comprising waste foundry sand. *Construction and Building Materials*. 209, 555–565, 2019.
- [5] Komnitsas K., Potential of geopolymer technology towards green buildings and sustainable cities. *Procedia Engineering*, 21, 1023-1032, 2011.
- [6] Duxon, P., Van Deventer, J.S.J., Provis, J.L., Commercialisation of geopolymer concrete in Australia: From market push to market pull. *Global Roadmap for Ceramics ICC2 Proceedings*, 713-721, Ed: Bellosi A., Babini G.N., Institute of Science and Technology for Ceramics, National Research Council. Verona, Italy, 2008.
- [7] Van Deventer, J.S.J., Provis, J.L., Duxon, P., Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement. *Minerals Engineering*, 29, 89-104, 2012.
- [8] Yang, K., Seo, E., Tae, S., Carbonation and CO₂ uptake of concrete. *Environmental Impact Assessment Review*, 46, 43-52, 2014.
- [9] Arıöz, E., Geopolimer Elde Edilmesi ve Katyon, pH ve Isıl İşlemin Geopolimer Üzerine Etkisi. *Doktora Tezi*, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, 2015.

- [10] Onuncu Kalkınma Planı, Madencilik Politikaları Özel İhtisas Komisyonu Raporu, 2014-2018.
- [11] Öncül, M. K., Türkiye Perlit Endüstrisi. 26. Milletlerarası Yıllık Perlit Kongresi. Mayıs 1975, Atina, s. 35-43, 1975.
- [12] Yu, L.H., Ou, H., Lee, L.L., Investigation on pozzolanic effect of perlite powder in concrete. Cement And Concrete Research, 33; 73-76, 2003.
- [13] Bektaş, F., Turanlı, L., Monteiro, P.J.M., Use of perlite powder to suppress the alkali-silica reaction. Cement and Concrete Research, 35, 2014– 2017, 2005.
- [14] Dokuzuncu Kalkınma Planı, Madencilik Politikaları Özel İhtisas Komisyonu Raporu, 2007-2013.
- [15] Anonim, Perlit, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
<http://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/perlit>, (Erişim Tarihi: 17.10.2019)
- [16] Hassan, A., Arif, M., Shariq, M., Use of geopolymer concrete for a cleaner and sustainable environment - A review of mechanical properties and microstructure. Journal of Cleaner Production, 223, 704-728, 2019.
- [17] Duxon, P., Provis, J.L., Lukey, G.C., Van Deventer, J.S.J., The role of inorganic polymer technology in the development of green concrete. Cement and Concrete Research. 37, 1590-1597, 2007a.
- [18] Duxon P., Fernandez-Jimenez A., Provis J.L., Lukey G.C., Palomo A., van Deventer J.S.J., Geopolymer technology: The current state of the art, Journal of Materials Science, 42, 2917-293, 2007b.
- [19] Ranjbar N., Mehrli M., Alengaram U.J., Metselaar H.S.C., Jumaat M.Z., Compressive strength and microstructural analysis of fly ash/palm oil fuel ash based geopolymer mortar under elevated temperatures, Construction and Building Materials, 65, 114-121, 2014.

- [20] Wu Y., Lu B., Bai T., Wang H, Feipeng Du F., Zhang Y., Cai L., Jiang C., Wang W., Geopolymer, green alkali activated cementitious material: Synthesis, applications and challenges. *Construction and Building Materials*, 224, 930–949, 2019.
- [21] Lyu S., Hsiao Y., Wang T., Cheng T., Ueng T., Microstructure of geopolymer accounting for associated mechanical characteristics under various stress states. *Cement and Concrete Research*, 54, 199-207, 2013.
- [22] Khale D., Chaudhary R., Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: A Review. *Journal of Materials Science*, 42, 729-746, 2007.
- [23] Liew Y. M., Heah C.Y., Mohd Mustafa A.B., Kamarudin H., Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review. *Progress in Materials Science*, 83, 595–629, 2016.
- [24] Ma, C. K., Awang, A. Z., Omar, W., Structural and material performance of geopolymer concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 186, 90–102, 2018.
- [25] 8. Beş Yıllık Kalkınma Planı, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, 2001.
- [26] Ray A., Sriravindrarajah R., Gverbois J.B, Thomas P.S, Border S., Ray H.N, Haggman J., Joyce P., Evaluation of Waste Perlite Fines in The Production of Construction Material. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 88(1): 279-283, 2007.
- [27] Vessalas K., Ray A.S., Thomas P.S, Ravindrarajah S.R., Joyce P., Haggman J., Pitchstone Fines Pozzolanic Activity Assessment As Partial Portland Cement Replacements. *J. Aust. Ceram. Soc.*, 44(1): 7-12, 2008.

- [28] Demirboğa, R., Gül, R., The effects of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete. *Cement And Concrete Research*, 33, (5): 723-727, 2003.
- [29] Bynum, R.T. *Insulation Handbook*, McGraw Hill, 2001.
- [30] Faye, M., Lartigue, B., Kane, S., Influence Of Structural And Thermophysical Parameters Of Insulating aggregates On The Effective Thermal Conductivity Of Lightweight Concrete. *Journal Of Building Engineering*, 21, 74-81, 2019.
- [31] Chung, S.Y., Han, T.S., Kim, S.Y., Kim, J.H.J., Youm, K.S., Lim, J.H., Evaluation of effect of glass beads on thermal conductivity of insulating concrete using micro CT images and probability functions. *Cem. Concr. Compos*, 65, 150-162, 2016.
- [32] Kim, K.H., Jeon, S.E., Kim, J.K., Yang, S., An experimental study on thermal conductivity of concrete, *Cement Concrete Research*. 33 (3): 363-371, 2003.
- [33] Asadi, I., Shafigh, P., Hassan, Z. F. B. A., Mahyuddin, N. B., Thermal conductivity of concrete – A review. *Journal of Building Engineering*. 20, (11): 81-93, 2018.
- [34] Bergamonti, L., Taurino, R., Cattani, L., Ferretti, D., Bondioli, F., Light weight hybrid organic-inorganic geopolymers obtained using polyurethane waste. *Construction and Building Materials*, 185, 285–292, 2018.
- [35] Colangelo, F., Roviello, G., Ricciotti, L., Ferrándiz-Mas, V., Messina, F., Ferone, C., Tarallo, O., Cioffi, R., Cheeseman, C.R. Mechanical and thermal properties of lightweight geopolymer composites. *Cement Concrete Composites*. 86, (2): 266-272, 2018.
- [36] Albitar, M., Mohamed Ali, M.S., Visintin, P., Drechsler, M., Durability evaluation of geopolymer and conventional concretes. *Construction and Building Materials*, 136, 374–385, 2017.

- [37] Elyamany, H. E., Elmoaty M. A., Elshaboury, A. M., Magnesium sulfate resistance of geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, 184, 111–127, 2018.
- [38] Elyamany, H. E., Elmoaty M. A., Elshaboury, A. M., Setting time and 7-day strength of geopolymer mortar with various binders. *Construction and Building Materials*, 187, 974–983, 2018.
- [39] Firdous, R., Stephan, D., Djobo, J. N. Y., Natural pozzolan based geopolymers: A review on mechanical, microstructural and durability characteristics. *Construction and Building Materials*, 190(11): 1251–1263, 2018.
- [40] Hu, W., Nie, Q., Huang, B., Shu, X., He, Q., Mechanical and Microstructural Characterization of Geopolymers Derived from Red Mud and Fly Ashes. *Journal of Cleaner Production*, 186,10,(6): 799-806, 2018.
- [41] Ibrahim, M., Johari, M. A. M. Rahman, M., K., Maslehuddin, M., Effect of alkaline activators and binder content on the properties of natural pozzolan-based alkali activated concrete. *Construction and Building Materials*, 147,648–660, 2017.
- [42] Carreño-Gallardo, C., Tejeda-Ochoa, A., Perez-Ordóñez, O.I., Ledezma-Sillas, J.E., Lardizabal-Gutierrez, D., Prieto-Gomez, C., Valenzuela-Grado, J.A., Robles Hernandez, F.C., Herrera-Ramirez J.M., In the CO₂ Emission Remediation by Means of Alternative Geopolymers as Substitutes for Cements. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6, 4878–4884, 2018.
- [43] Kaur, K., Singh, J., Kaur, M., Compressive Strength of Rice husk Ash Based Geopolymer: The effect of alkaline activator. *Construction and Building Materials*, 169, 188–192, 2018.
- [44] Li, X., Rao, F., Song, S., Corona-Arroyo, M.A., Ortiz-Lara, N., Aguilar-Reyes, E.A., Effects of aggregates on the mechanical properties and microstructure of

geothermal metakaolin-based geopolymers. *Results in Physics*, 11,12, 267-273, 2018.

- [45] Palacios, M., Alonso, M.M., Varga, C., Puertas, F., Influence of the alkaline solution and temperature on the rheology and reactivity of alkali-activated fly ash pastes. *Cement and Concrete Composites*, 95, 1, 277-284, 2019.
- [46] Punurai, W., Kroehong, W., Saptamongkol,A., Chindaprasirt, P., Mechanical properties, microstructure and drying shrinkage of hybrid fly ash-basalt fiber geopolymer paste. *Construction and Building Materials*, 186, 62–70, 2018.
- [47] Papa, E., Medri, V., Murri, A. N., Laghi, L., Aloysio, G.D., Bandini, S., Landi, E., Characterization of alkali bonded expanded perlite. *Construction and Building Materials*, 191, 1139–1147, 2018.
- [48] Srinivasula Reddy, M., Dinakar, P., Hanumantha Rao, B., Mix design development of fly ash and ground granulated blast furnace slag based geopolymer concrete. *Journal of Building Engineering.*, 20,712–722, 2018.
- [49] Rocha, T.S., Dias, D.P., França, F.C.C., Guerra, R.R.S., Marques, L.R.C.O., Metakaolin-based geopolymer mortars with different alkaline activators (Na^+ and K^+). *Construction and Building Materials*, 178, 453–461,2018.
- [50] Salas, D.A., Ramirez, A.D., Ulloa, N., Baykara, H., Boero, A.J., Life cycle assessment of geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 190, 170–177, 2018.
- [51] Sun, Z., Lin, X., Vollpracht, A., Pervious concrete made of alkali activated slag and geopolymers. *Construction and Building Materials*, 189, 797–803,2018.
- [52] Zhang, P., Zheng, Y., Wang, K., Zhang, J., A review on properties of fresh and hardened geopolymer mortar, *Composites Part B.*, 152 (1): 11,79-95, 2018.

- [53] You, S., Ho, S.W., Li, T., Maneerung, T., Wang, C. H., Techno-economic analysis of geopolymer production from the coal fly ash with high iron oxide and calcium oxide contents. *Journal of Hazardous Materials*, 361 (5) 1,237-244, 2019.
- [54] Madhav, T.V., Reddy, I.V.R., Ghorpade, V. G., Jyothirmai, S., Compressive strength study of geopolymer mortar using quarry rock dust. *Materials Letters*, 213, 105-108, 2018.
- [55] Wongsas, A., Sata, V., Nuaklong, P., Chindaprasirt, P., Use of crushed clay brick and pumice aggregates in lightweight geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 188,1025–1034,2018.
- [56] Wongsas, A., Sata, V., Nematollahi, B., Sanjayan, J., Chindaprasirt, P., Mechanical and thermal properties of lightweight geopolymer mortar incorporating crumb rubber. *Journal of Cleaner Production*, 195 (10): 9,1069-1080, 2018.
- [57] Bakharev, T., Sanjayan, J.G., Cheng, Y.B., Alkali activation of Australian slag cements, *Cement and Concrete Research*. 29, 113–120,1999.
- [58] Chi, M., Huang, R.Binding mechanism and properties of alkaliactivated fly ash/slag mortars, *Construction and Building Materials*. 40, 291–298,2013.
- [59] Puertas, F., Martinnez-Ramirez, S., Alonso, S., Vazquez, T., Alkali-activated fly ash/slag cements strength behaviour and hydration products. *Cement and Concrete Research*, 30, 1625-1632, 2000.
- [60] Characterisation of fly ashes Potential reactivity as alkaline cements, Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A., *Fuel*, 82, (18): 2259–2265, 2003.
- [61] Ng, C., Alengaram, U.J., Wong, L.S., Mo, K.H., Jumaat, M.Z., Ramesh, S., A review on microstructural study and compressive strength of geopolymer mortar, paste and concrete. *Construction and Building Materials*, 186, 550–576, 2018.

- [62] Kwasny, J., Soutsos, M.N., McIntosh, J.A., Cleland, D.J., Comparison of the effect of mix proportion parameters on behaviour of geopolymer and Portland cement mortars. *Construction and Building Materials*, 187, 635–651, 2018.
- [63] Koushkbaghi, M., Alipour, P., Tahmouresi, B., Mohseni, E., Saradar, A., Sarker, P.K., Influence of different monomer ratios and recycled concrete aggregate on mechanical properties and durability of geopolymer concretes. *Construction and Building Materials*, 205, 519–528, 2019.
- [64] Long, W.J., Tan, X.W., Xiao, B.X., Han, N.X., Xing, F., Effective use of ground waste expanded perlite as green supplementary cementitious material in eco-friendly alkali activated slag composites. *Journal of Cleaner Production*. 213, 406–414, 2019.
- [65] Top, S., Vapur, H., Altın, M., Kaya, D., Ekicibil, A., Properties of fly ash-based lightweight geopolymer concrete prepared using pumice and expanded perlite as aggregates, *Journal of Molecular Structure*, 1202 (15): 2, 2020.
- [66] Gandage, A.S., Rao, V. R. V., Sivakumar, M. V. N., Vasan, A., Venu, M., Yaswanth, A. B., Effect of Perlite on Thermal Conductivity of Self Compacting Concrete. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 104, 188 – 197, 2013.
- [67] Wongkeo, W., Seekaew, S., Kaewrahan, O., Properties of high calcium fly ash geopolymer lightweight concrete. *Materials Today: Proceedings*, 17, 1423–1430, 2019.
- [68] Zannerni, G.M., Fattah, K.P., Al-Tamimi, A. K., Ambient-cured geopolymer concrete with single alkali activator. *Sustainable Materials and Technologies*, S2214-9937 (19) 30098-3
- [69] Shekhovtsova, J., Kearsley, E. P. M., Kovtun, Effect of activator dosage, water-to-binder-solids ratio, temperature and duration of elevated temperature curing on the compressive strength of alkali-activated fly ash cement pastes. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 56, (3): 10, 44–52, 2014.

- [70] Ryu, G.S., Lee, Y.B., Koh, K.T., Chung, Y.S., The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. *Construction and Building Materials*, 47, 409–418, 2013.
- [71] Aliabdo, A.A., Elmoaty, M.A., Salem, H.A., Effect Of Cement Addition, Solution Resting Time And Curing Characteristics On Fly Ash Based Geopolymer Concrete Performance. *Construction and Building Materials*, 123, 581–593, 2016.
- [72] Şengül, O., Azizi, S., Karaosmanoglu, F., Tasdemir, M.A., Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete. *Energy and Buildings*, 43, 671–676, 2011.
- [73] 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.
- [74] Demir, I., Başpınar, M. S., Effect of silica fume and expanded perlite addition on the technical properties of the fly ash–lime–gypsum mixture. *Construction and Building Materials*, 22, 1299–1304, 2008.
- [75] Erdem, T.K., Mera, Ç., Tokyay, M., Erdoğan, T.Y., Use of perlite as a pozzolanic addition in producing blended cements. *Cement & Concrete Composites*, 29, 13–21, 2007.
- [76] 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.
- [77] Wang, L., Liu, P., Jing, Q., Liu, Y., Wang, W., Zhang, Y., Li, Z., Strength properties and thermal conductivity of concrete with the addition of expanded perlite filled with aerogel. *Construction and Building Materials*, 188, 747–757, 2018.

- [78] EN, T. 196-1, Methods of testing cement–Part 1: Determination of strength. Turkish Standard Institution, Ankara, 2016.
- [79] ASTM C109 / C109M-16a, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [80] Anonim, Afyon Kocatepe Üniversitesi, <https://tuam.aku.edu.tr/termal-analiz/> (Erişim tarihi: 04.11.2019).
- [81] ASTM D 7984, Standard Test Method for Measurement of Thermal Effusivity of Fabrics Using a Modified Transient Plane Source (MTPS) Instrument.
- [82] Anonim, Afyon Kocatepe Üniversitesi, <https://tuam.aku.edu.tr/porozimetre-olcumu-analizi/> (Erişim tarihi: 04.11.2019).
- [83] Anonim, Afyon Kocatepe Üniversitesi, <https://tuam.aku.edu.tr/mikroyapi-analizi/> (Erişim tarihi: 04.11.2019).
- [84] TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları, (Thermal insulation requirements for buildings), Mayıs 2008.
- [85] Li, L.Y., Abdullah, M. M.A. B., Bui, Q. B., Mechanical properties and microstructure analysis of FA-GGBS-HMNS based geopolymer concrete. Construction and Building Materials, 210, 20(6): 198-209, 2019.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Selahattin GÜZELKÜÇÜK

Doğum Tarihi : 31.03.1983

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu :

Lisans : Erciyes Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği 2006

Yüksek Lisans : Kırıkkale Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği 2014

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl/Yıllar:

Kastamonu Üniversitesi İnşaat Mühendisi 2009-2011

Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Öğretim Görevlisi 2011-Hâlen

Yayınları :

Güzelküçük, S., Demir, İ., Perlit Esaslı Geopolimer Kompozitlere Kür Süresi ve Sıcaklığın Etkisi, Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, Article ID: 558983, (2019).

Demir, İ., Güzelküçük, S., Sevim, Ö., A Study on the Effects of Sulfate on Cement Mortar with Hybrid Pozzolan Substitution, Elsevier Science- Engineering Science and Technology, (2018).

Demir, İ., Güzelküçük, S., Sevim, Ö., Filazi, A., Sengül, C.G., Examination of Microstructure of Fly Ash in Cement Mortar, International Journal of Advances in Mechanical and Civil Engineering, 5(1), 49-51. 2018.

Demir, I., Güzelküçük, S., Sevim, Ö., Filazi, A., Şengül, Ç.G., Micro-structural Examination of The Effect of Sulfate on Cement Mortars with Blast Furnace Slag Substitution. International Scientific and Vocational Studies Journal, 2(1), 8-18.

Bildiriler:

Güzelküçük S., Demir, İ. Filazi, A., Sevim, Ö. “Kompoze Taban Külü ve Yüksek Fırın Cürufu İkameli Çimento Harçlarının Sülfata Karşı Dayanım ve Dayanıklılığının İncelenmesi”, İSTE-CE’2019, Hatay, Türkiye.

Güzelküçük, S., Demir, İ. Filazi, A., Sevim, Ö. “Kompoze Taban Külü ve Uçucu Kül İkameli Çimento Harçlarının Sülfata Karşı Dayanım ve Dayanıklılığının İncelenmesi”, İSTE-CE’2019, Hatay, Türkiye.

Demir, İ., Sivrikaya B., Sevim, Ö., Filazi, A., Güzelküçük S., "Effect of Fly Ash Having Optimized Particle Size Distribution on Alkali Silica Reaction According to Accelerated Mortar Bar Test Method" 10. Uluslararası Beton Kongresi- 02 - 04 May 2019, Bursa, Turkey.

Filazi, A., Demir, I., Güzelküçük, S., "Mechanical Effect of Fly Ash Substitution on Different Cement Types" 4. International Conference on Civil, Environmental, Geology and Mining Engineering- 20-22 April 2019, Trabzon, Turkey. (ICOCEM 2019).

Filazi, A., Demir, I., Güzelküçük, S., "Mechanical Effect of Blast Furnace Slag Substitution on Different Cement Types", 4. International Conference on Civil, Environmental, Geology and Mining Engineering- 20-22 April 2019, Trabzon, Turkey. (ICOCEM 2019).

Demir, İ., Filazi, A., Sevim, Ö., Güzelküçük S., “F Sınıfı Uçucu Kül İkameli Çimento Harcının Mekanik Özelliklerine Etkisi” “Uluslararası Ege Disiplinler Arası İnovatif Bilimsel Araştırmalar Sempozyumu, 26-27 Mart 2019, İzmir, Türkiye.

Demir, İ., Filazi, A., Sevim, Ö., Güzelküçük S., “C Sınıfı Uçucu Kül İkameli Çimento Harcının Mekanik Özelliklerine Etkisi” “Uluslararası Ege Disiplinler Arası İnovatif Bilimsel Araştırmalar Sempozyumu, 26-27 Mart 2019, İzmir, Türkiye.

Demir, İ., Güzelküçük, S., Sevim, Ö., Filazi, A., Sengül, C.G., Examination of Microstructure of Fly Ash in Cement Mortar. International Conference on Engineering and Natural Science (ICENS), 11 – 12 December 2017, Lisbon, Portugal.

Demir, İ., Filazi A., Sevim Ö., Kalkan İ, Güzelküçük S., Kartal, S. “The Effect of Mechanical Strength of Blast Furnace Slag Fineness”, 2nd International Conference on Civil and Environmental Engineering, 8 – 10 May 2017, Cappadocia, Nevşehir, Turkey.

Demir, İ., Sevim Ö., Kalkan İ, Filazi A, Güzelküçük S, Kartal S. “The Effect of Mechanical Strength of Fly Ash Fineness”, 2nd International Conference on Civil and Environmental Engineering, 8 – 10 May 2017, Cappadocia, Nevşehir, Turkey.

Demir, İ., Sevim Ö., Filazi, A., Güzelküçük S. “The Effect of Mechanical Strength of Ground Fly Ash Fineness”, 2nd International Conference on Civil and Environmental Engineering, 8 – 10 May 2017, Cappadocia, Nevşehir, Turkey.

Demir, İ., Filazi, A., Sevim, Ö., Güzelküçük, S. “The Effect of Mechanical Strength of Red Mud”, 2nd 2nd International Conference on Civil and Environmental Engineering, 8 – 10 May 2017, Cappadocia, Nevşehir, Turkey.

Demir, İ., Güzelküçük, S., Yaprak, H., Filazi, A., “Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu İkamesinin Kompoze Olarak Çimento Harçlarına Mekanik Etkisi,”, 8. Uluslararası Kırmataş Sempozyumu, 13-14 Ekim 2016.

Demir, İ., Sevim, Ö., Güzelküçük, S., “Plastik Lif Katkisinin Pomza Agregali Hafif Harçlara Etkisi” International Conference On New Advances in Civil Engineering Dubai, April (2015).

Güzelküçük, S., Şengül, Ç. G., Demir, İ., Yaprak, H., Önal, M.M., ve Doğan, O.,” Taban Külü İkameli Çimento Harçlarına Sülfatın Etkisi” Hazır Beton Kongresi Bildirileri, İstanbul, 345-355, İstanbul, Türkiye, (2013).

Özel, G., Güzelküçük, S., Filazi, A., Demir, İ., Yaprak, H., “Gazbetonda Uçucu Kül Kullanımının Isıl İletkenliğe ve Basınç Dayanımına Etkisi” 2012 Uluslararası Yapı Kongresi, Süleyman Demirel Üniversitesi Isparta, 11-13 Ekim, Isparta Türkiye, (2012).