



ATIK MALZEMELER İLE GEOPOLİMER

HARÇ ÜRETİMİ

Doktora Tezi

Asena KARSLIOĞLU KAYA

Eskişehir 2024

ATIK MALZEMELER İLE GEOPOLİMER HARÇ ÜRETİMİ

Asena KARSLIOĞLU KAYA

Doktora Tezi

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Malzemeleri Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet İnanç ONUR

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Aralık 2024

Bu tez çalışması BAP Komisyonu tarafından kabul edilen 22DRP202 no.lu proje kapsamında desteklenmiştir.

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Asena KARSLIOĞLU KAYA'nın ATIK MALZEMELER İLE GEOPOLİMER HARÇ ÜRETİMİ başlıklı çalışması 06/12/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, İnşaat Mühendisliği Anabilim dalında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvan Adı Soyadı

İmza

Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet İnanç ONUR
Üye	: Prof. Dr. Alpagut KARA
Üye	: Prof. Dr. Cenk KARAKURT
Üye	: Prof. Dr. Mehmet Uğur TOPRAK
Üye	: Doç. Dr. Mehmet CANBAZ

Prof. Dr. Semra KURAMA

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

06/12/2024

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Doktora ğrencisi Asena KARSLIOğLU KAYA, ATIK MALZEMELER İLE GEOPOLİMER HARÇ ÜRETİMİ başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Danişmanı

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet İnanç ONUR

ÖZET

ATIK MALZEMELER İLE GEOPOLİMER HARÇ ÜRETİMİ

Asena KARSLIOĞLU KAYA

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Malzemeleri Bilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Aralık 2024

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet İnanç ONUR

Günümüzde çevresel etkileri azaltmak ve sürdürülebilir yapı malzemeleri geliştirmek amacıyla atık malzemelerin yeniden kullanımı önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Bu çalışmada bor atığı, silis dumanı ve uçucu külün çeşitli kombinasyonlarla geopolimer harç üretiminde kullanılabilirliği deneysel ve istatistiksel olarak araştırılmıştır. Taguchi optimizasyonu yöntemiyle, atık malzemelerin etkin bir şekilde kullanılması ve geopolimer harçların dayanım, dayanıklılık ve termal özelliklerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Dört ana faktör (bor atığı, silis dumanı, sodyum konsantrasyonu, kürlenme sıcaklığı ve kürlenme süresi) beş farklı seviyede test edilmiştir ve toplamda 16 farklı harç karışımı elde edilmiştir. En iyi termal özelliklere sahip harç karışımlarında kullanılan kum miktarını azaltmak için ise %10 ile %100 arasında değişen miktarlarda ömrünü tamamlamış lastik kullanılarak dayanım ve termal özellikler araştırılmıştır. Toplamda 54 farklı harç karışımı incelenmiştir.

Taguchi yöntemi, geopolimer harç teknolojisinin gelişimi için önemli bir yol haritası sunmaktadır. ANOVA ile yapılan değerlendirmeler, optimum parametrelerin belirlenmesinde önemli rol oynamıştır. Kürlenme sıcaklığının, harcın mekanik dayanımını artırmada önemli bir rol oynadığı görülmüştür. Silis dumanı miktarının etkisi sınırlı kalırken, bor atığı miktarı harcın dayanımını ve ısı iletkenliğini etkileyen kritik bir faktör olarak öne çıkmaktadır. Ek olarak, asit, sülfat ve yüksek sıcaklık etkilerinin seçilen harçların mikro yapıları ile mineral bileşimleri üzerindeki etkileri tartışılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Ömrünü tamamlamış lastik, Bor atığı, Silis dumanı, Uçucu kül, Taguchi optimizasyonu.

ABSTRACT

PRODUCTION OF GEOPOLYMER MORTARS WITH WASTE MATERIALS

Asena KARSLIOĞLU KAYA

Department of Civil Engineering

Programme in Construction Materials

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, December 2024

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Mehmet İnanç ONUR

The reuse of waste materials has become a significant research area to reduce environmental impacts and develop sustainable building materials. In this study, the feasibility of using various combinations of boron waste, silica fume, and fly ash in the production of geopolymer mortar was investigated experimentally and statistically. The Taguchi optimization method was employed to efficiently utilize waste materials and improve the strength, durability, and thermal properties of geopolymer mortars. Four main factors (boron waste, silica fume, sodium concentration, curing temperature and curing hour) were tested at five different levels, resulting in a total of 16 different mortar mixtures. The strength and thermal properties were examined by using end-of-life tire in amounts ranging from 10% to 100% to reduce the sand content in mortar mixtures with the best thermal properties. A total of 54 different mortar mixtures were evaluated.

The Taguchi method provides an important roadmap for the development of geopolymer mortar technology. The evaluation through analysis of variance (ANOVA) played a crucial role in determining the optimum parameters. It has been observed that curing temperature plays a significant role in increasing the mechanical strength of the mortar. While the effect of silica fume is limited, the amount of boron waste emerges as a critical factor influencing both the strength and thermal conductivity of the mortar. Additionally, the effects of acid, sulfate, and high temperatures on the microstructure and mineral composition of selected mortars were discussed.

Keywords: End-of-life tire, Boron waste, Silica fume, Fly ash, Taguchi optimization.

TEŞEKKÜR

Yıllar boyunca ciddi bir emek ve özveri ile hazırladığım doktora tezimi tamamlamanın gururunu ve heyecanını yaşıyorum. Öncelikle, beni yetiştiren ve hayata başladığım ilk günden bugüne kadar bana her şartta destek olan anneme ve ablama; çalışmam sırasında bana her türlü desteği veren eşime tüm kalbimle teşekkür ederim.

Danışmanlığımı üstlenen, konu seçiminden araştırmanın yürütülmesine dek elinden gelen her türlü yardımı yapan değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Mehmet İnanç ONUR'a teşekkür ederim.

Yaptığım laboratuvar çalışmaları sırasında bana yardımcı olan Erdoğan ÖZKAN'a ve analizler sırasında benden desteğini esirgemeyen arkadaşım Mehmet Hanifi ALKAYIŞ'a teşekkür ederim.

Tez izleme komitemde yer alarak değerli görüşleri ile araştırmanın şekillenmesine yardımcı olan Doç. Dr. Mehmet CANBAZ ve Prof. Dr. Alpagut KARA hocalarım ile sayısal modelleme konusunda bana her türlü desteği veren Dr. Öğr. Üyesi Yalçın ÖZDEMİR hocama teşekkür ederim. Seramik Araştırma Merkezi çalışanlarına ve SEM analizi için yardımcı olan Doç. Dr. Erhan AYAS'a teşekkürlerimi iletmek isterim. Ayrıca, bor atığı temininde yardımcı olan Eti Maden işletmeleri Kırka Bor Müdürlüğü'ne ve baş mühendisi Oytun GÖKTEN'e teşekkür ederim.

Bu doktora tezi YÖK 100/2000 doktora projesi "Yapı, Yapı Malzemeleri ve Yapı Yönetimi" öncelikli alan vizyonu dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, TÜBİTAK Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı (BİDEB) 2211-Yurt İçi Lisansüstü Burs Programı kapsamında destek almamdan dolayı TÜBİTAK ve YÖK yetkililerine teşekkür ederim.

Bu tezi yıllar önce kaybettiğim babama ve bir mucize gibi hayatıma girecek olan kızıma ithaf ediyorum.

Asena KARSLIOĞLU KAYA

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Asena KARSLIOĞLU KAYA

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	I
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	II
DANIŞMAN ONAYI	III
ÖZET	IV
ABSTRACT.....	V
TEŞEKKÜR	VI
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	VII
İÇİNDEKİLER	VIII
TABLolar DİZİNİ	XIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	XIV
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XX
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel Bakış	1
1.2. Çalışmanın Önemi ve Amacı.....	3
1.3. Tezin Yapısı	4
2. GEOPOLİMERİZASYON	5
2.1. Genel Bakış	5
2.2. Bağlayıcı Malzemeler	9
2.3. Alkali Aktivatörler	11
2.4. Geopolimerizasyonu Etkileyen Faktörler	14
2.4.1. Alkali aktivatör tipi, konsantrasyonu ve katyon etkisi	14
2.4.2. Bağlayıcı malzemenin kimyasal ve mineralojik yapısı	16
2.4.3. Kür sıcaklığı ve süresi	18
2.4.4. Bağlayıcı/aktivatör oranı	19
2.4.5. Su/geopolimer oranı	19
2.4.6. pH değeri	20
2.4.7. Reaksiyon süresi	20

2.5. Geopolimer Harçların Özellikleri.....	21
2.6. Literatür Taraması	23
2.6.1. Taguchi yöntemi	25
2.6.2. ÖTL kullanımı ve yüzey işleme yöntemleri	27
2.6.3. Taze harç özellikleri	32
2.6.4. Fiziksel özellikler	34
2.6.5. Mekanik özellikler	35
2.6.6. Dayanıklılık özellikleri.....	38
2.6.7. Termal özellikler.....	41
2.6.8. Mikro yapı ve performans ilişkisi	42
2.6.9. Karbon ayak izi ve sürdürülebilirlik	44
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	47
3.1. Malzeme	48
3.1.1. Çimento	48
3.1.2. Uçucu kül.....	49
3.1.3. Bor atığı.....	50
3.1.4. Silis dumanı.....	53
3.1.5. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu.....	53
3.1.6. Standart kum	54
3.1.7. Ömrünü tamamlamış lastik.....	55
3.1.8. Sodyum hidroksit	57
3.1.9. Sodyum silikat.....	58
3.1.10. Polivinil alkol	59
3.1.11. Su.....	60
3.2. Harçların Tasarlanması	60
3.2.1. Taguchi deney tasarımı.....	60
3.3. Numune Üretimi.....	64
3.4. Deneyler	69
3.4.1. Taze harç deneyleri	69
3.4.1.1. Yayılma tablası.....	69
3.4.1.2. Taze birim hacim ağırlığı	70
3.4.1.3. Taze harç sıcaklığı	71

3.4.1.4. <i>Priz süresi</i>	71
3.4.2. Sertleşmiş harç deneyleri.....	72
3.4.2.1. <i>Sertleşmiş birim hacim ağırlığı</i>	72
3.4.2.2. <i>Su emme ve boşluk oranı</i>	73
3.4.2.3. <i>Kılcal su emme katsayısı (Sorptivite)</i>	74
3.4.2.4. <i>Ultrases geçiş hızı</i>	75
3.4.2.5. <i>Eğilme dayanımı</i>	76
3.4.2.6. <i>Basınç dayanımı</i>	77
3.4.3. Durabilite deneyleri.....	78
3.4.3.1. <i>Islanma-kuruma deneyi</i>	79
3.4.3.2. <i>Donma-çözülme direnci deneyi</i>	80
3.4.3.3. <i>Asit dayanıklılık deneyi</i>	81
3.4.3.4. <i>Sülfat dayanıklılık deneyi</i>	82
3.4.3.5. <i>Yüksek sıcaklık deneyi</i>	82
3.4.4. Isıl iletkenlik deneyi.....	83
3.4.5. Mikroyapı analizi	84
3.4.5.1. <i>XRF analizi</i>	84
3.4.5.2. <i>XRD analizi</i>	85
3.4.5.3. <i>TGA-DTA analizi</i>	85
3.4.5.4. <i>SEM-EDX analizi</i>	86
4. İSTATİKSEL ANALİZ.....	88
5. ISI TRANSFER ANALİZİ	91
6. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	93
6.1. Taze Harç Deneyleri	93
6.1.1. <i>Yayılma tablası</i>	93
6.1.2. <i>Taze birim hacim ağırlığı</i>	96
6.1.3. <i>Taze harç sıcaklığı</i>	98
6.1.4. <i>Priz süresi</i>	99
6.2. Sertleşmiş Harç Deneyleri	100
6.2.1. <i>Sertleşmiş birim hacim ağırlığı</i>	100
6.2.2. <i>Su emme ve boşluk oranı</i>	102
6.2.3. <i>Kılcal su emme katsayısı (Sorptivite)</i>	104

6.2.4. Ultrases geçiş hızı.....	108
6.2.5. Eğilme dayanımı.....	110
6.2.6. Basınç dayanımı.....	113
6.3. Isıl İletkenlik Deneyi.....	117
6.4. Harçların Özellikleri Arasındaki İlişkiler	121
6.4.1. Eğilme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	121
6.4.2. Basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı arasındaki ilişki	122
6.4.3. Basınç dayanımı ile birim hacim ağırlık arasındaki ilişki.....	122
6.4.4. Isıl iletkenlik ile birim hacim ağırlık arasındaki ilişki.....	123
6.5. Taguchi Optimizasyonu.....	125
6.5.1. Taze harç sıcaklığı.....	125
6.5.2. Priz süresi.....	126
6.5.3. Birim hacim ağırlık	127
6.5.4. Su emme oranı	127
6.5.5. Kılcal su emme derinliği	128
6.5.6. Ultrases geçiş hızı.....	129
6.5.7. Eğilme dayanımı.....	129
6.5.8. Basınç dayanımı.....	129
6.5.9. Isıl iletkenlik.....	130
6.6. İstatiksel Analiz	131
6.7. Optimum Harcın Belirlenmesi.....	137
6.8. Durabilite Deneyleri.....	147
6.8.1. Islanma-kuruma deneyi.....	147
6.8.2. Donma-özölme direnci deneyi	151
6.8.3. Yüksek sıcaklık deneyi.....	155
6.8.4. Asit dayanıklılık deneyi.....	158
6.8.5. Sülfat dayanıklılık deneyi	161
6.9. Mikroyapı Analizi	163
6.9.1. XRF analizi	164
6.9.2. XRD analizi.....	164
6.9.3. TGA-DTA analizi	179
6.9.4. SEM-EDX analizi	184
6.10. Isı Transfer Analizi	197

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	201
KAYNAKÇA.....	211
ÖZGEÇMİŞ	



TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 3.1. Bor mineralleri B ₂ O ₃ oranı (%) (Etimaden, 2024)	50
Tablo 3.2. CEN standart kumu ve elek analizi.....	54
Tablo 3.3. NaOH kimyasal özellikleri	57
Tablo 3.4. Na ₂ SiO ₃ kimyasal özellikleri.....	58
Tablo 3.5. PVA kimyasal özellikleri.....	59
Tablo 3.6. Taguchi deneysel tasarımında kullanılan parametreler	62
Tablo 3.7. Üretilen numune türleri.....	64
Tablo 3.8. Harç karışımları için malzeme miktarı	67
Tablo 3.9. A0 numunesi için üretilen ÖTL içeren numune tipleri (PVA yüzey işleme).....	68
Tablo 6.1. Tasarlanan geopolimer harçların birincil ve ikincil kılcallık katsayıları	107
Tablo 6.2. Taze harç sıcaklığı ANOVA analiz sonucu	131
Tablo 6.3. Başlangıç priz süresi ANOVA analiz sonucu	132
Tablo 6.4. Birim hacim ağırlık ANOVA analiz sonucu.....	133
Tablo 6.5. Su emme oranı ANOVA analiz sonucu	134
Tablo 6.6. Kılcal su emme yüksekliği ANOVA analiz sonucu	135
Tablo 6.7. Ultrases geçiş hızı ANOVA analiz sonucu	135
Tablo 6.8. Eğilme dayanımı ANOVA analiz sonucu.....	135
Tablo 6.9. Basınç dayanımı ANOVA analiz sonucu	136
Tablo 6.10. Mekanik özelliklerin ANOVA analiz sonucu.....	136
Tablo 6.11. Isıl iletkenlik ANOVA analiz sonucu	137
Tablo 6.12. Optimum harçlar	140
Tablo 6.13. AY/ÖTL harçlarının ultrases geçiş hızı ANOVA analiz sonucu.....	143
Tablo 6.14. AY/ÖTL harçlarının eğilme dayanımı ANOVA analiz sonucu	144
Tablo 6.15. AY/ÖTL harçlarının basınç dayanımı ANOVA analiz sonucu	145
Tablo 6.16. AY/ÖTL harçlarının ısı iletkenlik ANOVA analiz sonucu	147
Tablo 6.17. Geopolimer harç üretiminde kullanılan hammaddelerin oksit kompozisyonu	164

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Geopolimerizasyon mekanizmasının şematik gösterimi (Duxon vd., 2007'b).....	7
Şekil 2.2. Polisialatın yapısı (Davidovits 1994)	8
Şekil 3.1. Akış şeması.....	47
Şekil 3.2. Çimento (PÇ).....	48
Şekil 3.3. Uçucu kül (CFUK)	49
Şekil 3.4. Kırka-Eskişehir üretim tesisi	51
Şekil 3.5. Tinkal yataklarının genel görünümü	52
Şekil 3.6. Laboratuvar tipi çeneli kırıcı	52
Şekil 3.7. Bor atığı (BA).....	52
Şekil 3.8. Silis dumanı (SD)	53
Şekil 3.9. Yüksek fırın cürufu (YFC).....	54
Şekil 3.10. CEN standart kumu	55
Şekil 3.11. Ömrünü tamamlamış lastik (ÖTL)	56
Şekil 3.12. Harç karışımlarında kullanılan ÖTL malzemesinin elek analizi.....	56
Şekil 3.13. Sodyum hidroksit (NaOH)	57
Şekil 3.14. Sodyum silikat (Na_2SiO_3).....	58
Şekil 3.15. Polivinil alkol (PVA).....	59
Şekil 3.16. (a) Tek bileşenli ve (b) iki bileşenli geopolimer harcın üretimi	65
Şekil 3.17. Manyetik karıştırıcı	66
Şekil 3.18. Hobart mikseri ve harçların üretimi	66
Şekil 3.19. Sarsma cihazı, numunenin yerleştirilmesi ve kalıplanması.....	66
Şekil 3.20. Numunelerin torbalanması ve fırına yerleştirilmesi	67
Şekil 3.21. PVA yüzey işleme ile ÖTL kullanılarak harç üretilmesi	68
Şekil 3.22. Harçların yayılma çapının belirlenmesi	70
Şekil 3.23. Numune tartımı.....	70
Şekil 3.24. Taze harç ölçüm cihazı.....	71
Şekil 3.25. Otomatik Vicat cihazı.....	71
Şekil 3.26. Sertleşmiş harç numune tartımı	73
Şekil 3.27. P_d ve P_s ölçümü	73
Şekil 3.28. Kılcal su emme deneyi yapılışı	74

Şekil 3.29. Ultrases geçiş hızı deneyi yapılışı	76
Şekil 3.30. Üç noktalı eğilme deney cihazı ve numune.....	77
Şekil 3.31. Basınç deney cihazı ve numune	78
Şekil 3.32. Isılanma-kuruma deneyi	79
Şekil 3.33. Donma-çözülme çevrimi	80
Şekil 3.34. Donma-çözülme deney cihazı	80
Şekil 3.35. Asit dayanıklılık deneyi.....	81
Şekil 3.36. Sülfat dayanıklılık deneyi.....	82
Şekil 3.37. Yüksek sıcaklık deneyi.....	83
Şekil 3.38. Isıl iletkenlik deney cihazı.....	84
Şekil 3.39. XRD cihazı	85
Şekil 3.40. TG/DTA cihazı.....	86
Şekil 3.41. SEM cihazı	86
Şekil 4.1. Minitab programında ANOVA analizi.....	89
Şekil 5.1. Kullanılan AY modeli	91
Şekil 5.2. Isı transfer analizi akış şeması.....	92
Şekil 6.1. Tasarlanan geopolimer harçların yayılma çapı	94
Şekil 6.2. ÖTL kullanılan A0 harçlarının yayılma çapı	95
Şekil 6.3. ÖTL kullanılan AY harçlarının yayılma çapı.....	95
Şekil 6.4. Tasarlanan geopolimer harçların taze birim hacim ağırlığı.....	96
Şekil 6.5. ÖTL kullanılan A0 harçlarının taze birim hacim ağırlığı.....	97
Şekil 6.6. ÖTL kullanılan AY harçlarının taze birim hacim ağırlığı.....	97
Şekil 6.7. Tasarlanan geopolimer harçların taze harç sıcaklığı	98
Şekil 6.8. Tasarlanan geopolimer harçların priz süresi	100
Şekil 6.9. Tasarlanan geopolimer harçların sertleşmiş birim hacim ağırlığı	101
Şekil 6.10. ÖTL kullanılan A0 harçlarının sertleşmiş birim hacim ağırlığı	101
Şekil 6.11. ÖTL kullanılan AY harçlarının sertleşmiş birim hacim ağırlığı	102
Şekil 6.12. Tasarlanan geopolimer harçların su emme değerleri	103
Şekil 6.13. Tasarlanan geopolimer harçların boşluk oranları	104
Şekil 6.14. Tasarlanan geopolimer harçların kılcal su emme değerleri.....	105
Şekil 6.15. Tasarlanan geopolimer harçların kümülatif su emme yüksekliği	106
Şekil 6.16. Tasarlanan geopolimer harçların ultrases geçiş hızı değerleri	109
Şekil 6.17. ÖTL kullanılan A0 harçlarının ultrases geçiş hızı değerleri	109

Şekil 6.18. ÖTL kullanılan AY harçlarının ultrases geçiş hızı değerleri	110
Şekil 6.19. Tasarlanan geopolimer harçların eğilme dayanımları	111
Şekil 6.20. ÖTL kullanılan A0 harçlarının eğilme dayanımları	112
Şekil 6.21. ÖTL kullanılan AY harçlarının eğilme dayanımları	113
Şekil 6.22. Tasarlanan geopolimer harçların basınç dayanımları.....	114
Şekil 6.23. ÖTL kullanılan A0 harçlarının basınç dayanımları.....	116
Şekil 6.24. ÖTL kullanılan AY harçlarının basınç dayanımları.....	117
Şekil 6.25. Tasarlanan geopolimer harçların ısı iletkenlik değerleri.....	118
Şekil 6.26. ÖTL kullanılan A0 harçlarının ısı iletkenlik değerleri.....	119
Şekil 6.27. ÖTL kullanılan AY harçlarının ısı iletkenlik değerleri.....	119
Şekil 6.28. Geopolimer harçların basınç dayanımı ve ısı iletkenliği.....	120
Şekil 6.29. Geopolimer harçların eğilme ve basınç dayanımları arasındaki ilişki	121
Şekil 6.30. A0/ÖTL ile AY/ÖTL harçlarının eğilme ve basınç dayanımları arasındaki ilişki	122
Şekil 6.31. Geopolimer harçların ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımları arasındaki ilişki	123
Şekil 6.32. A0/ÖTL ile AY/ÖTL harçlarının ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımları arasındaki ilişki	124
Şekil 6.33. Geopolimer harçların basınç dayanımları ve BHA'ları arasındaki ilişki ...	124
Şekil 6.34. A0/ÖTL ile AY/ÖTL harçlarının basınç dayanımları ve BHA'ları arasındaki ilişki	124
Şekil 6.35. Geopolimer harçların ısı iletkenlik ve BHA'ları arasındaki ilişki	125
Şekil 6.36. A0/ÖTL ile AY/ÖTL harçlarının ısı iletkenlik ve BHA'ları arasındaki ilişki.....	125
Şekil 6.37. Taze harç sıcaklığı sinyal/gürültü grafiği.....	126
Şekil 6.38. Başlangıç priz süresinin sinyal/gürültü grafiği.....	126
Şekil 6.39. BHA'nın sinyal/gürültü grafiği	127
Şekil 6.40. Su emme oranının sinyal/gürültü grafiği.....	128
Şekil 6.41. Kılcal su emme derinliğinin sinyal/gürültü grafiği	128
Şekil 6.42. Ultrases geçiş hızı sinyal/gürültü grafiği.....	129
Şekil 6.43. Eğilme dayanımı sinyal/gürültü grafiği.....	130
Şekil 6.44. Basınç dayanımı sinyal/gürültü grafiği	130
Şekil 6.45. Isı iletkenlik katsayısının sinyal/gürültü grafiği.....	131

Şekil 6.46. Taze harç sıcaklığı için deneysel ve tahminsel sonuçların karşılaştırılması	132
Şekil 6.47. Başlangıç priz süresi için deneysel ve tahminsel sonuçların karşılaştırılması	133
Şekil 6.48. AY/ÖTL harçlarının ultrases geçiş hızı sinyal/gürültü grafiği.....	142
Şekil 6.49. Ultrases geçiş hızı için deneysel ve tahminsel sonuçların karşılaştırılması	143
Şekil 6.50. AY/ÖTL harçlarının eğilme dayanımı sinyal/gürültü grafiği	144
Şekil 6.51. Eğilme dayanımı için deneysel ve tahminsel sonuçların karşılaştırılması	144
Şekil 6.52. AY/ÖTL harçlarının basınç dayanımı sinyal/gürültü grafiği	145
Şekil 6.53. Basınç dayanımı için deneysel ve tahminsel sonuçların karşılaştırılması	146
Şekil 6.54. AY/ÖTL harçlarının ısı iletkenlik sinyal/gürültü grafiği	146
Şekil 6.55. Isı iletkenlik için deneysel ve tahminsel sonuçların karşılaştırılması	147
Şekil 6.56. Islanma-kuruma çevrimine maruz kalan optimum harçların ağırlık kaybı.....	148
Şekil 6.57. Islanma-kuruma çevrimine maruz kalan optimum harçların ultrases geçiş hızı değerleri	149
Şekil 6.58. Islanma-kuruma çevrimine maruz kalan optimum harçların eğilme dayanım kaybı.....	150
Şekil 6.59. Islanma-kuruma çevrimine maruz kalan optimum harçların basınç dayanım kaybı.....	150
Şekil 6.60. Donma-çözülme çevrimine maruz kalan optimum harçların ağırlık kaybı.....	151
Şekil 6.61. Donma-çözülme çevrimine maruz kalan optimum harçların ultrases geçiş hızı değerleri	153
Şekil 6.62. Donma-çözülme çevrimine maruz kalan optimum harçların eğilme dayanım kaybı.....	154
Şekil 6.63. Donma-çözülme çevrimine maruz kalan optimum harçların basınç kaybı.....	154
Şekil 6.64. Yüksek sıcaklığa maruz kalan optimum harçların ağırlık kaybı.....	155

Şekil 6.65. Yüksek sıcaklığa maruz kalan optimum harçların ultrases geçiş hızı değerleri	156
Şekil 6.66. Yüksek sıcaklığa maruz kalan optimum harçların eğilme dayanım kaybı.....	157
Şekil 6.67. Yüksek sıcaklığa maruz kalan optimum harçların basınç dayanım kaybı.....	158
Şekil 6.68. HCl'ye maruz kalan optimum harçların ağırlık kaybı.....	159
Şekil 6.69. HCl'ye maruz kalan optimum harçların basınç dayanım kaybı	160
Şekil 6.70. MgSO ₄ 'e maruz kalan optimum harçların ağırlık kaybı	161
Şekil 6.71. MgSO ₄ 'e maruz kalan optimum harçların ağırlık kaybı	163
Şekil 6.72. CFUK malzemesinin XRD deseni	164
Şekil 6.73. BA malzemesinin XRD deseni.....	165
Şekil 6.74. SD malzemesinin XRD deseni	165
Şekil 6.75. YFC malzemesinin XRD deseni	166
Şekil 6.76. A0 harcının XRD deseni	167
Şekil 6.77. A1 (%100 CFUK) harcının XRD deseni.....	169
Şekil 6.78. A4 (%85CFUK+%15SD) harcının XRD deseni	169
Şekil 6.79. A13 (%85CFUK+%15BA) harcının XRD deseni.....	170
Şekil 6.80. AS harcının XRD deseni	170
Şekil 6.81. AX harcının XRD deseni	171
Şekil 6.82. AY harcının XRD deseni	172
Şekil 6.83. HCl'ye ve MgSO ₄ 'e 360 gün maruz kalan A0 harcının XRD deseni	173
Şekil 6.84. HCl'ye ve MgSO ₄ 'e 360 gün maruz kalan AX harcının XRD deseni	175
Şekil 6.85. Yüksek sıcaklığa maruz kalan A0 harcının XRD desenleri	177
Şekil 6.86. Yüksek sıcaklığa maruz kalan AX harcının XRD desenleri	178
Şekil 6.87. A0 harcının TG/DTA analizi.....	179
Şekil 6.88. A4 harcının TG/DTA analizi.....	182
Şekil 6.89. A13 harcını TG/DTA analizi.....	183
Şekil 6.90. AX harcının TG/DTA analizi.....	183
Şekil 6.91. A0 ve AX harcının SEM/EDX analizleri (250x, 2500x ve 10000x).....	186
Şekil 6.92. HCl'ye 360 gün maruz kalan A0 ve AX harcının SEM/EDX analizleri (250x, 2500x ve 10000x)	189

Şekil 6.93. MgSO ₄ 'e 360 gün maruz kalan A0 ve AX harcının SEM/EDX analizleri (250x, 2500x ve 10000x)	191
Şekil 6.94. 200 ⁰ C'ye maruz kalan A0 ve AX harcının SEM/EDX analizleri (250x, 2500x ve 10000x)	193
Şekil 6.95. 400 ⁰ C'ye maruz kalan A0 ve AX harcının SEM/EDX analizleri (250x, 2500x ve 10000x)	194
Şekil 6.96. 600 ⁰ C'ye maruz kalan A0 ve AX harcının SEM/EDX analizleri (250x, 2500x ve 10000x)	195
Şekil 6.97. 800 ⁰ C'ye maruz kalan AX harcının SEM/EDX analizleri (250x, 2500x ve 10000x)	196
Şekil 6.98. 1.model kararlı hal ısı transferi.....	197
Şekil 6.99. 1.model sıcaklık dağılım grafiği (analitik çözüm)	197
Şekil 6.100. 2.model kararlı hal ısı transferi (41,6 ⁰ C).....	198
Şekil 6.101. 2.model 41,6 ⁰ C için sıcaklık dağılım grafiği (analitik çözüm)	198
Şekil 6.102. 2.model kararlı hal ısı transferi (-28,6 ⁰ C).....	199
Şekil 6.103. 2.model -28,6 ⁰ C için sıcaklık dağılım grafiği (analitik çözüm)	199
Şekil 6.104. 3.model kararlı hal ısı transferi (41,6 ⁰ C).....	200
Şekil 6.105. 3.model kararlı hal ısı transferi (-28,6 ⁰ C).....	200

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
Al	: Alüminyum
ANOVA	: Analysis of Variance (Varyans Analizi)
ASTM	: American Society for Testing Materials
BA	: Bor Atığı
C ₂ S	: Belit (Dikalsiyum silikat), 2CaOSiO ₂
C ₃ S	: Alit (Trikalsiyum silikat), 3CaOSiO ₂
Ca	: Kalsiyum
CEN	: Avrupa Standartlar Komitesi
C-H	: Kalsiyum Hidroksit
CO ₂	: Karbondioksit
C-S-H	: Kalsiyum Silika Hidrat
C-UK	: C Tipi Uçucu Kül
Fe	: Demir
FEM	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
F-UK	: F Tipi Uçucu Kül
Gt	: Gros Ton
K	: Potasyum
K ₂ CO ₃	: Potasyum Karbonat
K ₂ SiO ₃	: Potasyum Silikat
KOH	: Potasyum Hidroksit
M-A-S-H	: Magnezyum Alümina Silika Hidrat
Mg	: Magnezyum
Mt	: Metric Ton
N	: Newton
Na	: Sodyum
Na ₂ CO ₃	: Sodyum Karbonat
Na ₂ SiO ₃	: Sodyum Silikat
NaOH	: Sodyum Hidroksit
N-A-S-H	: Sodyum Alümina Silika Hidrat

NO _x	: Nitrik oksit
OH ⁻	: Hidroksil
ÖTL	: Ömrünü Tamamlamış Lastik
PÇ	: Portland Çimentosu
pH	: Potential of Hydrogen (Hidrojen Potansiyeli)
SD	: Silis Dumanı
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
Si	: Silisyum
Si-O-Al	: Silikon-okso-alüminat (Sialat)
SO ₂	: Kükürt dioksit
Ti	: Titanyum
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
XRD	: X-ışını Difraksiyon Spektrometresi
XRF	: X-ışını Floresans Spektrometresi
YFC	: Yüksek Fırın Cürufu
γ	: Birim Hacim Ağırlık

1. GİRİŞ

1.1. Genel Bakış

Geleneksel beton, inşaat mühendisliğinin temel yapı taşlarından biri olarak yüzyıllardır kullanılmaktadır. Betonun sunduğu ekonomik faydalar, dayanıklılık, işlenebilirlik ve çeşitlendirilebilirlik gibi özellikler, onu çok geniş bir yelpazede kullanıma uygun hale getirmiştir. Özellikle yüksek dayanım göstermesi ve farklı iklim koşullarına dayanıklı yapısı, betonun mega altyapı projelerinden küçük ölçekli yapılara kadar her alanda tercih edilmesine neden olmaktadır. Betonun kullanıldığı alanların çokluğu ve üretim sürecinin yerinde kolayca gerçekleştirilebilmesi, bu malzemenin sektörde neden bu kadar baskın olduğunu açıkça göstermektedir. Ancak betonun önemli bileşenlerinden olan Portland çimentosunun (PÇ) üretim süreci, enerji yoğun yapısı ve çevresel etkileriyle ciddi sorunlara yol açmaktadır.

PÇ, beton üretiminde kritik bir bileşen olmakla birlikte, ciddi çevresel etkileri beraberinde getiren bir malzemedir. PÇ üretim sürecinde büyük miktarlarda enerji harcanmakta ve bu enerji ihtiyacı genellikle fosil yakıtların yakılması yoluyla karşılanmaktadır. PÇ'nin küresel üretim miktarları, inşaat sektöründeki kritik rolünü gözler önüne sermektedir. Örneğin, ABD'de yılda yaklaşık 120 milyon ton PÇ tüketilirken, Çin'de bu miktar 1,8 milyar ton ile dünya üretiminin yaklaşık %60'ını oluşturmaktadır (Portland Çimento Derneği, 2016; CEMBUREAU, 2017). Bu büyük üretim rakamları, çimento sektörünün dünya genelinde önemli bir endüstriyel oyuncu olduğunu göstermektedir. Bu durum, atmosfere yüksek miktarlarda karbondioksit (CO₂), kükürt dioksit (SO₂) ve nitrik oksit (NO_x) gibi sera gazlarının salınmasına neden olmaktadır. Özellikle CO₂, küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi ciddi çevresel sorunların başlıca etkenlerinden biridir. PÇ üretimi, dünya genelinde sanayi kaynaklı CO₂ emisyonlarının yaklaşık %7'sinden sorumlu olup, bu oran çimento sektörünün çevresel etkisinin ne kadar büyük olduğunu göstermektedir (Ali vd., 2011). Üretim sırasında açığa çıkan diğer sera gazları da çevre üzerinde zararlı etkilere yol açarak hem ekosistemlere hem de insan sağlığına zarar vermektedir.

PÇ üretimi, yalnızca çevresel gaz salınımıyla sınırlı kalmamakta, aynı zamanda büyük miktarlarda enerji tüketimini de gerektirmektedir. Bu süreçte fosil yakıtların yoğun bir şekilde kullanılması, doğal kaynakların hızla tükenmesine neden olmaktadır. Özellikle kireçtaşının kalsinasyon işlemi sırasında gerekli olan yüksek sıcaklık, döner fırınlarda fosil yakıtlarla sağlanır ve bu da enerji maliyetlerini artırır. Aynı zamanda bu enerji

tüketimi, üretim maliyetlerinin yükselmesine neden olurken, fosil yakıtların yanmasıyla atmosfere daha fazla CO₂ salınmasına yol açmaktadır. Çimento üretiminde fosil yakıtlara olan bu bağımlılık, sektörde sürdürülebilirlik odaklı çözümler geliştirilmesini zorunlu hale getirmektedir.

PÇ'nin çevresel maliyetlerinin fark edilmesiyle birlikte, sürdürülebilir ve çevre dostu yapı malzemeleri geliştirilmesine yönelik çalışmalar hız kazanmıştır. Bu bağlamda, geopolimerler, inşaat sektöründe potansiyel bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Geopolimerler, alüminyum silikat içeren atık malzemelerin alkali aktivatörlerle reaksiyona sokulmasıyla elde edilen inorganik polimerlerdir. Endüstriyel atık malzemelerin geri dönüştürülmesiyle üretilen geopolimerler, PÇ'ye kıyasla daha düşük karbon ayak izi sunmakta ve çevresel sürdürülebilirliğe önemli katkılar sağlamaktadır. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi atık malzemeler, geopolimer üretiminde sıklıkla kullanılan hammaddelerdir (Davidovits, 2008). Bu atıkların yeniden değerlendirilmesi, atık yönetimi sorunlarına çözüm olmasının yanı sıra enerji tasarrufu da sağlar.

Geopolimerlerin sunduğu bir diğer önemli avantaj ise mekanik ve kimyasal dayanıklılık açısından geleneksel betona kıyasla üstün performans göstermesidir. Özellikle asidik, tuzlu veya sülfatlı ortamlar gibi zorlu çevresel koşullarda geopolimerler, kimyasal dayanıklılık bakımından çok daha uzun ömürlüdür (Provis ve Van Deventer, 2014). Geleneksel beton, bu tür zorlu koşullarda hızla bozulabilirken, geopolimerler daha dayanıklı yapıları sayesinde uzun vadeli projelerde önemli avantajlar sunar. Bu durum, özellikle altyapı projelerinde, deniz yapılarında ve endüstriyel tesislerde geopolimerlerin tercih edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, geopolimerler yüksek sıcaklıklara karşı da oldukça dayanıklıdır; bu özellik, yangın riski taşıyan yapılarda veya yüksek sıcaklık uygulamaları gerektiren endüstrilerde kullanımlarını artırmaktadır.

Geopolimer teknolojisi, aynı zamanda endüstriyel atıkların geri dönüştürülmesi ve yapı malzemesi olarak kullanılması açısından da büyük bir sürdürülebilirlik potansiyeli taşımaktadır. Endüstriyel atıklar, geleneksel yöntemlerle bertaraf edilmesi zor ve maliyetli malzemeler olarak bilinirken, geopolimer üretiminde bu atıkların kullanılması hem atık yönetim maliyetlerini düşürmekte hem de depolama alanlarının verimli kullanılmasını sağlamaktadır. Atık malzemelerin değerlendirilmesi, aynı zamanda bu tür atıkların çevreye olan olumsuz etkilerinin azaltılmasına yardımcı olur. Fosil yakıt tüketiminin minimize edilmesi, enerji tasarrufu ve sürdürülebilir bir yapı malzemesi

Üretim süreci, geopolimerlerin inşaat sektöründe evre dostu bir alternatif olarak ön plana çıkmasına katkıda bulunmaktadır (Duxon vd., 2007'a; Duxon vd. 2007'b).

Geopolimerlerin evresel ve performans avantajları, bu malzemelerin gelecekte inşaat sektöründe daha geniş bir kullanım alanı bulabileceğini göstermektedir. Ancak, geopolimerlerin potansiyelinin tam anlamıyla değerlendirilebilmesi için daha fazla bilimsel araştırmaya ve mühendislik uygulamalarına ihtiyaç vardır. Geopolimerlerin farklı üretim yöntemleri, kullanılan hammaddelerin çeşitliliği ve farklı kullanım alanlarına yönelik performans analizlerinin yapılması, bu malzemelerin inşaat sektörüne entegrasyonu açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle büyük ölçekli altyapı projelerinde, geopolimerlerin uzun vadeli dayanıklılığı ve maliyet etkinliği üzerine yapılan çalışmalar, bu teknolojinin benimsenmesini hızlandırabilir. Bu bağlamda, atık malzemelerle üretilen geopolimer harçlar, geleneksel betonun çevresel etkilerini hafifletme potansiyeline sahip inovatif ve sürdürülebilir bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır.

1.2. Çalışmanın nemi ve Amacı

Bu çalışmanın temel amacı, Türkiye'deki endüstriyel atık malzemeleri kullanarak çevreye duyarlı geopolimer harçlar üretmektir. Bor atığı, silis dumanı ve uçucu kül gibi endüstriyel yan ürünler hem çevresel hem de ekonomik açıdan büyük bir potansiyele sahiptir. Atıkların kullanımı atık yönetimi sorunlarına çözüm sunarken, yapı malzemeleri sektöründe maliyetleri drmeye de katkı sağlamaktadır. Geopolimer harçların üretimi hem çevresel sürdürülebilirlik açısından hem de yapı malzemeleri alanında yenilikçi bir yaklaşım sunması nedeniyle büyük bir öneme sahiptir. Bu yaklaşım, inşaat sektöründe üçüncü nesil bağlayıcıların kullanımını yaygınlaştırma potansiyeline sahiptir.

Çalışmada, sadece bağlayıcı malzemelerin değil, aynı zamanda kumun kullanımını da azaltmak hedeflenmiştir. Bu doğrultuda, ömrünü tamamlamış lastik gibi malzemeler de değerlendirilmiştir. Ömrünü tamamlamış lastik hem ekonomik açıdan avantaj sağlar hem de doğal kaynak kullanımını azaltmaktadır. Böylece, sürdürülebilir yapı malzemeleri geliştirilirken aynı zamanda atık malzemelerin çevresel faydaları da artırılmaktadır.

Literatürde, geopolimer yapı malzemeleri ile ilgili çeşitli çalışmalar bulunmaktadır, ancak bu çalışmaların büyük bir kısmı mekanik özelliklere odaklanmıştır. Atık malzemelerin ısı yalıtımı ve çevresel koşullara dayanıklılık gibi özellikleri üzerine yapılan çalışmalar sınırlıdır. Çalışmanın bu noktada önemli bir katkısı, tamamen atık malzemelerden oluşan geopolimer harçların farklı çevresel stres faktörlerine karşı

performansını değerlendirmek olmuştur. Kapiller su emme, ıslanma-kuruma, asit ve sülfat saldırısı, donma-zlme direnci, yüksek sıcaklık dayanımı gibi testler, geopolimerlerin dayanıklılık özelliklerini ortaya koymak açısından önemlidir. Bu testler sonucunda, geleneksel imento bazlı malzemelere kıyasla optimize edilen geopolimerlerin daha dayanıklı olduğu grlmştur.

Çalışmanın bir diğer önemli amacı, geopolimer harçların optimum karışım oranlarını belirlemektir. Taguchi optimizasyonu ve ANOVA analizi gibi istatistiksel yöntemler kullanılarak, farklı malzeme bileşenlerinin geopolimer harcın mekanik ve dayanıklılık özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu tür bir optimizasyon süreci, yüksek performanslı ve evre dostu malzemelerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Optimizasyon sonuçları, inşaat sektöründe kullanılabilecek sürdürülebilir yapı malzemelerinin geliştirilmesi açısından önemli bir adım olarak değerlendirilebilir. Bu alışma, geopolimer teknolojisinin daha geniş bir uygulama alanı bulmasına katkıda bulunacak önemli bulgular sunmaktadır.

1.3. Tezin Yapısı

Bu tez, atık malzemelerle üretilen geopolimer harçların performansını detaylı bir şekilde inceleyerek, bu malzemelerin inşaat mühendisliği alanındaki potansiyellerini değerlendirmektedir. Yedi ana bölümden oluşan tez, kapsamlı bir analiz ve deneysel çalışmaları içermektedir.

Birinci bölümde, çalışmanın genel konusu, önemi ve amacı ele alınmıştır. Bu bölümde, sürdürülebilir yapı malzemeleri geliştirme gereksinimi ve geopolimerlerin inşaat sektörü için önemi vurgulanmıştır. İkinci bölümde geopolimerizasyon sürecine ek olarak literatür taraması yapılmış olup, geopolimer yapı malzemeleri ile ilgili önceki araştırmalar ve mevcut bilgi birikimi aktarılmaktadır.

nc bölümde, geopolimer harçların fiziksel, dayanım, dayanıklılık, termal ve mikro yapı özellikleri üzerine detaylı bir deneysel çalışma gerçekleştirilmiş ve üretilen numuneler çeşitli testlere tabi tutulmuştur. Dördüncü bölüm, elde edilen verilerin istatistiksel analizi ile ilgilidir ve bu analizler Taguchi ve ANOVA yöntemleri kullanılarak yapılmıştır.

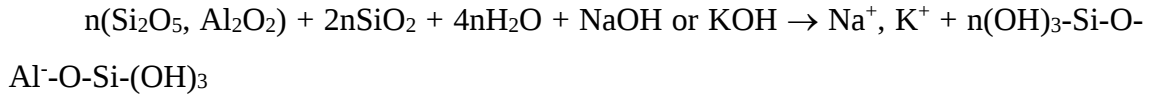
Beşinci bölümde, ısı transfer analizi gerçekleştirilmiş ve harçların termal performansı değerlendirilmiştir. Altıncı bölümde deneysel testlerin sonuçları rapor edilip tartışılmış, yedinci bölümde ise çalışma sonucunda elde edilen bulgular değerlendirilmiş ve geleceğe yönelik öneriler sunulmuştur.

2. GEOPOLİMERİZASYON

2.1. Genel Bakış

II. Dünya Savaşı'nın ardından 1950'lerde, Doğu Avrupa'da PÇ kıtlığı yaşanmaya başlamıştır. Bu dönemde, Glukhovsky ve ekibi, silisyum ve reaktif alüminyum içeren malzemelerin alkali ile aktive edilmesi üzerine araştırmalara yönelmiştir. Glukhovsky, yüksek fırın cürufunu kullanarak bu çimento sıkıntısına hızlı bir çözüm geliştirmiş ve yapılan testler, bu malzemelerin oldukça dayanıklı olduğunu göstermiştir. Bu yeni ve etkili yöntemler, bilimsel çalışmaların ilerlemesine katkı sağlamıştır. 1970'lerde ise Davidovits, metakaolin kullanarak alüminosilikatların alkali hidroksit ve silikat çözeltileriyle reaksiyonlarını detaylı bir şekilde incelemiştir (Duxon vd., 2008).

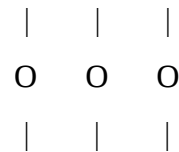
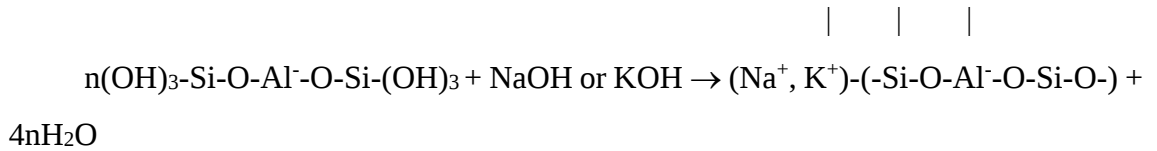
Joseph Davidovits tarafından 1978'de geliştirilen amorf ve yarı kristalin 3 boyutlu alümina-silikat ağına sahip maddelere geopolimer denilmektedir (Davidovits 1991). Bu maddeler “inorganik polimerler” olarak da bilinmektedir (MacKenzie 2008). Silisyum ve alüminyum atomları, doğal kayalarda bulunan yapıları andıran moleküller oluşturmak için reaksiyona girer. Ortaya çıkan inorganik polimer malzemeler, jeolojik feldspatların amorf bir karşılığı olarak değerlendirilebilir, ancak organik polimerlerin ısıyla sertleştirilme sürecine benzer bir yöntemle sentezlenirler. Bu özelliklerinden dolayı bu malzemeler geopolimer olarak adlandırılmaktadır (Khale ve Chaudhary 2007).



(Si-Al malzemeler)



(Geopolimer öncü)



(Geopolimerin omurgası)

Geopolimerler, başta inşaat ve malzeme mühendisliği olmak üzere birçok alanda yenilikçi ve sürdürülebilir malzemeler üretmek için kullanılmaktadır. Davidovits, yüksek alkali koşullar altında alümina-silikat oksitlerle kimyasal reaksiyonları yukarıdaki reaksiyonlarla açıklamıştır (Xu ve van Deventer 2000). Bu iki reaksiyon, geopolimerizasyonun herhangi iki alüminosilikat malzemeyle meydana gelebileceğini göstermektedir (Van Jaarsveld vd., 1997).

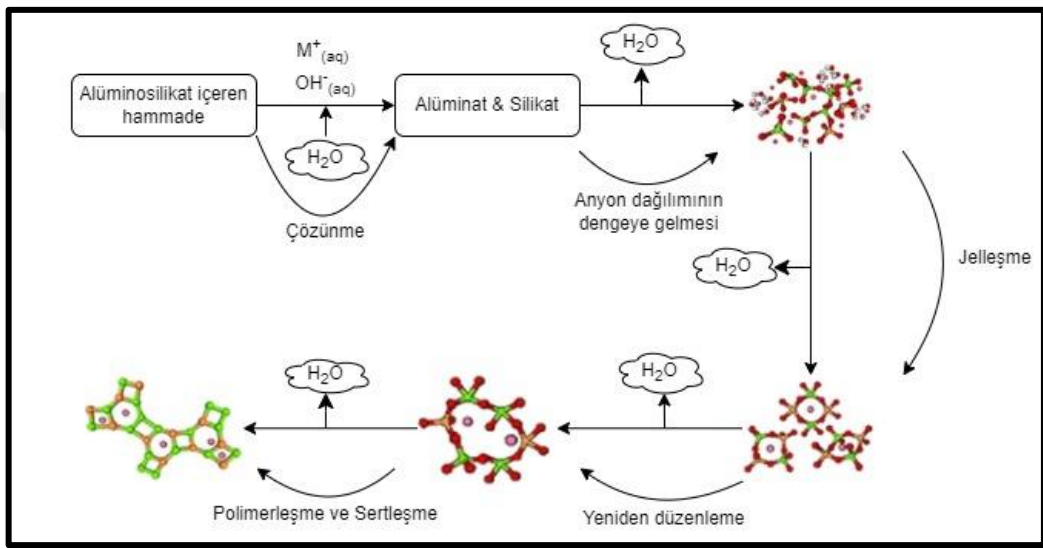
Malzemelerin alkali aktivasyonu, kısmen amorf veya tamamen amorf yapıların, kompakt yapılara hızla dönüşmesini sağlayan bir kimyasal süreçtir. Bazı araştırmacılar, alkali aktivasyonu, toz halindeki malzemenin konsantre alkali çözeltiyle karıştırılması ve ardından orta sıcaklıklarda kısa bir süre bekletilerek iyi bağlayıcı özelliklere sahip bir malzemenin elde edilmesi olarak tanımlamaktadır. Bu işlem sonucunda ana reaksiyon ürünü olarak amorf alüminosilikat jel meydana gelmektedir (Bakri vd., 2011).

Geopolimerizasyon, alüminyum açısından zengin ve amorf silisyum içeren bir katının, yüksek bazik bir çözelti ile reaksiyona girerek amorf yapıdan yarı kristal yapıya geçiş yapan alüminosilikat inorganik polimerlerin oluşumunu temel alan ve üç boyutlu bir ağ yapı oluşan kimyasal bir süreçtir. Bu süreç yenilikçi ve gelecek vaat eden bir teknoloji olarak görülmektedir (Duxon vd., 2007'b). Bu reaksiyon, özellikle atık malzemeler (uçucu kül, cüruf gibi) ve doğal alüminosilikat kaynakları kullanılarak çevre dostu bir bağlayıcı üretmek amacıyla uygulanır. Geopolimerizasyon süreci, geleneksel PÇ hidratasyonundan farklıdır. Puzolanik çimentolar kalsiyum-silikat hidrat oluşumuna dayanırken, geopolimerler yüksek derecede bazik bir ortamda silisyum ve alüminyum içeren başlatıcı bileşenlerin polikondenzasyonu ile oluşmaktadır. Alkali aktivatörler (genellikle sodyum hidroksit veya potasyum hidroksit ve sodyum silikat karışımları) kullanılarak başlatılan bu reaksiyon, yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklı, asit ve tuzlara karşı dirençli bağlayıcılar üretir (Khale ve Chaudhary 2007; Rattanasak & Chindaprasirt, 2009).

Geopolimerizasyon mekanizmasının şematik bir gösterimi Şekil 2.1'de verilmiştir. Aşağıda verilen dört temel aşama, geopolimerizasyon sürecinin temel mekanizmalarını oluşturur;

- *Katı malzemelerin çözünmesi:* Alüminosilikat bileşenleri, yüksek alkali içeren bir çözelti ile reaksiyona girer. Bu aşamada, amorf yapıdaki silisyum ve alüminyum bileşikler çözünerek monomerik bir form alır.

- *Hidroksil iyonları ile etkileşim:* Alüminosilikat yapıları, çözeltideki hidroksil (OH^-) iyonları ile etkileşime girerek reaksiyona başlar ve çözeltinin pH'ı yükselir.
- *Polikondenzasyon:* Çözünen monomerik silikat ve alüminat türleri, yoğunlaşma reaksiyonu ile alüminosilikat zincirler ve ağ yapılar oluşturarak polimerleşir. Bu aşama, jel oluşumu ile karakterizedir.
- *Yapısal düzenleme ve sertleşme:* Oluşan jel, daha düzenli bir yapıya dönüşerek yarı kristal bir yapı kazanır ve sertleşir. Bu aşama, mekanik dayanım kazanmaya başlanan süreçtir.

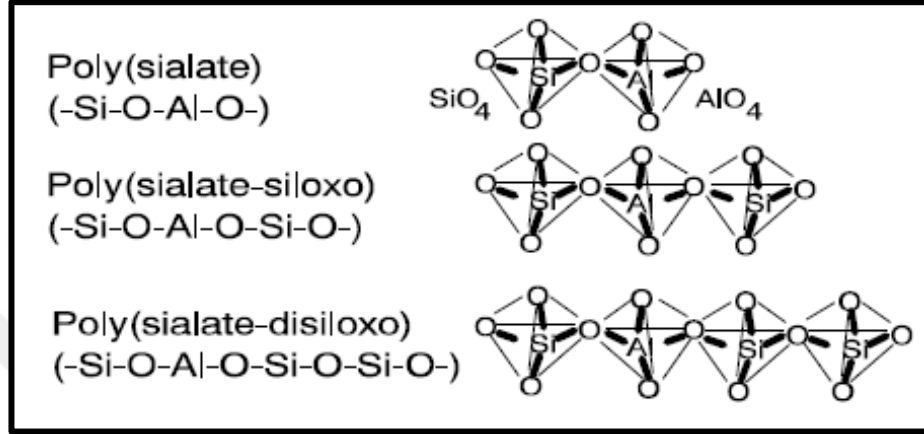


Şekil 2.1. Geopolimerizasyon mekanizmasının şematik gösterimi (Duxon vd., 2007'b)

Geopolimerizasyonun temel aşamaları, çözülme, jel oluşumu ve yoğunlaşma (polikondenzasyon) olarak özetlenebilir. İlk aşamada, alüminosilikat yapıları (örneğin, uçucu külde bulunan amorf silika ve alümina) alkali ortamda çözülerek serbest silika ve alümina iyonları açığa çıkar. Bu çözülme reaksiyonu, alkali çözelti içerisindeki OH^- iyonlarının malzeme yüzeyine saldırmasıyla başlar ve silikat ile alüminat monomerlerinin çözünmesi ile sonuçlanır. Yüksek pH seviyesi bu reaksiyonu hızlandırır ve çözünmüş iyonların konsantrasyonunu artırır (Xu ve van Deventer 2000).

Çözülme aşamasından sonra jel oluşumu aşaması gelir. Bu aşamada çözünmüş silika ve alümina monomerleri, alkali ortamda yeniden düzenlenir ve üç boyutlu bir jel yapısı oluşturur. Silikat ve alüminat türleri arasında kovalent bağlar oluşur ve yavaş yavaş polimerik yapılar ortaya çıkar. Bu süreçte oluşan Na^+ veya K^+ iyonları, jel yapısının iç stabilizasyonunu sağlamak için yapının boşluklarına yerleşir. Bu jel, geopolimer yapının mekanik özelliklerinin ve kimyasal dayanıklılığının temelini oluşturur. Bu aşamada,

başlangıçtaki jel amorf veya yarı kristal yapıdadır ve yapının tamamen sertleşmesi için zamanla yoğunlaşma reaksiyonları devam eder (Xu ve van Deventer 2000). Alkali ortamda, silisyum ve alüminyum minerallerinin oksitleri veya alüminosilikatlar alkali çözeltiyle reaksiyona girerek polimerik sialat bağları oluşturduğunda geopolimerizasyon süreci gerçekleşir (Ng vd., 2018). Şekil 2.2., polisialatın yapısını göstermektedir. Sialat, silikon-okso-alüminat (Si-O-Al)'ı temsil etmek için kullanılan bir kısaltmadır.



Şekil 2.2. Polisialatın yapısı (Davidovits 1994)

Son aşama olan yoğunlaşma, jel yapısının zamanla katılaşması ve güçlenmesi ile sonuçlanır. Bu aşamada silikat ve alüminat zincirleri arasındaki polikondenzasyon reaksiyonları hızlanır ve çözülmüş iyonların daha sıkı bir şekilde bağlanarak kristal benzeri yapıların oluşumunu sağlar. Polikondenzasyon sırasında suyun açığa çıkması, ortamın viskozitesini azaltır ve jelin katılaşma sürecini hızlandırır. Yoğunlaşma aşamasının tamamlanmasıyla, geopolimer yapı maksimum mekanik dayanımına ulaşır ve çevresel etkilere karşı yüksek dayanıklılık sergiler (Xu ve van Deventer 2000).

Geopolimerizasyon süreci hem geleneksel çimento bazlı malzemelere alternatif bir yapı malzemesi üretimi sağlamakta hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Bu süreç, PÇ üretimine kıyasla daha düşük enerji tüketir ve sera gazı salınımlarını azaltır. Özellikle endüstriyel atıkların geri dönüştürülmesi ile yapılan geopolimer üretimi, çevre dostu ve sürdürülebilir bir yapı malzemesi geliştirme potansiyeline sahiptir. Geleneksel çimento üretimi sırasında atmosfere büyük miktarda CO₂ salınırken, geopolimer üretiminde bu emisyonlar minimum seviyede kalır. Bu bağlamda, geopolimerizasyon süreçlerinin daha fazla araştırılması ve farklı atık malzemelerin bu süreçteki performanslarının incelenmesi, malzeme bilimi ve inşaat teknolojileri alanında yeni ufuklar açmaktadır.

2.2. Bağlayıcı Malzemeler

Geopolimerizasyonda kullanılan bağlayıcı malzemeler, alüminosilikat yapılarından oluşur ve alkali aktivatörler yardımıyla çözünerek polikondenzasyon reaksiyonlarına girmektedir. Bu malzemeler, genellikle endüstriyel atıklar ve doğal kaynaklı mineraller olup, çevre dostu ve sürdürülebilir bir yapı malzemesi üretimi sağlarlar. Geopolimerlerin çevresel avantajları göz önüne alındığında, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, metakaolin, pirinç kabuğu külü gibi malzemeler bu süreçte yaygın olarak kullanılır. Her bir bağlayıcı malzemenin kimyasal ve mineralojik yapısı, geopolimerizasyon sürecini ve nihai ürünün özelliklerini doğrudan etkiler.

Geopolimer bağlayıcılar, tıpkı çimento gibi, aktif veya reaktif olmayan dolgu malzemelerini bir arada tutarak bağlayıcı görevi görürler. Ancak, kristal fazlar geopolimerizasyon sürecine katılmaz ve ana malzemede bulunan amorf fazlar her zaman tam olarak geopolimerlere dönüşmeyebilir. Geopolimer üretiminde, reaktif hammaddelerin geopolimerizasyon reaksiyonuna tam olarak katılabilmesi için hammaddelerin alkali çözelti ile uzun süre (en az 15 dakika) karıştırılması gerekmektedir (He vd., 2012).

Hammaddelerdeki tüm mineral fazlar geopolimerizasyon reaksiyonlarına katılmaz. Kristal fazlar genellikle reaktif olmadıkları için geopolimer bağlayıcının içinde aktif olmayan dolgu malzemesi olarak işlev görürler. Ayrıca, nihai geopolimer ürünleri, tam çözünme gerçekleşmediği durumlarda (örneğin, uçucu kül partikülleri) ya da çözünen fazların tekrar çökmesiyle (NaOH veya Na_2CO_3 gibi) az miktarda reaksiyona girmemiş hammadde içerebilir (He vd., 2012).

Uçucu kül, kömür yakma proseslerinden elde edilen ince partiküllü bir yan üründür ve geopolimer üretiminde yaygın olarak kullanılan bir bağlayıcı malzemedir. Yüksek silika ve alümina içeriği, uçucu külü geopolimerizasyon için uygun kılmaktadır. Genellikle amorf yapıda olan uçucu kül, alkali aktivatörler ile kolayca çözünür ve polikondenzasyon reaksiyonuna girerek üç boyutlu bir yapı oluşturur. Kömürün yakılması ve gazlaştırma sistemlerinden elde edilen uçucu küller temel olarak Al-Si camsı matrisleri, Ca, Fe, Na, K, Ti, Mg gibi safsızlıkları ve çok az ve değişen miktarlarda kristal fazları içerirler. Uçucu küllerin bünyesinde baskın olarak bulunan ve düzensiz atomik yapısından dolayı kimyasal reaksiyonlarda yer alan camsı matris uçucu külün temel bileşenidir (Font vd., 2010). Uçucu kül bazlı geopolimerler, yüksek mekanik dayanım, termal direnç ve kimyasal dayanıklılık özelliklerine sahiptir. Ayrıca, uçucu külün

kullanılması, hem atık malzemelerin geri dönüştürülmesini sağlar hem de çimento üretiminden kaynaklanan çevresel etkileri azaltır.

Yüksek fırın cürufu, demir ve çelik üretimi sırasında açığa çıkan bir yan üründür. Yüksek fırın cürufu, silika, alümina ve kalsiyum oksit gibi bileşenler içerir ve geopolimer bağlayıcı olarak kullanıldığında mükemmel performans sergiler. Cüruf, amorf veya yarı kristal yapıda olabilir ve alkali çözeltilerle reaksiyona girerek geopolimerizasyon sürecini hızlandırır. Yüksek fırın cürufu bazlı geopolimerler, yüksek mekanik dayanım ve kimyasal dayanıklılık özelliklerine sahip olup, özellikle yapı mühendisliği uygulamalarında tercih edilir. Cürufun kullanımının çevresel avantajları da önemlidir; bu malzeme, demir-çelik endüstrisinden elde edilen atıkların etkin bir şekilde geri dönüştürülmesine katkı sağlar.

Metakaolin, kaolin kili yüksek sıcaklıklarda kalsine edilerek elde edilen amorf bir alüminosilikat malzemedir. Metakaolin, yüksek saflıkta alümina ve silika içerdiği için geopolimer üretiminde sıkça kullanılır. Alkali aktivatörler ile reaksiyona giren metakaolin, hızlı ve verimli bir geopolimerizasyon süreci sunmaktadır. Metakaolin bazlı geopolimerler, yüksek mekanik dayanım ve düşük gözeneklilik oranı ile bilinirler. Ayrıca, metakaolinin kullanımı ile elde edilen geopolimerler, geleneksel çimento bazlı malzemelere kıyasla daha düşük ısı iletim katsayılarına sahip olabilir. Bu da metakaolinin hem yapısal hem de yalıtım özellikleri bakımından avantajlı bir malzeme olduğunu gösterir.

Pirinç kabuğu külü, pirinç üretiminden elde edilen bir tarımsal atık olup, yüksek silika içeriği sayesinde geopolimer üretiminde bağlayıcı malzeme olarak kullanılabilir. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde pirinç kabuğu külü, ekonomik ve çevresel açıdan avantajlı bir hammadde olarak öne çıkmaktadır. Pirinç kabuğu külü, alkali aktivatörlerle reaksiyona girerek güçlü bir geopolimer yapısı oluşturur. Ayrıca, bu malzeme, düşük yoğunluk ve yüksek termal direnç özelliklerine sahip olup, yangın dayanımı ve ısı yalıtımı gibi alanlarda kullanılabilecek potansiyele sahiptir. Pirinç kabuğu külü, tarımsal atıkların etkin bir şekilde geri dönüştürülmesi açısından da büyük önem taşımaktadır.

Silis dumanı, ferrosilikon ve silikon metal üretimi sırasında açığa çıkan ince partiküllü bir yan üründür ve geopolimer bağlayıcı olarak kullanılabilecek yüksek oranda amorf silika içermektedir. Silis dumanı, geopolimerizasyon sürecini hızlandırarak, polikondenzasyonun daha hızlı gerçekleşmesini sağlar ve ürünün mekanik dayanımını artırır. Ayrıca, silis dumanı bazlı geopolimerler, daha yoğun ve daha az gözenekli bir yapı

sunmaktadır. Silis dumanının diğer bağlayıcı malzemelerle birlikte kullanılması, malzemenin genel performansını iyileştirir ve özellikle dayanım açısından avantajlar sağlar.

Kırmızı çamur, boksit cevherinin işlenmesiyle elde edilen bir atık malzemedir ve yüksek oranda alümina içermektedir. Boksit işleme endüstrisi tarafından büyük miktarlarda üretilen bu malzeme, çevresel açıdan büyük bir sorun teşkil eder. Ancak, kırmızı çamur, geopolimerizasyon süreçlerinde bağlayıcı malzeme olarak kullanılabilen potansiyele sahiptir. Kırmızı çamur bazlı geopolimerler, yüksek mekanik dayanım ve kimyasal dirence sahip olabilirler. Ayrıca, kırmızı çamurun kullanımı, bu malzemenin depolanmasından kaynaklanan çevresel sorunları azaltmak için sürdürülebilir bir çözüm sunar. Kırmızı çamurun diğer atık malzemelerle birleştirilmesi, özellikle geopolimer üretiminde olumlu sonuçlar verir.

Volkanik tuf ve doğal puzolanlar, jeotermal süreçler sırasında oluşan ve yüksek silika ve alümina içeren doğal alüminosilikat malzemelerdir. Bu malzemeler, geopolimer üretiminde çevre dostu ve sürdürülebilir bağlayıcılar olarak kullanılabilirler. Doğal puzolanlar, alkali aktivatörlerle reaksiyona girerek geopolimerizasyon sürecini başlatır ve dayanıklı bir yapı oluşturur. Volkanik tuf bazlı geopolimerler hem yüksek sıcaklık dayanımı hem de kimyasal dayanıklılık açısından avantajlıdır. Bu malzemelerin kullanımı, doğal kaynakların sürdürülebilir bir şekilde değerlendirilmesini sağlar ve özellikle yapı mühendisliği ve yalıtım uygulamalarında tercih edilebilir.

Kısacası, geopolimerizasyonda kullanılan bağlayıcı malzemeler hem endüstriyel atıkların geri dönüştürülmesi hem de doğal kaynakların verimli bir şekilde kullanılması açısından önemli avantajlar sunar. Her bir bağlayıcı malzeme, geopolimerlerin fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerini farklı şekillerde etkiler ve çeşitli mühendislik uygulamaları için optimize edilebilir. Bu bağlamda, kullanılan bağlayıcıların özelliklerinin ve performanslarının daha fazla araştırılması, geopolimer teknolojisinin daha geniş bir yelpazede uygulanabilirliğini sağlayacaktır.

2.3. Alkali Aktivatörler

Geopolimer sentezinde kullanılan bazik çözeltilerdeki alkali bileşenler, periyodik tablodaki 1. grup elementlerden oluşmaktadır. Aktivasyon çözeltisi olarak yalnızca alkali hidroksit çözeltileri ya da alkali hidroksit-alkali silikat karışımları kullanılmaktadır. Alkali hidroksit çözeltilerinin silikat içeriği oldukça düşük olduğundan, çoğunlukla alkali silikat çözeltileriyle birlikte kullanılır. Bu kombinasyon, geopolimerlerin yapısal ve

özelliksel farklılıklar göstermesine neden olur, çünkü kullanılan aktifleştirici çözelti türüne bağlı olarak nihai ürünün özellikleri değişiklik gösterebilir (Khale ve Chaudhary 2007; Sagoe-Crentsil ve Weng, 2007).

Geopolimerizasyon süreci, alüminosilikat içeren bağlayıcı malzemelerin alkali aktivatörler yardımıyla çözülmesi ve ardından polikondenzasyon yoluyla üç boyutlu bir yapı oluşturması ile gerçekleşmektedir. Bu süreçte kullanılan alkali aktivatörler, geopolimerizasyonun başlamasını ve ilerlemesini sağlayan temel bileşenlerdir. Alkali aktivatörlerin kimyasal yapısı ve konsantrasyonu, geopolimer malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerini doğrudan etkiler. Sodyum ve potasyum bazlı hidroksitler, silikatlar ve karbonatlar gibi farklı alkali aktivatörler kullanılmaktadır.

Sodyum hidroksit (NaOH), geopolimerizasyonda en yaygın kullanılan alkali aktivatörlerden biridir. NaOH, alüminosilikat yapılarının çözülmesini sağlayarak silika ve alüminyum iyonlarının açığa çıkmasına neden olur. Bu iyonlar, daha sonra polikondenzasyon reaksiyonuna girerek geopolimer jelin oluşmasını sağlar. NaOH kullanımı, hızlı çözülme ve sertleşme süreçleri sunarak kısa sürede yüksek dayanım elde edilmesine olanak tanır. NaOH'nin konsantrasyonu, geopolimerin mekanik özelliklerini belirlemede önemli bir faktördür. Düşük konsantrasyonlarda reaksiyon hızı yavaş olurken, yüksek konsantrasyonlarda hızlı sertleşme ve yüksek dayanım elde edilir. Ancak aşırı yüksek konsantrasyonlar, malzemenin kırılgan olmasına neden olabilir.

Potasyum hidroksit (KOH), NaOH'e benzer şekilde geopolimerizasyon sürecini başlatan güçlü bir alkali aktivatördür. KOH, NaOH'ye kıyasla daha yüksek bir baziklik seviyesine sahiptir ve bu nedenle reaksiyon hızı genellikle daha yüksektir. K bazlı geopolimerler, genellikle daha yüksek sıcaklık dayanımına sahiptir ve bu nedenle yüksek sıcaklık uygulamalarında tercih edilebilir. KOH'nin avantajlarından biri, K^+ iyonlarının daha büyük olması nedeniyle polikondenzasyon sürecinde daha geniş bir üç boyutlu yapı oluşturabilmesidir. Bu geniş yapılar, daha gözeneksiz ve yoğun bir matris oluşturur, bu da geopolimerin mekanik dayanımını artırır. Ancak KOH'nin maliyeti, NaOH'ye kıyasla daha yüksek olabilir, bu yüzden ekonomik açıdan değerlendirilmesi gereklidir.

Sodyum silikat (Na_2SiO_3), geopolimerizasyonda hem aktivatör hem de silika kaynağı olarak görev yapan önemli bir bileşendir. Na_2SiO_3 , NaOH gibi hidroksitlerle kombine edildiğinde, geopolimerizasyon tepkimeleri hızlanır ve daha dayanıklı bir ürün elde edilir. Na_2SiO_3 , çözünmüş silika ve sodyum iyonları sağlayarak geopolimer jelin yoğunluğunu artırır ve polikondenzasyon sürecine katkıda bulunur. Na_2SiO_3 'ün kullanım

oranı, geopolimerin mekanik dayanımı ve termal direncini belirleyici bir faktördür. Genellikle NaOH ile kullanıldığında, optimum bir performans elde edilir. Ayrıca, Na_2SiO_3 , ürünün sertleşme sürecini hızlandırdığı için hızlı üretim süreçlerinde tercih edilen bir alkali aktivatördür.

Potasyum silikat (K_2SiO_3), K bazlı bir alkali aktivatör olup, özellikle yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. K_2SiO_3 , Na_2SiO_3 'e benzer şekilde, polikondenzasyon sürecine katkıda bulunur ve daha yoğun bir geopolimer yapısı oluşturur. K_2SiO_3 'ün kullanımı, özellikle yangına dayanıklı yapı malzemeleri ve termal yalıtım ürünlerinde avantaj sağlar. K bazlı geopolimerler, genellikle Na bazlılara göre daha yüksek termal kararlılık ve daha düşük termal iletkenlik sergiler. Ancak K_2SiO_3 maliyeti, Na_2SiO_3 göre daha yüksek olduğu için, ekonomik açıdan değerlendirilmesi önemlidir. Yine de bu aktivatör, yüksek performans gerektiren projelerde etkin bir şekilde kullanılabilir.

Sodyum karbonat (Na_2CO_3), hidroksit ve silikatlara alternatif olarak kullanılan bir alkali aktivatördür. Na_2CO_3 , özellikle çevresel etkilerin azaltılmasına yönelik sürdürülebilir geopolimer üretiminde tercih edilebilir. Na_2CO_3 'ün kullanımı, daha düşük enerji gereksinimi ve çevresel etkileri azaltma potansiyeli ile öne çıkar. Na_2CO_3 , düşük çözünürlük oranına sahip olduğundan, geopolimerizasyon süreci diğer alkali aktivatörlere göre daha yavaş gerçekleşir. Bu da daha uzun kürleme süreleri gerektirebilir. Ancak bu malzeme, özellikle büyük projelerde veya yavaş sertleşmenin kabul edilebilir olduğu uygulamalarda tercih edilebilir. Na_2CO_3 bazlı geopolimerler, düşük mekanik dayanım ve termal kararlılık gerektiren uygulamalar için uygundur.

Potasyum karbonat (K_2CO_3), Na_2CO_3 'ün bir alternatifi olarak geopolimerizasyonda kullanılan bir diğer alkali aktivatördür. K_2CO_3 , özellikle düşük sıcaklık dayanımı gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. K_2CO_3 kullanımı, Na_2CO_3 'ye kıyasla daha hızlı bir geopolimerizasyon tepkimesi sağlar. Bununla birlikte, K_2CO_3 bazlı geopolimerler, genellikle düşük mekanik dayanım ve daha düşük kimyasal direnç özellikleri sergiler. Bu tür geopolimerler, çevresel sürdürülebilirlik açısından avantaj sağlayan projelerde kullanılabilir. Ayrıca, K_2CO_3 bazlı geopolimerler, enerji tasarrufu sağlamak için düşük sıcaklıklarda üretilen yapı malzemeleri için uygun bir seçenek olabilir.

Sonuç olarak, geopolimerizasyonda kullanılan alkali aktivatörlerin türü ve konsantrasyonu, nihai ürünün mekanik, termal ve kimyasal özelliklerini önemli ölçüde

etkilemektedir. Alkali aktivatörlerin doğru seçimi, istenilen performans özelliklerine göre belirlenmelidir. Na ve K bazlı hidroksitler, silikatlar ve karbonatlar gibi farklı aktivatörlerin kullanımı, geopolimerizasyon sürecinin verimliliğini artırarak sürdürülebilir yapı malzemelerinin geliştirilmesine katkı sağlar.

2.4. Geopolimerizasyonu Etkileyen Faktörler

Geopolimerizasyon süreci, birçok parametreden etkilenir ve bu faktörlerin her biri, son üründe gözlemlenen mekanik, kimyasal ve fiziksel özelliklerin belirlenmesinde kritik rol oynar. Bu parametreler, alkali çözeltinin bileşimi ve konsantrasyonu, başlangıç malzemesinin kimyasal yapısı ve mineralojik özellikleri, kür koşulları, bağlayıcı/aktivatör oranı, su içeriği ve katkı maddelerinin kullanımını içermektedir (Khale ve Chaudhary 2007).

Her bir faktör, geopolimerizasyon tepkimesinin kinetiğini ve ürünün nihai performansını doğrudan etkiler. Yüksek alkali konsantrasyonları, çözülme hızını artırarak jel oluşumunu hızlandırırken, düşük sıcaklıklar bu süreci yavaşlatabilir. Ayrıca, kullanılan atık malzemenin kimyasal bileşimi, çözülme aşamasındaki reaksiyonların verimliliğini belirler. Jel faz içindeki Si/Al oranı ve hammaddenin yapısı (amorf yapı) geopolimerizasyonu etkileyen önemli parametrelerdir (Fernández Pereira vd., 2009).

2.4.1. Alkali aktivatör tipi, konsantrasyonu ve katyon etkisi

Alkali aktivatör, geopolimerizasyon sürecinin başlangıcını tetikleyen ve alüminosilikat yapıları çözerek polikondenzasyonun başlamasını sağlayan temel bileşendir. Genellikle NaOH, KOH ve Na₂SiO₃ alkali aktivatör olarak kullanılır. Aktivatörün tipi ve konsantrasyonu, çözünme reaksiyonunun hızını ve iyonların jel haline geçme sürecini doğrudan etkiler. Daha yüksek alkali konsantrasyonları, çözülme hızını artırarak daha fazla silikat ve alüminat monomerinin açığa çıkmasını sağlar ve jel oluşumunu hızlandırır. Ancak çok yüksek konsantrasyonlar, reaksiyonların aşırı hızlanmasına ve yapı içinde homojen olmayan bölgelerin oluşmasına neden olabilir.

Geopolimerizasyon sürecinde alkali derişimi, reaksiyonlar ve ürün özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Aktivasyon çözeltisindeki silikat birimlerinin polimerizasyon derecesi ve alüminosilikatların çözünürlüğü, hidroksit iyonlarının derişimine bağlı olarak artmaktadır. Yüksek pH seviyelerinde küçük monomerik silikatlar baskın hale gelir ve bu silikatlar çözünebilir alüminyumla reaksiyona girerek daha güçlü bir yapı oluşumunu destekler (Khale ve Chaudhary, 2007; Zaharaki vd., 2010).

Alkali hidroksit derişimi artırıldığında, kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jeli içeren amorf yapıli geopolimerler baskın ürün olarak ortaya çıkmaktadır. Bu C-S-H jeli, geopolimer içindeki boşlukları doldurarak reaksiyona girmemiş parçacıklar ve diğer hidratlar arasında köprü görevi görür, böylece basınç dayanımını artırır (Khale ve Chaudhary, 2007). Na'nın yüksek olduğu çözeltiler, jel oluşumunu destekler ve Na, alüminosilikat jel içerisinde önemli bir rol oynar. Bu durum, üç boyutlu alkali-alüminosilikat-hidrat ($\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$) oluşumuna yol açarak geopolimerlerin dayanımını ve dayanıklılığını büyük ölçüde etkiler (Ruiz-Santaquiteria vd., 2012).

Aktivasyon çözeltilisine çözünebilir silisyum eklenmesi, geopolimer numunelerinin yapısal kararlılığını artırmaktadır. Ancak çok yüksek silisyum derişimlerinde bile amorf yapı korunur ve kristal faz gözlenmez. Çözünebilir silisyumun varlığı, reaksiyon mekanizmasını değiştirmese de daha amorf jel oluşumunu artırır. Silisyum derişimindeki artış, $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranını ve dolayısıyla polimerizasyon derecesini değiştirir. Yüksek mekanik özellikler elde etmek için bazı uçucu kül sistemlerinde yüksek silisyum derişimlerine ihtiyaç duyulabilir (Duxon vd., 2007'b).

Bununla birlikte, $\text{Na}_2\text{O}/\text{H}_2\text{O}$ oranı sabit tutulduğunda, çözünebilir silisyum derişimi arttıkça çözeltilinin pH değeri düşer ve viskozitesi artar. Bu, hammaddenin reaksiyon hızını azaltabilir ve özellikle uçucu kül içeren sistemlerde reaksiyona girmemiş parçacıkların varlığı mekanik performansı olumsuz etkileyebilir. Ancak bu reaksiyona girmemiş parçacıklar mikro agrega gibi davranarak dayanımı artırabilir (Duxon vd., 2007'b).

NaOH derişiminin artması, silisyum ve alüminyumun çözünmesiyle geopolimerin basınç dayanımını artırır. Ancak, OH^- derişiminin çok yüksek olması, alüminosilikat jel çökeleği nedeniyle erken aşamalarda düşük basınç dayanımına yol açabilir (Somna vd., 2011). Yüksek pH seviyelerinde geopolimer karışım viskoz kalırken, daha düşük pH seviyelerinde karışım daha az viskoz ve işlenebilir bir hale gelir (Khale ve Chaudhary, 2007).

Geopolimer sistemlerinin mikroyapısal gelişimini etkileyen önemli bir diğer faktör, aktivasyon reaksiyonunda yer alan katyon türüdür. Hammaddenin ağ yapısının çözülmesi ve silikat ve alüminatlardan küçük reaktif birimlerin sağlanması, reaksiyonun ilk aşamasında alkali bileşiklerin rolüyle kontrol edilir (Duxon vd., 2007'b). Alkali çözeltilinin hem derişimi hem de türü, hammaddede bulunan alüminyum ve silisyumun çözünmesini büyük ölçüde etkiler (Rattanasak ve Chindaprasirt, 2009). Teorik olarak,

KOH yüksek alkalitesine bağı olarak daha fazla çözme kapasitesine sahip olması beklenirken, pratikte NaOH silikat ve alüminat monomerlerini daha fazla çözdüğü görülmüştür (Duxon vd., 2007'b).

K eklenmesi çatlak oluşumunu azaltırken, NaOH kalsiyum hidrat oluşumunu engellemektedir (Khale ve Chaudhary, 2007). Reaksiyon kinetiği açısından iyon büyüklüğü de önemli bir faktördür. Örneğin, potasyum iyonlarının (K^+) daha büyük silikat oligomerler oluşturma eğilimi bulunurken, sodyum iyonları (Na^+) daha fazla zeolitik yapı oluşturma yeteneğine sahiptir. Bu durum, Na^+ 'nın K^+ 'dan daha küçük olmasına ve jel yapı içerisinde daha kolay hareket edebilmesine bağı olabilir. Genel olarak, OH^- iyonu bir katalizör olarak işlev görürken, yapısal negatif yükü dengeleyen alkali metal katyonu ise yapı oluşturma elementi olarak rol oynar (Duxon vd., 2007'b).

OH^- iyonu, hammaddedeki Si^{4+} ve Al^{3+} iyonlarının çözünmesine katkıda bulunur (Khale ve Chaudhary, 2007). Ayrıca, geopolimerlerin fiziksel özelliklerini belirlemede kalsiyumun (Ca^{+2}) miktarı ve ortama hangi şekilde eklendiği önemli bir etkidir. Ca^{+2} etkisi, aktivasyon çözeltisinin pH'ını değiştirmesi ve farklı kalsiyum içerikli çökeleklerin oluşmasına yol açar. Bu bağlamda, çözeltideki çözünmüş silisyum, kalsiyum çökeleklerinin oluşumunu etkileyen kritik bir rol oynar. Uçucu küle yüksek derecede bazik aktivasyon çözeltilerinin eklenmesi, küle bulunan kalsiyumun hızla çözünmesine ve $Ca(OH)_2$ olarak çökmesine neden olur. Bu durum, OH^- iyonlarının ortamdan uzaklaşmasına ve dolayısıyla aktivasyon çözeltisinin pH'ının düşmesine yol açar (van Deventer vd., 2007; Lyu vd., 2013'b).

2.4.2. Bağlayıcı malzemenin kimyasal ve mineralojik yapısı

Geopolimerizasyon sürecinde kullanılan başlangıç malzemesinin kimyasal ve mineralojik yapısı, reaksiyonun etkinliğini belirlemektedir. Uçucu kül, yüksek oranda amorf silika ve alümina içerdiği için yaygın olarak kullanılan bir atık malzemedir. Cüruf ve diğer endüstriyel atıklar da benzer şekilde yüksek alüminosilikat içerir. Amorf yapıya sahip malzemeler, kristal yapıya sahip olanlara göre alkali çözeltiyle daha hızlı çözünür ve daha etkin bir jel oluşumu sağlar. Malzemenin içerisindeki serbest silika ve alüminat oranları, geopolimerin kimyasal yapısının belirlenmesinde önemli rol oynar. Ayrıca başlangıç malzemesinin tane boyutu da reaksiyon hızını etkiler; daha ince taneli malzemeler, çözünme hızını artırır ve daha homojen bir yapı sağlar.

Geopolimer oluşumunda başlangıç malzemesi, sistemin mikroyapısını ve nihai ürünün performansını belirlemede kritik bir rol oynamaktadır. Silis ve alümina içeren

amorf yapıdaki malzemeler, geopolimer üretimi için uygun kaynaklar arasında yer alır. Geopolimerizasyon sürecinde genellikle puzolanlar, çimento benzeri destekleyici malzemeler, kimyasallar ve mineral katkıları kullanılmaktadır. Uçucu kül, cüruf ve pirinç kabuğu külü gibi silisyum açısından zengin hammaddeler, kaolinit ve bentonit gibi alüminyum açısından zengin killeri, geopolimer üretiminde öncelikli hammaddeler arasında sayılabilir. Hem doğal malzemeler (kaolinit, stilbit vb.) hem de endüstriyel yan ürünler (uçucu kül, fırın cürufu vb.) ekonomik ve çevresel açıdan büyük avantajlar sunmaktadır. Endüstriyel yan ürünlerin kullanımı, maliyetleri düşürürken aynı zamanda "yeşil" üretim süreçlerine katkıda bulunarak sürdürülebilir kalkınmayı destekler (Khale ve Chaudhary, 2007; He vd., 2012).

Geopolimerlerin nihai özellikleri, kullanılan hammaddeye bağlı olarak farklılık göstermektedir. Hammaddelerin çözünürlüğü, amorf ve reaktif olmayan kristal fazlarda, alkali çözeltilerle olan etkileşimlerinde değişkenlik oluşturur. Bu değişkenlik, kür süresini ve mekanik özellikleri etkileyerek pratik uygulamalarda önem kazanır (He vd., 2012). Örneğin, yüksek basınç dayanımı gerektiren uygulamalarda reaktivitesi yüksek hammaddelerin kullanılması gerekir (Khale ve Chaudhary, 2007). Yüksek reaktiviteye sahip hammaddeler, hızlı çözünme, daha yüksek derecelerde geopolimerizasyon ve daha kısa reaksiyon süresi sağlar (He vd., 2012).

Hammaddelerin reaktivitesi aynı zamanda parçacık boyutuna bağlıdır. İnce parçacıklar daha geniş bir yüzey alanına sahip oldukları için daha yüksek reaktivite gösterirler. Bu da silisyum ve alüminyumun alkali ortamda daha hızlı çözünmesini sağlar ve dolayısıyla basınç dayanımını artırır. Özellikle uçucu küllerin öğütülmesi, geopolimerizasyon süreçlerini hızlandırabilir. Kömürlerin yanma sıcaklıklarının yüksek olması, ince parçacık boyutlarında uçucu küllerin oluşmasına neden olarak mekanik performansı olumlu yönde etkileyebilir (Díaz vd., 2010; Phoo-ngernkham vd., 2014).

Geopolimer ürünlerinin kalitesini etkileyen bir diğer faktör, reaktif olmayan ve reaksiyona girmemiş fazların miktarı ve boyut-şekil gibi özellikleridir. Bu fazlar, aktif bir dolgu malzemesi gibi işlev görebilir ve geopolimerin dayanımını artırabilir. Kaolin ve metakaolin gibi kil bazlı malzemeler, yüksek basınç dayanımına sahip geopolimerlerin üretiminde kullanılır. Metakaolin, uçucu külden daha yüksek çözünürlük kapasitesine sahiptir ve bu da mekanik performansı iyileştirir (Khale ve Chaudhary, 2007). Ancak, metakaolin nispeten pahalı bir hammadde olduğundan, kullanım alanları sınırlı olabilir (Weil vd., 2007).

2.4.3. Kür sıcaklığı ve süresi

Geopolimerizasyon sürecinde kür sıcaklığı ve süresi, ürünün mekanik dayanımı ve dayanıklılığı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yüksek sıcaklıklar, çözülme ve yoğunlaşma reaksiyonlarını hızlandırarak daha hızlı bir sertleşme ve dayanım artışı sağlar. Kür sıcaklığı genellikle 60°C ile 80°C arasında tutulur ve bu sıcaklık aralığında, geopolimerizasyon süreci daha hızlı gerçekleşir. Ancak çok yüksek sıcaklıklar, reaksiyonların aşırı hızlanmasına ve ürünün yapısal bütünlüğünün bozulmasına yol açabilir.

Kür süresi de önemli bir faktördür; daha uzun kürleme süreleri, polikondenzasyonun tamamlanmasına olanak tanır ve ürünün nihai dayanımını artırmaktadır. Mekanik dayanıma ek olarak kimyasal ve termal direnci gibi özellikler, kürlenme sıcaklığına ve süresine bağlı olarak değişir. Bazı durumlarda, özellikle yüksek sıcaklık dayanımı veya daha yoğun bir yapı elde etmek amacıyla ısıl kürleme uygulanabilir. Yüksek sıcaklıkta kürlenmiş geopolimerler, daha kısa sürede yüksek mekanik dayanım kazandığı gibi, kimyasal dayanıklılığı da artırılmış olur. Kürleme koşulları, nihai ürünün performansını optimize etmek için dikkatle kontrol edilmelidir.

Geopolimer üretiminde kür sıcaklığı ve süresi, oluşan ürünlerin yapısı ve performansı üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Kür sıcaklığının belirli bir seviyeye kadar artırılması, geopolimerizasyon reaksiyonlarını hızlandırarak reaksiyonun tamamlanmasına katkıda bulunur. Yüksek sıcaklıklar, hammaddelerin çözünmesini kolaylaştırarak reaksiyona giren birimlerin miktarını artırır ve böylece oluşan polimer ağının daha hızlı oluşmasına olanak tanır (Khale ve Chaudhary, 2007; Fernández Pereira vd., 2009). Özellikle kür süresinin başlarında sıcaklığın artırılması, basınç dayanımının da artmasına neden olur. Bu durum, reaksiyon ürünlerinin miktarının yüksek sıcaklıklarda daha fazla olmasından ve geopolimerizasyon derecesinin hızla artmasından kaynaklanır.

Bununla birlikte, ilerleyen süreçlerde geopolimerizasyon derecesi sabit hale gelir ve reaksiyon ürünlerinin kalitesi daha baskın hale gelmektedir. Düşük sıcaklıklarda kür edilen geopolimerler daha yavaş oluşur, ancak düşük gözeneklilikleri sayesinde daha kaliteli bir yapıya sahip olurlar (Rovnanik, 2010; Lyu vd., 2013). Kür sıcaklığı 90°C'nin altında olan geopolimerler genellikle amorf yapıya sahip olurken, 150-200°C arasında sentezlenenler zeolit benzeri kristal yapılar oluşturur (Ferone vd., 2013).

Kür süresi de geopolimer ürünlerinin mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Uzun kür süreleri, özellikle basınç dayanımı açısından polimerizasyon sürecini

geliştirir. Kür işleminin ilk 24 saatinde basınç dayanımı hızla artar, ancak 24 saatten sonra bu artış daha yavaş gerçekleşir ve 48 saatten daha uzun kür işlemlerinin dayanım üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı gözlemlenmiştir (Davidovits, 2008; Khale ve Chaudhary, 2007). Yüksek sıcaklıkta uzun süreli kür işlemi ise yapısal bozulmalara neden olabilir. Yüksek sıcaklıkta uzun süre maruz kalan geopolimerler, dehidratasyon ve jel yapısının büzülmesine bağlı olarak aşırı büzülme gösterir ve basınç dayanımı azalabilir. Ayrıca, kristal fazlar uzun kür sürelerinden etkilenmez, bu da dayanımdaki farklılıkların amorf fazlardan kaynaklandığını ortaya koyar (Khale ve Chaudhary, 2007; Fernández Pereira vd., 2009).

2.4.4. Bağlayıcı/aktivatör oranı

Geopolimer üretiminde kullanılan karışımın bağlayıcı/aktivatör oranı, malzemenin işlenebilirliği ve nihai performansı üzerinde kritik bir etkiye sahiptir. Düşük bağlayıcı/aktivatör oranları, karışımın daha akışkan hale gelmesini sağlayarak dökme işlemini kolaylaştırır. Ancak bu durumda fazla sıvı miktarı, karışımın gözenekliliğini artırarak mekanik dayanımı ve dayanıklılığı olumsuz yönde etkileyebilir. Aşırı gözenekli yapılar, basınç dayanımının düşmesine ve malzemenin uzun ömürlülüğünün azalmasına yol açabilir (Khale ve Chaudhary, 2007).

Diğer taraftan, yüksek bağlayıcı/aktivatör oranları, daha yoğun ve sağlam bir yapı sağlayarak sertleşmiş geopolimerin mekanik özelliklerini iyileştirir. Fakat bu durumda karışımın işlenebilirliği azalır ve homojen bir karışım elde etmek zorlaşabilir, bu da yerleştirme sırasında sıkıntılara yol açabilir (Duxon vd., 2007). Bu nedenle, bağlayıcı/aktivatör oranı, geopolimerizasyon sürecinde malzemenin hem taze hem de sertleşmiş özelliklerini optimize etmek açısından dikkatle kontrol edilmesi gereken bir parametredir. İdeal oran, kullanılan hammaddenin cinsine ve nihai ürünün beklenen özelliklerine göre ayarlanmalıdır (Duxon vd., 2007; Fernández-Jiménez vd., 2007). Doğru ayarlamalar yapıldığında, geopolimerin mekanik performansı, dayanıklılığı ve çevresel direnci önemli ölçüde artırılabilir.

2.4.5. Su/geopolimer oranı

Geopolimer üretiminde kullanılan suyun miktarı, reaksiyon hızını ve polikondenzasyon süreçlerini doğrudan etkileyen önemli bir faktördür. Su, alüminosilikatların çözülmesi ve oluşan monomerlerin taşınması için gereklidir. Ancak su miktarının fazla olması, jele yoğunlaşma aşamasında fazlalık suyun hapsolmesine ve

bu durumun gözenekliliği artırmasına yol açabilir. Artan gözeneklilik ise geopolimer yapısının mekanik dayanımını olumsuz etkileyebilir (Khale ve Chaudhary, 2007).

Optimum su/geopolimer oranı, alüminosilikatların çözünme aşamasını desteklerken, jelin yoğunlaşmasını da sağlamaktadır. Su oranının düşük olması, reaksiyonların daha hızlı ilerlemesine ve daha yoğun bir yapı elde edilmesine katkıda bulunur. Bununla birlikte, su içeriğinin aşırı düşük olması durumunda reaksiyon yavaşlayabilir, bu da homojen olmayan bir dağılıma ve dolayısıyla yapısal kusurlara neden olabilir (Fernández Pereira vd., 2009). Dolayısıyla, geopolimerizasyon sürecinde su miktarının dikkatlice ayarlanması, dayanıklı ve yoğun bir yapı elde edilmesi açısından kritik bir rol oynar (Rattanasak ve Chindapasirt, 2009).

2.4.6. pH değeri

Geopolimerizasyon süreci, yüksek pH'lı bir ortamda gerçekleşir ve bu yüksek pH, alüminosilikat yapılarının çözülmesini hızlandırarak reaksiyonun verimliliğini artırır. Alkali aktivatörler kullanılarak sağlanan bu yüksek pH ortamı, alüminyum ve silisyum iyonlarının serbest hale gelmesini ve çözeltide reaksiyona girmesini sağlar (Duxson vd., 2007). pH seviyesinin alkali çözeltinin miktarıyla doğrudan bağlantılı olduğu bu süreçte, uygun bir pH seviyesinin sağlanması büyük önem taşır.

Yüksek pH seviyeleri, çözünme hızını ve polimerleşme sürecini hızlandırarak daha yoğun bir yapı oluşumuna katkıda bulunur (Khale ve Chaudhary, 2007). Ancak, aşırı yüksek pH seviyeleri malzemenin kırılganlaşmasına ve mikroyapıda homojen olmayan bölgelerin oluşmasına neden olabilir. Bu, ürünün mekanik dayanımını düşürebileceği gibi, uzun vadede yapısal performansını da olumsuz etkileyebilir. Dolayısıyla, pH değerinin optimum seviyede tutulması hem malzemenin dayanımını artırmak hem de istenilen mekanik ve kimyasal özellikleri elde etmek açısından kritik bir faktördür (Provis ve Bernal, 2014).

2.4.7. Reaksiyon süresi

Geopolimerizasyonun tamamlanma süresi, malzemenin mekanik dayanımı ve sertleşme hızını doğrudan etkileyen önemli bir faktördür. Reaksiyon süresi, kullanılan alkali aktivatörün türüne, başlangıç malzemesinin yapısına ve uygulanan kür koşullarına bağlı olarak değişir. Hızlı sertleşme, üretim süreçlerini hızlandırarak kısa sürede yüksek dayanım elde edilmesine olanak tanır. Ancak bu durumda, oluşan yapının homojenliği riske girebilir ve bu da nihai ürün performansını olumsuz etkileyebilir. Daha uzun reaksiyon süreleri, homojenliği ve dayanımı artırarak yapının kalitesini iyileştirir, ancak

Üretim sürecini yavaşlatabilir (Khale ve Chaudhary, 2007; He vd., 2012). Bu nedenle, optimum reaksiyon süresi, üretim ve kullanım gereksinimlerine göre dikkatlice belirlenmelidir. Geopolimerizasyon süresini kontrol eden bir diğer önemli etken de kullanılan alkali aktivatörün bileşimi ve derişimidir. Örneğin, yüksek konsantrasyonlu alkali çözeltiler, hızlı çözünmeyi sağlayarak reaksiyon sürelerini kısaltabilir, fakat bu durumda yapısal bütünlük ve dayanımda istenmeyen etkiler ortaya çıkabilir (Duxon vd., 2008; Fernndez Pereira vd., 2009). Uygulama alanına bağlı olarak, bu faktörlerin dengelenmesi gerekmektedir. Yüksek mekanik dayanım ve kimyasal direnç gerektiren mühendislik uygulamaları için, uygun alkali aktivatör konsantrasyonu ve kr koşulları özenle seçilmelidir (Lyu vd., 2013b; Rovnanik, 2010). Buna karşılık, yapısal olmayan uygulamalarda daha esnek üretim koşulları kabul edilebilir, bu da üretim maliyetlerini ve süresini azaltabilir (Davidovits, 2007'a). Uygulama gereksinimlerine göre optimum reaksiyon süresi ve koşulları belirlemek, istenen performansı elde etmek için kritik bir rol oynamaktadır.

Tüm bunlar değerlendirildiğinde geopolimerizasyonu etkileyen faktörler, nihai ürünün farklı uygulamalarda kullanılabilirliğini de doğrudan etkilemektedir. Yüksek mekanik dayanım ve kimyasal direncin gerekli olduğu mühendislik uygulamaları için, optimum alkali aktivatör konsantrasyonu ve uygun kr koşulları sağlanmalıdır. Yapısal olmayan uygulamalarda ise daha esnek üretim koşulları kabul edilebilir. Bu nedenle, geopolimerizasyonun nihai ürün performansını etkileyen tüm faktörler, kullanım alanlarına göre dikkatlice değerlendirilmelidir.

2.5. Geopolimer Harçların zellikleri

Geopolimer harçlar, geleneksel imento bazlı malzemelere kıyasla evre dostu ve yüksek performanslı bir yapı malzemesi alternatifini sunmaktadır. Bağlayıcı olarak uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi atık malzemeler kullanılırken, alkali aktivatörlerle reaksiyona sokularak elde edilirler. Geopolimer harçlar, dayanım, kimyasal direnç, termal performans ve sürdürülebilirlik açısından birçok avantaja sahiptir. Bu zellikler, onları inşaat sektöründe cazip bir alternatif haline getirmektedir (Davidovits, 2008; Provis ve van Deventer, 2014).

Geopolimer harçların en dikkat çekici özelliklerinden biri, yüksek mekanik dayanım kapasiteleridir. Alüminosilikat yapılarının çözünmesi ve ardından polikondenzasyon tepkimeleri sonucunda elde edilen yoğun, üç boyutlu yapı, malzemenin yüksek basınç dayanımı sağlamasına olanak tanır. Bu bağlayıcı yapıların

doğru bileşenlerle ve uygun kür koşulları altında elde edilmesi durumunda, geopolimer harçlar çimento bazlı malzemelere kıyasla daha yüksek basınç dayanımı gösterebilirler. Örneğin, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen geopolimer harçlar, yüksek dayanım gerektiren altyapı projeleri için uygundur. Ancak mekanik dayanım, kullanılan malzemelerin türü, alkali aktivatörlerin konsantrasyonu ve kürleme koşulları gibi faktörlere bağlı olarak değişebilir (Khale ve Chaudhary, 2007; Fernández-Jiménez ve Palomo, 2005).

Geopolimer harçlar, sülfat, asit ve klor iyonları gibi agresif kimyasallara karşı yüksek direnç sergilemektedir. Çimento bazlı malzemelerle karşılaştırıldığında, bu malzemeler daha yoğun yapıya ve düşük gözenekliliğe sahiptir. Polikondenzasyon tepkimeleri sonucunda oluşan güçlü kimyasal bağlar, geopolimer malzemelerin dış etkenlere karşı dayanıklılığını artırır. Bu özellikler, deniz suyuna maruz kalan yapılar veya kimyasal atık sahaları gibi zorlu koşullarda kullanımı için geopolimerleri ideal bir seçim haline getirir. Kimyasal direncin yüksek olması, yapıların ömrünü uzatarak maliyet etkin çözümler sunmaktadır (Provis ve Van Deventer, 2014; Rovnaník, 2010).

Geopolimer harçlar, yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklı yapıları ile dikkat çeker. Çimento bazlı malzemeler yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerini kaybederken, geopolimerler 1000°C'ye kadar olan sıcaklıklara dayanabilir ve özelliklerini koruyabilirler. Bu özellik, özellikle yangına dayanıklı yapı elemanlarında veya yüksek sıcaklık gerektiren endüstriyel uygulamalarda geopolimerlerin tercih edilmesini sağlar (Lloyd ve Rangan, 2010). Termal performans, kullanılan alüminosilikat yapının türüne ve bağlayıcı özelliklerine bağlı olarak değişiklik gösterebilir (Provis ve Van Deventer, 2014).

Geopolimer harçlar, düşük ısı iletkenliği sayesinde iyi bir ısı yalıtım malzemesi olarak da kullanılabilir. Alüminosilikat matrisinin yoğunluğu ve düşük gözeneklilik oranı, geopolimer harçların ısı iletkenlik katsayısının düşük olmasını sağlar. Bu durum, enerji verimliliğini artırarak, iç mekanlarda sıcaklık kontrolünü kolaylaştırır ve enerji maliyetlerini düşürmektedir. Aynı zamanda düşük ısı iletkenliği, yangına karşı direnci artırarak yapıların güvenliğini artırır (Fernández-Jiménez vd., 2007).

Geopolimer harçların yoğunluğu ve gözeneklilik oranı, malzemenin mekanik ve kimyasal performansını doğrudan etkilemektedir. Düşük gözeneklilik, su emme oranını azaltır ve kimyasal direnci artırırken, yüksek yoğunluk mekanik dayanımı artırır. Kullanılan bağlayıcı malzemeler ve alkali aktivatörlerin konsantrasyonu gibi faktörler bu

özellikleri etkiler. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen geopolimerler, genellikle düşük gözenekli ve yüksek yoğunluklu yapılar oluşturur. Bu özellikler, dış etkenlere karşı uzun süre dayanıklılık sağlar (Khale ve Chaudhary, 2007).

Geopolimer harçlar, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Geleneksel PC üretiminde büyük miktarda enerji harcanırken ve CO₂ salınımı gerçekleşirken, geopolimer üretiminde endüstriyel atıkların kullanılması ve düşük sıcaklıklarda üretim yapılması, karbon ayak izini önemli ölçüde azaltır (Davidovits, 2008). Bu özellik, sürdürülebilir inşaat malzemeleri arayışında olan endüstriler için geopolimer harçları cazip bir alternatif haline getirir. Atık malzemelerin yerel kaynaklardan temin edilmesi de sürecin çevresel sürdürülebilirliğini artırır (Provis ve Van Deventer, 2014).

Geopolimer harçlar, düşük su emme oranı, kimyasal maddelere karşı yüksek direnç ve termal dayanıklılık gibi özellikleri sayesinde uzun ömürlü ve dayanıklı malzemelerdir. Zorlu çevresel koşullarda dahi yapısal bütünlüğünü koruyarak, uzun süreli kullanım avantajı sunar. Bu da altyapı projelerinde geopolimerlerin tercih edilmesini sağlar (Rovnanik, 2010).

Geopolimer harçlar, yüksek mekanik dayanım, kimyasal direnç, termal performans ve düşük karbon ayak izi gibi özellikleri sayesinde inşaat sektöründe çevre dostu ve dayanıklı bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Hem teknik performans hem de sürdürülebilirlik açısından büyük avantajlar sunan bu malzemeler, gelecekte inşaat sektöründe daha geniş kullanım alanı bulacaktır.

2.6. Literatür Taraması

Geopolimer bağlayıcılar, PC'ye kıyasla birçok teknik avantaj sunmaktadır. Literatürde, bu bağlayıcıların erken ve daha yüksek dayanım sağladığı, agresif kimyasallara ve donma-çözülme döngülerine karşı daha iyi dayanıklılık gösterdiği ve agrega-matris aderansının daha güçlü olduğu bildirilmiştir (Shi vd., 2015). Bu özellikler, geopolimer betonları, özellikle dayanıklılık gerektiren yapı projelerinde öne çıkarmaktadır. Örneğin, deniz yapıları, endüstriyel zeminler ve kimyasal tesisler gibi agresif çevresel koşullara maruz kalan uygulamalarda, geopolimer betonun uzun ömürlü performansı onu ideal bir alternatif haline getirmektedir. Geopolimer betonun bir diğer avantajı, kuruma büzülmesinin çimento betonuna kıyasla çok daha az olmasıdır. Kuruma büzülmesi, betonda çatlak oluşumuna yol açabilen bir faktör olduğundan, bu özellik, özellikle kalın ve ağır kısıtlanmış yapı elemanlarında geopolimer betonun kullanımını

teşvik eder. Bu düşük büzülme, geopolimerin üç boyutlu ağ yapısının poli-yoğuşma reaksiyonlarına dayanmasından kaynaklanmaktadır (Gharzouni vd., 2016). Bu ağ yapısı, betondaki matrisin daha stabil olmasını sağlarken, çatlak oluşumunu ve yayılmasını minimize eder.

Geopolimerlerin birçok avantajı bulunmasına rağmen, bazı dezavantajları da vardır. Bu dezavantajlar, geopolimerlerin geniş çapta benimsenmesi ve kullanılması önünde engeller oluşturabilir. Geopolimerlerin üretimi, genellikle karmaşık ve kontrollü bir süreç gerektirir. Üretim sürecinde kullanılan hammaddelerin, özellikle uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi atık materyallerin kimyasal bileşimi, bölgeden bölgeye değişiklik gösterebilir. Bu değişkenlik, kalite kontrol açısından zorluklara yol açar (Pacheco-Torgal vd., 2015). Geopolimer betonun üretiminde istikrarlı ve öngörülebilir performans elde etmeyi zorlaştırabilir. Ayrıca, alkali aktivatörlerin doğru oranlarda kullanılması gerekliliği, üretim sürecini hassas hale getirir ve bu da pratikte zorluklar yaratabilir. Malzeme kalitesinin standart hale getirilmesi, geopolimerlerin yaygın kullanımını sınırlayan bir faktördür.

Geopolimerlerin uzun vadeli performansı hakkında sınırlı bilgi mevcuttur. Geleneksel betonlar, yüzyıllar boyunca kullanılmış ve dayanıklılığı kanıtlanmıştır. Ancak geopolimerlerin kullanım geçmişi daha kısa olduğundan, bu malzemelerin on yıllar boyunca nasıl bir performans sergileyeceği tam olarak bilinmemektedir. Özellikle farklı iklim koşulları, nem oranları ve kimyasal maruziyet durumlarında, geopolimerlerin nasıl tepki vereceği üzerine daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir.

Geopolimerlerin üretimi sırasında kullanılan alkali aktivatörler, çevre ve insan sağlığı için potansiyel riskler oluşturabilir. Yüksek pH seviyelerine sahip bu kimyasalların yanlış kullanımı, cilt tahrişine veya daha ciddi sağlık sorunlarına yol açabilir. Ayrıca, bu kimyasalların çevreye yanlış şekilde atılması durumunda, su kaynaklarına zarar verme riski bulunmaktadır. Bu durum, geopolimerlerin çevresel olarak sürdürülebilir bir çözüm olup olmadığı konusunda soru işaretleri yaratabilir.

Diğer bir önemli dezavantaj, geopolimer betonların taze haldeki işlenebilirliğinin çimentolu betonlara kıyasla daha düşük olmasıdır. Taze betonun işlenebilirliği, betonun yerleştirilmesi, sıkıştırılması ve yüzey düzeltilmesi açısından kritik bir özelliktir. İşlenebilirlik sorunu, özellikle karmaşık kalıp tasarımlarında ve dar alanlarda uygulama zorluğuna neden olabilir. Ayrıca, geopolimer betonlarda kullanılan sodyum bazlı aktivatörler, çiçeklenme sorunlarına yol açabilir. Çiçeklenme, beton yüzeyinde beyaz

leke şeklinde görülen tuz birikintileridir ve estetik açıdan istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle, geopolimer beton uygulamalarında bu olumsuz etkilerin minimize edilmesi için özel karışım tasarımları ve uygulama teknikleri geliştirilmelidir.

Sonuç olarak, geopolimer betonlar, geleneksel çimento betonlarına kıyasla birçok avantaja sahip olmasına rağmen, bazı teknik zorluklar da içermektedir. Geopolimer teknolojisinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması, bu zorlukların aşılmasıyla mümkün olacaktır. Bu bağlamda, malzeme seçiminden üretim süreçlerine kadar tüm aşamalarda dikkatli bir optimizasyon ve kalite kontrolü gerekmektedir. Geopolimer betonların başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için bu dezavantajların anlaşılması ve uygun çözümlerin geliştirilmesi, gelecekteki araştırmaların odak noktası olmalıdır.

Geopolimer harçlarının detaylı bir literatür taramasıyla açıklanması, bu malzemelerin daha geniş bir perspektifte değerlendirilmesini sağlar. Literatürdeki çalışmalar, geopolimer harçlarının mekanik, kimyasal ve termal özellikleriyle ilgili çeşitli bulgular ortaya çıkarmaktadır. Aşağıdaki paragraflarda atık malzeme kullanılan harçlar ve geopolimerler ile ilgili literatür çalışmaları detaylandırılmıştır.

2.6.1. Taguchi yöntemi

Taguchi yöntemi, proses parametrelerinin optimizasyonu ve değişkenlerin çıktılar üzerindeki etkilerinin incelenmesi için yaygın olarak kullanılan bir deney tasarım yöntemidir. Japon mühendis Genichi Taguchi tarafından geliştirilen bu yöntem, özellikle üretim süreçlerinde kalite iyileştirmesi sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Temel amacı, girdi faktörlerindeki değişkenliklerin sonuç üzerindeki olumsuz etkilerini en aza indirmek ve kaliteyi artırmaktır (Taguchi, 1986). Taguchi yöntemi, deney sayısını minimize ederek, maliyet ve zaman açısından verimli bir optimizasyon sağlar. Aynı zamanda, bu yöntem sayesinde belirli parametrelerin çıktı üzerindeki etkileri sistematik olarak analiz edilebilir ve en uygun proses koşulları belirlenebilir (Sharifi vd., 2020).

Geopolimer harç üretiminde kullanılan parametreler genellikle malzeme türü, alkali aktivatörün konsantrasyonu, kür süresi ve sıcaklık gibi değişkenlerdir. Bu parametrelerin her biri, nihai ürünün mekanik dayanımı, kimyasal direnci ve gözeneklilik gibi özelliklerini etkiler. Dolayısıyla, geopolimerizasyon sürecinde bu faktörlerin optimizasyonu, nihai ürün kalitesini artırmada kritik bir rol oynar. Taguchi yöntemi, bu tür çok sayıda parametre ve kombinasyonun incelenmesi gereken durumlar için ideal bir yaklaşımdır.

Literatürde, Taguchi yöntemi ile geopolimer üretim parametrelerinin optimizasyonuna dair çeşitli çalışmalar yer almaktadır. Örneğin, Onoue vd. (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, uçucu kül bazlı geopolimerlerin mekanik özelliklerini optimize etmek amacıyla Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Bu çalışmada, NaOH derişimi, kür sıcaklığı ve kür süresi gibi parametrelerin basınç dayanımı üzerindeki etkileri incelenmiş ve optimum koşullar belirlenmiştir. Çalışma, NaOH derişiminin en önemli parametre olduğunu ve kür sıcaklığının da önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Benzer şekilde, Sheelavantar vd. (2024) da Taguchi yöntemi kullanarak, farklı alkali aktivatör konsantrasyonları ile yapılan geopolimer harçların mekanik özelliklerini optimize etmişlerdir. Çalışma sonucunda, optimum NaOH ve Na₂SiO₃ oranlarının belirlenmesi ile basınç dayanımında önemli bir iyileşme sağlanmıştır.

Olivia ve Nikraz (2012), Taguchi yöntemi kullanılarak uçucu kül bazlı geopolimer beton karışımlarının mekanik özelliklerinin ve dayanıklılığının optimizasyonuna odaklanmaktadır. Alkalın aktivatörleri olarak NaOH ve Na₂SiO₃ kullanıldı. Karışım tasarımını agrega içeriği, alkali aktivatör/uçucu kül oranı, Na₂SiO₃/NaOH oranı ve kürleme yöntemini içeren dört faktörü göz önünde bulundurdu. 28 günde 55 MPa basınç elde edildi. Optimal karışımlar, geleneksel betona kıyasla daha yüksek gerilme ve eğilme dayanımı, daha düşük genişleme ve kurutma büzülmesi gösterdi. Taguchi yöntemi kullanılarak optimize edilen geopolimer beton, geleneksel betona uygun bir alternatiftir.

Mehta vd. (2017), geopolimerlerin basınç dayanımını etkileyen faktörleri araştırmak için Taguchi yöntemini kullanmıştır. En uygun tasarımı belirlemek için sinyal-gürültü oran grafiklerini ve çeşitli faktörlerin basınç dayanımı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için ANOVA'yı kullandılar.

Addis vd. (2023), uçucu kül esaslı geopolimer bağlayıcılar için optimal karışım oranlarını belirlemek amacıyla Taguchi optimizasyon yöntemini kullanmıştır. Alkali aktivatör/bağlayıcı oranı, NaOH konsantrasyonu, Na₂SiO₃/NaOH kütle oranı ve kür süresi gibi parametreler incelenmiştir. Optimum koşullar, 0.46 alkali aktivatör/bağlayıcı oranı, 14 M NaOH konsantrasyonu, 1.5 Na₂SiO₃/NaOH oranı ve 72 saat kürleme süresi olarak belirlenmiştir. Bu koşullar altında, maksimum basınç dayanımı 24.96 MPa ve yarıлма çekme dayanımı 4.40 MPa elde edilmiştir. Numunelerin görünen yoğunluğu 1835 kg/m³ olarak kaydedilmiştir. ANOVA sonuçları, kür süresi ve NaOH konsantrasyonunun mekanik özellikler üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Doğrulama testleri, basınç dayanımlarında %4.1'lik değişim göstermiştir.

Taguchi yönteminin kullanımı sadece mekanik dayanımın iyileştirilmesinde değil, aynı zamanda diğer performans kriterlerinde de etkilidir. Örneğin, Radhi vd. (2024) tarafından yapılan bir çalışmada, geopolimer harçların kimyasal direncini optimize etmek amacıyla Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada sülfat saldırısına karşı dayanım üzerinde etkili olan parametreler analiz edilmiş ve optimum koşullar belirlenmiştir.

Taguchi yöntemi, geopolimer harç üretiminde farklı proses parametrelerinin optimizasyonu için etkin bir araçtır. Bu yöntem sayesinde, parametrelerin minimum sayıda deneyle optimize edilmesi sağlanarak hem maliyet hem de zaman açısından verimlilik elde edilir. Geopolimerizasyon sürecinde kullanılan atık malzemeler ve farklı alkali aktivatörlerin nihai ürün üzerindeki etkilerini incelemek için literatürde geniş bir uygulama alanına sahip olan bu yöntem, araştırmacılar tarafından sıklıkla tercih edilmektedir.

2.6.2. ÖTL kullanımı ve yüzey işleme yöntemleri

Son yıllarda, atık yönetimi ve sürdürülebilirlik konuları inşaat sektöründe büyük bir öneme sahip olmuştur. Bu sebeple, ömrünü tamamlamış lastiklerin (ÖTL) geri dönüştürülerek yapı malzemelerinde kullanımı, çevre dostu çözümler üretmek amacıyla yaygınlaşmaktadır. Geopolimer harç üretiminde, ÖTL'nin kullanımı üzerine yapılan çalışmalar, bu malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermektedir. Literatürde, bu uygulamanın geopolimer harçların dayanımı, esnekliği ve çevresel sürdürülebilirliği üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir.

ÖTL'nin geri dönüştürülmesi, büyük miktarda katı atığın bertaraf edilmesi ve inşaat malzemelerinin performansının artırılması açısından önemli bir fırsat sunar. ÖTL atıkları, özellikle esnekliği artırma ve darbe dayanımını geliştirme gibi mekanik avantajlar sağlar. Thomas ve Gupta (2016) yaptıkları çalışmada, ÖTL atıklarının hem çimento bazlı hem de geopolimer harçlarda kullanıldığında darbe dayanımı ve enerji emme kapasitesini artırdığını göstermiştir. Ayrıca, bu atıklar su geçirimsizlik özelliklerini de olumlu yönde etkileyebilir.

ÖTL'lerin ince veya granüler hale getirilerek geopolimer harçlara eklenmesi, harcın mekanik özellikleri üzerinde bazı olumlu etkiler bırakır. Kırılmış veya granül haldeki ÖTL parçalarının, geopolimer matris içine dağıtılması sonucunda hem darbe direncinin hem de esnekliğin artırıldığı bildirilmiştir (Moustafa ve ElGawady, 2015). Bu çalışmalar,

ÖTL kullanımı sayesinde malzemenin kırılabilirliğinin azaldığını ve harcın sünekliğinin arttığını göstermektedir.

Geopolimer harçlara ÖTL eklenmesi, malzemenin mekanik performansını önemli ölçüde etkileyebilir. ÖTL'lerin harçlara eklenmesi ile ilgili yapılan çalışmalar, bu malzemelerin betonun yoğunluğunu ve basınç dayanımını azaltabildiğini, ancak elastikiyet ve darbe dayanımı gibi mekanik özelliklerde iyileşmeler sağladığını göstermektedir. Huang vd. (2013), lastik partiküllerinin eklenmesiyle harcın elastik modülünün düştüğünü, fakat çatlak gelişimini önleyen esnek bir yapı oluşturduğunu belirtmiştir. Bu sayede, ÖTL atıklarının geopolimer harçlarda kullanımı, özellikle darbelere ve titreşimlere karşı daha dayanıklı yapı elemanları üretmeye olanak tanımaktadır.

Park vd. (2016) atık lastiğin uçucu kül bazlı geopolimer betonun basınç dayanımına etkisini araştırmıştır. NaOH molaritesi, agregaların boyutu, ÖTL miktarı ve uçucu kül türleri gibi basınç dayanımını etkileyen çeşitli faktörler incelenmiştir. Uçucu kül tipi ve $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı, karışık aktivatör olarak, basınç dayanımında önemli bir azalmaya yol açmaktadır. Daha düşük bir $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranıyla ÖTL eklenmesine bağlı olarak daha fazla dayanım azalması gözlemlenmektedir.

Wongsa vd. (2018) ince agrega olarak %100 ÖTL içeren, uçucu kül bazlı hafif geopolimer harçların mekanik ve termal özelliklerini araştırmıştır. %100 ÖTL içeren geopolimer betonun yoğunluğu ve termal iletkenliği, kontrol geopolimer harcınınkinden ortalama olarak %42 ve %79 daha düşüktür. Bundan dolayı %100 ÖTL içeren geliştirilmiş geopolimer harç, çevre dostu, daha hafif ve geleneksel tuğla/bloklardan daha iyi ısı yalıtımı sağlayan tuğla/blok yapımında kullanılabilir. ÖTL içeren geopolimer harcının 28 günlük basınç dayanımı, nehir kumu içeren kontrol geopolimer harcınınkinden %93 daha az olduğu belirlenmiştir.

Luhar vd. (2018) uçucu kül bazlı geopolimer beton ve ÖTL'li geopolimer betonun ısıl direncinin karşılaştırmalı çalışmasındaki ilk bilimsel girişimi sunmaktadır. Sonuç olarak yüksek sıcaklıklarda ÖTL kullanılan geopolimer beton için dayanım kaybının, entegre malzemelerin ısıl genleşme katsayıları arasındaki olası uyumsuzluk nedeniyle kontrol geopolimer betonunkinden sadece biraz daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Aslani vd. (2020) hafif beton, atık lastikli beton ve atık lastikli hafif geopolimer betonun mekanik özelliklerini incelemiştir. İki farklı ÖTL boyutu (2–5 mm ve 5–10 mm)

kullanılmıştır. Sonuç olarak daha büyük ÖTL parçalarının kullanımının daha düşük bir basınç dayanımına sebep olduğu belirlenmiştir.

ÖTL'nin geopolimer harçlarda kullanımı üzerine yapılan literatür çalışmaları, bu uygulamanın hem mekanik hem de çevresel performans açısından önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir. Lastik atıklarının geri dönüştürülmesi, malzemenin esnekliğini ve darbe dayanımını artırırken, çevresel sürdürülebilirlik açısından da olumlu etkiler yaratmaktadır. Ancak, ÖTL kullanımının basınç dayanımı üzerinde olumsuz etkiler yaratabileceği göz önünde bulundurulmalı ve optimum karışım oranları dikkatle belirlenmelidir. Özellikle basınç dayanımı ve yapısal bütünlükte görülen azalmalar, bu malzemelerin kullanımında karşılaşılan önemli sorunlar arasındadır. Bu olumsuzlukları aşmak için yüzey işleme yöntemleri uygulanarak, ÖTL parçacıklarının geopolimer matrisle olan bağlanma performansı artırılabilir ve mekanik özelliklerdeki olumsuz etkiler minimize edilebilir. Literatürde, bu amaca yönelik çeşitli yüzey işleme yöntemleri ve teknikleri incelenmiştir.

Lastik atıklarının yüzeyinin işlenmesi, bu malzemelerin matrisle olan bağlanma kalitesini artırmak için önemli bir adımdır. Yapılan çalışmalarda, lastik parçacıklarının yüzey işlemesine tabi tutulması, özellikle malzemenin mekanik performansındaki olumsuzlukları azaltmada etkili bir yöntem olarak rapor edilmiştir. Eldin ve Senouci (1993), lastik parçacıklarının beton matris ile zayıf bağlanma eğiliminde olduğunu ve bu nedenle basınç dayanımında azalma yaşandığını belirtmiştir. Yüzey işlemesi ile lastik parçacıklarının yüzey enerjisi artırılarak matrisle daha güçlü bir bağ oluşturulabilir. Bu durum, özellikle basınç dayanımının iyileştirilmesi açısından önem taşır.

Fiziksel yöntemler, lastik parçalarının mekanik yüzey işleme ile modifiye edilmesini içerir. Kumlama, zımparalama veya mekanik aşındırma gibi yöntemlerle lastik parçalarının yüzeyi pürüzlendirilir ve bu sayede bağlanma kuvveti artırılır. Örneğin, He vd. (2016), lastik parçalarının yüzeyinin aşındırılması ile geopolimer matris içindeki mekanik özelliklerin önemli ölçüde iyileştirildiğini bulmuşlardır. Fiziksel işlemler, lastik parçacıkları ile matris arasındaki yüzey temasını artırarak homojen bir yapının oluşmasına katkı sağlar. Bu da özellikle basınç dayanımını artırmada faydalıdır.

Kimyasal yüzey işleme, lastik parçacıklarının yüzeyini modifiye ederek matris ile olan bağlanma performansını artırma amacı taşımaktadır. Özellikle asidik çözeltilerle yapılan yüzey işlemleri, lastik yüzeyinde mikro-çatlaklar ve pürüzler oluşturarak bağlanma yüzey alanını artırır. Gheni vd. (2017), taramalı elektron mikroskobu (SEM)

analizi kullanarak çimento-atık lastik arayüz bölgesini incelemiştir. Atık lastik parçacıkları ile çimento pastası arasındaki bağın, doğal agregalarla olandan daha zayıf olduğu gözlemlenmiş ve bu durum, numunelerin basınç dayanımındaki sistematik azalmanın nedeni olarak tespit edilmiştir. Atık lastik içeren betonun dayanımını artırmanın anahtarı, atık lastik parçacıkları ile çimento pastası arasındaki arayüz dayanımını iyileştirmekte yatmaktadır. Bazı araştırmacılar, lastik parçacıkları ile çimento pastası arasındaki bağ performansını artırmak için atık lastik/çimento arayüzünü kimyasal olarak modifiye etmeyi önermiştir.

Leung ve Grasley vd. (2012), sülfürik asit ve nitrik asit kullanarak lastik parçacıklarının yüzeyini işlediklerinde, lastik parçacıklarının matrisle daha iyi bütünleştiğini ve betonun basınç dayanımında iyileşmeler gözlemlendiğini rapor etmişlerdir. Ayrıca, plazma işleme ve alkali çözeltilerle yüzey işlemleri de lastik parçalarının kimyasal bağlanma özelliklerini iyileştirerek mekanik dayanım üzerindeki olumsuzlukları azaltır (Siddique ve Naik, 2004).

Kashani vd. (2018), atık lastiklerin betondaki dayanım kaybını azaltmak için beş farklı yüzey işleme yöntemi (çimento kaplama, silis dumanı kaplama, NaOH, potasyum permanganat ve sülfürik asit daldırma) kullanmıştır. Sonuçlar, %10 atık lastik içeren kontrol betonu ile karşılaştırıldığında, basınç dayanımında %27 ila %56 arasında bir artış olduğunu göstermiştir. En önemli iyileşme, sülfürik asit daldırma ve silis dumanı kaplamada gözlenmiştir.

Bir diğer yüzey iyileştirme yöntemi, lastik parçalarının yüzeyinin polimerik veya organik kaplamalarla modifiye edilmesidir. Bu kaplamalar, lastik parçalarının yüzey enerjisini artırarak, geopolimer veya beton matrisle daha iyi bağlanmasını sağlar. Xue ve Shinozuka (2013), lastik parçacıklarının yüzeyine silan bazlı bir kaplama uyguladıklarında, basınç dayanımında önemli bir artış elde ettiklerini bildirmiştir. Bu kaplama işlemleri, lastik ile geopolimer matrisi arasında kimyasal uyum sağlayarak mekanik performansı artırabilir. Aynı zamanda, yüzey kaplama işlemleri, lastik parçalarının su emme oranını azaltarak malzemenin genel dayanıklılığını da artırmaktadır.

Guo vd. (2017), ÖTL-çimento yapışmasını artırmak amacıyla iki farklı yüzey işleme yöntemi (NaOH ve Silan Bağlayıcı Ajan) ve üç kaplama tekniği (çimento, silis dumanı+çimento, çimento+Na₂SiO₃) kullanmıştır. Genel olarak, NaOH ile işlenen yöntemlerin, kauçuklu betonun mekanik performansını iyileştirme ve uzun vadeli

dayanıklılığı artırma potansiyeline sahip olduğu görülmüştür. NaOH çözeltisi ile muamele edilen atık lastik agregaları içeren numuneler, kontrol numunelerine kıyasla ısı iletkenliğinde %15,5 ve basınç dayanımında %3,81 azalma göstermiştir.

Aly vd. (2019) atık lastiğin cüruf esaslı geopolimer betonun mekanik özelliklerine ve darbe dayanımına etkisini araştırmıştır. Basınç dayanımı NaOH ile işlenmiş %10'a kadar ÖTL kullanımının artması ile bir miktar arttırılabilir, bu sebeple çevre dostu karışımlar yapısal elemanlarda kullanılabilir.

Dong vd. (2020) atık lastik kullanılan geopolimer betonun çeşitli mekanik ve dayanıklılık özelliklerini incelemiştir. Aktivatörün hem ÖTL muamelesi hem de bağlayıcı aktivasyonu için kullanılması, geleneksel muamele yöntemlerine kıyasla geopolimer betonun dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmamıştır.

Thong vd. (2016), PVA kullanımının, kalsiyum hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) oluşumunu azaltarak çimento harcı ve agregalar arasındaki yapışmayı iyileştirdiğini belirtmiştir. Bu çalışmaya göre, PVA çimento esaslı kompozit malzemelerde agregalar için bir yüzey ön işleme yöntemi olarak kullanılabilir.

Ho vd. (2018), geri dönüştürülmüş beton agregalarını PVA ile işleyerek, beton karışımında doğal ince agreganın %25'ini değiştirmiştir. PVA kaplamasının, taze betonun işlenebilirliğini artırdığı ve agregaların yüzeyinde ince bir polimer film oluşturarak su emilimini engellediği not edilmiştir.

Han vd. (2020), atık lastiğin yapışma sorununu gidermek ve hidrofilikliğini artırmak için yenilikçi bir yüzey işleme yöntemi olarak PVA kullanımını önermiştir. %0,1 PVA çözeltisi eklenmesinin, 28 günlük basınç dayanımını %7 ila %14 ve 28 günlük eğilme dayanımını %20 ila %38 artırdığı gösterilmiştir.

Son yıllarda, nanoteknolojiye dayalı yüzey modifikasyonları da lastik parçacıklarının performansını artırma amacıyla kullanılmaktadır. Nanopartiküllerle yapılan kaplamalar, lastik parçacıklarının yüzey alanını ve bağlanma kapasitesini artırarak daha güçlü bir matris oluşmasına olanak sağlar. Şanghay Jiaotong Üniversitesi tarafından yapılan bir çalışmada, nano-silika ile kaplanmış lastik parçalarının kullanıldığı geopolimer harçların basınç dayanımında önemli iyileşmeler sağlandığı rapor edilmiştir (Wang vd., 2017). Bu yöntemin bir diğer avantajı, nanomalzemelerin lastik yüzeyini kimyasal olarak kararlı hale getirerek, malzemenin uzun ömürlü olmasına katkıda bulunmasıdır.

ÖTL'nin geopolimer harçlarda kullanımı sırasında yaşanan mekanik dayanım problemleri, yüzey işleme yöntemleri ile büyük ölçüde aşılabılır. Kimyasal, fiziksel ve nanoteknolojik yüzey işlemleri, lastik parçacıklarının geopolimer matrisi ile olan uyumunu ve bağlanma performansını artırarak, basınç dayanımı ve diğer mekanik özellikler üzerinde olumlu etkiler yaratmaktadır. Literatürdeki çalışmalar, bu tür yüzey işlemlerinin uygulandığı durumlarda geopolimer harçların performansında belirgin iyileşmeler olduğunu göstermektedir.

2.6.3. Taze harç özellikleri

Geopolimer harçlar, taze haldeyken çimento bazlı malzemelere benzer şekilde işlenebilmektedir. Ancak, taze özellikleri (işlenebilirlik, kıvam, priz süresi ve akışkanlık gibi) kullanılan atık malzemelere, aktivatör türüne ve karışım oranlarına bağlı olarak farklılık gösterebilir. Bu bölümde, geopolimer harçların taze durumdaki önemli özellikleri üzerine yapılan çalışmalar ele alınmaktadır.

İşlenebilirlik, harcın dökülebilirliği ve şekillendirilebilirliği açısından kritik bir parametredir. Hardjito ve Rangan (2005), uçucu kül bazlı geopolimer harçların işlenebilirliğinin, NaOH ve Na₂SiO₃ karışımı aktivatörlerin kullanılmasıyla iyileştirilebileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca, su/katı oranının artırılması, harcın kıvamını ve işlenebilirliğini artırırken, mekanik dayanımı olumsuz yönde etkileyebilir (Rattanasak ve Chindaprasirt, 2009).

Geopolimer harçların kıvamı ve akışkanlık özellikleri, harcın kalıplara düzgün bir şekilde dökülebilmesi için büyük önem taşımaktadır. Su içeriği ve alkali aktivatörün bileşimi, taze geopolimer harçların viskozitesini doğrudan etkiler. Atık malzemelerin, özellikle uçucu kül gibi ince malzemelerin kullanılması, daha akışkan bir karışım elde edilmesine yardımcı olur (Palomo vd., 1999). Bununla birlikte, daha yüksek viskoziteye sahip olan bazı aktivatörler, harcın kıvamını olumsuz etkileyebilir. Örneğin, Rangan (2008), Na₂SiO₃ içeriğinin artırılmasının akışkanlığı azalttığını belirtmiştir.

Geopolimer harçların priz süresi, kullanılan aktivatörün derişimine, kürleme sıcaklığına ve malzeme bileşenlerine bağlıdır. Çimento bazlı malzemelerde olduğu gibi, geopolimer harçların da hızlı priz alması arzu edilir. Davidovits (2008), geopolimerizasyon sürecinin priz süresi üzerinde büyük etkisi olduğunu ve priz süresinin aktivatör türü ve kürleme sıcaklığı ile optimize edilebileceğini belirtmiştir. Özellikle yüksek sıcaklıklarda kürleme, priz süresini kısaltmakta ve daha hızlı bir sertleşme

sağlamaktadır (Khale ve Chaudhary, 2007). Ancak, priz süresinin çok hızlı olması, malzemenin işlenebilirliğini azaltabilir ve kalıplama işlemini zorlaştırabilir.

Nath ve Sarker (2014), uçucu kül bazlı geopolimerlerin işlenebilirlik ve priz süreleri gibi özelliklerini incelemiştir. Çalışmalarında, normal çevresel koşullar altında uçucu külün bir kısmını yüksek fırın cürufu ile değiştirmenin etkisini araştırmışlardır. Karışım, NaOH ve Na₂SiO₃ kombinasyonu ile aktive edilmiştir. Geopolimerlerin işlenebilirliğinin, esas olarak alkali aktivatörün yüksek viskozitesi nedeniyle çimentodan farklı olduğu vurgulanmıştır. İlginç bir şekilde, cüruf içeriğinin artması işlenebilirlik ve priz süresinde azalmaya yol açmış, ancak basınç dayanımında artış gözlenmiştir.

Topark-Ngarm vd. (2015), uçucu küldeki yüksek kalsiyum içeriğinin, yüksek dayanımlı ve priz süresi 28 ila 58 dakika arasında değişen geopolimer yapı malzemesi üretimi ile ilişkili olduğunu belirtmiştir.

Al-Majidi vd. (2016), cüruf içeriğinin artmasının geopolimer harçlarının akışkanlığını ve priz sürelerini önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Başka bir çalışmada, yüksek kalsiyum içeren uçucu kül bazlı geopolimer harçlarının akışkanlığının NaOH konsantrasyonundan büyük ölçüde etkilendiği belirlenmiştir.

Tuyan vd. (2018), alkali aktivatör konsantrasyonu ve kür koşullarının atık tuğla tozu esaslı geopolimer kompozitlerin kıvam ve dayanıklılığı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Yirmi farklı geopolimer harcı üretilmiş, optimum karışımlar farklı kür koşullarına tabi tutulmuştur. Alkali aktivatör konsantrasyonu için en uygun SiO₂/Na₂O oranı (Ms oranı) 1,6 ve bağlayıcı ağırlığının %10'u kadar Na₂O bulunmuştur. 90°C'de ve %40 nemde 5 gün boyunca kür edilen örneklerde maksimum basınç dayanımı 36,2 MPa'ya ulaşmıştır. Na₂O içeriği ve Ms oranının 1,6'ya kadar artırılması karışımın gözenekliliğini azaltarak dayanıklılığı artırmıştır. Bağlayıcı-su oranının düşürülmesi basınç dayanımını iyileştirmiş, ancak 0,4'ün altındaki oranlar işlenemez karışımlar oluşturmuştur. Alkali aktivasyon ile amorf yapı artmış ve geopolimerlerin termal stabilitesi sağlanmıştır.

Samantasinghar ve Singh (2019), uçucu kül ve cüruf karışımı ile elde edilen geopolimer harçlarının, normal PÇ harçlarına benzer tutarlılık ve priz süreleri sergilediğini bulmuştur. Ayrıca hem uçucu külün hem de yüksek fırın cürufunun genleşme ve büzülme karşı mükemmel direnç gösterdiği not edilmiştir.

Taze geopolimer harçların yoğunluğu, karışımın içerdiği su miktarı ve kullanılan atık malzemenin türüne bağlı olarak değişmektedir. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi

ince malzemeler kullanıldığında, harçların taze yoğunluğu daha düşük olabilir (Duxon vd., 2007). Bununla birlikte, yoğunluk, nihai ürünün dayanım ve dayanıklılık özellikleriyle doğrudan ilişkili olduğu için, bu parametrenin karışım tasarımı sırasında dikkatle kontrol edilmesi gerekmektedir.

Kotwal vd. (2015), taze geopolimer harcının sıcaklığını dijital bir sap tipi termometre kullanarak ölçmüştür. Sonuçlar, sıcaklığın 32°C ile 54°C arasında değiştiğini göstermiştir. Ayrıca, NaOH ve Na₂SiO₃ miktarının artmasıyla sıcaklığın yükseldiği gözlemlenmiştir. Buna karşın, ince agrega/FA oranının artmasıyla sıcaklıkta düşüş eğilimi tespit edilmiştir.

Taze özelliklerin optimize edilmesi, geopolimer harçların uygulama alanlarına göre performanslarını en üst düzeye çıkarma açısından büyük önem taşımaktadır. Yapılan çalışmalarda, aktivatör ve malzeme bileşenlerinin oranları optimize edilerek istenilen kıvam ve akışkanlık özellikleri elde edilebilmiştir. Barbosa ve MacKenzie (2003), alkali aktivatör türünün ve konsantrasyonunun, taze harçların reolojik özellikleri üzerinde büyük etkisi olduğunu belirtmişlerdir.

2.6.4. Fiziksel özellikler

Geopolimer harçların fiziksel özellikleri, malzemenin performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yoğunluk, gözeneklilik ve su emme kapasitesi, malzemenin mekanik dayanımı, kimyasal direnci ve uzun ömürlülüğü açısından kritik öneme sahiptir. Literatürde yapılan çalışmalar, bu fiziksel özelliklerin, geopolimer harçların çevresel ve mekanik performansını optimize etmek için dikkatle kontrol edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Geopolimer harçların yoğunluğu, kullanılan alüminosilikat kaynakları, alkali aktivatörlerin türü ve kütleme koşullarına göre önemli ölçüde değişiklik gösterebilir. Yoğunluk, malzemenin mekanik dayanımıyla doğrudan ilişkilidir; yüksek yoğunluklu geopolimer harçlar genellikle daha yüksek basınç dayanımına sahiptir. Davidovits (2008), yoğun bir yapıya sahip geopolimerlerin, düşük yoğunluklu olanlara kıyasla su emme oranlarının düşük olduğunu ve bu durumun malzemenin dış etkilere karşı direncini artırdığını vurgulamıştır. Özellikle endüstriyel atıkların kullanıldığı geopolimerlerin yoğunluğu, bu malzemelerin fiziksel performansını artırmada önemli rol oynamaktadır.

Rovnaník (2010) tarafından yapılan çalışmada, geopolimer harçların yoğunluğunun, düşük kür sıcaklıklarında elde edilen harçlarda daha homojen ve düşük gözenekli yapılarla sonuçlandığı görülmüştür. Bu çalışmada, yüksek yoğunluklu

yapıların su emme oranlarının da düşük olduğu ve bu durumun harcın uzun vadede dayanıklılığını artırdığı gözlemlenmiştir.

Geopolimer harçların gözeneklilik seviyesi, malzemenin hem mekanik dayanımını hem de kimyasal ve fiziksel saldırılara karşı direncini etkileyen kritik bir özelliktir. Düşük gözeneklilik, malzemenin yoğunluğunu artırırken, su emme kapasitesini azaltır ve kimyasal etkilere karşı koruma sağlar. Gözeneklilik, kullanılan hammadde türüne, karışım oranlarına ve kütleme koşullarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

Fernández-Jiménez ve Palomo (2005) uçucu kül bazlı geopolimerlerin gözeneklilik oranlarının, kullanılan alkali aktivatörlerin konsantrasyonuna bağlı olarak azaldığı ve düşük gözenekliliğe sahip numunelerin daha yüksek mekanik dayanım gösterdiği tespit etmiştir. Gözeneklilik oranı, aynı zamanda harcın termal dayanıklılığını da etkileyen bir faktördür; düşük gözenekli yapılar, yüksek sıcaklıklara karşı daha iyi direnç gösterir.

Geopolimer harçların su emme oranı, malzemenin dayanıklılığı açısından büyük önem taşımaktadır. Düşük su emme oranı, harcın çevresel etkenlere karşı dayanıklılığını artırır ve uzun ömürlü yapılar için avantaj sağlar. Su emme kapasitesi, malzemenin gözenekliliği ile doğrudan ilişkilidir; düşük gözenekliliğe sahip geopolimer harçlar genellikle düşük su emme oranlarına sahiptir.

Yılmazoğlu vd. (2022) çalışmasında, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen geopolimer harçların su emme oranlarının, çimento bazlı harçlara göre daha düşük olduğu rapor edilmiştir. Bu düşük su emme kapasitesi, geopolimerlerin daha yoğun ve az gözenekli yapılarından kaynaklanmaktadır. Aynı çalışmada, düşük su emme kapasitesine sahip harçların, kimyasal saldırılara karşı daha dayanıklı olduğu ve bu özelliklerinin özellikle deniz suyu veya endüstriyel atık su gibi agresif ortamlarda kullanım için ideal olduğu belirtilmiştir.

2.6.5. Mekanik özellikler

Geopolimerizasyon süreci boyunca, amorf yapıdaki reaktif silis (SiO_2) ve alüminyumun çözülmesi ya da aktive edilmesi için yüksek derecede bazik bir ortam gerekmektedir. Yüksek baziklik seviyesi, ana malzemenin daha hızlı çözünmesini sağlayarak reaktif silis ve alüminyum tanelerinin sayısını artırır. Bu durum, ortamda daha fazla geopolimer bağlayıcı oluşmasına neden olur ve bu da geopolimerizasyonun daha etkin gerçekleşmesini sağlar. Sonuç olarak, yüksek baziklik, nihai ürünün basınç dayanımını ve sertliğini artırır. Yapılan araştırmalar, alkali derişiminin geopolimerizasyonu etkileyen önemli bir faktör olduğunu göstermiştir. Örneğin, daha

yüksek NaOH derişimlerinin daha yüksek basınç dayanımları ile sonuçlandığı bildirilmiştir. Yüksek alkali çözeltiler, geopolimerlerin mekanik performansı üzerinde pozitif bir etki yaratmaktadır (He vd., 2012). Ayrıca, amorflik derecesindeki artışın da daha yüksek basınç dayanımları sağladığı gözlemlenmiştir (Zaharaki vd., 2010). Uçucu kül kullanılarak yapılan çalışmalarda, sürenin ve sıcaklığın artmasının geopolimer malzemelerin mekanik gelişimini önemli ölçüde etkilediğı tespit edilmiştir (Duxon vd., 2007'b). Ayrıca, basınç dayanımı, malzemenin yaşlanmasıyla birlikte artış göstermektedir (Davidovits, 2008).

Geopolimer harçların en önemli mekanik özelliklerinden biri basınç dayanımıdır. Literatürde, farklı atık malzemelerin kullanılmasıyla geopolimer harçların basınç dayanımının artırılabilceğı çeşitli çalışmalarla gösterilmiştir. Örneğın, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi sanayi atıklarının alkali aktivatörler ile reaksiyona sokulmasıyla elde edilen geopolimer harçların, PÇ bazlı harçlara göre daha yüksek basınç dayanımı sağladığı belirtilmektedir (Bakharev 2005). Benzer şekilde, Nath ve Sarker (2014) tarafından yapılan çalışmada, uçucu kül ile üretilen geopolimer harçların oda sıcaklığında kürlenmesine rağmen yüksek basınç dayanımı gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmalar, atık malzemelerle üretilen geopolimerlerin çevre dostu bir alternatif olmasının yanında yüksek mekanik performans sunduğunu ortaya koymaktadır.

Eğilme dayanımı, yapı malzemelerinin çekme etkilerine karşı direncini ölçen bir mekanik özelliktir. Geopolimer harçlar, genellikle yüksek basınç dayanımı ile iyi bir eğilme dayanımı da sunar. Yip ve van Deventer (2003), atık malzeme kaynaklı geopolimerlerin eğilme dayanımının, geleneksel betonlara göre daha iyi performans sergileyebileceğini rapor etmiştir. Ayrıca, Zhuang vd. (2016) çalışmasında, metakaolin ve uçucu kül gibi atık malzemelerle üretilen geopolimer harçların eğilme dayanımının kürlenme koşullarına ve kullanılan aktivatörlerin oranına bağılı olarak değıştiğı, ancak genel olarak yüksek performans sergilediğı belirtilmiştir.

Geopolimer harçların elastisite modülü, malzemenin esneklik kapasitesini belirler ve mekanik özelliklerin değerlendirilmesinde kritik bir parametredir. Geopolimer harçların elastisite modülü, kullanılan bağlayıcı malzemelere ve üretim sürecine bağılı olarak değışiklik göstermektedir. Bernal vd. (2010), yüksek fırın cürufu ve uçucu kül kullanarak ürettikleri geopolimer harçlarda elastisite modülünün, çimento bazlı harçlara kıyasla daha yüksek olduğunu rapor etmiştir. Bu da geopolimer malzemelerin, geleneksel betona göre daha rijit yapılar oluşturabileceğini göstermektedir.

Atiş vd. (2015), NaOH ile aktive edilen uçucu kül bazlı geopolimerlerin mekanik özelliklerini, 45°C'den 115°C'ye kadar her bir sıcaklık değerinde 10°C artışlarla 24, 48 ve 72 saatlik kürleme süreleri boyunca incelemiştir. En yüksek basınç dayanımı 120 MPa olarak elde edilmiştir. Sıcaklık ve NaOH konsantrasyonu arttıkça dayanımın belirli bir seviyeye kadar arttığı gözlemlenmiştir. Isı kürleme süresinin 48 ve 72 saatlik dönemlerinde, ilk 24 saatte olduğu kadar yüksek sıcaklık ve NaOH konsantrasyonu artışında dayanımda önemli bir artış görülmediği, ancak basınç dayanımındaki artışın daha düşük olduğu belirtilmiştir.

Sasui vd. (2019), NaOH ve NaOH+Na₂SiO₃ ile aktive edilmiş C sınıfı uçucu kül ve granüle yüksek fırın cürufu geopolimer karışımlarının dayanım ve mikro yapısını incelemiştir. Uçucu kül içeriğinin artması priz süresini uzatmış, dayanımı azaltmış ve gevşek bir matris oluşmasına yol açmıştır. SEM görüntüleri, reaksiyona girmeyen uçucu kül parçacıklarının yoğun matris oluşumunu engellediğini göstermiştir.

Bajpai vd. (2020), NaOH ve Na₂SiO₃ aktivatörleri ile aktive edilmiş uçucu kül ve silis dumanı bazlı betonun çevresel etkisini detaylı bir şekilde incelemiştir. Silis dumanının Na₂SiO₃ kullanıldığında basınç dayanımını artırdığı, Na₂SiO₃ bulunmadığında ise dayanımı azalttığı tespit edilmiştir.

Wong vd. (2020), yüksek kalsiyumlu uçucu kül ve geri dönüştürülmüş tuğla tozu kullanarak bir geopolimer harcı üretmeyi ve değerlendirmeyi amaçlamıştır. NaOH ve Na₂SiO₃ alkali aktivatör olarak kullanılmış, farklı NaOH konsantrasyonları ve Na₂SiO₃/NaOH oranları incelenmiştir. Tuğla tozu eklenmesi akışkanlığı azaltmış, %10 tuğla tozu ve 10 M NaOH ile 28 gün sonra 44,2 MPa'lık en yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. Mikro yapı analizleri, %10'un üzerinde tuğla tozu içeren karışımların homojen olmayan mikro yapılara yol açtığını ve mekanik dayanımı olumsuz etkilediğini göstermiştir. Daha yüksek NaOH konsantrasyonları, su emilimini ve su çekimini artırmıştır.

Atabey vd. (2020), NaOH ve Na₂SiO₃ gibi alkali aktivatörler ile F sınıfı uçucu kül kullanarak üretilen geopolimer harçların dayanım özelliklerini araştırmıştır. Na miktarları uçucu kül ağırlığının %6, %9, %12 ve %15'ine karşılık gelecek şekilde belirlenmiş ve 100°C'de 24 saat boyunca kür edilmiştir. Na içeriğinin artması, geopolimer örneklerin taşıma özelliklerini iyileştirmiş ve en iyi sonuçlar %15 Na içeriği ile elde edilmiştir.

Ergeshov (2021), uçucu kül bazlı geopolimer harç numunelerine %2 ila %10 arasında silis dumanı ikame etmiş ve bu numuneleri 60°C, 75°C ve 90°C 'de 24, 48 ve 72

saatlik termal kürlemeye tabi tutmuştur. Isı kürleme süresini tamamlayan geopolimer harç numunelerinin mekanik özellikleri analiz edilmiştir. En yüksek basınç dayanımındaki artış, 72 saat boyunca 60 C'de kürlenen %4 silis dumanı içeren geopolimer harçlarda, 48 saat boyunca 75 C ve 90 C'de kürlenen %2 silis dumanı içeren numunelerde gözlemlenmiştir.

Caldas vd. (2023), silis dumanının (0%, %10 ve %20)  imento ile kısmen ikame edilme potansiyelini ve aktivasyonunu değerlendirmeyi amaçlamıştır. Sonuçlar, NaOH'nin  imento sürecini hızlandırdığını, ancak işlenebilirliği tehlikeye atmadı ını, KOH'nin ise anlamlı bir etki göstermediğini ortaya koymuştur. Silis dumanının hidroksitlerle alkali aktivasyonu,  imento kullanımına kıyasla daha etkili olup basınç dayanımını artırmış, tobermorit ve zeolit oluşumuna yol açmıştır.

2.6.6. Dayanıklılık  zellikleri

Geopolimer harçların dayanıklılık özellikleri, bu malzemelerin mühendislik uygulamalarındaki uzun vadeli performansını belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Dayanıklılık, malzemenin çevresel faktörler ve kimyasal etkilere karşı direncini, su geçirmezlik, dona karşı direnç, termal dayanıklılık gibi özellikleri içermektedir. Atık malzemelerle üretilen geopolimer harçların dayanıklılığı üzerine yapılan çalışmalarda, bu malzemelerin  imento bazlı harçlara kıyasla üstün performans sergilediği belirtilmektedir. Bu bölümde, literatürde yer alan çalışmalar gözden geçirilmiştir.

Dona karşı dayanıklılık, özellikle soğuk iklimlerde kullanılan yapı malzemeleri için önemli bir parametredir. Geopolimer malzemeler, düşük gözeneklilikleri sayesinde donma-    lme döngülerine karşı  imento bazlı malzemelerden daha dirençli olabilirler. Olivia ve Nikraz (2012) tarafından yapılan çalışmada, geopolimer harçların dona karşı dayanıklılığı, düşük su emme kapasitesi ve yoğun yapısı nedeniyle yüksek olarak rapor edilmiştir. Ayrıca, Li vd. (2019) tarafından yapılan bir diğer çalışma, dona karşı dayanıklılığın atık malzeme türüne bağlı olarak de işebilece ini ancak genel olarak olumlu sonuçlar elde edildiğini göstermiştir.

Zhao vd. (2019) %10-50 c r f içeriğine sahip F Sınıfı uçucu kül esaslı geopolimer betonun donma-    lme direncini araştırmıştır. %10 c r f kullanımının beş donma-    lme döngüsünden sonra hasar gördüğünü, ancak yüksek sıcaklıkta k rlemenin donma-    lme direncini artırdığını göstermektedir. %30 c r f kullanımı, 50 donma-    lme döngüsünde hasar görürken, %50 c r f kullanımı referans numunesinin donma-    lme direnciyle karşılaştırılabilir ve 225 donma-    lme döngüsüne dayanabilir.

Geopolimer harçların kimyasal direnci, özellikle sülfat, klor ve asit saldırılarına karşı büyük önem taşımaktadır. Çimento bazlı malzemelerde, bu tür kimyasal saldırılar malzemenin zamanla zayıflamasına ve yapısal bütünlüğünün bozulmasına yol açarken, geopolimer malzemeler düşük gözeneklilikleri ve yoğun yapıları sayesinde bu etkilere karşı daha dayanıklıdır. Provis ve van Deventer (2014) tarafından yapılan çalışmada, geopolimer harçların sülfat ve asit ortamlarına karşı gösterdiği yüksek dayanıklılık ortaya konmuştur. Benzer şekilde, Bakharev (2005), geopolimerlerin asit saldırısına karşı çimento bazlı malzemelere göre daha iyi performans gösterdiğini belirtmiştir.

Okoye vd. (2017), %2 sülfürik asit (H_2SO_4) ve %5 sodyum klorür (HCl) çözeltileri kullanarak silis dumanının uçucu kül esaslı geopolimer betonun dayanıklılık özelliklerine etkisi araştırılmıştır. 90 gün maruz kaldığında %20 silis dumanı içeren geopolimer betonda erozyon olmadığını ortaya koymuştur. H_2SO_4 ve HCl çözeltisinde silis dumanı içeren geopolimer betonun direncinin, referans numuneden önemli ölçüde daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Sun ve Wu (2013) uçucu kül esaslı geopolimer harçlarının kimyasal maddelere ve donma-çözünme döngülerine karşı dayanıklılıkları incelemiştir. Çalışmada uçucu kül, metakaolin, NaOH ve silis dumanı belirli oranlarda karıştırılarak farklı geopolimer harç numuneleri elde edilmiştir. Bu numuneler 28 gün boyunca havada kürlenmiş ve ardından 7 gün suda bekletilmiştir. Dayanıklılık testleri kapsamında, bir grup numune basınç dayanımı açısından değerlendirilmiş, diğer numuneler ise farklı kimyasal çözeltilere ve donma-çözünme döngüsüne maruz bırakılmıştır. Uçucu kül ile hazırlanan numunelerden bir kısmı %5'lik Na_2SO_4 çözeltisine, bir kısmı %3'lük H_2SO_4 çözeltisine ve bir kısmı saf suya daldırılmıştır. 24 hafta boyunca bu ortamlarda bekletilen numuneler üzerinde gözlem yapılmıştır. Sonuçlar, %5'lik Na_2SO_4 çözeltisinde bekletilen numunelerde herhangi bir yıpranma gözlenmediğini, %3'lük H_2SO_4 çözeltisinde ise asidik ortam nedeniyle numunelerde belirgin yıpranmalar oluştuğunu göstermiştir. Bu, geopolimerlerin sülfat ortamına karşı iyi bir direnç sergilerken, asidik ortamlarda daha hassas olabileceğini göstermektedir. Donma-çözülme döngüsü testine tabi tutulan numunelerde, PÇ ile üretilen beton numunelerinin basınç dayanımlarında belirgin bir azalma yaşanırken, uçucu kül esaslı geopolimer harçlarının basınç dayanımında önemli bir kayıp gözlenmemiştir. Bu sonuç, geopolimer harçlarının donma-çözülme döngülerine karşı çimento bazlı betonlardan daha dirençli olduğunu ortaya koymuştur. Bu çalışma, uçucu kül kullanılarak üretilen geopolimerlerin sülfat gibi kimyasal maddelere ve donma-

çözünme gibi fiziksel çevresel etkilere karşı yüksek dayanım gösterdiğini, ancak asidik ortamlara karşı daha hassas olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgular, geopolimerlerin özellikle sülfat saldırısı riski yüksek olan ortamlarda geleneksel betona alternatif olabileceğini göstermektedir.

Geopolimer harçların termal dayanıklılığı, yüksek sıcaklıklara maruz kalan yapılarda önemli bir performans kriteridir. Geleneksel çimento bazlı malzemeler, yüksek sıcaklıklara maruz kaldıklarında mekanik özelliklerinde bozulmalar yaşarken, geopolimer malzemeler ısıya karşı daha dirençlidir. Duxon vd. (2007) çalışması, geopolimer harçların 800°C'ye kadar olan sıcaklıklarda mekanik dayanımlarını büyük ölçüde koruyabildiğini göstermiştir. Termal dayanıklılık, özellikle yangına dayanıklı yapı elemanları ve endüstriyel tesislerde önemli bir faktör olarak öne çıkmaktadır.

Geopolimerlerin yüksek sıcaklıklara karşı direnci, yapılarındaki alüminosilikat matrisi nedeniyle oldukça yüksektir. Kong vd. (2007) yaptıkları çalışmada, uçucu kül bazlı geopolimerlerin 800°C'ye kadar yüksek sıcaklıklarda bile mekanik dayanımlarını büyük ölçüde koruyabildiklerini belirtmişlerdir. Özellikle yangına maruz kalan yapı elemanlarında geopolimer harçların, çimento bazlı betonlardan çok daha düşük bir bozulma eğilimi gösterdiği vurgulanmıştır. Bu durum, geopolimer malzemelerinin yangına dayanıklı yapı elemanları ve yüksek sıcaklık uygulamaları için ideal olabileceğini göstermektedir. Benzer şekilde, Yang vd. (2022) de geopolimerlerin 1000°C ve üzeri sıcaklıklarda dahi yapısal bütünlüğünü koruduğunu, geleneksel çimentolu betonlarda bu sıcaklıklarda önemli bozulmalar görüldüğünü aktarmıştır.

Aydın ve Kızıltepe (2019) bor madeninden çıkan bor içeren atık kilin (WCB) alkali aktivasyon imkânı araştırmıştır. Bu çalışmanın ilk aşamasında, 500°C ile 800°C arasındaki farklı sıcaklıklarda kalsine edilmiş WCB'nin alkali aktivasyonu, buharla kürlenme koşulları altında incelenmiştir. Kabul edilebilir su emme özellikleri ve kuruma büzülme değerleri ile 38 MPa'ya kadar bir basınç dayanımı değeri, 800°C'de kalsine edilmiş WCB'nin alkali aktivasyonundan elde edilebilmiştir.

Ali vd. (2020) metakaolin esaslı geopolimer harçların %30'a kadar kolemanit ikamesi ve farklı uzunluklarda (12-24 mm) bazalt lif eklenmesi durumunda mekanik özelliklerini incelemiştir. %10 kolemanit ikamesi ile 28 günlük basınç dayanımı sonuçları %1,71 artmış, %20 ve %30 kolemanit ikamesi durumunda sırasıyla %13,64 ve %26,99 basınç dayanımı düşüşü olmuştur. Basınç dayanımı sonuçları, 24 mm uzunluğundaki bazalt lif takviyeli numunelerin 12 mm uzunluğundaki bazalt lif takviyeli numunelere

göre daha iyi sonuçlara sahip olduğunu göstermiştir. Geopolimer numunelerinin donma-çözülme, yüksek sıcaklıklar ve sülfürik asit etkilerinde stabiliteyi koruduğu görülmüştür.

Tuyan vd. (2020) uçucu kül esaslı geopolimer betonların mekanik özellikleri ve yüksek sıcaklık dirençleri araştırmıştır. Bu amaçla, farklı termik santrallerden elde edilen F ve C tipi uçucu küller alkali aktivatör çözeltileri ile aktive edilerek geopolimer beton üretiminde kullanılmıştır. Geopolimer betonlarda alkali aktivatör çözeltisi olarak Na_2SiO_3 ve NaOH değerlendirilmiştir. F tipi uçucu kül ile üretilen ve yüksek sıcaklıkta kürlenmiş geopolimer betonun benzer dayanıma sahip çimento esaslı betona göre daha üstün mekanik özelliğe sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, bu karışımın yüksek sıcaklık direncinin çimento esaslı betona göre bir miktar fazla olduğu tespit edilmiştir.

2.6.7. Termal özellikler

Geopolimer harçların termal özellikleri, özellikle ısı iletkenliği ve termal genişleme gibi parametreler açısından çeşitli çalışmalarla ele alınmıştır. Bu çalışmalar, geopolimer harçlarının geleneksel çimento bazlı malzemelere kıyasla üstün termal performans sunduğunu göstermektedir.

Geopolimer harçların ısı iletkenliği genellikle düşük olduğu için bu malzemeler iyi bir termal yalıtım sağlamaktadır. Tashima vd. (2016), geopolimer harçlarının yüksek sıcaklıklara karşı termal performansını incelemiş ve bu malzemelerin düşük ısı iletkenliği sayesinde enerji verimliliği sağladığını gözlemlemiştir. Özellikle endüstriyel izolasyon malzemesi olarak kullanılabileceklerini vurgulamışlardır.

Zhang vd. (2014) tarafından yapılan bir çalışmada, geopolimerlerin düşük ısı iletkenliği sayesinde enerji tasarrufu sağlayabileceği ve yapıların enerji verimliliğini artırabileceği belirtilmiştir. Geopolimerlerde düşük ısı iletkenliğinin, malzemenin gözenekli yapısı ve matrisindeki yoğun alüminosilikat bağ yapısından kaynaklandığı ifade edilmiştir. Bu durum, geopolimer harçların yüksek sıcaklık ve yalıtım gerektiren alanlarda kullanılabilirliğini artırmaktadır.

Pacheo-Torgal vd. (2014), uçucu kül bazlı geopolimerlerin ısı iletkenliği üzerine yaptıkları çalışmada, bu malzemelerin çimento bazlı malzemelere kıyasla düşük ısı iletkenliği sergilediğini belirtmişlerdir. Gözeneklilik yapısının malzemenin ısı iletkenliği üzerinde belirleyici bir rol oynadığını ve düşük ısı iletkenliğinin yalıtım performansını artırdığını bulmuşlardır.

Kamseu vd. (2010), geopolimerler ile ısı yalıtımı üzerine çalışmalarında, bu malzemelerin düşük ısı iletkenliği ile enerji tasarrufu sağlama potansiyelini araştırmıştır.

Uçucu kül ve cüruf bazlı geopolimerlerin düşük termal iletkenlik katsayısına sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Geopolimerlerin termal genleşme katsayısı, geleneksel betonlardan genellikle daha düşük olup bu durum, yüksek sıcaklıklarda yapısal stabilitenin korunmasına katkı vermektedir. Criado vd. (2010), geopolimerlerin termal genleşme katsayısının PÇ bazlı betonlardan daha düşük olduğunu, bu sayede termal gerilmelerden kaynaklanan çatlak oluşumunun azaldığını tespit etmişlerdir. Bu özellik, geopolimer malzemelerinin sıcaklık değişimlerinin sık yaşandığı uygulamalarda tercih edilmesini sağlamaktadır.

Komnitsas vd. (2011), termal genleşme katsayısı açısından geopolimerlerin performansını incelemişlerdir. Geopolimer harçlarının düşük termal genleşme katsayısı sayesinde sıcaklık dalgalanmalarına karşı oldukça dayanıklı olduğunu ve endüstriyel uygulamalarda tercih edilebileceğini ortaya koymuşlardır.

Bernal vd. (2013), geopolimerlerin termal genleşme özellikleri üzerine yaptıkları çalışmalarında, uçucu kül ve cüruf bazlı geopolimerlerin düşük termal genleşme katsayıları sergilediğini ve bu durumun termal çevrimler sırasında malzemenin bozulmasını önlediğini gözlemlemiştir.

Bu çalışmalar, geopolimerlerin hem düşük ısı iletkenliği hem de düşük termal genleşme katsayısı sayesinde yüksek sıcaklık uygulamaları ve enerji verimliliği açısından önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir.

2.6.8. Mikro yapı ve performans ilişkisi

Geopolimer harçların mikro yapısı ile performans özellikleri arasındaki ilişki, malzemenin nihai özelliklerini belirleyen kritik bir faktördür. Özellikle basınç dayanımı, gözeneklilik, çatlama direnci ve ısı iletkenlik gibi önemli performans kriterlerinin anlaşılmasında mikroyapı analizi büyük bir rol oynamaktadır. Bu bölümde, X-ışını kırınımı (XRD), SEM ve diğer mikroyapı analiz tekniklerinin sonuçları ile geopolimer harçlarının özelliklerinin nasıl etkilendiğine dair literatür taraması sunulmaktadır.

Gözeneklilik, geopolimer harçlarının genel mekanik performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Provis ve Bernal (2014), yüksek yoğunlukta ve düşük gözenekli bir mikro yapının basınç dayanımı ve kimyasal direnci artırdığını ortaya koymuştur. Gözeneklilik, SEM analizleri ile doğrudan gözlemlenebilir ve gözeneklerin boyutu ile dağılımı, malzemenin su emme kapasitesini ve dolayısıyla dayanıklılığını etkiler. Gözenekli yapının su emme oranını artırarak harcın dayanıklılığını azalttığı

gösterilmiştir. Rovnaník (2010) daha düşük sıcaklıklarda kürlenene geopolimerlerin daha az gözenekli olduğu ve bu yapıların daha dayanıklı olduğu belirtilmiştir.

Geopolimer harçların çatlama direnci, mikroyapının homojenliği ve yoğunluğu ile doğrudan ilişkilidir. Mikroyapıdaki çatlaklar ve boşluklar, malzemenin mekanik stres altında çatlama olasılığını artırır. Buchwald vd. (2009), SEM ve XRD analizleriyle, homojen bir mikroyapının daha yüksek çatlama direnci sağladığını ve daha az içsel gerilme birikimine neden olduğunu göstermiştir. Bu çalışma, ince bir mikroyapı düzenlemesinin çatlak oluşumunu ve büyümesini engelleyerek malzemenin uzun vadeli performansını artırabileceğini öne sürmüştür.

Geopolimer harçların ısı iletkenliği, malzemenin yoğunluğu, gözenekliliği ve bileşenlerinin mikroyapısı ile doğrudan ilişkilidir. Gözenekliliğin artması, ısı iletkenliğini genellikle azaltırken, düşük gözenekli ve yoğun yapılar daha iyi termal performans sergiler. Lloyd ve Rangan (2009) tarafından yapılan çalışmada, geopolimer harçların düşük ısı iletkenliği, yüksek yoğunluklu amorf alüminosilikat matrisine bağlanmıştır. SEM görüntüleri, malzemenin mikroyapısındaki yoğunluk farklarını ve bunun ısı iletkenliğe etkilerini gözlemlemek için kullanılmıştır. Daha yoğun bir mikroyapı, daha düşük gözeneklilik ve dolayısıyla daha düşük termal genleşme oranları ile ilişkilendirilmiştir (García-Lodeiro vd. 2012).

Geopolimer harçların basınç dayanımı, esas olarak polikondenzasyon sonucu oluşan alüminosilikat jel yapısına bağlıdır. XRD analizleri, amorf yapıdaki alüminosilikatların kristalin yapıya dönüşüm derecesini inceleyerek, basınç dayanımı ile ilişkilendirilebilir. Örneğin, Zhang vd. (2016) yaptığı çalışmada, XRD sonuçlarına göre amorf fazdaki alüminosilikat jelin kristal faza dönüşümünün basınç dayanımını artırdığını belirtilmiştir. Bu durum, daha yoğun ve bağlayıcı özellikte bir jel yapısının oluşmasına bağlıdır. Ayrıca SEM görüntüleri, homojen ve yoğun bir mikroyapının daha yüksek basınç dayanımı ile ilişkili olduğunu göstermektedir (Fernández-Jiménez vd. 2003). Gözeneklilik ve zayıf bağlanma bölgeleri basınç dayanımını olumsuz etkilerken, SEM görüntülerinde daha kompakt bir yapı elde eden harçlar daha yüksek dayanım göstermiştir.

Ryu vd. (2013) yaptığı çalışmada, NaOH derişiminin geopolimerlerin basınç dayanımı ve mikroyapısına etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Bu çalışmada, F sınıfı uçucu kül, Na₂SiO₃ ve farklı derişimlerde NaOH (6M, 9M ve 12M) ile aktive edilmiştir. Numuneler 60°C'de 24 saat boyunca kür edilmiştir ve ardından farklı sürelerde (1, 3, 7,

14, 28, 56 ve 91 gün) basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur. NaOH derişiminin artmasıyla basınç dayanımında belirgin bir artış olduğunu göstermektedir. En yüksek dayanım, 12M NaOH derişiminde aktifleştirilen ve 91 gün boyunca yaşlandırılan numunede 47 MPa olarak tespit edilmiştir. Bu artış, yüksek NaOH derişimlerinin, uçucu küldeki amorf yapıların çözünmesini ve daha fazla alüminosilikat jel oluşumunu hızlandırdığı hipoteziyle açıklanabilir. SEM ve EDS (Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi) sonuçları, yapıda kalan uçucu küllerin küresel şekillerini büyük ölçüde koruduğunu, ancak çoğunlukla Si ve Al elementlerinin hâkim olduğunu göstermiştir. Bu da alüminosilikat jel oluşumunu doğrulamaktadır. Alüminyumun yapıya katılmasının mikroyapıda önemli bir rol oynadığını gösterilmektedir. XRD analizleri ise yapıda kuvars ve mullit kristallerinin varlığını ortaya koymuştur. Bu kristalin varlığı, geopolimerizasyon sürecinde kristal fazların önemli olduğunu ve bu fazların malzemenin mekanik özelliklerini etkilediğini göstermektedir. Özellikle mullit gibi yüksek sıcaklıklarda oluşan kristaller, geopolimerlerin termal ve mekanik dayanımını artırıcı etkiler göstermektedir. Bu çalışma NaOH derişiminin geopolimerlerin hem mikroyapısı hem de mekanik performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ve daha yüksek derişimlerde basınç dayanımının arttığını açıkça ortaya koymaktadır.

Geopolimer harçların mikro yapısı ve performans özellikleri arasındaki ilişki, XRD ve SEM gibi mikroyapı analiz teknikleri ile anlaşılabilir. Yoğun, gözeneksiz ve homojen bir mikro yapıya sahip geopolimer harçlar, genellikle daha yüksek basınç dayanımı, daha düşük su emme kapasitesi ve çatlama direncine sahiptir. Aynı zamanda, termal performans ve ısı iletkenlik gibi özellikler de mikroyapının yoğunluğuna ve homojenliğine bağlıdır. Dolayısıyla, geopolimerizasyon sürecinde kullanılan malzemeler ve üretim parametreleri, mikro yapıyı şekillendiren kritik faktörlerdir ve bu yapıların nihai mekanik ve termal performans üzerinde önemli etkileri vardır.

2.6.9. Karbon ayak izi ve sürdürülebilirlik

Yeşil üretim, çevreye duyarlı, sürdürülebilir bir üretim anlayışını temsil eder ve kaynakların verimli kullanımı, enerji tüketiminin minimize edilmesi, atıkların geri dönüştürülmesi ve çevresel etkilerin azaltılması üzerine odaklanır. Bu yaklaşım, inşaat sektörü gibi büyük miktarda enerji ve hammadde tüketen sektörlerde giderek önem kazanmaktadır. Geopolimer harçlar, geleneksel PÇ'ye kıyasla daha düşük karbon ayak izine sahip çevre dostu alternatifler olarak öne çıkmaktadır. PÇ, üretim aşamasında yüksek sıcaklıklara ve büyük miktarda enerjiye ihtiyaç duyarken, bu süreç önemli

miktarda CO₂ salımına neden olur. Küresel CO₂ emisyonlarının yaklaşık %8'inin çimento üretiminden kaynaklandığı belirtilmektedir (Mehta ve Monteiro, 2006). Buna karşılık, geopolimerler, özellikle endüstriyel atık malzemeler kullanıldığında, daha az enerji tüketir ve dolayısıyla karbon emisyonlarını büyük ölçüde azaltır (Davidovits, 1994).

Yeşil üretim anlayışının önemli unsurlarından biri, hammadde kaynaklarının sürdürülebilir şekilde temin edilmesi ve çevresel etkilerin azaltılmasıdır. Endüstriyel atıkların değerlendirilmesi, hem bu malzemelerin depolanması sorununu azaltmakta hem de doğal kaynaklara olan talebi düşürmektedir. Geopolimerlerin çevresel avantajları, hammaddelerin alkali aktivasyonu yoluyla üretilmeleri nedeniyle daha az enerjiye ihtiyaç duymaları ve bu sebeple düşük karbon salımı sağlamalarından kaynaklanır. Duxson vd. (2007), geopolimer üretiminde kullanılan hammaddelerin özellikle uçucu kül gibi atık malzemeler olması durumunda, karbon ayak izinin PÇ'ye göre %40-80 oranında daha düşük olduğunu bildirmiştir. Aynı çalışmada, geopolimerlerin üretim süreçlerinde ortaya çıkan sera gazı emisyonlarının azaltılabileceği ve bu malzemelerin çevresel sürdürülebilirliği destekleyebileceği vurgulanmıştır.

Geopolimer üretiminde atık malzemelerin kullanılması hem kaynakların daha verimli kullanılmasına hem de atıkların yönetimine katkı sağlamaktadır. Özellikle döngüsel ekonomi yaklaşımında, atıkların yeniden kullanılması ve değerli malzemelere dönüştürülmesi, sürdürülebilir inşaat sektörüne katkıda bulunur (Van Deventer vd., 2012). Yüksek fırın cürufu, uçucu kül gibi sanayi atıkları, geopolimer üretiminde bağlayıcı malzeme olarak kullanılarak atıkların çevresel etkisi azaltılmakta, aynı zamanda bu malzemelerin depolanması gereksinimi de ortadan kalkmaktadır (Habert ve Ouellet-Plamondon, 2016).

Yeşil üretim süreçlerinin bir diğer avantajı, daha az çevresel zarar ve sera gazı salınımına yol açmalarıdır. Turner ve Collins (2013), geopolimerlerin yaşam döngüsü analizlerinde, PÇ'ye göre %70-90 arasında daha az karbon salımı yaptığını belirtmiştir. Bu, sürdürülebilir inşaat uygulamaları için önemli bir adımdır. Habert ve Ouellet-Plamondon'un (2016) yaptığı çalışmada, geopolimer betonların yaşam döngüsü değerlendirmesi ile PÇ'li betonlar karşılaştırılmıştır. Geopolimer betonların üretiminde enerji tüketimi ve karbon emisyonlarının çimentoya göre %80'e varan oranlarda daha düşük olduğunu ortaya koymuştur. Ancak bu avantajların elde edilmesi, kullanılan alkali aktivatörlerin üretim süreçlerinin de optimize edilmesine bağlıdır, çünkü bu aktivatörlerin üretimi sırasında karbon salımı söz konusu olabilir (Turner ve Collins, 2013).

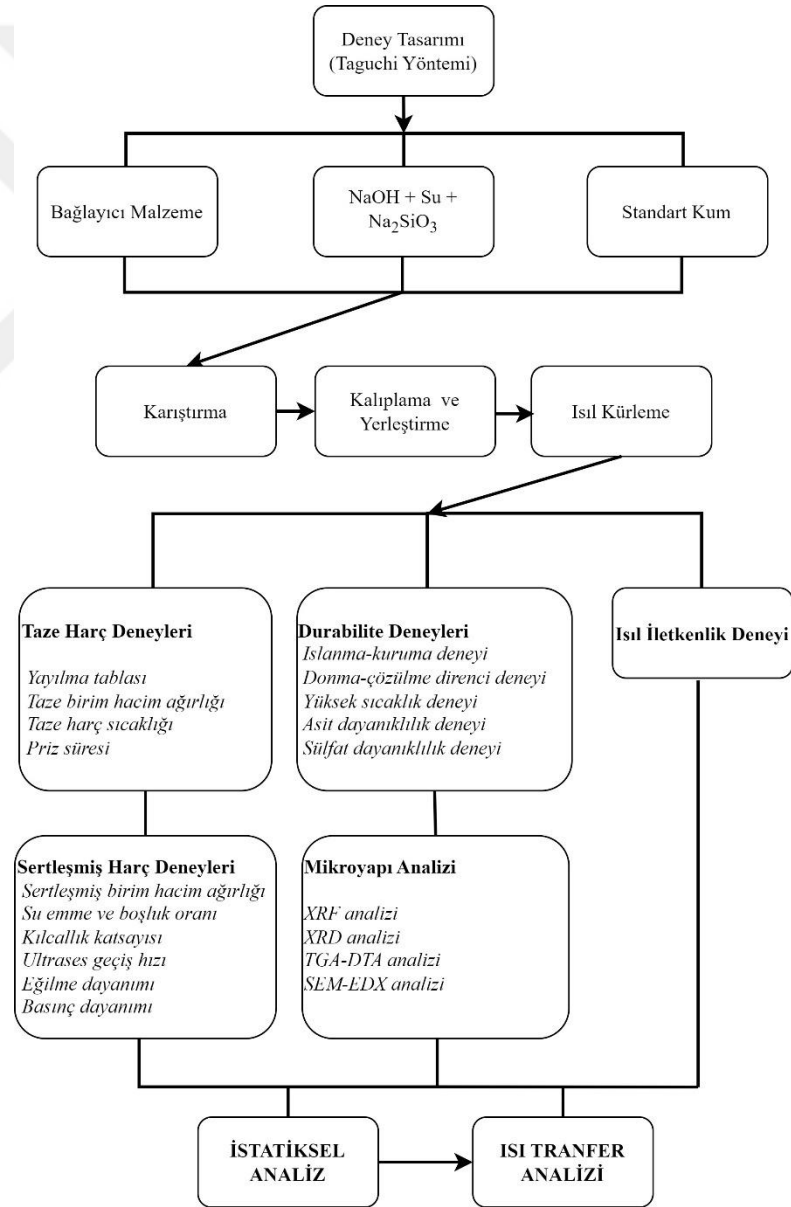
Bunlara ek olarak kum kullanımının azaltılması sebebiyle ÖTL'nin geri dönüştürülmesi, büyük çevresel faydalar sağlamaktadır. Yılda milyonlarca ton lastik atığı biriktikçe, bu malzemelerin bertaraf edilmesi önemli bir çevresel sorun oluşturmaktadır. Geopolimer harç üretiminde ÖTL kullanımı, bu atıkların inşaat sektöründe yeniden değerlendirilmesi için etkili bir çözüm sunar. Aynı zamanda, ÖTL'nin geri dönüştürülerek yapı malzemelerine dahil edilmesi, bu malzemelerin üretim maliyetlerini düşürebilir ve çevresel sürdürülebilirliği artırabilir (Siddique ve Naik, 2004). Atık lastiklerin kullanımı, inşaat sektörü için ekonomik açıdan cazip bir seçenek olarak öne çıkmakta, aynı zamanda karbon ayak izinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır.

Geopolimerlerin sürdürülebilirlik açısından birçok avantajı bulunmaktadır. Doğal kaynakların korunmasına, enerji verimliliğine, daha düşük karbon ayak izine ve atık yönetimine katkı sağlar. Geopolimer harçların karbon ayak izi, hammadde kaynağı, üretim süreci ve kullanılan enerjiye bağlı olarak büyük ölçüde değişiklik gösterebilir. Ancak genel literatür, geopolimerlerin PC'ye kıyasla çevresel avantajlar sunduğunu ve sürdürülebilir bir malzeme olarak öne çıktığını göstermektedir. Bu malzemelerin yaygınlaşması, sürdürülebilir inşaat sektörüne geçişte önemli bir rol oynayabilir.

Geopolimerlerin mekanik, termal ve mikro yapı özellikleri üzerine yapılan araştırmalar, kullanılan hammadde kaynakları, alkali aktivatörler, karışım oranları ve kürlenme süreçleri arasındaki ilişkileri incelemiştir. Bu çalışmalar, alüminosilikat kaynaklarının türü, Na konsantrasyonu, kürlenme sıcaklığı ve süresinin basınç ve eğilme dayanımı üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermiştir. Ancak, bu etkilerin geopolimer harçlarında nasıl ortaya çıktığı ve hangi parametrelerin özellikle fiziksel, mekanik ve termal özellikler üzerinde en fazla etkiye sahip olduğu yeni araştırmalarla aydınlatılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada, Taguchi yöntemi ve ANOVA analizleri ile bu parametrelerin etkisi incelenmiştir. Deneysel tasarım programı, tüm faktörleri ve seviyeleri içeren bir ortogonal A16(4⁵) dizisi kullanılarak oluşturulmuştur. Mekanik özellikler için "en iyisi en büyük", termal özellikler için ise "en iyisi en küçük" kriteri esas alınarak en uygun karışım belirlenmiştir. Deney sonuçları Taguchi yöntemi ve ANOVA ile analiz edilerek hipotez doğrulanmıştır. Ayrıca, en iyi mekanik ve termal özelliklere sahip harç karışımlarında kullanılan kum miktarını azaltmak için %10 ile %100 arasında değişen miktarlarda ÖTL kullanılarak dayanım ve termal özellikler araştırılmıştır. Toplamda 54 farklı harç karışımı incelenmiştir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Tezin bu bölümünde geopolimer harç üretimi için çeşitli atık malzemelerin kullanımı deneysel olarak incelenmiştir. Deneylerde bor atığı, uçucu kül ve silis dumanı gibi atık malzemeler, belirlenen oranlarda karıştırılarak alkali aktivasyon süreciyle geopolimerizasyon gerçekleştirilmiştir. Kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimi, alkali aktivatör konsantrasyonu, kürleme sıcaklığı ve süresi gibi parametreler optimize edilmiştir. Bu parametrelerin mekanik, termal ve dayanıklılık özellikleri üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla basınç dayanımı, eğilme dayanımı, termal iletkenlik ve su emme gibi testler uygulanmıştır. Deneysel çalışmanın akış şeması Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Akış şeması

3.1. Malzeme

Bu deneysel çalışmada, geopolimer harç üretiminde kullanılan malzemeler titizlikle seçilmiştir. Ana bağlayıcı malzeme olarak uçucu kül, bor atığı ve silis dumanı kullanılmıştır. Uçucu kül, yüksek oranda silis ve alümina içeren bir yan ürün olup, alkali aktivasyona uygun reaktivitesi ile bilinir. Bor atığı, endüstriyel üretim süreçlerinden elde edilen ve geri dönüştürülebilir bir malzemedir; silis dumanı ise ince yapısı ve yüksek amorf silika içeriği sayesinde mekanik dayanımın artırılmasında kritik bir rol oynar. Alkali aktivasyon süreci için NaOH ve Na_2SiO_3 çözeltileri kullanılarak geopolimerizasyonun etkinliği sağlanmıştır. Ayrıca, harç karışımlarında kullanılan su hem karışımın işlenebilirliğini sağlamak hem de kimyasal reaksiyonları başlatmak için gerekli bir bileşen olarak yer almıştır. Bu malzemeler, çevresel sürdürülebilirlik ve performans açısından optimize edilerek kullanılmıştır. Kullanılan malzemelerin özellikleri aşağıdaki bölümlerde ayrı ayrı tanımlanmıştır.

3.1.1. Çimento

Bu çalışmada, geopolimer harç ile karşılaştırma amacıyla geleneksel harç üretiminde ÇİMSA Eskişehir Çimento Fabrikası'nda üretilen ve TS EN 197-1 standardına uygun CEM I 42.5 R tipi PÇ kullanılmıştır. CEM I 42.5 R çimentosu, yüksek erken dayanım ve hızlı priz alma özellikleri ile bilinen bir çimento türüdür. Bu özellikler, özellikle yapı sektöründe hızlı inşaat süreçlerinde tercih edilen bir çimento sınıfıdır. Çimentonun özgül ağırlığı 3.11 olarak belirlenmiştir. PÇ, geleneksel harçlarda bağlayıcı olarak kullanılmış ve mekanik dayanımın yanı sıra dayanıklılık açısından geopolimer harçlarla karşılaştırılmak üzere seçilmiştir. Bu karşılaştırma, geleneksel çimento bazlı sistemlerle geopolimerlerin sürdürülebilirlik ve mekanik özellikler açısından nasıl bir alternatif oluşturabileceğini göstermek amacıyla yapılmıştır. Çalışmada kontrol harcı üretimi için kullanılan çimento malzemesinin görünümü Şekil 3.2'de sunulmuştur.



Şekil 3.2. Çimento (PÇ)

3.1.2. Uçucu kül

Uçucu kül, termik santrallerde öğütülmüş kömürün yanmasıyla ortaya çıkan bir üründür. Türkiye İstatistik Kurumunun yaptığı çalışmaya göre, Türkiye’de termik santrallerde 2003 yılında 11.84 milyon ton, 2004 yılında 13.34 milyon ton, 2006 yılında 16.01 milyon ton ve 2008 yılında 19.66 milyon ton uçucu kül açığa çıkmıştır. 2020 yılına kadar yıllık uçucu kül miktarının ise 50 milyon tonu geçeceği bildirilmiştir (Kaplan ve Gültekin, 2010). Dünya üzerinde de yıllık uçucu kül miktarının 600 milyon tondur. Birçok ülkede üretilen uçucu külün %80’i inşaat endüstrisinde kullanılırken bu değer Türkiye’de %2-3 arasında, dünya ortalaması olarak %15 civarındadır (Türker vd. 2009).

Uçucu kül, geopolimer üretiminde yaygın olarak kullanılan önemli bir endüstriyel yan üründür. Yüksek oranda amorf silis ve alümina içerdiği için geopolimerizasyon için uygun bir kaynaktır (Duxon vd., 2007’b; Rattanasak ve Chindaprasirt, 2009). Ancak, uçucu küllerin büyüklükleri, morfolojileri ve reaktiviteleri değişkenlik gösterebilir, bu da geopolimer ürünlerinin dayanımını etkileyebilir. Aynı kaynaktan elde edilen uçucu küllerle üretilen geopolimerlerde bile farklı dayanımlar gözlemlenebilir (van Deventer vd., 2007). Uçucu kül parçacıkları genellikle küresel şekilli ve homojen olmayan yapıya sahiptir. Kristal ve camsı fazlar içerirler, bu da geopolimerizasyon sürecinde dikkatli bir kontrol gerektirir (Duxon vd., 2007’b).



Şekil 3.3. Uçucu kül (CFUK)

Bu çalışmada kullanılan uçucu kül, Selka Hazır Beton Tic. ve San. AŞ.’den temin edilmiş olup Çayırhan Termik Santrali atığıdır ve TS EN 197-1 standardına göre V sınıfı uçucu kül olarak uygunluk göstermektedir. Ayrıca, ASTM C 618 standardına göre hem C hem de F sınıfı uçucu kül kriterlerini karşılamaktadır. Uçucu külün özgül ağırlığı 2.30 olarak belirlenmiştir. Çalışmada geopolimer harç üretiminde bağlayıcı malzeme olarak kullanılan CFUK malzemesinin görünümü Şekil 3.3’te sunulmuştur.

3.1.3. Bor atığı

Bor, doğada serbest element olarak bulunmayan, genellikle bor oksit (B_2O_3) bileşiği şeklinde bulunan bir elementtir. Bor mineralleri, içeriklerindeki kalsiyum, sodyum ve magnezyum elementlerine göre sınıflandırılır. Minerallerin ekonomik değeri, bileşikteki B_2O_3 oranına göre belirlenir (Bütünler, 2011). Doğada 230'dan fazla bor minerali bulunmakta olup, ticari açıdan en önemli bor mineralleri Tablo 3.1'de görüldüğü gibi tinkal, kolemanit, kernit, üleksit, pandemit, borasit, szaybelit ve hidroborasit'tir.

Tablo 3.1. Bor mineralleri B_2O_3 oranı (%) (Etimaden, 2024)

Yapı	Mineral İsmi	Formül	B_2O_3 oranı (%)	Yer
Sodyum Borat	Tinkal	$Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$	36.6	Kırka, Emet, Bigadiç, USA
	Kernit	$Na_2B_4O_7 \cdot 4H_2O$	51.0	Kırka, USA, Argentina
Kalsiyum Borat	Kolemanit	$Ca_2B_6O_{11} \cdot 5H_2O$	50.8	Emet, Bigadiç, USA
	Pandemit	$Ca_4B_{10}O_{19} \cdot 7H_2O$	49.8	Sultançayır, Bigadiç
Sodyum-Kalsiyum Borat	Üleksit	$NaCaB_5O_9 \cdot 8H_2O$	43.0	Bigadiç, Kırka, Emet, Argentina
	Probertit	$NaCaB_5O_9 \cdot 5H_2O$	49.6	Kestelek, Emet, USA
Magnezyum-Kalsiyum Borat	Hidroborasit	$CaMgB_6O_{11} \cdot 6H_2O$	50.5	Emet

Bor rezervinin %73'üne sahip olan Türkiye, dünyada ilk sırada yer alarak dünya bor ihtiyacının %60'ını karşılamaktadır (Boren 2021). Türkiye'deki bor rezervleri açısından en bol bulunan mineraller tinkal ve kolemanittir. Türkiye'deki tinkal yatakları Kırka-Eskişehir'de, kolemanit yatakları ise Emet-Kütahya, Bigadiç-Balıkesir ve Kestelek-Bursa bölgelerinde yer almaktadır. Ayrıca, üleksit rezervleri Bigadiç-Balıkesir'de bulunmaktadır ve zaman zaman Kestelek-Bursa'dan yan ürün olarak üretilmektedir. Eti Maden tarafından yüksek katma değerli ürünlere dönüştürülen başlıca bor mineralleri kolemanit (%76), tinkal (%22) ve üleksit (%2)'tir (Tablo 3.1). Bu minerallerden elde edilen ürünler, yoğunlaştırılmış tinkal, boraks pentahidrat, boraks dekahidrat, anhidrit boraks, borik asit, sodyum perborat, etidot-67, bor oksit, çinko borat, kalsine tinkal, öğütülmüş kolemanit ve öğütülmüş üleksittir. Üretimin çoğu ihraç edilmektedir. Eti Maden, çeşitli madencilik yöntemleriyle değer kazandırdığı bor minerallerini, fiziksel işlemlerden geçirerek zenginleştirir ve yoğunlaştırılmış bor ürünlerine dönüştürür.

Türkiye’de üretilen bor ürünleri, genellikle cam ve seramik alanlarında %36 ve %31 oranlarında kullanılmaktadır (Etimaden, 2024).

Türkiye’de yoğunlaştırılmış bor üretimi, Eti Holding’e ait Eti Bor A.Ş. tarafından işletilen Emet-Kütahya, Bigadiç-Balıkesir, Kırka-Eskişehir (Şekil 3.4) ve Kestelek-Bursa tesislerinde gerçekleştirilmektedir. Bu tesislerde yoğunlaştırılmış bor üretimi, yıkama işleminden sonra dağılma ve sınıflandırma sonucu killi malzemenin uzaklaştırılmasına dayanmaktadır. Etibank Kırka Boraks Fabrikaları, yılda yaklaşık 3 milyon ton tinkal üretmektedir (Etimaden, 2024). Tinkalden boraks pentahidrat, boraks dekahidrat, yoğunlaştırılmış tinkal anhidrit boraks ve kalsine tinkal elde edilmektedir. Kullanım çeşitliliğinden dolayı Türkiye’de yılda yaklaşık 3.5 milyon ton bor atığı ortaya çıkmaktadır (DPT 2008). Üretim sırasında, yoğunlaştırılmış tinkal birimi ve boraks pentahidrat biriminde yılda 120.000 ton kil atığı meydana gelmektedir. Bu atıklar, yaklaşık %8-22 B_2O_3 içermekte olup, tesis alanına boşaltılmaktadır. Bu atıklar yüksek B_2O_3 konsantrasyonuna sahip olduklarından, ekonomik kayıp ve çevresel kirlilik problemi oluşturmaktadır (Özdemir ve Öztürk, 2003).



Şekil 3.4. Kırka-Eskişehir üretim tesisi

Üretim potansiyelindeki artışla birlikte bor atıklarının giderek artması beklenen bir durumdur. Bor atıkları endüstriyel diğer yan ürünler gibi geopolimer karışımlarına dahil edilebilir. Bu tür atıklar, geopolimerin çevresel sürdürülebilirliğini artırırken, malzemenin farklı özellikler kazanmasına da olanak tanır. Örneğin, bor içeren katkılar, geopolimerin termal direncini artırabilir ve yüksek sıcaklık koşullarına karşı dayanıklılığını geliştirebilir (Çelik, 2019). Aynı şekilde, bor atıkların kullanılması çevresel yükü azaltırken ekonomik avantajlar da sağlayabilir (Karslıoğlu vd., 2022).

Bu çalışmada kullanılan bor atığı Kırka bölgesindeki tinkal cevherinin işlenmesi sonucu ortaya çıkan atıktır. Kırka bölgesi, dünya çapında en büyük tinkal yataklarını

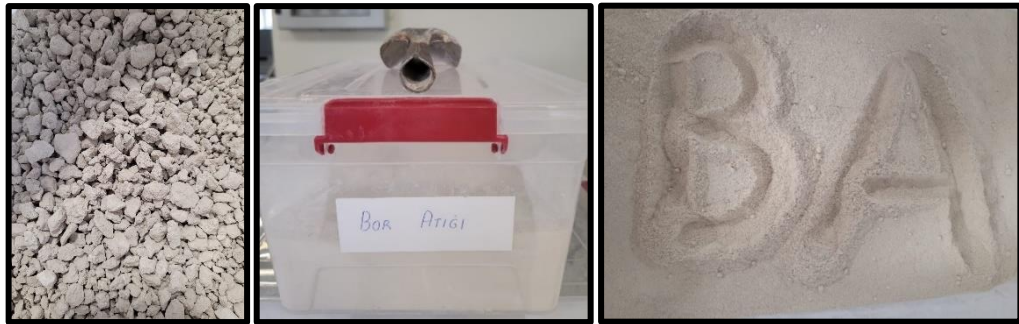
barındırmaktadır. Tinkal cevheri, doğada suda çözünmeyen maddeler, dolomit ve kil ile bulunur. Saf tinkal cevheri şeffaf veya beyaz renkte olsa da killi malzemelerle birleştğinde genellikle soluk gri veya sarı renkte görülmektedir. Kırka-Eskişehir’de yer alan cevherin genel görünümü Şekil 3.5’te sunulmuştur. Çıkarılan cevher ortalama %25 bor içeriğine sahiptir. Kırka bölgesinden alınan BA Şekil 3.6’da gösterilen laboratuvar tipi çeneli kırıcı ile öğütülmüştür. Ayrıca, çalışmada geopolimer harç üretiminde bağlayıcı malzeme olarak kullanılan BA malzemesinin görünümü Şekil 3.7’de verilmiştir. Bor atığının özgül ağırlığı 2.61 olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.5. Tinkal yataklarının genel görünümü



Şekil 3.6. Laboratuvar tipi çeneli kırıcı



Şekil 3.7. Bor atığı (BA)

3.1.4. Silis dumanı

Silis dumanı, silisyum metali veya ferrosilisyum alaşımlarının elektrik ark fırınlarında üretilmesi sırasında, yüksek saflıktaki kuvarsitin kömür ve odun parçacıkları ile indirgenmesi sonucu ortaya çıkan ince taneli bir baca tozudur. Bu üretim sürecinde büyük miktarda SiO gazı açığa çıkar ve bu gaz hava ile temas ettiğinde SiO₂'ye dönüşür. Hızlı soğuma ve yoğunlaşma sonucu, içeriğinde %85-98 oranında amorf silis bulunan ince taneli bir madde olan silis dumanı oluşur. Bu yüksek incelik ve silis içeriği sayesinde, silis dumanı güçlü bir puzolanik özellik sergilemektedir.

Geopolimer üretiminde kullanılan çeşitli malzemeler, geopolimerizasyon sürecini hızlandırmak veya nihai ürünün özelliklerini iyileştirmek amacıyla önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle silis dumanı gibi bağlayıcı malzemeler karışıma eklendiğinde, daha yoğun bir polimer yapısı oluşturulabilir, bu da mekanik dayanımı önemli ölçüde artırır. Silis dumanı, yüksek oranda silika içeriği nedeniyle polimerizasyon tepkimelerini hızlandırarak reaksiyon ürünlerinin daha kompakt ve homojen bir yapıda oluşmasına katkıda bulunur (Rashad, 2013). Bu tür katkılar, geopolimer matrisinde oluşan boşlukları doldurarak malzemenin dayanımını ve uzun vadeli performansını artırır.

Bu çalışmada kullanılan silis dumanı Antalya Ferrokrom tesisinde üretilen endüstriyel bir atıktır. Silis dumanının özgül ağırlığı 2.21 olarak belirlenmiştir. Çalışmada geopolimer harç üretiminde bağlayıcı malzeme olarak kullanılan SD malzemesinin görünümü Şekil 3.8'de sunulmuştur.



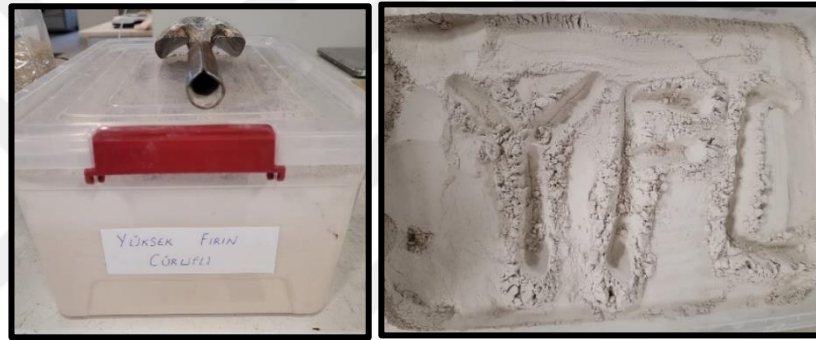
Şekil 3.8. Silis dumanı (SD)

3.1.5. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu

Yüksek fırın cürufu, demir cevherinin kok kömürü ve kireç taşı gibi yardımcı maddelerle yüksek sıcaklıkta eritilmesi sonucu elde edilen bir yan üründür. Demir ve çelik üretimi sırasında açığa çıkan bu cüruf, başlıca SiO₂, CaO, Al₂O₃ ve MgO gibi bileşenler içerir (Bakharev vd., 1999). Cürufun kimyasal bileşimi, onu çimento

üretiminde yaygın olarak kullanılan bir puzolanik malzeme haline getirir. Yüksek fırın cürufu, alkali aktivasyonla geopolimer harç üretiminde de kullanılabilir. Bu süreçte cürufun reaktif bileşenleri, alkali çözelti ile reaksiyona girerek bağlayıcı özellik kazanır ve çevre dostu, dayanıklı yapı malzemeleri elde edilmesine olanak tanır. Yüksek fırın cürufu kullanımı, doğal kaynakların korunmasına katkı sağlar ve endüstriyel atıkların yeniden değerlendirilmesini teşvik etmektedir.

Bu çalışmada geopolimerizasyon reaksiyonunda kalsiyum miktarını artırmak ve oda sıcaklığında sertleşmeyi yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Yüksek fırın cürufu Karabük Demir Çelik Fabrikası'nın atığı olup Küpeliler AŞ'den temin edilmiştir. Yüksek fırın cürufunun özgül ağırlığı 2.81 olarak belirlenmiştir. Çalışmada geopolimer harç üretiminde katkı maddesi olarak YFC malzemesinin görünümü Şekil 3.9'da sunulmuştur.



Şekil 3.9. Yüksek fırın cürufu (YFC)

3.1.6. Standart kum

Harç karışımlarında kullanılan CEN standart kumu, Limak Çimento San. ve Tic. A.Ş. Trakya Çimento Fabrikası'ndan temin edilmiştir. Bu standart kum, 1350 gramlık paketler halinde sağlanmış olup, TS EN 196-1 standardına uygun bir tane boyutu dağılımına sahiptir. Kumun elek analizi sonuçları ve sınır değerleri Tablo 3.2 verilmiştir. CEN standart kumunun görünümü Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Özgül ağırlığı 2.57 olarak belirlenmiştir.

Tablo 3.2. CEN standart kumu ve elek analizi

Elek çapı (mm)	Elek üstü kalan (%)	TS EN 196-1 sınır değerleri (%)
2.00	0.0	0
1.60	10.2	7±5
1.00	34.6	33±5
0.50	68.4	67±5
0.16	89.9	87±5
0.08	99.3	99±1



Şekil 3.10. CEN standart kumu

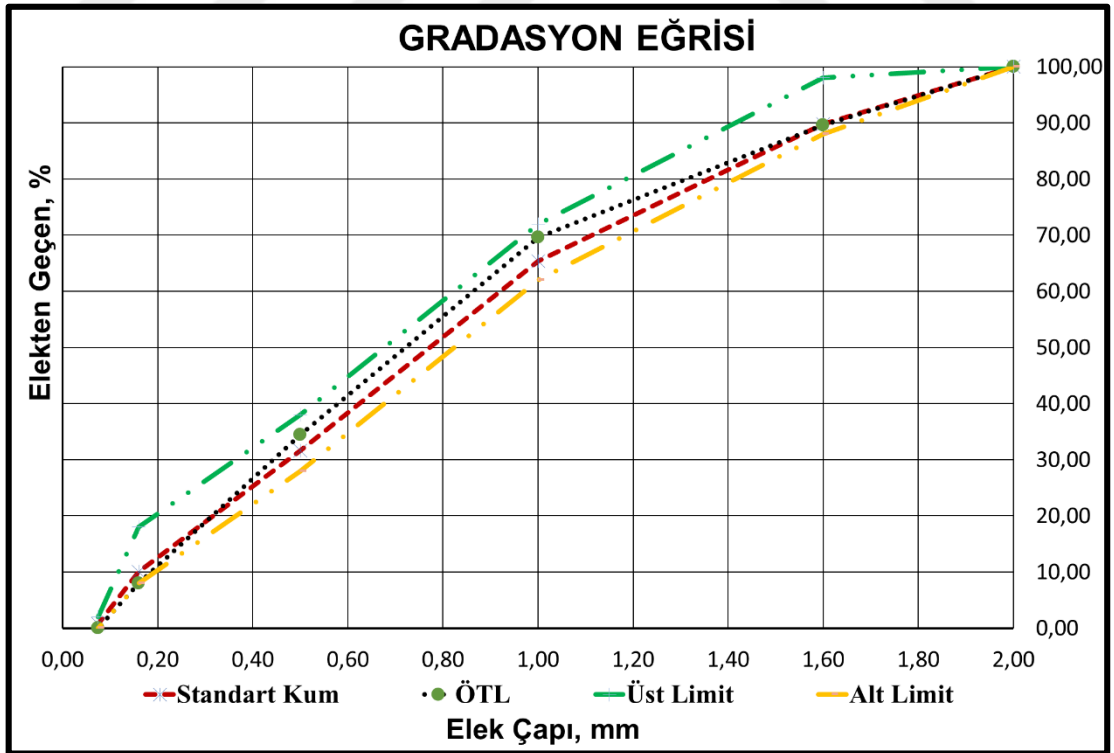
3.1.7. Ömrünü tamamlamış lastik

Dünyada her geçen gün artan araç sayısı, atık üretim miktarını doğrudan etkilemektedir. Her yıl yaklaşık 1.5 milyar atık lastik ortaya çıkarken, bu sayının 2030 yılına kadar yılda 5 milyara ulaşacağı tahmin edilmektedir (Thomas ve Gupta 2016). Lastiklerin hava koşullarına dayanıklılığı ve biyolojik olarak parçalanmaması nedeniyle doğal ortamda ayrışması uzun zaman almaktadır. Lastik yakma, atık lastiklerden kurtulmanın en yaygın yöntemidir çünkü atık lastikleri yok etmenin en kolay ve en ucuz yoludur. Atık lastiğin yakılması yangın tehlikelerine neden olabilir ve canlıların sağlığını tehdit eden zararlı bileşikler üretir. Ayrıca yandıktan sonra kalan toz toprağı kirleterek büyük bir çevre kirliliğine neden olmaktadır.

Harçlarda kullanılan kum sınırsız bir doğal kaynak değildir ve kum temininde gelecekte güçlükler yaşanması olasıdır. Bu tezde kum kullanımını azaltmak amacıyla ömrünü tamamlamış atık lastik kullanılmıştır. Ömrünü tamamlamış lastiğin görünümü Şekil 3.11’de sunulmuştur. Özgül ağırlığı 0,95 olarak belirlenmiştir. Ömrünü tamamlamış lastiğin elek analizi sonuçları ve sınır değerleri Şekil 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.11. Ömrünü tamamlamış lastik (ÖTL)



Şekil 3.12. Harç karışımlarında kullanılan ÖTL malzemesinin elek analizi

3.1.8. Sodyum hidroksit

Sodyum Hidroksit, kimyasal formülü NaOH olan, güçlü bir alkali bileşiktir. Genellikle beyaz katı formda bulunur ve su ile çözündüğünde oldukça korozif bir çözelti oluşturur. NaOH, sabun yapımından kâğıt üretimine kadar çeşitli endüstrilerde kullanılır. Aynı zamanda su ile birleştiğinde ekzotermik bir reaksiyon verir, yani ısı açığa çıkar. Bu özellikleri nedeniyle endüstriyel işlemlerde sıkça tercih edilen bir bileşiktir.



Şekil 3.13. Sodyum hidroksit (NaOH)

NaOH, geopolimer üretiminde alkali aktivatör olarak önemli bir role sahiptir. Geopolimerizasyon sürecinde, alüminosilikat içeren hammaddeler NaOH gibi alkali çözeltilerle aktive edilerek bağlayıcı özellikler kazanır. NaOH, alüminosilikat malzemeleri çözerek, onların polikondenzasyonunu ve alüminosilikat jel oluşumunu sağlamaktadır. Bu jel, geopolimerlerin temel yapı taşıdır ve dayanım özelliklerini belirler. NaOH konsantrasyonu, geopolimer harcın mekanik özellikleri ve dayanımı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Düşük NaOH konsantrasyonu, bağlayıcı reaksiyonların tam olarak gerçekleşmemesine ve daha düşük dayanım elde edilmesine yol açarken, yüksek konsantrasyon ise reaksiyonları hızlandırır ve erken dayanım kazandırır. Ancak, aşırı yüksek konsantrasyonlar da aşırı ısı üretimi ve çatlamalara neden olabilir. Bu nedenle, geopolimer harçlarda NaOH miktarının dikkatle optimize edilmesi gerekir. Bu çalışmada NaOH, katı olarak Detsan Kimya Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti.'nden temin edilip suda çözdürülerek kullanılmıştır.

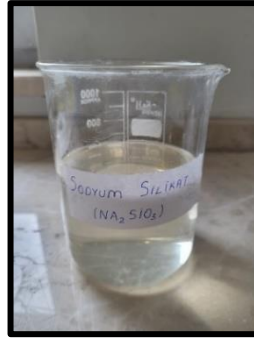
Tablo 3.3. NaOH kimyasal özellikleri

Kimyasal özellikleri	Veriler
Molekül ağırlığı	40 g/mol
Asidimetrik	% 98.28
Na ₂ CO ₃	0.3
NaCl	% 0.008
Fe	8.22 ppm

Kimyasal özellikleri Tablo 3.3'te verilmiştir. Çalışmada geopolimer harç üretiminde bağlayıcı malzemeleri aktive etmede kullanılan iki bileşikten biri olan NaOH malzemesinin görünümü Şekil 3.13'te sunulmuştur.

3.1.9. Sodyum silikat

Sodyum silikat, kimyasal formülü Na_2SiO_3 olan, halk arasında "cam suyu" veya "su camı" olarak bilinen ve suda kolayca çözünebilen bir malzemedir. Bu bileşik, özellikle seramik endüstrisi başta olmak üzere birçok farklı alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Sodyum silikat, yüksek erime noktasına sahip olmasıyla dikkat çeker ve bu özellik, onu çeşitli yüksek sıcaklık uygulamaları için ideal kılar. Aynı zamanda, temin edilmesi kolay ve maliyeti düşük bir malzemedir, bu da onu endüstriyel işlemlerde tercih edilen bir seçenek haline getirir. Geopolimer üretiminde de önemli bir role sahiptir. Sodyum silikat, alkali aktivasyon sürecinde NaOH ile kullanılarak, alüminosilikatların çözülmesini ve bağlayıcı jel oluşumunu destekler. Bu, geopolimerlerin mekanik dayanımını ve kimyasal direnç özelliklerini artırır. Bu çalışmada Na_2SiO_3 , katı olarak Detsan Kimya Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti.'nden sulu çözelti halinde temin edilmiştir. Kimyasal özellikleri Tablo 3.4'te verilmiştir. Çalışmada geopolimer harç üretiminde bağlayıcı malzemeleri aktive etmede kullanılan iki bileşikten biri olan Na_2SiO_3 malzemesinin görünümü Şekil 3.14'te sunulmuştur.



Şekil 3.14. Sodyum silikat (Na_2SiO_3)

Tablo 3.4. Na_2SiO_3 kimyasal özellikleri

Kimyasal özellikleri	Veriler
Molekül ağırlığı	63.94 g/mol
Yoğunluk	1.391 g/cm ³
Na ₂ O	% 8.93
SiO ₂	% 29.11
Modül	3.36

3.1.10. Polivinil alkol

Polivinil Alkol (PVA), sentetik bir polimer olup, suda çözünebilen bir malzemedir. Genellikle beyaz veya sarımsı renkli bir toz halinde bulunur. PVA, yüksek yapışma özelliği, iyi film oluşturma kapasitesi ve kimyasal dayanıklılığı nedeniyle çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle tekstil, yapıştırıcılar, kaplamalar ve emülsiyon polimerizasyonu gibi alanlarda tercih edilir. Ayrıca, PVA biyobozunur olması nedeniyle çevre dostu bir malzeme olarak kabul edilmektedir. ÖTL'in yüzey işleminde PVA, lastik yüzeyinin modifikasyonunda ve diğer malzemelere yapışmasını artırmada etkili bir ajan olarak kullanılabilir. PVA, lastik yüzeyine uygulandığında ince bir film tabakası oluşturarak, yüzeyi kaplar ve lastik malzemesinin diğer bağlayıcılarla, özellikle polimer veya kompozitlerle daha iyi yapışmasını sağlar. Ayrıca, PVA'nın suya dayanıklı yapısı ve iyi yapışma özellikleri, geri dönüştürülmüş lastiklerin farklı uygulamalarda kullanımını kolaylaştırır. Bu işlem, özellikle lastiklerin geri dönüştürülerek inşaat malzemelerinde, yol yapımında veya diğer sanayi alanlarında yeniden kullanılmasını teşvik eder.

Çalışmada harç üretiminde ÖTL yüzey işleminde kullanılan PVA malzemesinin görünümü Şekil 3.15'te sunulmuştur. Kimyasal özellikleri Tablo 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.15. Polivinil alkol (PVA)

Tablo 3.5. PVA kimyasal özellikleri

Kimyasal özellikleri	Veriler
Kimyasal formül	$(C_2H_4O)_n$
Moleküler ağırlık	Değişken (ortalama 20,000 - 200,000 g/mol)
Erime noktası	230°C - 240°C
Yoğunluk	1.19 - 1.31 g/cm ³
pH (5% çözeltide)	5 - 7
Viskozite (20°C'de, 4% çözeltide)	4 - 60 mPa·s

3.1.11. Su

Harç üretiminde su, iki temel sebepten dolayı kullanılmıştır. İlk olarak, su çimento ile reaksiyona girerek hidratasyon süreci başlatılmıştır. İkinci olarak ise, dökülmüş geleneksel harcın yüzeyini nemli tutularak, suyun buharlaşmasını önlemek ve kimyasal reaksiyonların devam etmesi için gerekli suyun ortamda kalmasını sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan su ise Tepebaşı Belediyesi'ne ait şehir şebekesinden temin edilmiştir. Karışım suyu olarak şehir içme sularının kullanılabilirliği TS EN 1008'de belirtilmektedir.

3.2. Harçların Tasarlanması

Harç tasarımı, yapı malzemelerinin mekanik ve fiziksel performansını optimize etmek için önemli bir adımdır. Geopolimer harçlarda, malzemelerin dayanıklılık, işlenebilirlik ve sürdürülebilirlik gibi özelliklerini en üst düzeye çıkarmak amacıyla doğru karışım oranları büyük önem taşır. Geopolimer harçların tasarım süreci, kullanılan malzemelerin çeşitliliği ve özelliklerine bağlı olarak çeşitli parametrelerin optimize edilmesini gerektirir. Bu süreçte alkali aktivatörlerin konsantrasyonu, bağlayıcı malzeme gibi bileşenlerin oranları ve kürleme koşulları dikkate alınır. Tasarımda en uygun parametrelerin belirlenmesi, malzemenin hem dayanım kazanmasını hem de uzun vadede stabil ve dayanıklı olmasını sağlar.

3.2.1. Taguchi deney tasarımı

Geopolimerler, kullanılan hammaddelere ve sentez koşullarına bağlı olarak yüksek basınç dayanımı, düşük büzülme, hızlı veya yavaş priz alma, klor geçişine karşı direnç, asit dayanıklılığı, yüksek sıcaklık ve ateşe dayanıklılık, düşük ısı iletkenlik gibi çeşitli özellikler sergileyebilirler. Ayrıca, kimya ve nükleer endüstrilerde atıkların immobilizasyonu için alternatif çözümler sunabilirler. Ancak, bu özelliklerin tümü her geopolimer yapısında doğal olarak bulunmaz. Bu nedenle, istenen özellikler, uygulama alanına veya maliyet azaltımına yönelik olarak uygun karışımlar ve süreç koşulları ile optimize edilmelidir (Duxon vd. 2007'a; Duxon vd. 2007'b; Lyu vd. 2013).

Geopolimer harçların tasarlanmasında kullanılan optimizasyon yöntemlerinden biri Taguchi Deney Tasarımıdır. Bu yöntem, deney sayısını en aza indirerek, malzemelerin performansını etkileyen faktörler arasındaki etkileşimleri anlamaya ve optimum performansı sağlayacak kombinasyonları belirlemeye yardımcı olur. Genichi Taguchi tarafından geliştirilen bu metodun temel amacı, bir sürecin veya ürünün belirlenen hedef değer etrafındaki sapmaları azaltmaktır. Geleneksel deney tasarımlarında, faktörlerin

sayısı arttıkça deney sayısı katlanarak artar ve bu da zaman ve maliyet açısından büyük bir yük oluşturur. Taguchi yöntemi ise ortogonal dizinler ve kesirli faktöriyel tasarımları kullanarak bu deney sayılarını minimize eder ve süreç optimizasyonunda maliyet ve zaman tasarrufu sağlar. Taguchi yöntemi, özellikle çoklu faktörlerin olduğu karmaşık sistemlerde kullanılabilecek etkili bir araçtır.

Bu çalışmada deneyler, Taguchi'nin ortogonal dizilime dayalı (OD) kesirli faktöriyel tasarım metodolojisi kullanılarak yapılandırılmıştır. Bu güçlü yöntem, tam faktöriyel tasarıma kıyasla daha az deneyle, birden fazla girdinin sonucu nasıl etkilediğini keşfetmek için kullanılır. Verimliliği, nispeten az sayıda deneyden önemli bulgular, ideal parametre kombinasyonları ve girdilerin bireysel etkileri gibi değerli sonuçlar elde etmesinde yatar. Ayrıca, bu yaklaşım, varyasyon kaynaklarını izole etme ve bu sayede sistem performansı ile kalitesindeki dalgalanmaları azaltma kabiliyetine sahiptir (Dongxia vd., 2012). Bu metodolojinin temel adımları, Addis vd., (2023) tarafından aşağıda özetlenmiştir:

I. İlk olarak, hedefler belirlenir ve bağımlı değişken tanımlanır. Bu çalışmada amaç, geopolimer harcın basınç ve çekme dayanımını artırırken, termal iletkenliği minimize etmektir. Dolayısıyla bağımlı değişkenler, harcın basınç ve eğilme dayanımı ile ısı iletkenliktir.

II. Girdi süreç parametreleri belirlenir ve bu parametrelerin seviyeleri tanımlanır. Tablo 3.6, beş girdi parametresi ve bunların seviyelerine dair ayrıntılı bir görünüm sunmaktadır.

III. Uygun bir OD tasarımı seçilir ve süreç parametrelerinin sayısına ve seviyelerine dayalı olarak gerekli minimum deney sayısını belirlenir. Taguchi'nin deney tasarımına (DOE) uygun olarak, A16 OD'si için tasarlanan deney numuneleri Tablo 3.7'de detaylandırılmıştır.

IV. Deneyler OD'ye uygun şekilde uygulanır ve yanıt verileri kaydedilir. Her deney altı tekrar ile yapılmış ve elde edilen ortalama değer yanıt parametresi olarak alınmıştır.

V. Sinyal-gürültü oranı hesaplanır ve varyans analizini gerçekleştirerek her süreç değişkeni için optimal seviyeleri belirlenir.

VI. Girdi değişkenlerinin sonuç üzerindeki yüzdelik katkıları değerlendirilir.

VII. Tahmin edilen teorik değerleri doğrulamak için bir doğrulama testi yapılır.

Tablo 3.6. Taguchi deneysel tasarımıda kullanılan parametreler

Level	BA (%)	SD (%)	Na (%)	Sıcaklık (°)	Kür süresi (s)
1	0	0	6	40	12
2	5	5	8	60	24
3	10	10	10	80	48
4	15	15	12	100	72

Taguchi optimizasyonu, deney tasarımıda varyasyonu azaltmak için performans kriteri olarak sinyal-gürültü (S/N) oranını geliştirmiştir. Taguchi Deney Tasarımı yöntemi ile elde edilen test sonuçları, S/N oranına dönüştürülerek değerlendirilir. Taguchi optimizasyonu, hedef türüne göre üçe ayrılarak her biri için farklı S/N oranları tanımlamıştır. Bu üç problemde de hedef, S/N oranını maksimize etmektir. Numunelerin mekanik özellikleri için "en büyük en iyisidir" yaklaşımı, termal özellikleri için ise "en küçük en iyisidir" yaklaşımı kullanılmıştır.

En küçük en iyisidir: Bu durumda kalite değişkeni Y'nin hedef değeri sıfırdır.

$$S/N \text{ Ratio} = -10 \cdot \log(\Sigma Y^2/n) \quad (3.1)$$

En büyük en iyisidir: Y'nin hedef değeri sonsuzdur.

$$S/N \text{ Ratio} = -10 \cdot \log[\Sigma (1/Y^2)/n] \quad (3.2)$$

Hedef değer en iyisidir: Mevcut durumda Y için belirli bir hedef değer (örneğin ürün boyutları) verilmiştir.

$$S/N \text{ Ratio} = 10 \cdot \log(Y^2/S^2) \quad (3.3)$$

Geopolimerlerin mikro yapısal ve mekanik özellikleri, alümina-silikat bileşenlerin kompozisyonları ve alkali aktivatörlerin yanı sıra, alümina-silikat bileşenlerin reaktivitesi tarafından da etkilenir. Bu nedenle geopolimer tasarımı, bağlayıcı malzemede bulunan SiO₂ ve Al₂O₃'ün reaktivitesi, Ms modülü (SiO₂/Na₂O oranı ile tanımlanan), Na içeriği, sentez koşulları, kürlenme yöntemleri, süre ve sıcaklıklar gibi birçok değişkeni içerir (Juengsuwattananon vd. 2019; Dehghani vd. 2021). Bu çalışmada, bor atığı kullanımı (0, 5, 10 ve 15% olmak üzere 4 seviye), silis dumanı kullanımı (%0, %5, %10 ve %15 olmak üzere 4 seviye), Na konsantrasyonu (%6, %8, %10 ve %12 olmak üzere 4 seviye), etüv kürlenme sıcaklığı (40, 60, 80 ve 100°C olmak üzere 4 seviye) ve etüv kürlenme süresi (12, 24, 48 ve 72 saat olmak üzere 4 seviye) olmak üzere beş faktör göz önüne alınmıştır. Bu optimizasyon ile geopolimer harçların bağlayıcı fazının üretilmesi amaçlanmıştır.

Farklı kontrol edilebilir faktörlerin ve bunların seviyelerinin seçimi, önceki araştırmalara ve ön testlerden elde edilen gözlemler ışığında belirlenmiştir. Bu bağlamda, Na konsantrasyonu için daha iyi mekanik özellikler elde etmek amacıyla önerilen değer aralığı %6-15 olarak belirlenmiştir (Atabey vd., 2020). Bağlayıcı malzemenin ağırlığına göre %6 ile %12 arasında değişen optimal Na konsantrasyonunu kullanılması amaçlanmıştır. Aktivasyon çözeltilerinin Ms modülü 1,0 olarak belirlenmiştir.

Nurruddin vd. (2018), geopolimer yapı malzemeleri için çeşitli kürleme tekniklerini inceleyen çalışmaları değerlendirmiştir. Araştırmacılar, fırında kürleme, membran kürleme, buharla kürleme, sıcak bezle kürleme, hidrotermal kürleme, oda sıcaklığında kürleme ve suyla kürleme gibi çeşitli kürleme yöntemlerini incelemiştir. Bu yöntemler arasından, fırında kürleme geopolimer harç için en etkili yöntem olarak öne çıkmıştır. Bu çalışmada da fırında kürleme yöntemi uygulanmıştır. Birçok çalışma (Perera vd., 2007; Kani ve Allahverdi, 2009; Rovnanik, 2010; Heah vd., 2011), farklı kürleme koşullarının geopolimer hamurunun fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Neredeyse kusursuz bir geopolimerizasyon elde etmek için 40°C ile 85°C arasındaki kürleme sıcaklıkları gereklidir. Genel olarak ise geopolimer ürünlerinin daha yüksek kürleme sıcaklıklarıyla birlikte artan basınç dayanımı sergilediğini belirtilmektedir (Rangan, 2008; Rovnanik, 2010; Mo vd., 2014). Ancak, bu eğilim genellikle daha düşük sıcaklık aralıklarında, özellikle 60-75°C arasında daha belirgindir (Rashidian-Dezfouli vd., 2018). Bu çalışmada, 40°C ile 100°C arasındaki sıcaklıklarda ve 12-72 saatlik kürleme süresinde sentezlenmiş geopolimer harçlar kullanılmıştır.

Bu deneysel çalışma programı kapsamında, tüm faktörlerin ve seviyelerin kullanıldığı ortogonal bir dizi A16(4⁴5) içeren Taguchi yöntemi kullanılarak toplam 16 karışım grubu tasarlandı. Bu bağlamda, farklı parametrelerin geopolimer harç üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla göz önüne alınarak, Tam faktöriyel tasarım yöntemine göre, her parametrenin etkisini incelemek için toplam 1024 (Seviye^{Parametre};4⁵) deneysel kombinasyon gerekmekte olup, bu kesinlikle zaman alıcı bir süreçtir ve ekonomik olmadığı fark edilebilir. Bu nedenle, araştırmada daha az sayıda deney ile karışım parametrelerinin farklı seviyelerinin geopolimer harç özellikleri üzerindeki etkisini incelemek ve optimum sonucu elde etmek için Taguchi deneysel tasarım yöntemi kullanılmıştır. Tasarlanan harçlar Tablo 3.7'de verilmiştir. Ayrıca, geleneksel çimento harcı A0, minimum birim hacim ağırlığına sahip harç AS, en iyi mekanik özelliklere sahip harç AX ve en iyi termal özelliklere sahip harç ise AY olarak adlandırılmıştır.

Tablo 3.7. Üretilen numune türleri

Numune tipi	BA (%)	SD (%)	Na (%)	Sıcaklık (°)	Kür süresi (s)
A1	0	0	6	40	12
A2	0	5	8	60	24
A3	0	10	10	80	48
A4	0	15	12	100	72
A5	5	0	8	80	72
A6	5	5	6	100	48
A7	5	10	12	40	24
A8	5	15	10	60	12
A9	10	0	10	100	24
A10	10	5	12	80	12
A11	10	10	6	60	72
A12	10	15	8	40	48
A13	15	0	12	60	48
A14	15	5	10	40	72
A15	15	10	8	100	12
A16	15	15	6	80	24

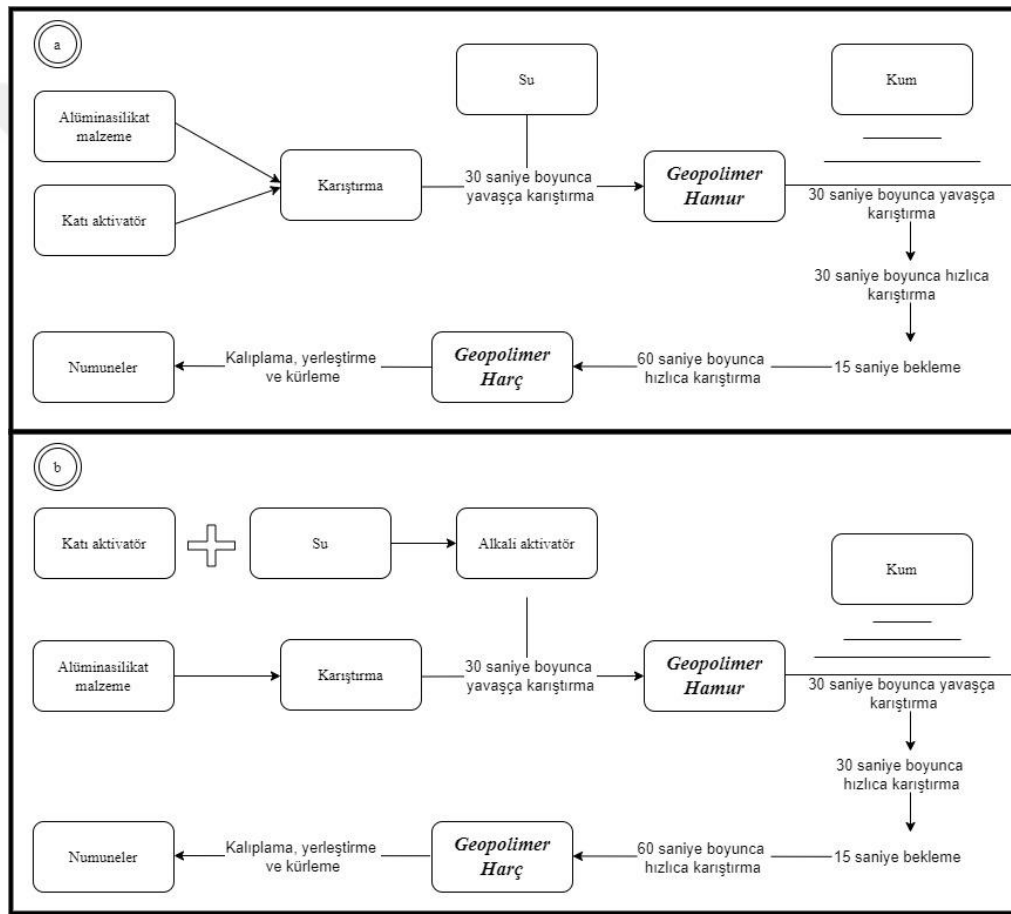
3.3. Numune Üretimi

Tek bileşenli geopolimerler, "sadece su ekle" geopolimerler olarak da bilinir ve üretim sürecini basitleştirir. Bu tür geopolimerlerde, katı alkali aktivatör ve alüminosilikat öncüsü tek bir kuru karışımda birleştirilir. Geleneksel iki bileşenli geopolimer sistemlerinde ise sıvı alkali aktivatör ve alüminosilikat öncüsü, kullanım sırasında karıştırılır. Tek bileşenli sistemin en büyük avantajı, sadece su eklenerek geopolimerizasyon reaksiyonunun başlatılabilmesidir. Ancak, katı alkali aktivatörler (örneğin, NaOH veya Na₂SiO₃) ve alüminosilikat öncüsü içeren kuru karışıma su eklendiğinde, alkali aktivatörlerin tamamen çözülmesi zaman alabilir. Bu eksik çözülme, aktivatör ile alüminosilikat öncüsü arasındaki reaksiyonu yavaşlatır ve tek bileşenli geopolimerlerin mekanik özelliklerinin, iki bileşenli geopolimerler kadar iyi olmamasına neden olabilir. Bu nedenlerle, bu tezde iki bileşenli geopolimer üretim yöntemi tercih edilmiştir. Şekil 3.16'da geopolimer harcın üretim süreci gösterilmektedir.

Harç karışımlarının üretimi TS EN 196-1 standardına uygun olarak Hobart mikserinde gerçekleştirilmiştir. Hobart mikseri 140 ve 285 devir/dakika olmak üzere iki farklı karıştırma hızına sahiptir. 140 devir/dakika yavaş, 285 devir/dakika da hızlı ayarda karıştırma hızıdır. Hobart mikseri karıştırma kabına öncelikle kuru malzemeler (bağlayıcı malzeme) yerleştirilmiştir. Geopolimerizasyon reaksiyonunda kalsiyum miktarını

artırmak ve oda sıcaklığında sertleşmeyi sağlamak için %13,5 cüruf ilave edilmiştir (Celik vd. 2018). Geopolimer harç karışımı için karışımdan 24 saat önce hazırlanan NaOH çözeltisi Şekil 3.17’de gösterilen manyetik karıştırıcı ile tam bir karışım elde edilinceye kadar Na_2SiO_3 çözeltisi ile karıştırılmıştır.

Bağlayıcı/aktivatör oranı 1/1 olarak alınmıştır. Bağlayıcı malzeme, hobart mikseri yardımıyla alkali aktivatör çözeltisi ile karıştırılmıştır. Hobart mikseri TS EN 196-1 standardına uygun şekilde ilk olarak 30 sn yavaş ayar da çalıştırılmıştır. İlk 30 saniyelik yavaş karıştırmadan sonra, standart kum karışımına yavaşça ilave edilmeye başlanmış ve bu süreçte 30 saniye daha ikinci yavaş karıştırma uygulanmıştır.



Şekil 3.16. (a) Tek bileşenli ve (b) iki bileşenli geopolimer harcın üretimi

Harç için gerekli olan standart kum bağlayıcı oranının 2,5 katı ilave edilmiştir. İlk 60 saniyelik yavaş karıştırmadan sonra karışımlar 30 saniye de hızlı ayar da karıştırılmıştır. Daha sonra 15 saniye kadar dinlenen karışımlar tekrar 60 saniye hızlı ayar da karıştırılmış ve harç karışımı üretimleri gerçekleştirilmiştir. Hobart mikseri ve harç üretimi Şekil 3.18’de verilmiştir. Karıştırma kabından mala yardımıyla alınan harç karışımları, iki ya da üç tabaka halinde prizma numune kalıplarına dikkatlice

yerleştirilmiştir. Her bir tabaka yerleştirildikten sonra, yüzeyleri düzgün bir şekilde düzeltilmiş ve numuneler dakikada 60 düşme hareketi yapan düşme tablası kullanılarak sıkıştırılmıştır. Bu sıkıştırma işlemi, harç içindeki boşlukları en aza indirerek numunelerin homojen ve dayanıklı olmasını sağlamıştır. Numunenin yerleştirilmesi ve kalıplanması Şekil 3.19’da sunulmuştur.



Şekil 3.17. Manyetik karıştırıcı



Şekil 3.18. Hobart mikseri ve harçların üretimi



Şekil 3.19. Sarsma cihazı, numunenin yerleştirilmesi ve kalıplanması

Geopolimerizasyon süreci boyunca, kimyasal reaksiyonlar su açığa çıkarır ve bu su, kürlleme sırasında uygulanan ısı nedeniyle buharlaşır (Hardjito ve Rangan, 2005). Bu nedenle numune kürlleme aşamasında su kaybı olmaması amacıyla Şekil 3.20’de sunulduğu üzere numuneler etüve fırın torbaları kullanılarak koyulmuştur. Isıl kürlleme sonunda etüvden çıkarılan numuneler deney gününe kadar laboratuvar ortamında bekletilmiştir. A0 ise üretimden 1 gün sonra kalıplarından çıkarılmış ve deney gününe kadar standart kür koşullarında kür havuzunda $25\pm 2^{\circ}\text{C}$ ’de bekletilmiştir.

Geopolimer harç karışım detayları Tablo 3.8’de verilmiştir. Burada karışlar kodlanırken UK “U”, SD “S” ve BA “B” olarak belirtilmiştir. Örneğin A6 harcı için %90UK+%5BA+%5SD kullanımı kısaca 90U5B5S olarak verilmiştir. Kullanılan bağlayıcı malzeme miktarı 450 g, YFC miktarı 60 g ve standart kum miktarı 1125 g’dır. Ayrıca, referans numunesinin (A0) üretiminde 450 gram çimento (CEM I 42.5 R), 225 gram su ve 1350 gram standart kum kullanılmıştır.



Şekil 3.20. Numunelerin torbalanması ve fırına yerleştirilmesi

Tablo 3.8. Harç karışımları için malzeme miktarı

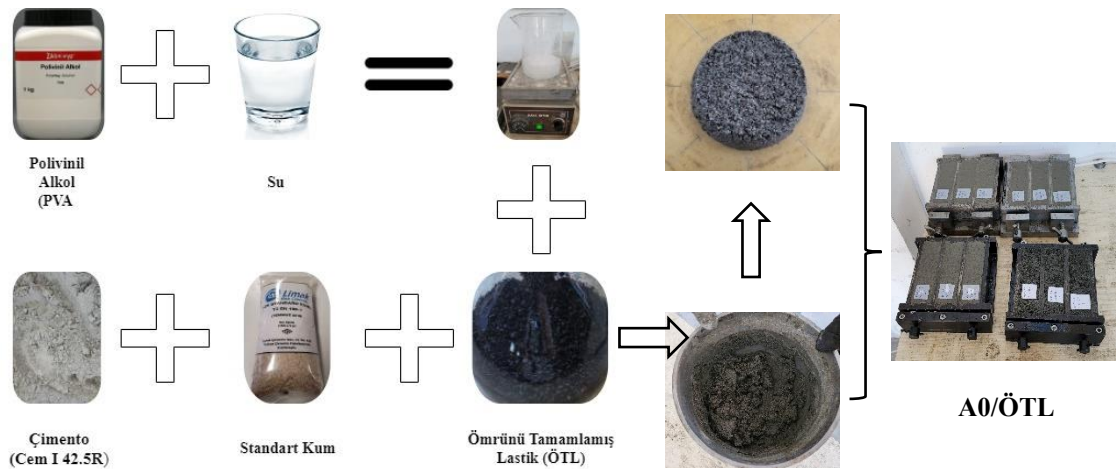
Numune tipi	UK (g)	BA (g)	SD (g)	NaOH (g)	Na ₂ SiO ₃ (g)	Su (g)
A1 100U	450,0	0,0	0,0	32,5	125	147,9
A2 95U5S	427,5	0,0	22,5	44	170	120,1
A3 90U10S	405,0	0,0	45,0	55	212	94,2
A4 85U15S	382,5	0,0	67,5	66	255	67,7
A5 95U5B	427,5	22,5	0,0	44	170	120,1
A6 90U5B5S	405,0	22,5	22,5	32,5	125	147,9
A7 85U5B10S	382,5	22,5	45,0	66	255	67,7
A8 80U5B15S	360,0	22,5	67,5	55	212	94,2
A9 90U10B	405,0	45,0	0,0	55	212	94,2
A10 85U10B5S	382,5	45,0	22,5	66	255	67,7
A11 80U10B10S	360,0	45,0	45,0	32,5	125	147,9
A12 75U10B15S	337,5	45,0	67,5	44	170	120,1
A13 85U15B	382,5	67,5	0,0	66	255	67,7
A14 80U15B5S	360,0	67,5	22,5	55	212	94,2
A15 75U15B10S	337,5	67,5	45,0	44	170	120,1
A16 70U15B15S	315,0	67,5	67,5	32,5	125	147,9

Karışımlara kum miktarını azaltmak için kuma ikame olarak hacimce %10 ile %100 arasında değişen miktarlarda ÖTL eklenmiştir. A0 harcı için karışım detayları Tablo 3.9’da verilmiştir. Şekil 3.21’de ÖTL harç üretimi verilmiştir. Harç içinde kullanılan su miktarının %0,5 ve %1’i oranında PVA kullanılarak yüzey işleme yapılmıştır.

Tablo 3.9. A0 numunesi için üretilen ÖTL içeren numune tipleri (PVA yüzey işleme)

Numune tipi	%ÖTL-%PVA	Kum (g)	ÖTL (g)	PVA (g)
A0/ÖTL1	%10-%0.0	1215	50,0	0,00
A0/ÖTL2	%10-%0.5	1215	50,0	1,13
A0/ÖTL3	%10-%1.0	1215	50,0	2,25
A0/ÖTL4	%20-%0.0	1080	100,1	0,00
A0/ÖTL5	%20-%0.5	1080	100,1	1,13
A0/ÖTL6	%20-%1.0	1080	100,1	2,25
A0/ÖTL7	%40-%0.0	810	200,1	0,00
A0/ÖTL8	%40-%0.5	810	200,1	1,13
A0/ÖTL9	%40-%1.0	810	200,1	2,25
A0/ÖTL10	%60-%0.0	540	300,2	0,00
A0/ÖTL11	%60-%0.5	540	300,2	1,13
A0/ÖTL12	%60-%1.0	540	300,2	2,25
A0/ÖTL13	%80-%0.0	270	400,3	0,00
A0/ÖTL14	%80-%0.5	270	400,3	1,13
A0/ÖTL15	%80-%1.0	270	400,3	2,25
A0/ÖTL16	%100-%0.0	0	500,3	0,00
A0/ÖTL17	%100-%0.5	0	500,3	1,13
A0/ÖTL18	%100-%1.0	0	500,3	2,25

Üretim sırasında ÖTL parçacıkları ve PVA çözeltisi önce manyetik karıştırıcıda 500 dev/dk dönüş hızıyla 10 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra ÖTL-PVA çözeltisine çimento eklenerek karıştırılmıştır. Hobart mikseri TS EN 196-1 standardına uygun şekilde çalıştırılmıştır. Ayrıca, bu işlemler geopolimer harçlar deneyleri sonucunda AY karışım içinde yapılmıştır. Toplamda 54 farklı harç karışımı incelenmiştir.



Şekil 3.21. PVA yüzey işleme ile ÖTL kullanılarak harç üretilmesi

3.4. Deneyler

Bu çalışmada, taze ve sertleşmiş geopolimer harçların fiziksel, mekanik ve termal performanslarını belirlemek amacıyla çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler, taze harçların işlenebilirliğini ve kıvamını ölçmeye yönelik taze harç deneyleri ile başlamış, ardından sertleşmiş harç numunelerinin mekanik özelliklerini inceleyen sertleşmiş harç deneyleriyle devam etmiştir. Ayrıca, geopolimer harçların farklı çevresel koşullar altındaki dayanıklılığını ölçmek için durabilite testleri uygulanmıştır. Bu deneyler, harçların performansını belirlemek için önemli veriler sağlamış ve elde edilen sonuçlar, geopolimer harç karışımlarının optimize edilmesine katkı sunmuştur.

3.4.1. Taze harç deneyleri

Taze harç deneyleri, karışımın sahada veya laboratuvar ortamında nasıl davranacağını anlamak açısından büyük öneme sahiptir. Yayılma tablası, taze birim hacim ağırlığı, taze harç sıcaklığı ve priz süresi gibi deneyler, taze harcın hem reolojik hem de fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde kullanılır. Bu testler, özellikle harcın uygulama sürecindeki performansını ölçerek, işlenebilirlik ve akışkanlık hakkında bilgi sağlar.

Bu deneylerde yayılma tablası ile harcın akışkanlık özellikleri değerlendirilirken, taze birim hacim ağırlığı testi ile karışımın yoğunluğu belirlenir. Ayrıca, taze harç sıcaklığı deneyleri ile karışımın sıcaklık değişimlerine karşı davranışı incelenir. Priz süresi ise harcın sertleşme hızını ve kalıplama sonrası ne kadar sürede dayanım kazandığını gösterir. Bu deneyler, özellikle geopolimer harçlarda optimum karışım oranlarının belirlenmesi ve kıvam kontrolü açısından kritik veriler sağlar.

3.4.1.1. Yayılma tablası

Yayılma tablası deneyi, taze harcın kıvamını ve akışkanlık davranışını belirlemek için kullanılan bir yöntemdir. Harcın başlangıçtaki akışkanlığını ve viskozitesini belirlemeye yardımcı olan bu testte, taze harcın belirli bir yük altında ne kadar yayıldığı ölçülerek işlenebilirliği hakkında bilgi sağlanır.

Deney düzeneği, 300 mm çapında bir tabla ve üzerine yerleştirilen kesik koni şeklindeki kalıptan oluşur. Bu kalıbın yüksekliği 60 mm, taban çapı 100 mm ve üst çapı 70 mm'dir. Taze harç konik kalıba üç katman halinde doldurulur ve sıkıştırıldıktan sonra kalıp dikkatlice kaldırılır ve harcın serbest yayılmasına izin verilir. Ardından, yayılma tablası saniyede 1 kez olmak üzere 15 defa düşürülür ve bu süreç sonucunda harcın

yayılma çapı ölçülerek işlenebilirlik değerlendirilir. Yayılma tamamlandıktan sonra, iki karşılıklı çap ölçülerek ortalama yayılma çapı belirlenir. Yayılma çap ölçümleri TS EN 1015-3 standardına uygun olarak yapılmıştır. Deneyinin yapılışı Şekil 3.15'te verilmiştir.

Deney sonuçlarına göre, harcın yayılma çapı ne kadar büyükse, akışkanlığı o kadar fazla ve işlenebilirliği o kadar iyidir. Yüksek yayılma değerleri, düşük viskozite ve iyi işlenebilirlik anlamına gelirken, düşük yayılma değerleri harcın daha katı ve akışa karşı dirençli olduğunu gösterir. Yayılma tablası deneyi, taze harçların döküm sırasında kalıpta nasıl hareket edeceğini ve yerleşme potansiyelini anlamak için pratik bir yöntemdir.



Şekil 3.22. Harçların yayılma çapının belirlenmesi

3.4.1.2. Taze birim hacim ağırlığı

Taze birim hacim ağırlığı (BHA) deneyi, harçların yoğunluk ve homojenliğini taze durumda belirlemek amacıyla yapılır. Bu deneyde, belirli hacimdeki bir kalıba üç aşamada yerleştirilen harç, her aşama sonunda sıkıştırılarak homojen dağılım sağlanır ve Şekil 3.23'te gösterildiği gibi dolu kalıbın ağırlığı ölçülür. Kalıbın ağırlığı ve hacmi kullanılarak birim hacim ağırlığı Denklem 3.4 kullanılarak hesaplanır.

$$\text{Taze BHA (g/cm}^3\text{)} = \frac{\text{Taze harcın kütlesi (g)}}{\text{Kalıbın hacmi (cm}^3\text{)}} \quad (3.4)$$



Şekil 3.23. Numune tartımı

3.4.1.3. Taze harç sıcaklığı

Taze harç sıcaklığı deneyi, harçların karıştırma işlemi sonrasında sahip olduğu sıcaklığı belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Bu deney, harcın priz süresi, sertleşme hızı ve nihai dayanımı üzerinde etkili olan sıcaklık değerini ölçmek için önemlidir. Deneyin uygulanmasında, karıştırma işlemi tamamlanan taze harç, uygun bir kap içerisine alınır ve sıcaklık ölçer cihaz, harca doğrudan daldırılarak sıcaklık değeri okunur. Ölçüm sırasında cihazın harçla tam temas ettiğinden emin olunmalıdır. Taze harç sıcaklığı ölçümleri ASTM C 1064 standardına uygun olarak yapılmıştır. Ölçüm için kullanılan cihaz Şekil 3.24'te verilmiştir.



Şekil 3.24. Taze harç ölçüm cihazı

3.4.1.4. Priz süresi

Priz süresi deneyi, harçların sertleşmeye başlama ve tamamlanma sürelerini belirlemek amacıyla yapılır. Bu deney, harcın taze halden katı hale geçiş sürecini analiz ederek, uygulama ve işlenebilirlik açısından önemli veriler sunar. Deneyin uygulanmasında, harç karışımı uygun kalıplara yerleştirilir ve başlangıç ve bitiş priz süreleri Vicat iğnesi ile ölçülür. İlk olarak, Vicat iğnesi harcın yüzeyine belirli aralıklarla batırılarak, iğnenin harç içine ne kadar battığı ölçülür. İğne harç içine 25 mm'den daha fazla batmadığında, başlangıç priz süresi olarak kaydedilir. Bu ölçüm periyodik olarak her 10-15 dakikada bir tekrarlanır ve başlangıç priz süresi belirlenir.



Şekil 3.25. Otomatik Vicat cihazı

Aynı Vicat cihazı kullanılarak, iğnenin harç içerisine neredeyse hiç batmadığı (1 mm'den az) zaman bitiş priz süresi olarak kaydedilir. Bu süre, harcın tamamen katı hale gelmesi ve artık şekil verilemez durumda olduğu aşamayı temsil eder. Priz süre ölçümleri ASTM C 807 standardına uygun olarak yapılmıştır. Ölçüm için kullanılan cihaz Şekil 3.25'te verilmiştir.

Priz süresi sonuçları, atık malzemelerin karışım üzerindeki etkilerinin yanı sıra sıcaklık ve nem gibi çevresel faktörlerin prizlenme sürecine katkısını değerlendirmede kritik öneme sahiptir. Bu sayede, geopolimer harcın uygulama sahasındaki uygunluğunu ve dayanım gelişimi için ideal koşulların sağlanması mümkün olabilir.

3.4.2. Sertleşmiş harç deneyleri

Sertleşmiş harçların performansını anlamak için çeşitli deneyler uygulanır. Bu deneyler, sertleşmiş harçların birim hacim ağırlığı, su emme ve boşluk oranı, kılcallık katsayısı, ultrases geçiş hızı, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı gibi özellikleri belirler. Sertleşmiş harçların birim hacim ağırlığı ve boşluk oranı, malzemenin iç yapısındaki yoğunluk ve gözenek miktarını belirlerken, ultrases geçiş hızı harcın iç yapısındaki homojenlik ve dayanımı anlamaya yardımcı olur. Eğilme ve basınç dayanımı testleri ise malzemenin yapısal dayanımını ölçmek için kritik öneme sahiptir.

3.4.2.1. Sertleşmiş birim hacim ağırlığı

Sertleşmiş BHA deneyi, harçların sertleşme sonrası BHA'yı belirlemek amacıyla yapılan bir deneydir. BHA, malzemenin içinde bulunan boşluklar da dahil olmak üzere, malzemenin toplam ağırlığının hacmine bölünmesiyle hesaplanır. Bu deney, harcın dayanıklılığı, dayanım kapasitesi ve yapı elemanlarının ağırlığı üzerindeki etkilerini değerlendirmek açısından önemlidir. Deneyin uygulanmasında, önceden belirli ölçülere sahip kalıplara dökülüp kür edilen harç numuneleri kullanılır. Sertleşmiş numunenin ağırlığı hassas bir terazi ile ölçülürken, numunenin hacmi de fiziksel ölçümleri ile hesaplanır. BHA, Şekil 3.26'da gösterildiği gibi üretimden 24 saat sonra kalıplardan çıkarılan numunelerin tartılması ile belirlenmiştir. Kalıplardan çıkarılan harç numunelerinin ağırlıkları, hacimlerine bölünerek sertleşmiş BHA hesaplanmış ve her karışımdan 40x40x160 mm boyutlarında altı numune alınarak bunların BHA ortalaması alınmıştır. Bu sonuçlar, karışımdaki atık malzemelerin harcın yoğunluk ve içyapı üzerindeki etkilerini analiz etmede önemli bir veri sunar. Özellikle yüksek birim hacim ağırlıkları, harcın daha kompakt ve dayanıklı bir yapıya sahip olduğunu gösterirken, düşük değerler daha gözenekli bir yapı oluşumuna işaret edebilir.



Şekil 3.26. Sertleşmiş harç numune tartımı

3.4.2.2. Su emme ve boşluk oranı

Su emme ve boşluk oranı deneyi, harçların su alma kapasitesini ve iç yapısındaki boşluk miktarını belirlemek amacıyla gerçekleştirilir. Bu deney, harcın gözeneklilik düzeyini değerlendirmek açısından önemlidir.



Şekil 3.27. P_d ve P_s ölçümü

Deneyin uygulanmasında, her harç karışımı için 40x40x160 mm ölçülerine sahip altı adet sertleşmiş harç numuneleri kullanılmıştır. İlk olarak, numuneler belirli bir süre su içerisinde bekletilerek doymun hale getirilir ve ardından yüzeydeki fazla su temizlenerek doymun yüzey kuru ağırlıkları (P_d) ölçülür. Daha sonra, numuneler 105°C'de 24 saat kurutularak tamamen kuru ağırlıkları (P_k) belirlenir. Su emme miktarı Denklem 3.5'te belirtildiği üzere, doymun ağırlık ile kuru ağırlık arasındaki farkın kuru ağırlığa oranlanmasıyla hesaplanır. Boşluk oranı için ise numunenin su içindeki ağırlığı (P_s) belirlenir ve Denklem 3.6 ile hesaplanır.

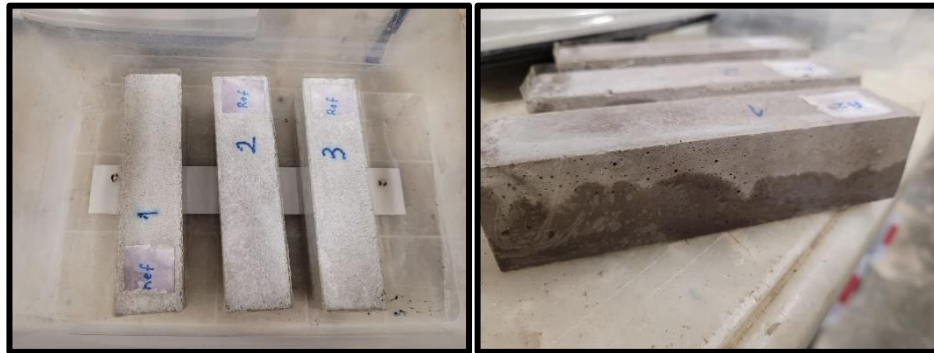
$$S_e = \left(\frac{P_d - P_k}{P_k} \right) \times 100 \quad (3.5)$$

$$S_e = \left(\frac{P_d - P_k}{P_d - P_s} \right) \times 100 \quad (3.6)$$

Su emme ve boşluk oranı ölçümleri TS EN 1015-10 standardına uygun olarak yapılmıştır. Deneyinin yapılışı Şekil 3.27’de verilmiştir. Elde edilen su emme ve boşluk oranı değerleri, harcın su geçirgenliği, dayanıklılığı ve uzun vadeli performansı hakkında önemli bilgiler sunar. Bu parametreler, atık malzemelerin harcın iç yapısı üzerindeki etkilerini değerlendirmeye ve optimum karışımın belirlenmesine yardımcı olur.

3.4.2.3. Kılcal su emme katsayısı (Sorptivite)

Sorptivite, bir malzemenin suyu kılcal emiş yoluyla absorbe etme ve iletme kapasitesini belirleyen kritik bir özelliktir ve özellikle yapı malzemelerinde dayanıklılığı değerlendirmek için kullanılmaktadır. Kılcallık, malzeme içinde suyun hareket etmesini sağlayan mikroyapısal boşluklarla ilişkilidir ve dayanıklılık açısından önemlidir. Yüksek kılcallık katsayısına sahip malzemeler, su ve agresif iyonların iç yapıya girmesini kolaylaştırarak korozyon ve çatlama gibi bozulma mekanizmalarını hızlandırabilmektedir. Bu nedenle, sorptivite yapı malzemelerinin agresif çevresel etkilere (örneğin, sülfat ve klor iyonları) karşı gösterdiği direnci değerlendiren temel bir parametre olarak öne çıkmaktadır. Bu deney, harcın gözenek yapısını ve suyun yapı malzemesi içindeki yükselme eğilimini analiz etmek için önemli bir parametre sunmaktadır. Bu çalışmada, harçlar üzerinde ASTM C1585-13 standardına uygun şekilde kılcal su emme deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneyinin yapılışı Şekil 3.28’de verilmiştir. Deneyde her harç karışımı için 40x40x160 mm boyutlarındaki üç prizma numune kullanılmış ve bu numuneler, deney öncesinde etüvde sabit ağırlığa gelene kadar bekletilmiştir. Daha sonra, harç numunelerinin dört yüzü su emmeyen bantla kaplanmıştır. Kaplama işleminden sonra, bir kap içine iki mesnet yerleştirilerek, harç numunelerin kaplı olmayan bir yüzü bu mesnetlerin üzerine gelecek şekilde konulmuştur. Bu işlemden sonra kap, harcın kaplı olmayan yüzeyi 5 mm kadar suya batacak şekilde suyla doldurulmuştur.



Şekil 3.28. Kılcal su emme deneyi yapılışı

Tek yüzeyi suyla temas halinde olan numuneler tarafından, su emme miktarı 1., 5., 10., 20. ve 30. dakikada; 1., 2., 3., 4., 5. ve 6. saatte; 1., 2., 3., 4., 5., 6., 7. ve 8. günde hassas terazi ile ölçülmüştür. Numuneler tarafından kılcal yolla emilen su miktarı, numunelerin suyla temas ettiği yüzeyin alanına (40x160 mm²) bölünerek belirlenen sürelerde emilen suyun yüksekliği teorik olarak Denklem 3.7'ye göre hesaplanır. Denklem 3.7'de yer alan I = Kılcal su emme (mm), m_t = numunenin “t” sürede değişen ağırlık farkı (g), a = numunenin suyla temas eden yüzey alanı (mm²), d_{su} = suyun yoğunluğunu (g/mm³) temsil etmektedir.

$$I = \left(\frac{m_t}{a \times d_{su}} \right) \quad (3.7)$$

Ayrıca, ASTM C1585-13 standardına göre, numunelere ait birincil kılcallık katsayıları 6 saate kadar olan sürenin kareköküne karşı çizilen eğiminden elde edilen regresyon analizi ile, ikincil kılcallık katsayıları ise 1 ile 8 gün sürenin kareköküne karşı çizilen eğimin regresyon analizi ile belirlenmiştir. Birincil ve ikincil kılcallık katsayıları, harçların kılcal yolla emdikleri su seviyesinin (I), zamanın kareköküne ($\sqrt{t}$) bağlı değişimini gösteren grafikteki doğrusal eğilim çizgilerinin eğimleri dikkate alınarak hesaplanmıştır.

Kılcallık katsayısı, harcın su geçirmezlik performansı, iç yapısındaki gözeneklilik ve dayanıklılık özellikleri açısından önemli veriler sunar. Yüksek kılcallık katsayısı, harcın suyu daha hızlı emdiğini ve gözenekli bir yapıya sahip olduğunu gösterirken, düşük katsayı daha kompakt ve dayanıklı bir yapı oluşumunu işaret eder. Bu sonuçlar, atık malzemelerin harcın kılcal su emme özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmede kritik rol oynar.

3.4.2.4. Ultrases geçiş hızı

Ultrases geçiş hızı deneyi, harçların iç yapısındaki homojenlik ve yoğunluk düzeylerini değerlendirmek amacıyla uygulanmaktadır. Bu deney, harcın kompaktlık seviyesi, iç yapısındaki olası boşluklar ve gözenekler hakkında bilgi sağlayarak, malzemenin mekanik dayanımı ve kalite kontrolü açısından önemli veriler sunar. Deneyde, her harç karışımı için 40x40x160 mm ölçülere sahip sertleşmiş harç numunelerinin karşılıklı yüzeylerine ultrasonik dalgalar gönderen prob cihazları yerleştirilerek dalgaların numuneden geçiş süresi ölçülür. Bu süre, malzemenin yoğunluğu ve iç yapısındaki boşluklarla ilişkilidir. Daha kısa ultrases geçiş süresi, harcın daha dolu ve kompakt olduğunu, dolayısıyla daha yüksek dayanım ve daha iyi

dayanıklılık özelliklerine sahip olduğunu gösterir. Yüksek ultrases geçiş hızı, malzemenin homojen yapısını işaret ederken, düşük hız değerleri boşluklu yapı ve iç kusurları gösterir.

Ultrases geçiş süresi ölçümleri, dijital ultrases geçiş hızı ölçme cihazı ile ASTM C 597 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deneyinin yapılışı Şekil 3.29’da verilmiştir. Ölçüm öncesinde numunelerin yüzeyleri temizlenmiş ve cihaz başlıklarına jel sürülerek alıcı ve verici başlıkları numunelerin karşılıklı yüzeylerine yerleştirilmiştir. Her numune için en az üç okuma yapılmış ve her bir karışımdan altı numunenin ortalaması alınarak ultrases geçiş hızı değerleri belirlenmiştir.



Şekil 3.29. Ultrases geçiş hızı deneyi yapılışı

Ultrases geçiş süresi, mikrosaniye (μs) cinsinden hesaplanmış olup, harç numunelerinin 7, 28 ve 90 günlük ultrases geçiş süreleri, eğilme dayanımı deneylerinden önce okunmuştur. Denklem 3.8’de yer alan; U_{pw} = Ultrases geçiş hızı (m/s), S = numunenin ses dalgası gönderilen yüzeyi ile dalgaın alındığı yüzeyi arasındaki mesafe (m), t = ses üstü dalgaın gönderilmiş olduğu numune yüzeyinden, dalgaın alındığı yüzeye kadar geçen zamanı (μs) temsil etmektedir.

$$U_{pw} = \frac{S}{t} \times 10 \quad (3.8)$$

3.4.2.5. Eğilme dayanımı

Eğilme dayanımı deneyi, sertleşmiş harcın eğilme kuvvetlerine karşı gösterdiği direnci belirlemek için yapılan bir deneydir. Bu deney, özellikle yapı malzemelerinin çekme gerilmelerine karşı performansını değerlendirmek için önemlidir. Deneyin uygulanmasında, her harç karışımı için 40x40x160 mm ölçülere sahip prizmatik altı harç numunesi kullanılmıştır. Harçların eğilme dayanımları, numunelerin döküm yönü olmayan yan yüzeylerine tek noktadan yükleme uygulanarak tayin edilmiştir. Eğilme dayanımı ölçümleri TS EN 196-1 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deneyinin yapılışı Şekil 3.30’da verilmiştir. Üç noktalı eğilme testi cihazı ile yapılan bu

deneyde mesnet silindirlerinin açıklığı 100 mm olacak şekilde numunenin iki uç noktası cihazın desteklerine yerleştirilir ve ortasından kontrollü bir şekilde yük uygulanır. Numunenin kırıldığı andaki yük değeri kaydedilerek, Denklem 3.9 kullanılarak hesaplanır. Eğilme dayanımı numunenin kırılmasına neden olan yükün numune kesitinde meydana getirdiği momentin kesit mukavemet momentine bölünmesi ile belirlenir. Denklem 3.9’da yer alan f_{ed} = Eğilme dayanımı (N/mm²), P = Kırılmaya neden olan yük (N), L = Numune uzunluğu (mm), b = Numune eni (mm), d = Numune yüksekliği (mm) temsil etmektedir. Yüksek eğilme dayanımı, harcın çekme kuvvetlerine karşı direncinin ve elastikiyetinin yüksek olduğunu gösterirken, düşük değerler ise kırılğan bir yapıyı işaret eder.

$$f_{ed} = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3.9)$$



Şekil 3.30. Üç noktalı eğilme deney cihazı ve numune

3.4.2.6. Basınç dayanımı

Basınç dayanımı deneyi, harçların yük altında performansını belirlemek amacıyla gerçekleştirilen bir deneydir. Bu deney, malzemenin mekanik özelliklerini değerlendirmek ve yapı uygulamalarındaki güvenilirliğini sağlamak için kritik öneme sahiptir. Deneyin uygulanmasında, eğilme dayanımı değerlerinin belirlenmesinin ardından ikiye bölünen yarım prizma halindeki numuneler ve 50x50x50 mm ölçülere sahip kübik numuneler üzerinde TS EN 196-1 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Altı prizma numunesinin ikiye bölünen on iki parçası ve altı kübik numune kullanılmıştır. Deneyinin yapılışı Şekil 3.31’de verilmiştir.

Yükleme öncesinde, yarım prizma numunelerin döküm yönü olmayan alt ve üst yüzeyleri, çimento presinin 40x40 mm ölçülerindeki plakaları arasına yerleştirilmiştir. Deney, numunenin yüzeyine uygulanan eksenel yük ile gerçekleştirilir; yük uygulama

cihazı, harç numunesinin ortasına yerleştirilerek, kontrollü bir hızda yük artırılır ve numunenin kırıldığı andaki maksimum yük değeri kaydedilir.



Şekil 3.31. Basınç deney cihazı ve numune

Basınç dayanımı, Denklem 3.10’da verildiği üzere numunenin kırılma yükünün kesit alanına bölünmesi ile hesaplanır. Denklem 3.10’da yer alan f_{bd} = Basınç dayanımı (N/mm^2), P = Kırılmaya neden olan yük (N), A = Kesit alanı (mm^2) temsil etmektedir.

$$f_{bd} = \frac{P}{A} \quad (3.10)$$

Elde edilen yüksek basınç dayanımı değerleri, harcın mekanik performansının yüksek olduğunu gösterirken, düşük değerler, malzemenin potansiyel zayıflıklarını işaret edebilir.

3.4.3. Durabilite deneyleri

Harçların çevresel ve kimyasal etkiler karşısındaki dayanıklılıklarını inceleyen deneyler yapılmıştır. Bu deneyler, harçların uzun vadeli performansını değerlendirmek amacıyla uygulanır. Geopolimer harçların dayanıklılığını ölçmek için yaygın olarak ıslanma-kuruma, donma-çözülme, yüksek sıcaklık, asit ve sülfat dayanıklılık deneyleri yapılır. Bu deneylerin amacı, malzemenin su geçirgenliği, termal kararlılığı ve kimyasal etkilere karşı dayanımını anlamaktır.

Islanma-kuruma deneyi, malzemenin suya karşı direncini değerlendirirken, donma-çözülme testi ise harcın soğuk iklimlerdeki performansını ortaya koyar. Yüksek sıcaklık deneyi, yangına dayanıklı yapı elemanları ve endüstriyel uygulamalarda kullanımı öngörülen harçlar için önemlidir. Asit ve sülfat dayanıklılık testleri ise kimyasal maddelere karşı direnci inceleyerek, bu harçların kimyasal saldırılara karşı ne kadar dayanıklı olduğunu ölçer.

3.4.3.1. Islanma-kuruma deneyi

Islanma-kuruma deneyi, harçların suya maruz kaldıktan sonraki kuruma sürecini ve su kaybını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilir. Bu deney, harcın dayanıklılığı, uzun ömürlülüğü ve çevresel koşullara karşı direnci hakkında bilgi sağlamak için önemlidir. Harcın suya dayanıklılığını ve dolayısıyla yapıların dayanımını etkileyen gözeneklilik özelliklerini anlamada önemli bir rol oynar. Islanma-kuruma deneyi ASTM D559-96 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deneyinin yapılışı Şekil 3.32’de verilmiştir.



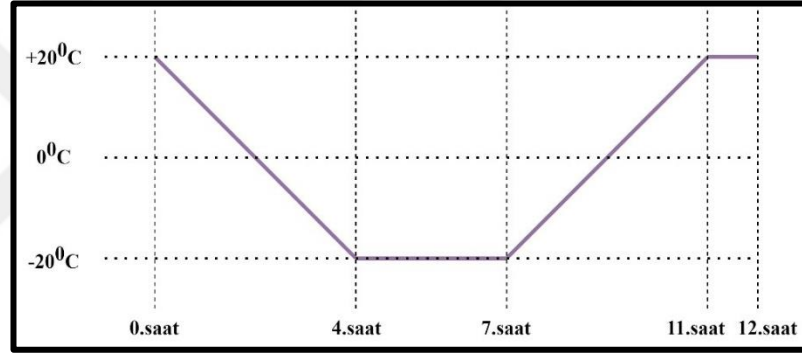
Şekil 3.32. Islanma-kuruma deneyi

Deneyin başlangıcında, her harç karışımı için 40x40x160 mm ölçülere sahip altı numune, fırında $110\pm5^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta kurutulmuş ve ağırlıkları kaydedilmiştir. Ardından, ıslanma işlemi başlatılarak, numuneler bir kap içerisindeki standart içme suyuna tamamen daldırılmış ve oda sıcaklığında en az 5 saat bekletilmiştir. Daha sonra numuneler 1 saat boyunca havada kurutulmuş, ardından kuruma işlemi için fırında 48 saat boyunca $70\pm3^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta tutulmuştur. Bu işlem, bir tam ıslanma-kuruma döngüsünü oluşturmaktadır. Deney boyunca toplam 30 ıslanma-kuruma döngüsü yapılmıştır. Her döngü tamamlandıktan sonra numuneler soğutulularak tekrar ıslatma işlemine tabi tutulmuştur. Döngülerin ardından, numuneler sabit bir kütle elde edene kadar fırında kurutulmuş ve son kütleler kaydedilmiştir. Islanma-kuruma döngülerinin tamamlanmasının ardından, numunelerde kütle kaybı ve dayanımda azalma tespit edilmiş ve bu değerler, işlem öncesindeki dayanım değerleriyle karşılaştırılmıştır. Kütle kaybı, Denklem 3.11’e göre hesaplanmıştır. Denklem 3.11’de yer alan A = Islanma kuruma testinden önce numunelerin fırın kurutulmuş kütlesi B = Islanma kuruma testinden sonra numunelerin fırın kurutulmuş kütlesi temsil etmektedir.

$$\text{Ağırlık kaybı} = \frac{A-B}{A} \times 100 \quad (3.11)$$

3.4.3.2. Donma-çözülme direnci deneyi

Donma-çözülme direnci deneyi, harçların düşük sıcaklık koşullarında maruz kaldığı donma ve çözülme süreçlerine karşı gösterdiği dayanıklılığı belirlemek amacıyla gerçekleştirilir. Bu deney, harcın iklimsel etkilere karşı direnç düzeyini değerlendirerek, yapı malzemelerinin uzun ömürlülüğünü ve güvenilirliğini sağlamak açısından kritik bir öneme sahiptir. Deneyin uygulanmasında, her harç karışımı için 40x40x160 mm ölçülere sahip altı numune Şekil 3.33'te belirtildiği şekilde donma-çözülme çevrimine maruz bırakılmıştır. Deney ASTM C666 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deneyinin yapılışı Şekil 3.34'te verilmiştir. Deneyde toplam 60 çevrim donma-çözülme işlemi uygulanmış olup, her çevrimde 4 saat donma, 3 saat bekleme, 4 saat çözülme ve 1 saat bekleme süresi belirlenmiştir. Her çevrim 12 saat sürmüştür. Deney sırasında sıcaklık 20⁰C ile -20⁰C arasında değiştirilmiştir.



Şekil 3.33. Donma-çözülme çevrimi



Şekil 3.34. Donma-çözülme deney cihazı

Çevrimlerin tamamlanmasının ardından, numuneler donma-çözülme öncesi ve sonrası olmak üzere analiz edilmiştir. Bu analizlerde fiziksel ve mekanik değişiklikler dikkate alınmış, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve ağırlık kaybı oranlarındaki farklar hesaplanmıştır. Harçlarda donma-çözülme etkisiyle meydana gelen ağırlık kayıpları Denklem 3.12 ile hesaplanmıştır. Denklem 3.12'de yer alan A_i ; harçların donma-

çözülme, asit, sülfat veya yüksek sıcaklık deneyine tabi tutulmadan önceki ağırlığını (g), A_s ; harçların donma-çözülme, asit, sülfat veya yüksek sıcaklık deneyine maruz bırakıldıktan sonraki ağırlığını (g) temsil etmektedir.

$$\text{Ağırlık kaybı} = \frac{A_i - A_s}{A_i} \times 100 \quad (3.12)$$

3.4.3.3. Asit dayanıklılık deneyi

Asit dayanıklılık deneyi harçların asidik ortamlara karşı gösterdiği direnç düzeyini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen bir testtir. Bu deney, harcın kimyasal etkilere karşı dayanıklılığını ve uzun ömürlülüğünü değerlendirmek için kritik bir öneme sahiptir. Deneyin uygulanmasında, her harç karışımı için 50x50x50 mm ölçülere sahip altı numune %5 derişime sahip hidroklorik asit (HCl) çözeltisine maruz bırakılmıştır. Numuneler 90, 180 ve 360 gün boyunca asit çözeltisinde bekletilmiştir. Ayda bir asit çözeltisi değiştirilmiştir. Daha sonra numuneleri çözeltiden çıkartılarak, yüzeydeki değişiklikler, ağırlık kaybı ve mekanik özellikleri gözlemlenmiştir. Harçlarda asit etkisiyle meydana gelen ağırlık kayıpları Denklem 3.12 ile hesaplanmıştır. Şekil 3.35'te HCl çözeltisinin hazırlanması ve deney süreci gösterilmektedir. Deneyin sonunda, numunelerin fiziksel durumları ve dayanım özellikleri, başlangıç değerleri ile karşılaştırılarak asit dayanıklılığı belirlenir. Elde edilen sonuçlar, atık malzemelerin harcın kimyasal dayanıklılık performansı üzerindeki etkilerini analiz etmede yardımcı olur ve yapıların asidik ortamlarda karşılaşılabileceği sorunlara karşı ne ölçüde koruma sağladığını değerlendirir.



Şekil 3.35. Asit dayanıklılık deneyi

3.4.3.4. Sülfat dayanıklılık deneyi

Sülfat dayanıklılık deneyi, harçların sülfatlı ortamlara karşı gösterdiği dayanıklılığı belirlemek amacıyla gerçekleştirilen bir testtir. Bu deney, harcın kimyasal etkiler ve çevresel koşullar karşısında ne ölçüde koruma sağladığını değerlendirerek, yapı malzemelerinin uzun ömürlülüğünü sağlamak açısından kritik bir öneme sahiptir.



Şekil 3.36. Sülfat dayanıklılık deneyi

Deneyin uygulanmasında, her harç karışımı için 50x50x50 mm ölçülere sahip altı numune %5 derişime sahip magnezyum sülfat ($MgSO_4$) çözeltisine maruz bırakılmıştır. Numuneler 90, 180 ve 360 gün boyunca sülfat çözeltisinde bekletilmiştir. Ayda bir sülfat çözeltisi değiştirilmiştir. Deneyin sonunda, numunelerin yüzey durumu ve dayanım değerleri, başlangıç ölçümleri ile karşılaştırılarak sülfat dayanıklılığı belirlenir. Harçlarda sülfat etkisiyle meydana gelen ağırlık kayıpları Denklem 3.12 ile hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, atık malzemelerin harcın kimyasal dayanıklılık performansı üzerindeki etkilerini analiz etmeye yardımcı olur ve yapıların sülfat içeren ortamlarda karşılaşabileceği olumsuz durumlara karşı ne ölçüde dayanıklı olduğunu değerlendirmek için kritik bilgiler sunar. Deney ASTM C1012-09 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.36'da $MgSO_4$ çözeltisinin hazırlanması ve deney süreci gösterilmektedir.

3.4.3.5. Yüksek sıcaklık deneyi

Yüksek sıcaklık deneyi, harçların yüksek ısı koşullarına karşı gösterdiği dayanıklılığı belirlemek amacıyla gerçekleştirilen bir testtir. Bu deney, harcın termal dayanıklılığını ve ısıya maruz kaldığında mekanik özelliklerindeki değişimleri değerlendirmek için kritik bir öneme sahiptir. Deney TS EN 1363-1 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deneyinin yapılışı Şekil 3.37'de verilmiştir. Deneyin başlangıcında harç numuneleri bünyesinde bulunan suyun yüksek sıcaklıkta buhar basıncı oluşturup numuneye zarar vermemesi için numuneler 24 saat boyunca $105^{\circ}C$ 'de etüvde

bekletilmiştir. Her harç karışımı için 40x40x160 mm ölçülere sahip altışar numune 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C’de 3 saat 6°C/dk hızla çalışan yüksek sıcaklık fırınında bekletilmiştir. Deney tamamlandıktan sonra, numuneler fırında 1 gün boyunca yavaşça soğutulmuş ve ardından ağırlıkları tekrar tartılmıştır. Numuneler, fırından çıkarıldıktan sonra soğutularak fiziksel ve mekanik özellikleri, özellikle basınç dayanımı ve görünüm açısından değerlendirilmiştir. Harçlarda yüksek sıcaklık etkisiyle meydana gelen ağırlık kayıpları Denklem 3.12 ile hesaplanmıştır.



Şekil 3.37. Yüksek sıcaklık deneyi

3.4.4. Isıl iletkenlik deneyi

Geopolimer harcın ısı iletkenliği birim hacim ağırlık ve kullanılan agrega cinslerine bağlı olarak değişmektedir. Homojen bir malzemenin ısı iletkenliği (W/mK), denge koşullarında iki yüzey arasındaki sıcaklık farkı 1°C olduğunda birim zamanda (1 saat), birim alanından (1 m²), bu alana dik yönde birim kalınlığından (1 m) geçen ısı miktarı ile ölçülmektedir (Taşdemir 2003). Isıl direnç ise, bir malzemenin tanımlanmış iki yüzeyi arasındaki sabit durumda K·m²/W birim alandan birim ısı akış hızını indükleyen sıcaklık farkıdır. Isıl direncin değeri, kalınlığın numunenin ısı iletkenliğine bölünmesiyle belirlenmektedir. Numunenin ısı iletkenlik değeri Denklem 3.13 ile belirlenmiştir. Denklem 3.13’te yer alan k = Isıl iletkenlik katsayısı (W/mK), Q = nominal ısı akışı (Wm²), L = numunenin kalınlığı (m), ΔT = Sıcaklık (K) temsil etmektedir.

$$k = \frac{QL}{\Delta T} \quad (3.13)$$

Isı akış ölçme tekniğindeki temel mantık, kare şeklinde, belli boyutları olan ve değişik sıcaklıklara sahip olan iki levha arasına yerleştirilen numuneden geçen eksenel ısı akısının ölçülmesidir. Numunenin altında temas halinde bulunan, içerisinde uniform yerleştirilmiş kalibreli ısı akısı sensörleri olan ince bir plaka yardımıyla ısı akısı ölçülmektedir. Isıl iletkenlik değeri; test numunesinin kalınlığı, sıcaklık gradyanı ve ısı akısı sayesinde hesaplanmaktadır. Bu çalışmada 20x20 cm boyutlarına sahip altı

numunenin ısı iletkenlik ölçümü ASTM C 518 standardına göre LINSEIS HFM 300 Isı Akış Ölçer kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneyinin yapılışı Şekil 3.38’de verilmiştir. Üst ve alt plakaların sıcaklıkları sırasıyla 38°C ve 10°C'ye ayarlanarak, ortalama malzeme sıcaklığının 24°C'de tutulması sağlanmıştır.



Şekil 3.38. Isı iletkenlik deney cihazı

3.4.5. Mikroyapı analizi

Geopolimer harçların mikroyapısının detaylı incelenmesi, bu malzemelerin nihai özelliklerini anlamak açısından büyük önem taşımaktadır. Mikroyapı analizleri, harçların fiziksel, kimyasal, mekanik ve ısı özellikleri ile performansları arasındaki ilişkileri ortaya koyar. Geopolimer harçlarda mikroyapı analizi için yaygın olarak kullanılan yöntemler arasında XRD (X-ışını Difraksiyon Spektrometresi), SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu), EDX (Enerji Dağıtıcı X-ışını Spektroskopisi) ve TGA-DTA (Termogravimetrik ve Diferansiyel Termal Analiz) gibi teknikler yer alır. Bu yöntemler, harçların kristal yapılarını, faz dönüşümlerini ve termal stabilitelerini belirlemek için kullanılır. Özellikle, SEM-EDX analizleri, malzemenin mikroskobik düzeyde yüzey morfolojisini ve element dağılımını incelerken, XRD analizi harcın kristal fazlarının tanımlanmasını sağlar. TGA-DTA ise harçlardaki termal davranışları izleyerek, malzemenin ısıya karşı dayanımını ve bozulma sıcaklıklarını belirler. Bu analizler sonucunda elde edilen veriler, harçların gözenek yapısı, yoğunluğu ve mikro çatlaklar gibi özelliklerini ortaya çıkarır, bu da malzemenin dayanıklılık ve performansını etkileyen kritik unsurların anlaşılmasına olanak tanır.

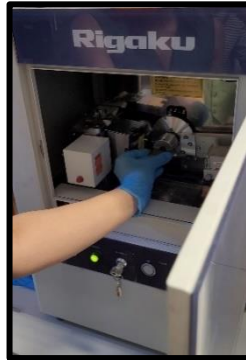
3.4.5.1. XRF analizi

XRF analizi, geopolimer harçlarda kullanılan bağlayıcı malzemelerin kimyasal bileşimlerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen bir yöntemdir. Bu analiz, malzeme içindeki elementlerin türünü ve konsantrasyonunu belirleyerek, harcın performansını etkileyen kimyasal özellikleri değerlendirmek için kritik bir öneme sahiptir. Deneyin

uygulanmasında, hazırlanan harç numuneleri, XRF cihazına yerleştirilir ve X ışınları ile bombardıman edilir. Bu işlem sırasında, numuneler içindeki elementler, X ışınlarını emer ve ardından karakteristik flüoresan ışımlar yayar. Cihaz, bu ışımları ölçerek, numunelerin kimyasal bileşimini ve her bir elementin yüzdesel dağılımını belirler.

3.4.5.2. XRD analizi

XRD analizi, bağlayıcı malzemelerin ve harçların mineralojik yapısını ve kristal formasyonlarını belirlemek amacıyla gerçekleştirilen bir yöntemdir. XRD yöntemi ile katıların kristal yapılarını incelenmekte ve içeriğindeki fazlar tespit edilmektedir. X-ışını saçılım teknikleri, numuneyi tahrip etmez ve incelenen numunenin özelliklerini değiştirmez. Kaba olarak gelen numune tungsten halkalı öğütücü ile $\sim 63\mu\text{m}$ altına gelecek şekilde öğütülmektedir. Daha sonra numune $\sim 105\pm 5^\circ\text{C}$ etüvde 4 saat kurutulmak üzere bekletilmektedir. Deneyin uygulanmasında, hazırlanan harç numuneleri, XRD cihazına yerleştirilerek, X ışınları ile taranır. X ışınları, numuneye vurduğunda, malzeme içindeki atomların düzenine bağlı olarak belirli açılarda dağılır. Bu dağılım, bir difraksiyon deseni oluşturur ve bu desen, malzemenin kristal yapısı hakkında bilgi verir. Numuneler uygun metoda göre hazırlanıp Şekil 3.39’da gösterilen Rigaku marka Miniflex 600 model XRD cihazı ile ölçüme alınıp standart tarama aralığında ($2\Theta=5^\circ-70^\circ$) ölçümü yapılmaktadır. Sonrasında elde edilen veriler, kristal fazların varlığını ve oranlarını belirlemek için analiz edilir.



Şekil 3.39. XRD cihazı

3.4.5.3. TGA-DTA analizi

TGA-DTA analizi, A4, A13, AS, AX, AY ve A0 harçlarının termal stabilitesini ve bileşimindeki değişimleri belirlemek amacıyla gerçekleştirilen yöntemlerdir. Bu analizler, malzemenin ısıya karşı davranışını ve termal özelliklerini değerlendirerek, harcın performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olan fiziksel ve kimyasal değişimleri anlamak için kritik bir öneme sahiptir.



Şekil 3.40. TG/DTA cihazı

Deneyin uygulanmasında, hazırlanan harç numuneleri, kuru hava ile 1000°C 'ye kadar $10^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ sabit bir hızda ısıtılmıştır. Numuneler, TGA cihazında kontrollü bir atmosferde ısıtılırken, numunenin ağırlık kaybı sürekli olarak kaydedilir. Aynı anda, DTA analizi ile sıcaklık değişimlerine bağlı olarak, malzemenin endotermik ve egzotermik tepkimeleri ölçülür. Elde edilen veriler, harcın termal dekompozisyon noktalarını, yanma sıcaklıklarını ve bileşim değişimlerini belirlemek için analiz edilir. Analizler Şekil 3.40'ta verilen STA 409PG LUXX cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

3.4.5.4. SEM-EDX analizi

SEM-EDX analizi, harçların yüzey morfolojisi ve kimyasal bileşimini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen ileri düzey analitik yöntemlerdir. Bu analizler, malzemenin mikro yapısını ve elementel bileşimini ayrıntılı bir şekilde inceleyerek, harcın performansını etkileyen fiziksel ve kimyasal özellikleri anlamak için kritik bir öneme sahiptir. Asit atağı, sülfat atağı ve yüksek sıcaklık sonucunda seçilen numunelerin SEM-EDX analizleri yapılmıştır. Deneyin uygulanmasında, hazırlanmış harç numuneleri, SEM cihazında yüksek enerjili elektronlarla taranarak yüzey detayları ve morfolojik özellikler gözlemlenir.



Şekil 3.41. SEM cihazı

SEM görüntüleri, malzemenin yüzey yapısının yanı sıra, gözenek dağılımı ve partikül boyutları hakkında bilgi sağlar. EDX analizi ise, numunelerin içindeki elementlerin kimyasal bileşimini belirleyerek, her bir elementin yüzdesel dağılımını sunar. Bu kombinasyon, geopolimer harcın dayanıklılığı ve kimyasal reaksiyonları üzerinde etkili olan bileşenlerin ve yapısal özelliklerin anlaşılmasına yardımcı olur. Seçilen numunelerin SEM görüntüleri, Şekil 3.41’te gösterilen Phenom Pro X cihazı ile eşit büyütmelerde (250x, 2500X ve 10000x) 15 kV altında alınmıştır. Numuneler, yüzeyde yük birikmesini önlemek için bir püskürtme kaplayıcı (Agar Scientific) ile 20 saniye boyunca 30 mA ve 0,1 mbar’da ince bir altın-paladyum tabakası ile kaplanmıştır.



4. İSTATİKSEL ANALİZ

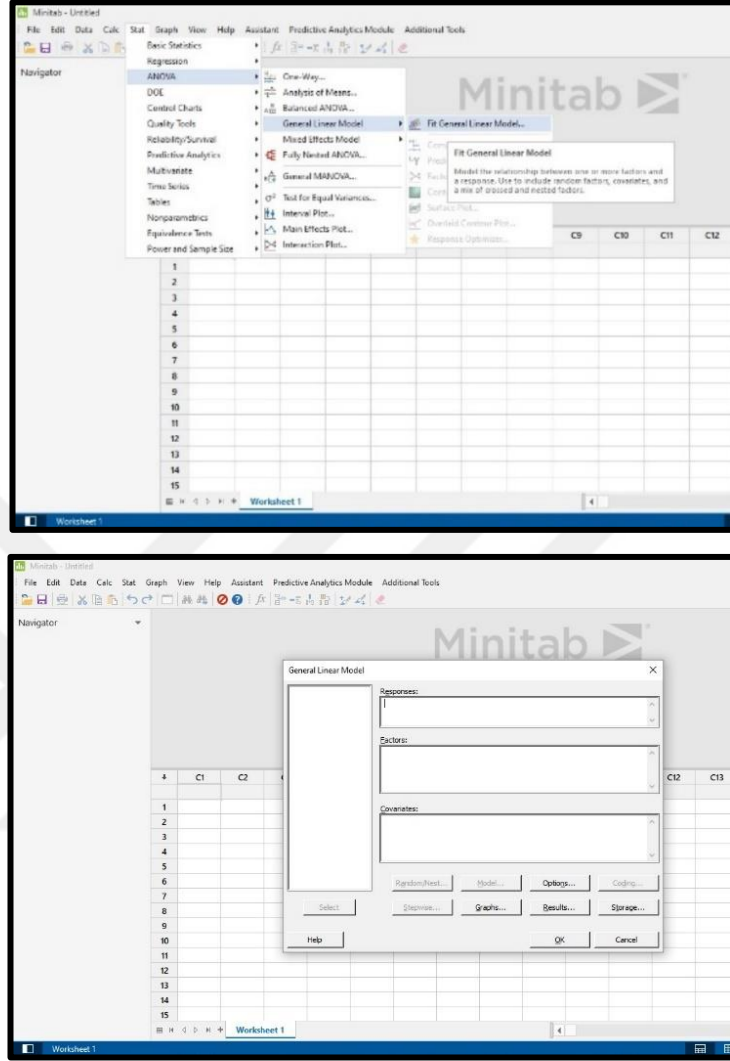
İstatistiksel analiz, deneysel ya da gözlemsel verilerin düzenlenmesi, incelenmesi, yorumlanması ve sonuçların değerlendirilmesi amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Bu analiz, veri setindeki eğilimleri ve ilişkileri ortaya koyarak karar verme süreçlerinde doğru ve bilimsel temellerle desteklenmiş sonuçlara ulaşmayı sağlar. İstatistiksel analiz, verilerin anlamlı olup olmadığını belirlemeye, belirli değişkenler arasındaki ilişkileri incelemeye ve olasılıkları değerlendirmeye yardımcı olur. Bilimsel araştırmalarda yaygın olarak kullanılan bu yöntem, deneylerde elde edilen sonuçların genellenebilirliğini test eder ve parametrelerin etkilerini belirleyerek süreçlerin iyileştirilmesine katkıda bulunur.

Deneysel çalışmalarda, belirli bir hipotezin geçerliliğini test etmek, değişkenlerin sonuçlara etkisini incelemek ve hangi faktörlerin önemli olduğunu belirlemek için istatistiksel analiz yapılır. Bu analizler, deneysel verilerin geçerli olup olmadığını, sonuçların rastlantısal mı yoksa kontrol edilen faktörlerden mi kaynaklandığını anlamak açısından kritik öneme sahiptir.

ANOVA (Analysis of Variance) istatistiksel analizde, birden fazla grubun ortalamalarını karşılaştırmak ve bu gruplar arasındaki farklılıkların anlamlı olup olmadığını test etmek için kullanılan bir yöntemdir. ANOVA, birden fazla bağımsız değişkenin bağımlı bir değişken üzerindeki etkisini inceleyerek varyansın kaynaklarını ayırır. Bu yöntem, deneysel çalışmalarda kullanılan faktörlerin sonuçlar üzerindeki etkisinin ne kadar güçlü olduğunu belirlemek amacıyla kullanılır. Varyans, yani gözlemlerdeki toplam değişkenlik, faktörlerin etkisi ve hata terimi olmak üzere iki temel kaynağa ayrılır. Varyansın toplamı, faktörlerin ve hata teriminin varyanslarına bölünerek her faktörün etkisi yüzdelik olarak belirlenir. ANOVA, bu varyansların her birini hesaplayarak, faktörlerin sonuçlar üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını test eder. F-testi (ortalama karelerinin oranı) yardımıyla, her bir faktörün etkisi değerlendirilir. F-değerlerinin yüksek çıkması, o faktörün sonuçlar üzerinde önemli bir etkisi olduğunu gösterir. Ayrıca, faktörlerin F-değeri, sonuçların rastgele mi yoksa kontrol edilen faktörlerden mi kaynaklandığını test eder.

ANOVA analizi, Taguchi deney tasarımı sonrası süreç parametrelerinin optimizasyonunda kullanılır. Bu tezde, Taguchi metodu ile parametrelerin optimum seviyeleri bulunduğundan sonra parametrelerin birbiriyle ve deney sonucuyla ilişkisini anlamak için, ANOVA analizi ile, parametrelerin geopolimer harçların fiziksel, mekanik ve ısı özellikleri üzerindeki etkilerini belirlenmiştir. Analizler, Şekil 4.1’de sunulduğu

üzere Minitab 21.3 istatistiksel yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, ANOVA analizleri %95 güven düzeyinde yapılmıştır.



Şekil 4.1. Minitab programında ANOVA analizi

Minitab programı, deneysel verilerin hızlı ve etkin bir şekilde işlenmesini sağlamış, ANOVA analizi için gerekli olan varyansların ve F-değerlerinin hesaplanmasında kullanılmıştır. İlk olarak, bağımsız değişkenler ve seviyeler tanımlanmış ve her bir faktörün bağımlı değişken üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Daha sonra, varyansın kaynakları belirlenmiştir. Minitab'ın ANOVA modülü, optimum parametrelerin belirlenmesine olanak tanımış ve faktörler arası etkileşimlerin daha iyi anlaşılmasını sağlamıştır.

Aşırı uyumlu tasarım nedeniyle F-değeri hesaplanamadığı için (hata serbestliği sıfır), her bir parametrenin etkisinin fiziksel, mekanik ve ısı özelliklerine etkisi incelenen parametrenin kareler toplamının tüm parametrelerin kareler toplamına yüzdesi bulunarak

hesaplanmıştır (Prusty ve Pradhan, 2020). Ancak, taze özelliklere küreme parametrelerinin bir etkisi olmadığı için ANOVA tasarımı değişmiştir (hata serbestliği: 3). Burada ise ilgili parametrenin deney üzerindeki etkisinin anlamlı olup olmadığı ve ilgili parametrenin etki yüzdeleri hesaplanmıştır. İlk olarak yokluk hipotezi H_0 ve alternatif hipotezi H_1 tanımlanır.

H_0 : Ortalamalar arasında fark yoktur (parametrenin anlamlı bir etkisi yoktur).

H_1 : En az iki ortalama arasında anlamlı bir farklılık vardır (parametrenin anlamlı bir etkisi vardır).

Elde edilen P değeri 0,05'ten büyük ise, bu sonuç, ilgili parametrenin deney sonucu üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olmadığını gösterir ve bu durumda sıfır hipotezi (H_0) kabul edilir. Yani, söz konusu faktörün deney sonucu üzerinde etkili olmadığı kabul edilir. Ancak, P değeri 0,05'ten küçük ise, bu faktörün deney sonucu üzerindeki etkisinin anlamlı olduğu tespit edilir ve H_0 hipotezi reddedilerek alternatif hipotez (H_1) kabul edilir. Ek olarak, P değeri 0,001 ile 0,01 arasındaysa, faktörün etkisi yüksek düzeyde anlamlı olarak değerlendirilir. P değeri 0,001'den küçük olduğunda ise, faktörün etkisi çok yüksek düzeyde anlamlı olarak kabul edilir. Bu analiz kapsamında her bir deney için serbestlik derecesi (SD), kareler toplamı (SS), kareler ortalaması (MS), etki yüzdesi, F değeri ve P değeri gibi çeşitli istatistiksel değerler de sunulmaktadır ve bunlar deney faktörlerinin etki düzeylerini anlamamıza olanak tanır (Yılmazoğlu, 2022). Bu şekilde, varyans analizi, deneysel verilerdeki faktörlerin etki derecelerini anlamada ve deney tasarımında hangi faktörlerin optimize edilmesi gerektiğine dair yönlendirici bilgiler sunar.

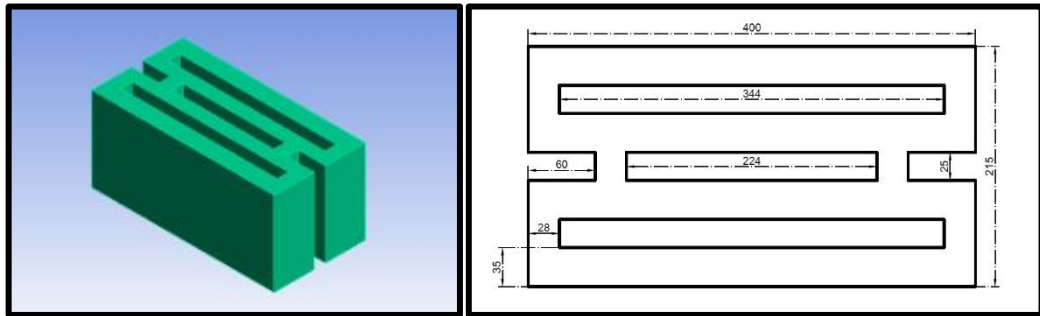
Sonuç olarak, istatistiksel anlamlılık düzeyi (genellikle 0,05 olarak belirlenir) baz alındığında, P değeri 0,05'ten büyük olduğunda ilgili faktörün deney sonuçları üzerinde anlamlı bir etkisi olmadığı kabul edilir. Bu durumda, parametrelerdeki değişimin deney sonuçları üzerinde gerçek bir ilişki oluşturmadığı sonucuna varılır. Öte yandan, P değeri 0,05'ten küçükse, ilgili faktörün deney sonuçları üzerinde anlamlı bir etkisi olduğu kabul edilir ve parametrelerdeki değişimin deney sonuçlarıyla ilişkili olduğu değerlendirilir. P değeri azaldıkça, etki daha anlamlı olarak kabul edilir ve bu da faktör değişiminin deney sonuçlarına olan etkisinin istatistiksel olarak güçlü olduğunu gösterir. Böylece, P değeri kullanılarak parametreler arasındaki değişimin deney sonuçlarına olan etkisinin anlamlılık düzeyi belirlenmiş olur; bu deneylerde gözlemlenen değişimlerin tesadüfi mi yoksa gerçek bir ilişki mi olduğunu ortaya koyar.

5. ISI TRANSFER ANALİZİ

Isı transfer analizi, bir yapının veya malzemenin sıcaklık farkları altındaki ısı akışını inceleyen önemli bir mühendislik yöntemidir. Bu analiz, bir yapı elemanının ısı yalıtım performansını değerlendirmek ve enerji verimliliğini artırmak amacıyla yapılır. Isı transferi, iletim (conduction), konveksiyon (convection) ve radyasyon (radiation) olmak üzere üç temel mekanizma ile gerçekleşir. Isı transfer analizinin amacı, bu mekanizmalar aracılığıyla malzeme veya yapının ne kadar enerji kaybedeceğini hesaplamaktır. İnşaat sektöründe ısı transfer analizi, binaların enerji performansını artırmak, soğutma ve ısıtma maliyetlerini düşürmek için kritik bir öneme sahiptir. Özellikle modern binalarda, iç mekanların ısıtma ve soğutma maliyetlerinin optimize edilmesi, enerji tüketimini azaltarak sürdürülebilirliğe katkı sağlar. İyi bir ısı yalıtımı sayesinde enerji tasarrufu sağlanır ve bina sakinlerinin konforu artırılır.

Isı transfer analizi, genellikle Sonlu Elemanlar Yöntemi (Finite Element Method-FEM) ile yapılır. FEM, karmaşık geometriye sahip yapıların ısı transferi, gerilme analizi gibi mühendislik sorunlarını çözmek için kullanılan sayısal bir tekniktir. Bu yöntemle, yapı elemanı küçük parçalara bölünür ve her bir elemanda fiziksel denklemler uygulanarak genel çözüm elde edilir. ANSYS ve ABAQUS gibi yazılımlar, FEM kullanarak ısı transferi gibi mühendislik analizlerini gerçekleştiren güçlü araçlardır.

Bu çalışmada, 3 farklı model üzerinde ANSYS workbench yazılımı kullanılarak ısı transfer analizi yapılmıştır. 1.modelde ısı iletkenliği belirlemek için kullanılan 20x20x5 cm'lik numune 2 boyutlu olarak tanımlanmıştır. 2.modelde Al-Tamimi vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada belirlenen optimum briket tasarımının (D-G1-HB5) dolu hali 2 boyutlu olarak, 3.modelde ise 3 boyutlu olarak incelenmiştir. Bunun amacı briketlerin içindeki boşluklu yapıların ısı transferini nasıl etkilediğini araştırmaktır. İncelenen model Şekil 5.1'de AY olarak verilmiştir. Simülasyon, belirlenen sıcaklık farkları altında yapının içindeki sıcaklık dağılımını incelemek için yürütülmüştür.

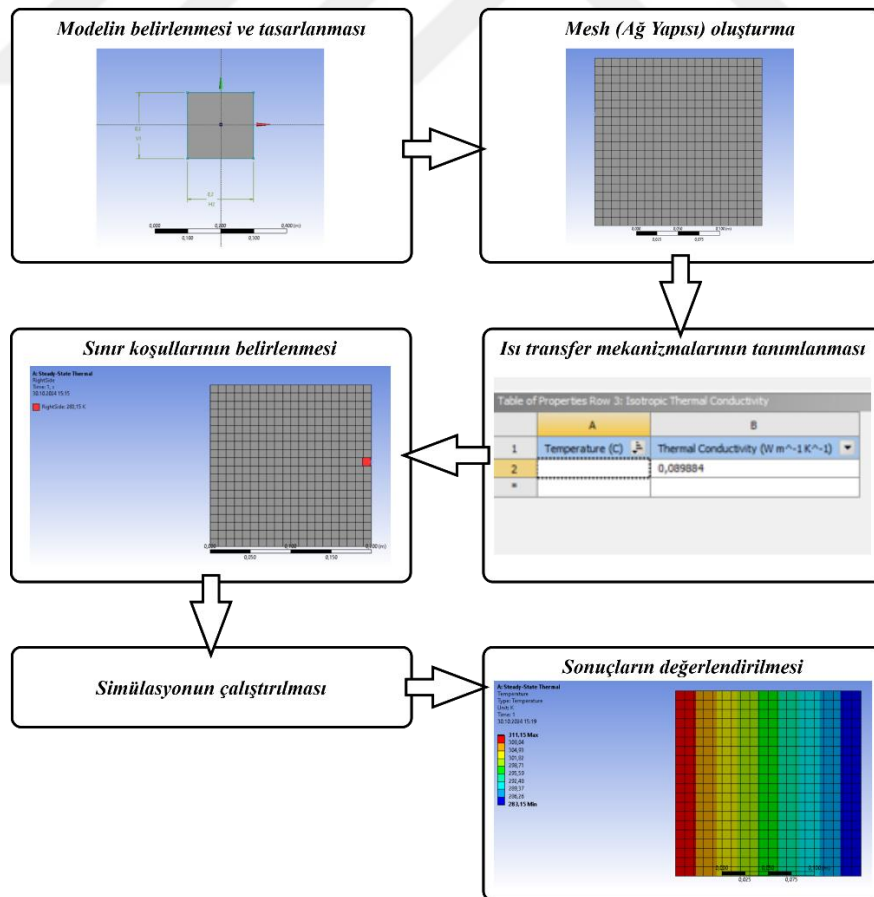


Şekil 5.1. Kullanılan AY modeli

Isı transfer analizinde öncelikle briket geometrisinin ve içindeki boşlukların tasarlanarak ANSYS yazılımına model 3D olarak aktarılmıştır. 1.model için dış sıcaklık 38⁰C, iç sıcaklık 10⁰C olarak tanımlanmıştır. 2.model ve 3.model Eskişehir için 1991-2023 yılları arasındaki ölçüm periyodunda yer alan en yüksek dış sıcaklık ise 41,6⁰C, en düşük dış sıcaklık -28,6⁰C sınır koşulları olarak alınırken iç sıcaklık: 24⁰C olarak belirlenmiştir (MGM, 2024). Zamandan tasarruf etmek ve hatayı azaltmak için simülasyon için 5 mm'lik optimum ağ boyutu seçilmiştir. Simülasyon çalıştırılarak ANSYS yazılımı üzerinde sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Şekil 5.2’de sunulduğu gibi ısı transfer analizi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, bu çalışmada kararlı hal (steady-state) ısı transferi kullanılarak iletim temel mekanizması ile gerçekleştirilmiştir.

Buna ek olarak, sıcaklık dağılımları analitik olarak Denklem 5.1 ile belirlenmiştir. Denklem 14’te yer alan $T(x) = X$ noktasındaki sıcaklık (K), $T_{S1} = Dış$ duvar sıcaklığı (K), $T_{S2} = İç$ duvar sıcaklığı (K), $X = Başlangıca$ olan uzaklık (m) ve $L = Duvar$ boyu (m) temsil etmektedir.

$$T(x) = (T_{S,2} - T_{S,1}) \frac{x}{L} + T_{S,1} \quad (5.1)$$



Şekil 5.2. Isı transfer analizi akış şeması

6. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde geopolimer harçların fiziksel, mekanik ve dayanıklılık özellikleri ile ilgili deney sonuçları aşağıdaki bölümlerde detaylı olarak açıklanmıştır. Ayrıca, optimum harçlar ile ilgili doğrulama deneyi ve istatistiksel analiz sonuçları da verilmiştir. Bununla birlikte en düşük ısı iletkenliğe sahip AY/ÖTL18 harcın ısı transfer analiz sonuçları gösterilmiştir.

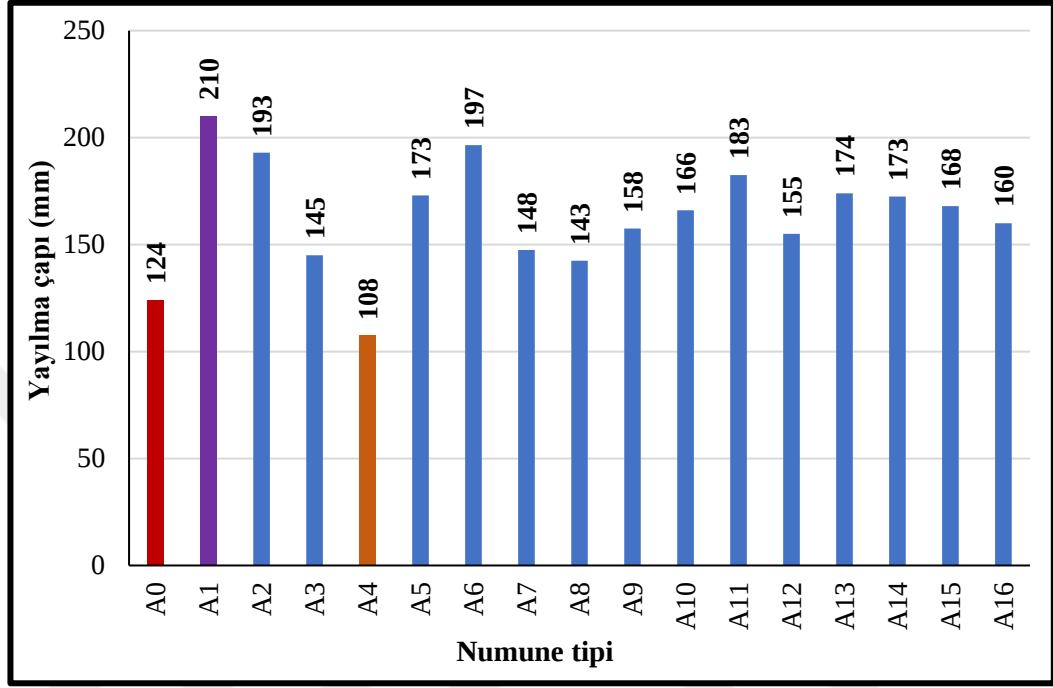
6.1. Taze Harç Deneyleri

Taze harç deneylerinde harçların yayılma çapı, taze birim hacim ağırlığı, taze harç sıcaklığı ve priz süresi belirlenmiştir.

6.1.1. Yayılma tablası

Karışımların ilk kısmında, Taguchi yöntemi ile oluşturulmuş deney tasarımındaki geopolimer harçlar kullanılmıştır. Şekil 6.1 harç karışımlarının yayılma çaplarını göstermektedir. Geleneksel çimento harcını temsil eden A0 numunesinin yayılma çapı 124 mm olarak belirlenmiştir. Geopolimer harç numune tipleri arasında ise A1 numunesi en geniş yayılma çapına (210 mm) sahipken, en düşük yayılma çapı 108 mm ile A4 numunesinde görülmüştür. Bu durum, harç içindeki bileşenlerin, özellikle de alkali aktivatörün miktarına ve viskozitesine bağlı olarak işlenebilirlik özelliklerinin değişkenlik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Yayılma tablası sonuçlarından görüldüğü gibi BA malzemesi CFUK yerine kullanıldığında, yayılma çapı kontrol karışımına kıyasla artmıştır. Kısacası, karışımda kullanılan CFUK ve BA miktarı arttıkça karışımların işlenebilirliği artmıştır. Bunun aksine, SD ve Na miktarı arttıkça da yayılma çapı azalmıştır. Geopolimer harçlarda SD ve Na konsantrasyonu arttıkça yayılma çapının azalmasının ana nedenlerinden biri, bu bileşenlerin harcın viskozitesini ve reaktivitesini artırarak akışkanlığını sınırlamasıdır. SD, yüksek yüzey alanına sahip bir katkı maddesi olup, su veya alkali çözeltisi ile temas ettiğinde harç matrisinde daha yoğun bir bağ yapısı oluşturarak karışımın işlenebilirliğini azaltır (Rashad, 2013). SD katkısının fazlalaşması ile matris içindeki parçacıklar arasındaki bağ kuvveti artar ve bunun sonucunda yayılma çapı daralır (Siddique ve Khan, 2011). Benzer şekilde, Na konsantrasyonunun artması da karışımın viskozitesini yükselterek harcın akışkanlığını olumsuz yönde etkiler. Yüksek Na içeriği, alüminosilikat jel oluşum sürecini hızlandırır ve harç içindeki serbest suyun bağlanmasına yol açarak daha katı bir yapı meydana getirir (Duxon vd., 2007). Bu nedenle, Na konsantrasyonunun artmasıyla harç daha yoğun hale gelir, akışkanlığı azalır ve yayılma çapı küçülür. Ayrıca, bor bileşiklerinin varlığı, matris içindeki partiküller

arasında kayganlaştırıcı bir etki yaratarak akışkanlığı destekleyebilir. Bu durum, geopolimer harçların işlenebilirliğini iyileştirerek yayılma çapını artmasını sağlamış olabilir. Böylece bor içeriği arttıkça, karışımın içsel sürtünmesi azalır ve daha geniş bir yayılma çapı gözlemlenebilmektedir.

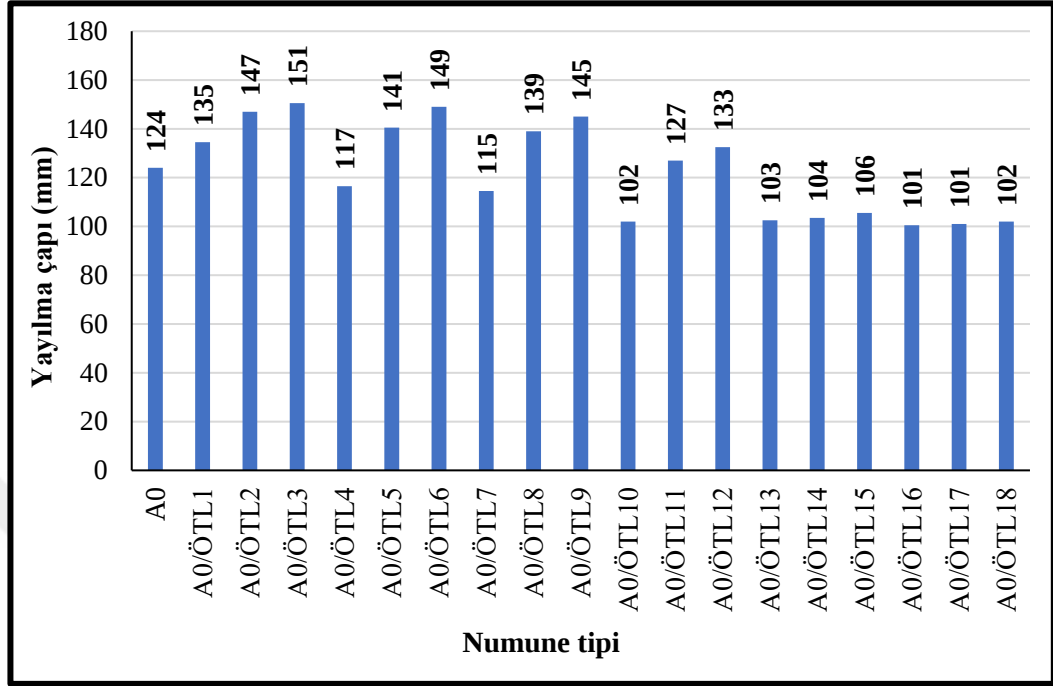


Şekil 6.1. Tasarlanan geopolimer harçların yayılma çapı

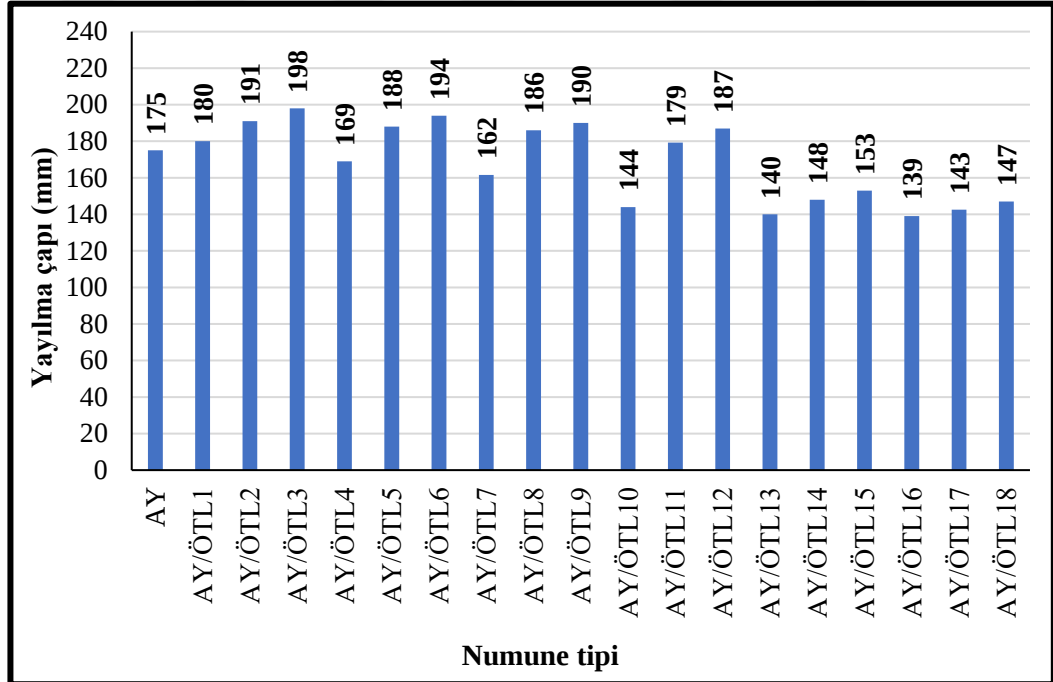
Karışımların ikinci kısmında, standart kum yerine farklı ÖTL yüzdeleri kullanılmıştır. Ayrıca, ÖTL yüzey işlemi için PVA kullanımı araştırılmıştır. Şekil 6.2 ÖTL eklenen harç karışımlarının yayılma çaplarına odaklanmaktadır. A0/ÖTL harçlarının yayılma çaplarının 101 mm ile 151 mm arasında değiştiği görülmektedir. Karışımlarda kullanılan ÖTL miktarı arttıkça, yayılma tablası değerlerinde azalış görülmüştür. Özellikle A0/ÖTL3 ve A0/ÖTL18 numuneleri arasında, yayılma çapı değerlerinde belirgin bir fark gözlemlenmiştir. Bu sonuç, ÖTL kullanımının işlenebilirlik üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ve bu etkinin bileşimdeki diğer bileşenlerle etkileşim halinde farklılaşabileceğini göstermektedir. Buna ek olarak, PVA'nın yüzey işleme yöntemi olarak kullanımının geleneksel çimento harçlarının işlenebilirliğini arttığı tespit edilmiştir.

Karışımların üçüncü kısmında ise, en iyi termal özelliklere sahip AY harcının içindeki standart kum yerine farklı ÖTL yüzdeleri kullanılmıştır. Şekil 6.3, ÖTL katkılı geopolimer harçların yayılma çaplarının daha geniş bir yelpazede dağıldığını ortaya koymaktadır. Yayılma çapları 139 mm ile 198 mm arasında değişmektedir. Bu durum,

kullanılan malzemelerin ve ÖTL katkısının yayılma üzerinde önemli bir rol oynadığını göstermektedir.



Şekil 6.2. ÖTL kullanılan A0 harçlarının yayılma çapı



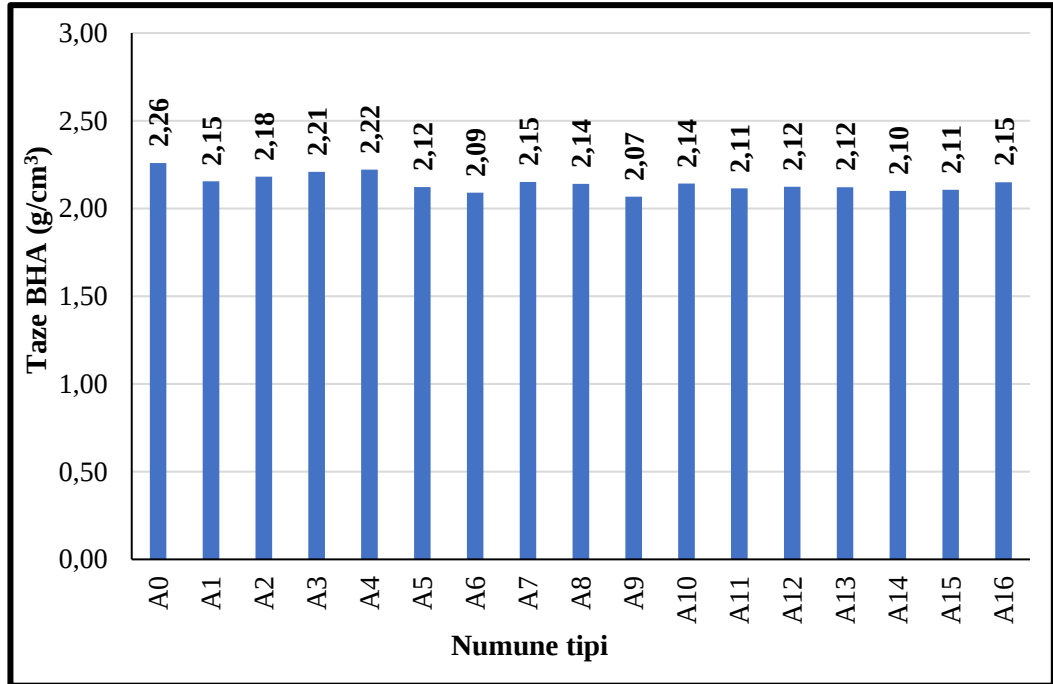
Şekil 6.3. ÖTL kullanılan AY harçlarının yayılma çapı

Hem A0 hem AY harcında ÖTL oranı arttıkça yayılma çapının azalmasının başlıca nedeni, ÖTL parçacıklarının harç içindeki viskoziteyi artırması ve harçların daha akışkan olmasını sağlarken, belirli bir sınırın üzerinde viskozitenin akışkanlığı sınırlamasıdır.

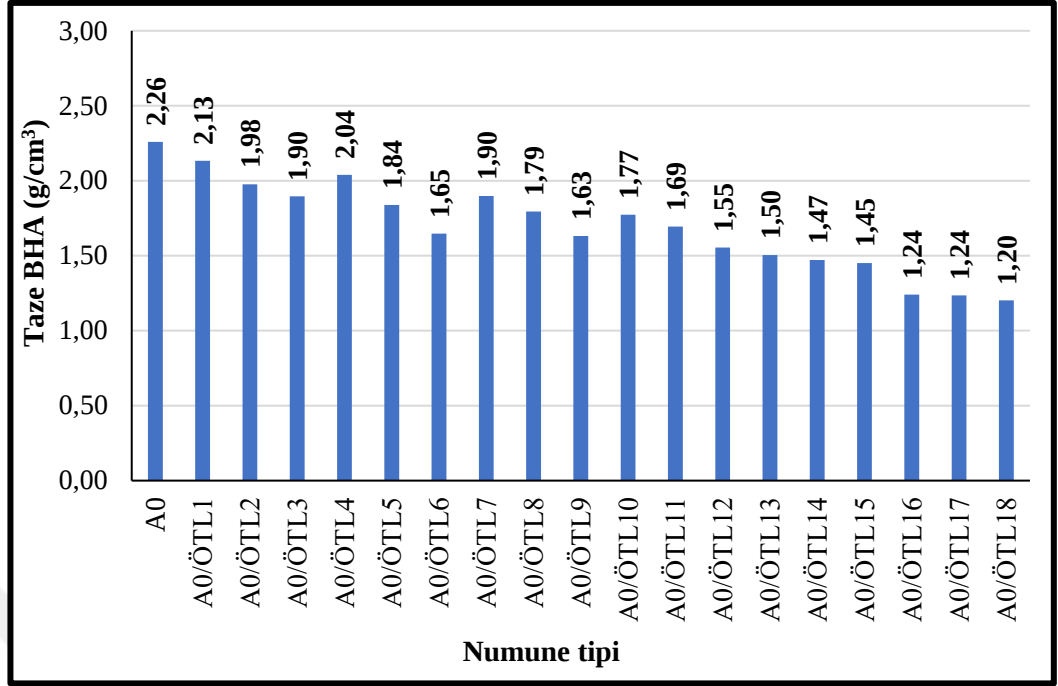
ÖTL parçacıkları, harçlara katıldığında matris içinde suyun hareketini engelleyerek karışımın daha katı ve yapışkan bir hale gelmesine yol açar (Gupta vd., 2015). ÖTL'nin çimento hamurunda su emici bir rol oynaması ve yüzeyinin pürüzlü olması, çimento harcı içindeki bağ yapısını daha yoğun hale getirerek yayılma çapının azalmasına neden olmaktadır (Thomas ve Gupta, 2016). PVA ile kaplanmış ÖTL kullanımı ise ÖTL parçacıklarının yüzey özelliklerini değiştirir, bu da akışkanlık ve yayılma çapında iyileşmeler sağlar. PVA kaplaması ÖTL parçacıkları arası sürtünmeyi düşürerek harcın daha akışkan bir yapı kazanmasına katkıda bulunur, böylece yayılma çapı artar.

6.1.2. Taze birim hacim ağırlığı

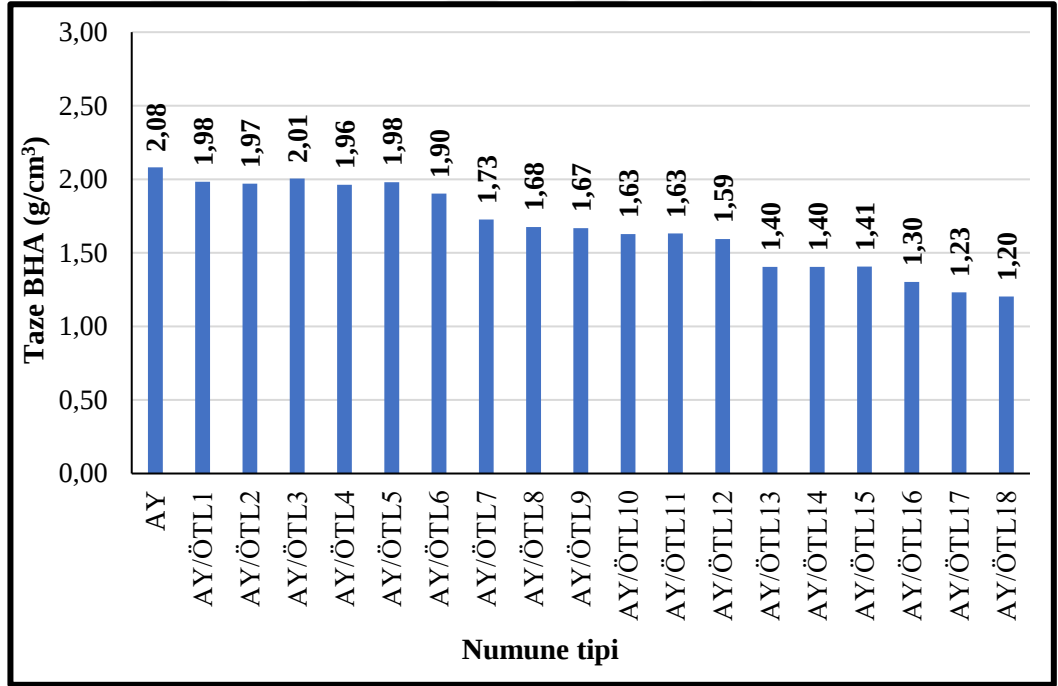
Şekil 6.4 harç karışımlarının BHA'larını göstermektedir. Taze geopolimer harçların ölçülen BHA değerleri $2,07 \text{ g/cm}^3$ ile $2,22 \text{ g/cm}^3$ arasında değişmiştir. Geopolimer harçların taze BHA değerlerinin kontrol karışımına ($2,26 \text{ g/cm}^3$) göre daha düşük olduğu görülmüştür. Bunun nedeni olarak CFUK, BA ve SD malzemelerinin özgül ağırlıklarının kontrol karışımında kullanılan çimentoya göre daha düşük olmasıdır. Ayrıca, geopolimer harçların CFUK içeriğinin artması ile taze BHA değerleri azalmıştır. Üretilen karışımlarında en yüksek taze BHA A0 harcında, en düşük birim ağırlık ise A9 harcında gözlenmiştir. A9 harcının taze BHA, A0 harcından yaklaşık %8,41 oranında daha düşük olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6.4. Tasarlanan geopolimer harçların taze birim hacim ağırlığı



Şekil 6.5. ÖTL kullanılan A0 harçlarının taze birim hacim ağırlığı



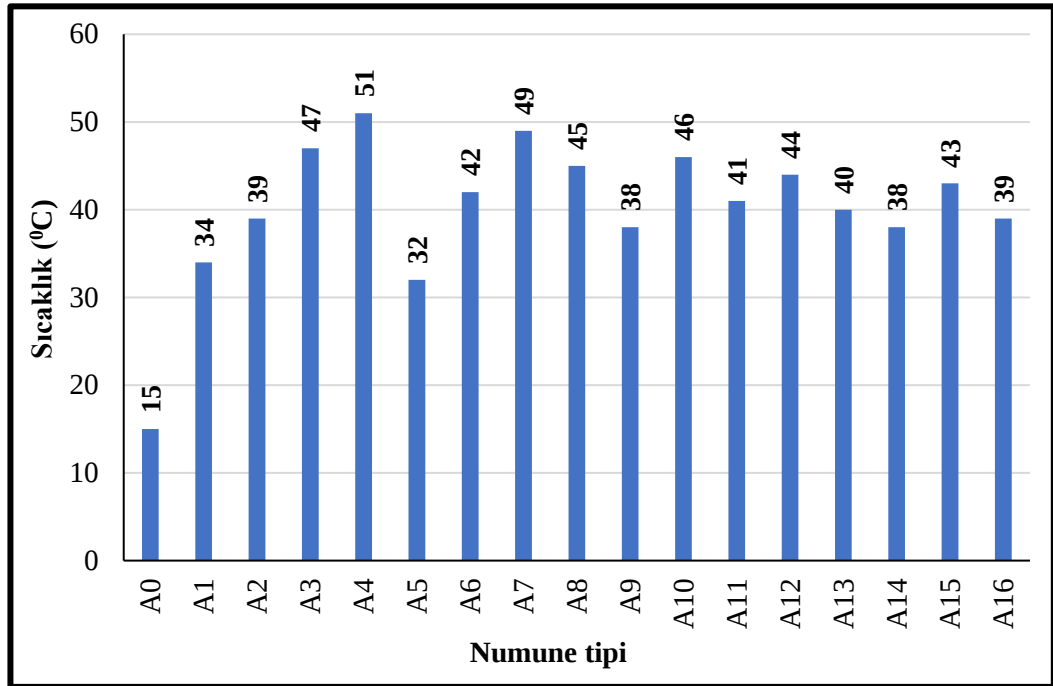
Şekil 6.6. ÖTL kullanılan AY harçlarının taze birim hacim ağırlığı

Şekil 6.5 A0-ÖTL harçlarının, Şekil 6.6 ise AY-ÖTL harçlarının BHA'larını göstermektedir. A0-ÖTL harçlarının taze BHA değerleri $1,20 \text{ g/cm}^3$ ile $2,26 \text{ g/cm}^3$ arasında, AY-ÖTL harçlarının taze BHA değerleri ise $1,20 \text{ g/cm}^3$ ile $2,08 \text{ g/cm}^3$ arasında değişmiştir. AY harcının taze BHA'sının %100 ÖTL kullanımı ile %42,3, A0 harcının taze BHA'sının ise %100 ÖTL kullanımı ile %46,9 oranında azaldığı belirlenmiştir. ÖTL

oranı arttıkça taze BHA'nın azalmasının temel nedeni, ÖTL parçacıklarının yoğunluğunun standart kuma göre çok daha düşük olmasıdır. Ayrıca ÖTL parçacıklarının, çimento hamuru ile uyumlu bir bağ yapısı oluşturmaması, çimento ve suyun etkili bir şekilde dağılmasını engelleyebilir ve çimento matrisinde gözenekli bir yapı oluşmasına neden olabilir. Bu gözeneklilik artışı, harcın BHA'sını daha da azaltır ve daha hafif bir yapı oluşturur (Thomas ve Gupta, 2016).

6.1.3. Taze harç sıcaklığı

Şekil 6.7 harç karışımlarının farklı numunelerdeki taze harç sıcaklığını göstermektedir. A0 harcının taze sıcaklığı 15⁰C iken, taze geopolimer harçların ölçülen sıcaklık değerleri 32⁰C ile 51⁰C arasında değişmiştir. A4 harcının taze sıcaklığı 51⁰C iken, A5 harcının taze sıcaklığı 32⁰C'dir. Bu iki değer arasındaki fark 19⁰C'dir. A4 harcının yüksek taze sıcaklığının birincil nedeni muhtemelen kimyasal bileşenlerdeki ve karıştırma oranlarındaki farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Geopolimer karışımlarında, özellikle SD ve Na içeriği taze sıcaklığı önemli ölçüde etkiler. A4 harcında, SD ve Na içeriği daha yüksek olduğu için ekzotermik reaksiyonları artmaktadır ve daha yüksek bir sıcaklık üretilmiştir. Öte yandan, A5 harcı bu bileşenlerin daha düşük bir oranına sahip olduğu için daha düşük bir taze sıcaklığa neden olmuştur. Ek olarak, karıştırma süresi ve çevre koşulları bu sıcaklık farkına katkıda bulunmuş olabilir. Bu fark, harçların kimyasal bileşenlerinin ve hazırlama koşullarının taze sıcaklık üzerindeki etkisini vurgulamaktadır.



Şekil 6.7. Tasarlanan geopolimer harçların taze harç sıcaklığı

Geopolimer harçlarının taze sıcaklığının çimento harcına kıyasla daha yüksek olmasının temel nedeni, geopolimerizasyon sürecinde meydana gelen ekzotermik reaksiyonların yoğunluğudur. Geopolimer harçlarda kullanılan CFUK, SD ve BA bileşenleri, alkali aktivatörlerle reaksiyona girdiğinde, yüksek enerjili bir polikondenzasyon süreci başlar. Bu süreç sırasında alüminosilikat bileşenlerin çözünmesi ve yoğun bir bağ yapısının oluşması sırasında ekzotermik bir ısı açığa çıkar (Duxon vd., 2007). Çimento hidratasyonuna göre çok daha hızlı gerçekleşen bu reaksiyonlar, harcın taze sıcaklığını artırır. Geopolimerizasyon sırasında alkali aktivatörlerin yüksek pH'ı, alüminosilikatların çözünürlüğünü artırarak ısı açığa çıkmasına neden olur ve bu da sıcaklığın hızla yükselmesine yol açar (Khale ve Chaudhary, 2007). Özellikle NaOH ve Na_2SiO_3 çözeltileri ile yapılan aktivasyonlar, kimyasal reaksiyon oranını hızlandırarak daha yüksek miktarda ısı üretilmesini sağlar. Na_2SiO_3 , polimerizasyon sürecini güçlendiren bir katalizör görevi gördüğünden, sıcaklık artışı daha belirgin hale gelir (Temuujin vd., 2009).

6.1.4. Priz süresi

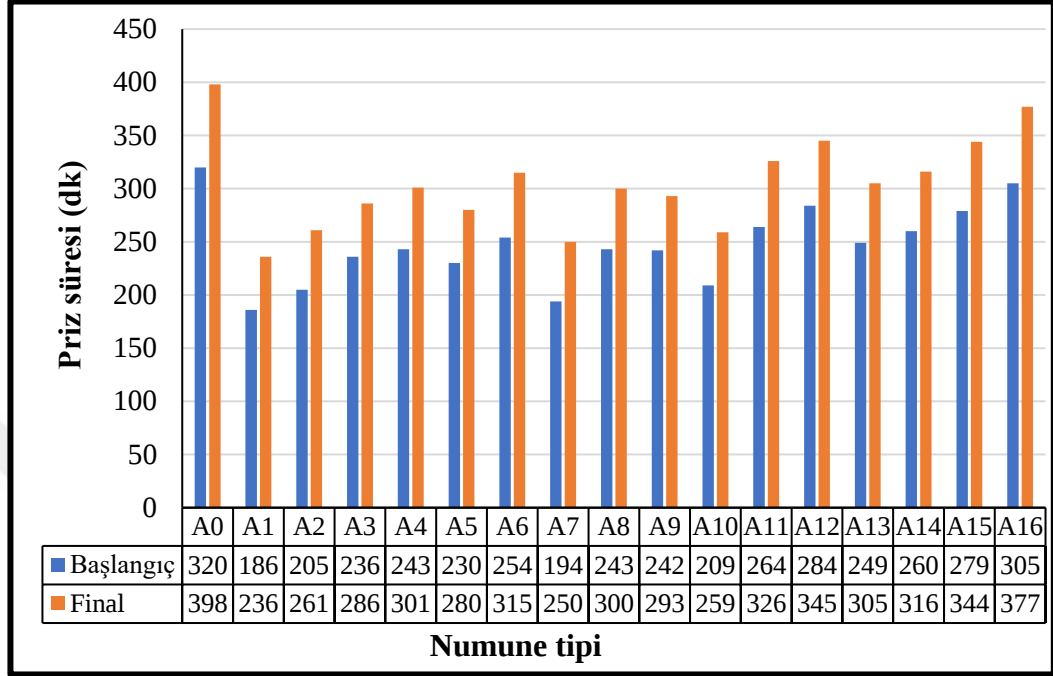
Şekil 6.8 harç karışımlarının farklı numunelerdeki priz sürelerini göstermektedir. A0 harcının başlangıç priz süresi 320 dakikayken, taze geopolimer harçların ölçülen priz süresi değerleri 186 dakika ile 305 dakika arasında değişmiştir. Priz süreleri, artan Na oranı azalırken artan BA ve SD miktarlarıyla artmıştır. Bunun nedeninin BA'daki yüksek miktarda borik asit (B_2O_3) olabileceği düşünülmektedir. Ek olarak, geopolimer harç karışımlarına YFC eklenmesi, harçların normal koşullardan daha erken priz almasına neden olmuştur.

Geopolimer harçların çimento harcına göre daha kısa priz süresine sahip olmasının temel nedeni, geopolimerizasyon sürecinde meydana gelen hızlı polikondenzasyon reaksiyonlarıdır.

Çimento harcında priz süresi, çimento bileşenlerinin su ile etkileşimi sonucu oluşan hidratasyon sürecine dayanır ve bu süreç nispeten yavaş ilerleyerek yapıdaki hidrate kalsiyum silikatların (C-S-H jel) oluşumunu sağlar (Taylor, 1997). Hidratasyon, daha düşük hızda gerçekleştiğinden çimento harcının priz süresi daha uzun olur.

Öte yandan, geopolimer harçlarda kullanılan CFUK, SD ve BA bileşenleri, yüksek pH'lı NaOH ve Na_2SiO_3 çözeltileri ile hızlı bir şekilde çözünür ve polikondenzasyon reaksiyonuna girer (Provis ve van Deventer, 2014). Bu hızlı çözünme ve ardından gelen yoğun bağ yapısının oluşumu, geopolimerizasyon sürecini oldukça hızlandırır,

dolayısıyla priz süresi çimento harcına göre çok daha kısa olur. Na_2SiO_3 , bağ yapısının oluşumunu hızlandırıcı bir etki yaparak sertleşme sürecini daha da kısaltır (Duxon vd., 2007).



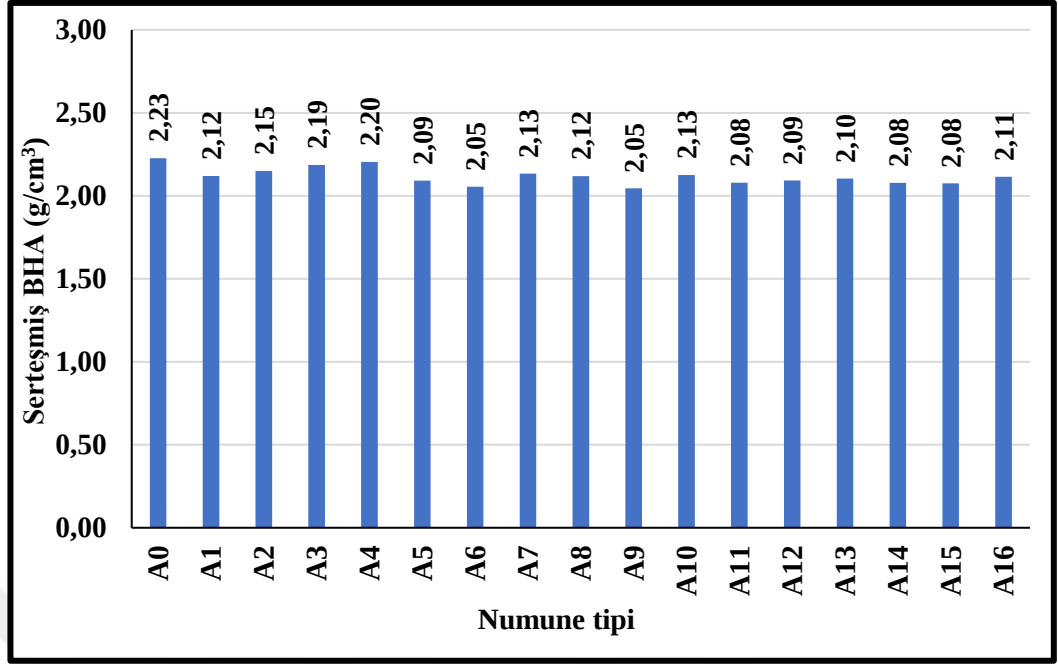
Şekil 6.8. Tasarlanan geopolimer harçların priz süresi

6.2. Sertleşmiş Harç Deneyleri

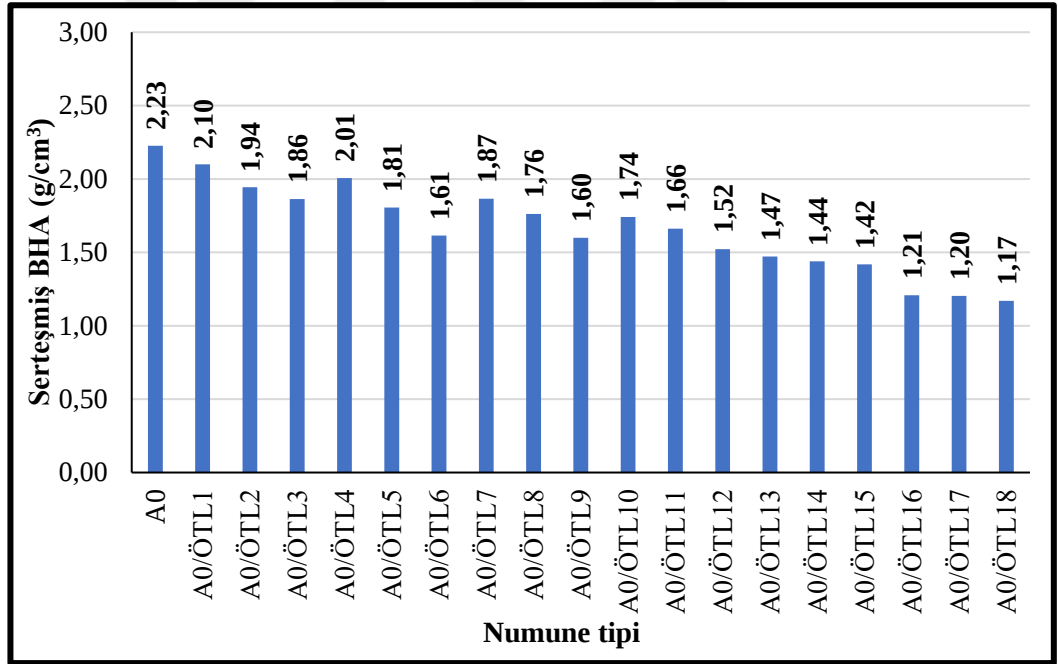
Sertleşmiş harç deneylerinde harçların birim hacim ağırlığı, su emme ve boşluk oranı, kılcalık katsayısı, ultrases geçiş hızı, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre bu değişkenlerin geopolimer harçların özelliklerini nasıl etkilediği ayrı ayrı değerlendirilmiş hem birbirleriyle hem de çimento ile üretilen kontrol harcıyla kıyaslanmıştır.

6.2.1. Sertleşmiş birim hacim ağırlığı

Şekil 6.9 harç karışımlarının sertleşmiş BHA'larını göstermektedir. Geopolimer harçların ölçülen BHA değerleri $2,05 \text{ g/cm}^3$ ile $2,20 \text{ g/cm}^3$ arasında değişmiştir. Geopolimer harçların BHA değerlerinin kontrol karışımına ($2,23 \text{ g/cm}^3$) göre daha düşük olduğu görülmüştür. Bunun nedeni olarak CFUK, BA ve SD malzemelerinin özgül ağırlıklarının kontrol karışımında kullanılan çimentoya göre daha düşük olmasıdır. Ayrıca, geopolimer harçların CFUK içeriğinin artması ile BHA değerleri azalmıştır. Üretilen karışımlarında en yüksek BHA A0 harcında, en düşük birim ağırlık ise A9 harcında gözlenmiştir. A9 harcının BHA, A0 harcından yaklaşık %8 oranında daha düşük olduğu belirlenmiştir.



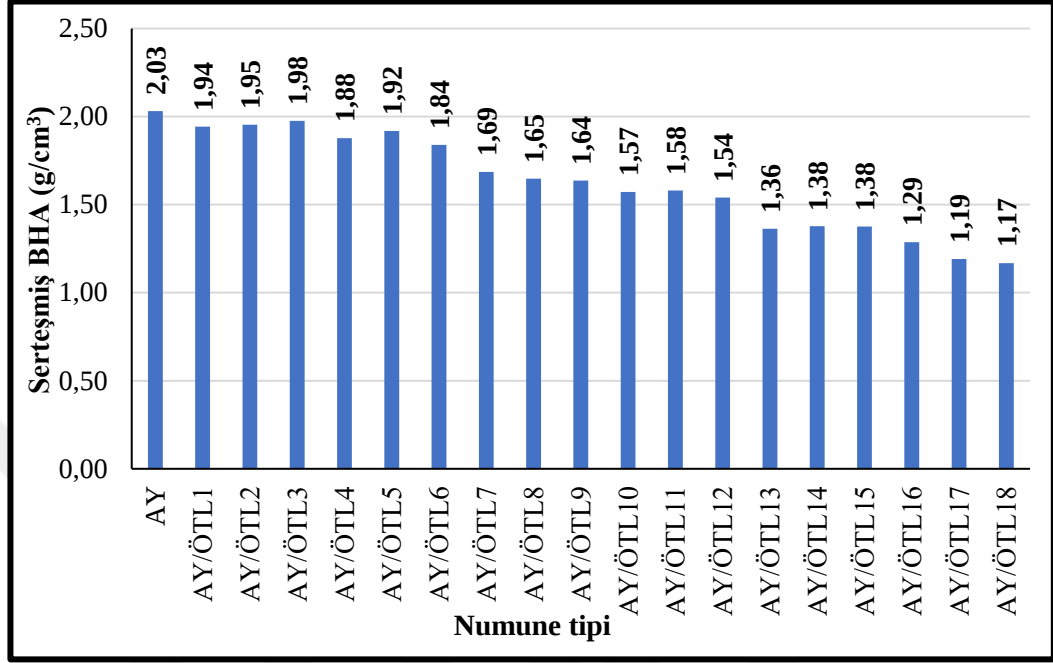
Şekil 6.9. Tasarlanan geopolimer harçların sertleşmiş birim hacim ağırlığı



Şekil 6.10. ÖTL kullanılan A0 harçlarının sertleşmiş birim hacim ağırlığı

Şekil 6.10 A0-ÖTL harçlarının, Şekil 6.11 ise AY-ÖTL harçlarının BHA'larını göstermektedir. A0-ÖTL harçlarının sertleşmiş BHA değerleri $1,17 \text{ g/cm}^3$ ile $2,23 \text{ g/cm}^3$ arasında, AY-ÖTL harçlarının sertleşmiş BHA değerleri ise $1,17 \text{ g/cm}^3$ ile $2,03 \text{ g/cm}^3$ arasında değişmiştir. AY harcının BHA'sının %100 ÖTL kullanımı ile %42,4, A0 harcının BHA'sının ise %100 ÖTL kullanımı ile %47,5 oranında azaldığı belirlenmiştir.

ÖTL oranı arttıkça sertleşmiş BHA'nın azalmasının temel nedeni, ÖTL parçacıklarının yoğunluğunun standart kuma göre çok daha düşük olması ve çimento matrisinde gözenekli bir yapının oluşmasıdır.



Şekil 6.11. ÖTL kullanılan AY harçlarının sertleşmiş birim hacim ağırlığı

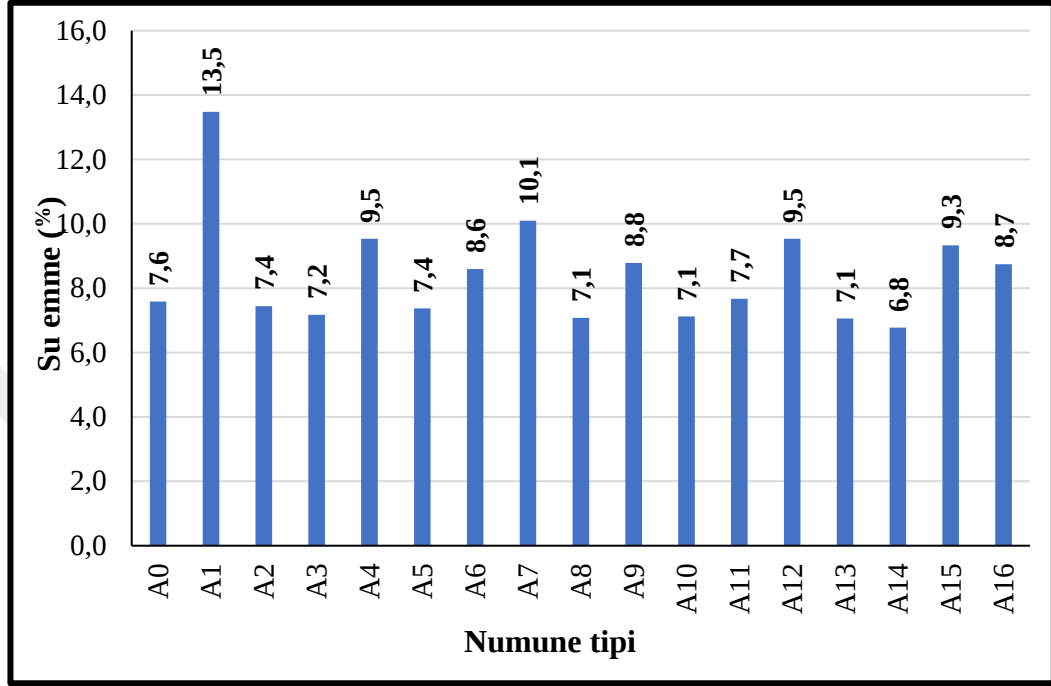
6.2.2. Su emme ve boşluk oranı

Şekil 6.12 harç karışımlarının su emme oranını göstermektedir. Geopolimer harçların ölçülen su emme değerleri %6,8 ile %13,5 arasında değişmiştir. A0 harcının su emmesinin ise %7,6 olduğu görülmüştür. Çoğu geopolimer harcın su emmesi, N-A-S-(H) jelinin C-S-H jeline kıyasla gözenekli yapıda olması nedeniyle kontrol harcından daha yüksek olmuştur.

Geopolimer bağlayıcıların su emme değeri, kullanılan bağlayıcı malzemelerin türüne ve içeriğine bağlı olmaktadır. Çalışmalar, YFC içeriğinin belirli bir seviyeye kadar artırılmasının toplam gözenek hacmini ve geçirgenliği azalttığını, ancak aşırı yüksek bağlayıcı içeriğinin mikro çatlaklara neden olarak geçirgenliği artırabileceğini göstermektedir (Bernal vd. 2011, Zhang vd. 2017). Ancak, SD içeriğinin belirli bir seviyeye kadar artırılması su emilimini azaltabilmektedir (Rostami ve Behfarnia, 2017).

Wong vd. (2020), yüksek Na konsantrasyonlarının yüksek kalsiyum içerikli UK bazlı geopolimer harçların su emme değerlerini artırdığını bulmuştur. CFUK içeriği geopolimer bağlayıcılardaki gözenek hacmini ve geçirgen gözenekleri artırır ancak gözenek bağlantısını azaltmaktadır. Daha yüksek CFUK içeriğiyle geçirgen gözenek

miktarındaki artış, N-A-S-(H) jelinin gözenekli yapısına atfedilmektedir (İsmail vd., 2014). UK bazlı bağlayıcıları uzun süre sıcak kürleme koşullarında tutmak, elde edilecek geopolimer bağlayıcının gözenek yapısı üzerinde önemli bir fayda sağlamaktadır ve su geçirgenliğini önemli ölçüde azaltmaktadır (Ma vd., 2013).



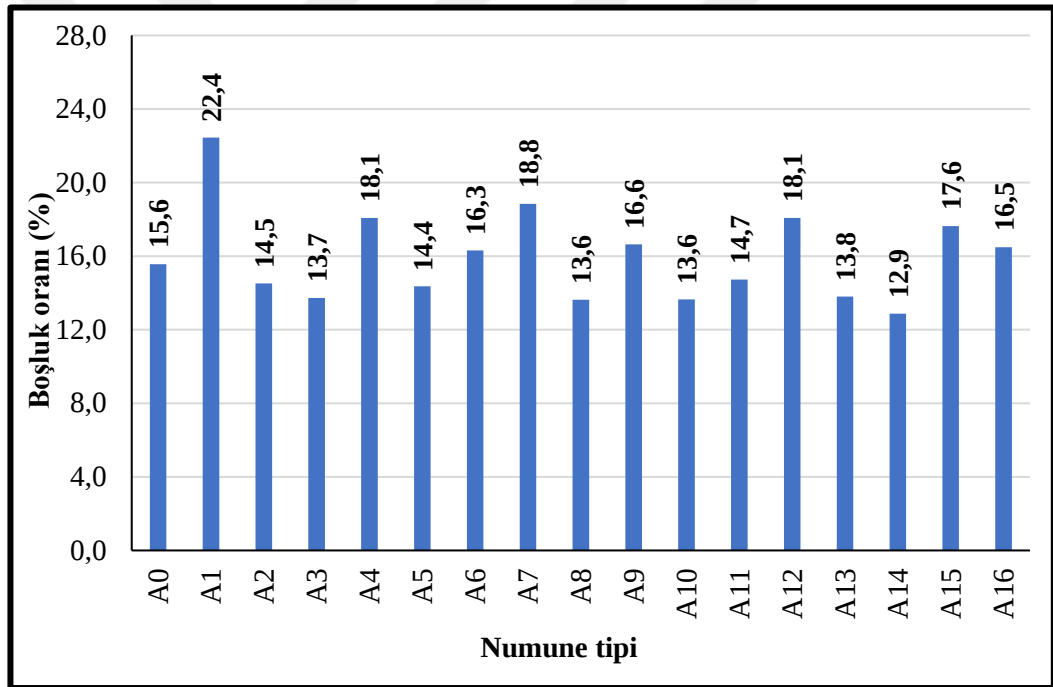
Şekil 6.12. *Tasarlanan geopolimer harçların su emme değerleri*

A1 harcında %100 CFUK kullanılması sonucunda en yüksek su emme kapasitesinin bu harçta olduğu belirlenmiştir. A1 harcının su emiliminin kontrol harçtan yaklaşık %77,8 daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ancak %15 BA ve %5 SD içeren A14 harcı en düşük su emilimine sahip olup kontrol harçtan yaklaşık %6,9 daha düşük olmuştur. Ek olarak hem SD hem de BA kullanımının su emilimini azalttığı belirlenmiştir.

Şekil 6.13 geopolimer harçların boşluk oranını göstermektedir. Geopolimer harç numunelerin boşluk oranları %12,9 ile %22,4 arasında değişmiştir. %100 CFUK içeren geopolimer harç numunelerin boşluk oranı %22,4 olarak bulunmuştur. CFUK bazlı geopolimer harçların boşluk oranları, ikame olarak BA ve SD kullanıldığında bir azalma göstermiştir.

Geopolimer harçta kürleme sıcaklığı 40°C ve 100°C olduğunda su emme ve boşluk oranı değerlerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeni, düşük veya yüksek sıcaklıklarda oluşan bağ yapısının homojenliğinin bozulması ve gözenekliliğin artmasıdır. 40°C gibi düşük sıcaklıklarda kürleme, geopolimerizasyon sürecinin yeterince

hızlı gerçekleşmemesine neden olabilmektedir, bu da matrisin tam olarak yoğunlaşamamasıyla sonuçlanmaktadır. Bu durumda, gözenekli bir yapı oluşur ve su emme kapasitesi artar (Duxon vd., 2007). Diğer yandan, 100°C gibi çok yüksek sıcaklıklarda yapılan kürlenme, harç içindeki suyun hızlı bir şekilde buharlaşmasına yol açarak matris içinde mikroskobik boşluklar bırakabilmektedir. Bu durum, bağ yapısının zayıflamasına ve su emme değerlerinin artmasına neden olmaktadır (Temuujin et al., 2009). 60°C ve 80°C sıcaklıklarında kürlenme ise optimal sıcaklık aralığında olduğu için geopolimerizasyon süreci dengeli bir hızda gerçekleşir ve matris yoğun bir yapı oluşturmaktadır. Bu sıcaklık aralığı, bağ yapısının daha homojen ve güçlü olmasını sağlayarak su emme değerlerini düşürmektedir (Olivia ve Nikraz, 2012). Bu optimal sıcaklık aralığında kürlenmiş geopolimerler, daha düşük gözeneklilik ve daha az su emme kapasitesi ile üstün dayanıklılık özellikleri sergilemektedir.



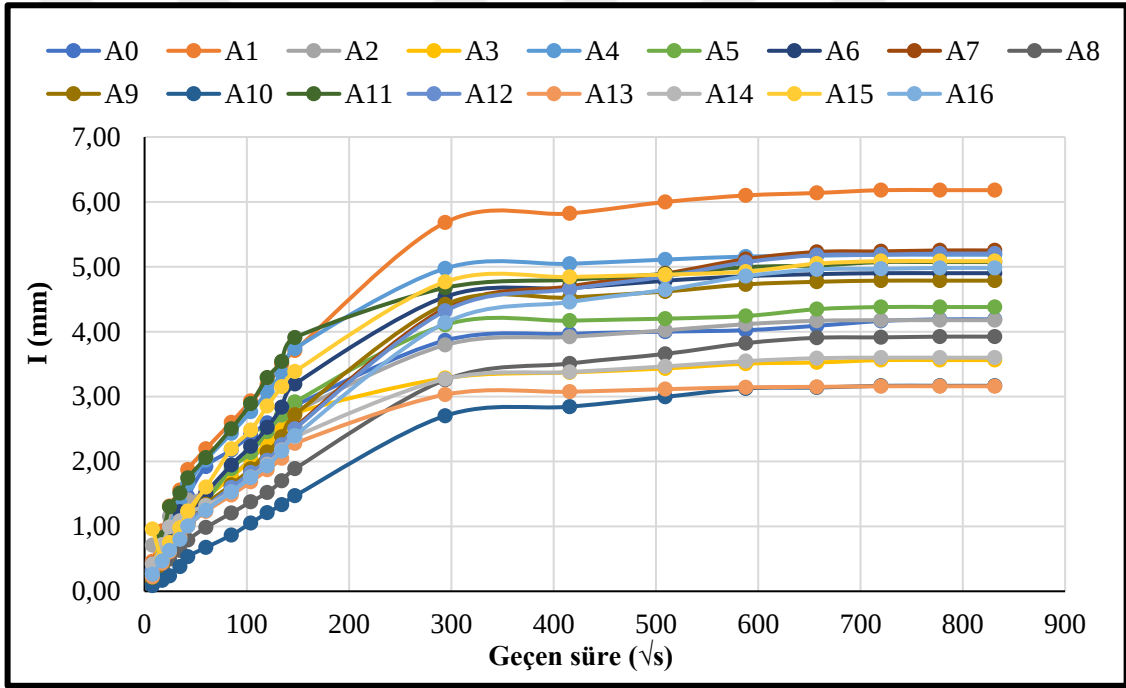
Şekil 6.13. Tasarlanan geopolimer harçların boşluk oranları

6.2.3. Kılcal su emme katsayısı (Sorptivite)

Geopolimer harçların zamana bağlı kılcal su emme yüksekliği (I, mm) Şekil 6.14 verilmiştir. Buna göre, grafik üçe ayrılarak incelenmiştir. Geopolimer harçların kümülatif kılcal su emme süreci zamanın karekökü ile doğrusal olmayan bir şekilde artarken; erken aşamada ($\sqrt{s} = 0-147$ s) hızlı bir şekilde artmakta, orta aşamada ($\sqrt{s} = 147-657$ s) yavaşlamakta ve dengeye gelene kadar yavaşça artmakta ($\sqrt{s} = 657-831$ s) olduğu belirlenmiştir. Üç aşamada, kümülatif kılcal su emme doğrusal olarak artarken kılcal su

emme hızı giderek azalmakta olduğu, başlangıçta kılcal su emme hızının daha hızlı olduğu, orta kılcal su emme hızının daha yavaş olduğu ve daha sonra kılcal su emme hızının temel olarak değişmediği gözlemlenmiştir.

Harcın kılcal su emme mekanizması, özellikle yüzeydeki boşlukların başlangıçta suyu hızla emmesiyle başlamaktadır. Harcın alt yüzeyinin suyla temas etmesi, kapiler boşlukların hızlıca dolmasına ve suyun iç bağlantı boşluklarına nüfuz etmesine neden olmaktadır. Kılcal su emme süresi uzadıkça, suyun ilerleme derinliği artar, beton yüzeyi suya doymun hale gelir ve yüzeydeki su hareketi azalır. Ancak, iç kısımda kalan kuru bölgeler, yüzey ve iç kısım arasında bir nem gradyanı oluşturarak harcın kılcal kuvvetle su emmeye devam etmesini sağlamaktadır. Zamanla kılcal su emme kuvveti azalsa da süreç belirli bir denge noktasına ulaşana kadar devam etmektedir (Xiao vd., 2020).



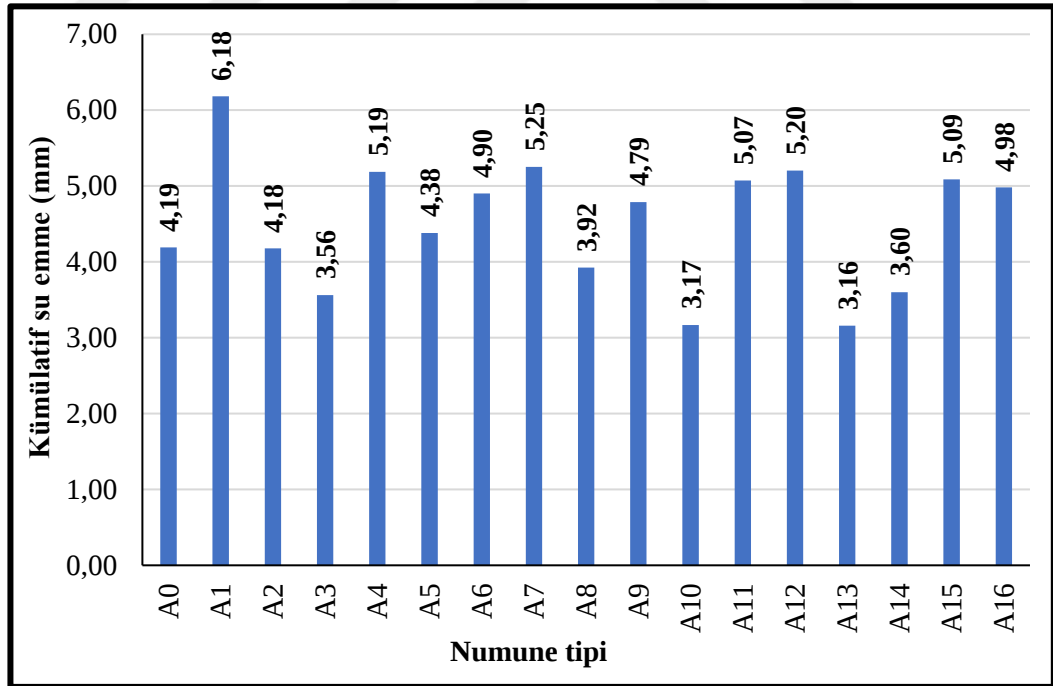
Şekil 6.14. Tasarlanan geopolimer harçların kılcal su emme değerleri

Geopolimer harçların ve geleneksel çimento harçlarının kılcallık katsayısı arasındaki farklar, bu malzemelerin mikro yapılarından ve kimyasal özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Kılcallık katsayısı, harç malzemesinin su emme kapasitesi ve suyun kapiler boşluklar yoluyla malzeme içinde ilerleyişini etkiler, bu yüzden su dayanıklılığı, donma-çözülme döngüsüne karşı direnç gibi özellikler üzerinde doğrudan etkilidir. Ayrıca, geopolimer harçların daha düşük kılcallık katsayısına sahip olmaları, onların daha iyi kimyasal direnç ve uzun ömürlülüğe sahip olmasına katkı sağlar. Bununla birlikte,

geopolimer harçların üretimi sırasında kullanılan atık malzemelerin türüne bağlı olarak kılcallık katsayısında bazı değişiklikler gözlenebilir.

Geopolimer harçlar, özellikle CFUK ve YFC'den üretilip alkali aktivatörlerle aktive edilen malzemeler olduğundan, gözeneklilik yapıları geleneksel çimentodan farklıdır. Yapılan çalışmalarda geopolimerlerin daha düşük kılcallık katsayısına sahip oldukları belirtilmiştir. Bu durum, geopolimerlerin sahip olduğu daha ince ve homojen mikro yapı ile açıklanmaktadır (Zhuang vd., 2016). Geopolimer harçlardaki bağlayıcı matrisin kimyasal yapısı, silikat ve alüminat zincirlerinden oluşan yoğun bir yapı oluşturarak kapiler boşlukları azaltır ve suyun ilerleyişini zorlaştırır (Shi vd., 2015). Bu sayede, geopolimer harçların su dayanıklılığı, çimento harçlarına göre genellikle daha yüksektir.

Çimento bazlı harçlarda ise kılcallık katsayısı daha yüksektir. Çimento hidrasyonu ile oluşan C-S-H yapısında bulunan kapiler boşluklar, suyun çimento matrisine girişini kolaylaştırır. Çimento harçlarının gözeneklilik oranı genellikle daha yüksek olduğundan su emme oranları da yüksektir. Bu durum, özellikle donma-çözülme döngüleri gibi dayanıklılık sorunlarına yol açabilir (Mehta ve Monteiro, 2006).



Şekil 6.15. Tasarlanan geopolimer harçların kümülatif su emme yüksekliği

Geopolimer harçların kümülatif kılcal su emme yüksekliğinin bir göstergesi olan 8. gün kılcal su emme yüksekliği Şekil 6.15'te gösterilmiştir. Buna göre, en düşük kılcal su emme yüksekliği 3,16 mm ile A13 harcında, en yüksek kılcal su emme derinliği ise 6,18

mm ile A1 harcında gözlemlenmiştir. Literatürde bulunan diğer çalışmalarda olduğu gibi, kılcal su emme yüksekliği değerlerinin basınç dayanım ve su emme sonuçları ile uyumlu geldiği belirlenmiştir (Mehta ve Siddique, 2017).

Tablo 6.1. *Tasarlanan geopolimer harçların birincil ve ikincil kılcallık katsayıları*

Numune Tipi	Birincil kılcallık katsayısı denklemi	Birincil kılcallık katsayısı (mm/ $\sqrt{s}$)	İkincil kılcallık katsayısı denklemi	İkincil kılcallık katsayısı (mm/ $\sqrt{s}$)
A0	$y = 0,0192x + 0,2982$ $R^2 = 0,927$	0,0192	$y = 0,0006x + 3,6842$ $R^2 = 0,9713$	0,0006
A1	$y = 0,0213x + 0,7014$ $R^2 = 0,9691$	0,0213	$y = 0,001x + 5,4517$ $R^2 = 0,9089$	0,001
A2	$y = 0,0135x + 0,7088$ $R^2 = 0,9828$	0,0135	$y = 0,0007x + 3,6221$ $R^2 = 0,9044$	0,0007
A3	$y = 0,0159x + 0,4113$ $R^2 = 0,9827$	0,0159	$y = 0,0005x + 3,1499$ $R^2 = 0,9391$	0,0005
A4	$y = 0,0226x + 0,4398$ $R^2 = 0,9778$	0,0226	$y = 0,0004x + 4,8857$ $R^2 = 0,8967$	0,0004
A5	$y = 0,019x + 0,1774$ $R^2 = 0,9963$	0,019	$y = 0,0006x + 3,9297$ $R^2 = 0,943$	0,0006
A6	$y = 0,0189x + 0,3458$ $R^2 = 0,985$	0,0189	$y = 0,0007x + 4,3945$ $R^2 = 0,8803$	0,0007
A7	$y = 0,0148x + 0,3283$ $R^2 = 0,993$	0,0148	$y = 0,0017x + 3,993$ $R^2 = 0,8992$	0,0017
A8	$y = 0,0111x + 0,2362$ $R^2 = 0,9925$	0,0111	$y = 0,0013x + 2,9831$ $R^2 = 0,8992$	0,0013
A9	$y = 0,0169x + 0,179$ $R^2 = 0,9886$	0,0169	$y = 0,0007x + 4,2411$ $R^2 = 0,9135$	0,0007
A10	$y = 0,0098x + 0,0341$ $R^2 = 0,9944$	0,0098	$y = 0,0009x + 2,5008$ $R^2 = 0,8822$	0,0009
A11	$y = 0,0233x + 0,5191$ $R^2 = 0,9696$	0,0233	$y = 0,0008x + 4,4855$ $R^2 = 0,9391$	0,0008
A12	$y = 0,0149x + 0,302$ $R^2 = 0,9915$	0,0149	$y = 0,0017x + 3,9559$ $R^2 = 0,8992$	0,0017
A13	$y = 0,0137x + 0,2813$ $R^2 = 0,9812$	0,0137	$y = 0,0002x + 2,9765$ $R^2 = 0,8967$	0,0002
A14	$y = 0,0121x + 0,559$ $R^2 = 0,9679$	0,0121	$y = 0,0006x + 3,1213$ $R^2 = 0,9044$	0,0006
A15	$y = 0,0223x + 0,188$ $R^2 = 0,9953$	0,0223	$y = 0,0007x + 4,5636$ $R^2 = 0,943$	0,0007
A16	$y = 0,0144x + 0,2741$ $R^2 = 0,9895$	0,0144	$y = 0,0016x + 3,788$ $R^2 = 0,8992$	0,0016

Çalışmada daha sonra ASTM C1585-13 standardına uygun şekilde geopolimer betonun zamana bağlı kılcal su emme yüksekliği grafiği incelenerek kılcal su emme katsayıları hesaplanmıştır. Birincil ve ikincil kılcal su emme katsayıları Tablo 6.1’de gösterilmiştir. Buna göre, en düşük birincil kılcal su emme kat sayısı değeri 0,0098 mm/ $\sqrt{s}$ ile A10 harcında en yüksek katsayısı değeri ise 0,0233 mm/ $\sqrt{s}$ ile A11 harcında görülmüştür. En düşük ikincil kılcal su emme katsayısı değeri 0,0002 mm/ $\sqrt{s}$ ile A13 harcında, en yüksek katsayı değeri ise 0,0017 mm/ $\sqrt{s}$ ile A7 ve A12 harçlarında görülmüştür.

Kılcal su emme hızı ile kümülatif kılcal su emme değerinin birbiriyle tam olarak uyumlu olmadığı gözlemlenmiştir. Örneğin en yüksek kılcal su emme katsayısını gösteren harcın en yüksek kümülatif kılcal su emme değerini göstermediği belirlenmiştir. Buna karşın, en düşük kılcal su emme gösteren harcın en düşük kılcal su emme katsayısı değerini verdiği görülmüştür.

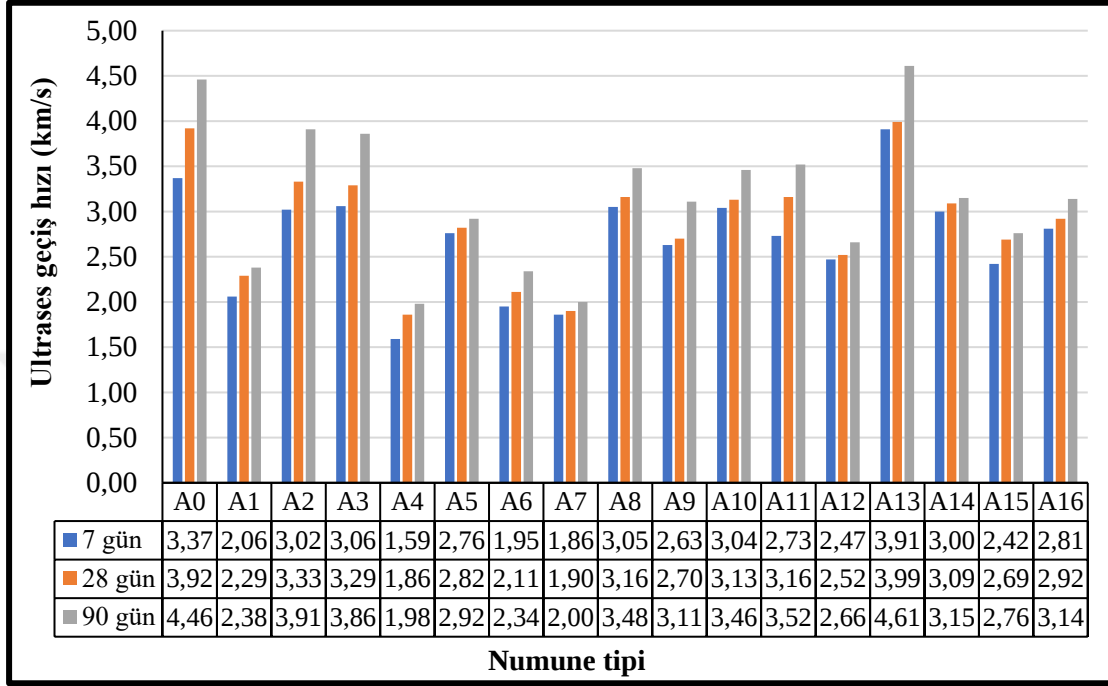
6.2.4. Ultrases geçiş hızı

Geopolimer harçların kalitesini ve uniform yapısını ölçmek için 7, 28 ve 90. günlerde ultrases geçiş hızı testleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, ultrases geçiş hızının zamanla arttığını ve dayanım kazanımını göstermektedir. Şekil 6.16’da tasarlanan geopolimer harçların 7. günde ultrases geçiş hızı değerlerinin 1,59 km/s ile 3,91 km/s arasında, 28. günde 1,86 km/s ile 3,99 km/s arasında ve 90. günde 2,00 km/s ile 4,61 km/s arasında değiştiği görülmektedir. Bu sonuçlar, geopolimer matrisin zamanla daha yoğun ve daha düzgün hale geldiğini göstermektedir.

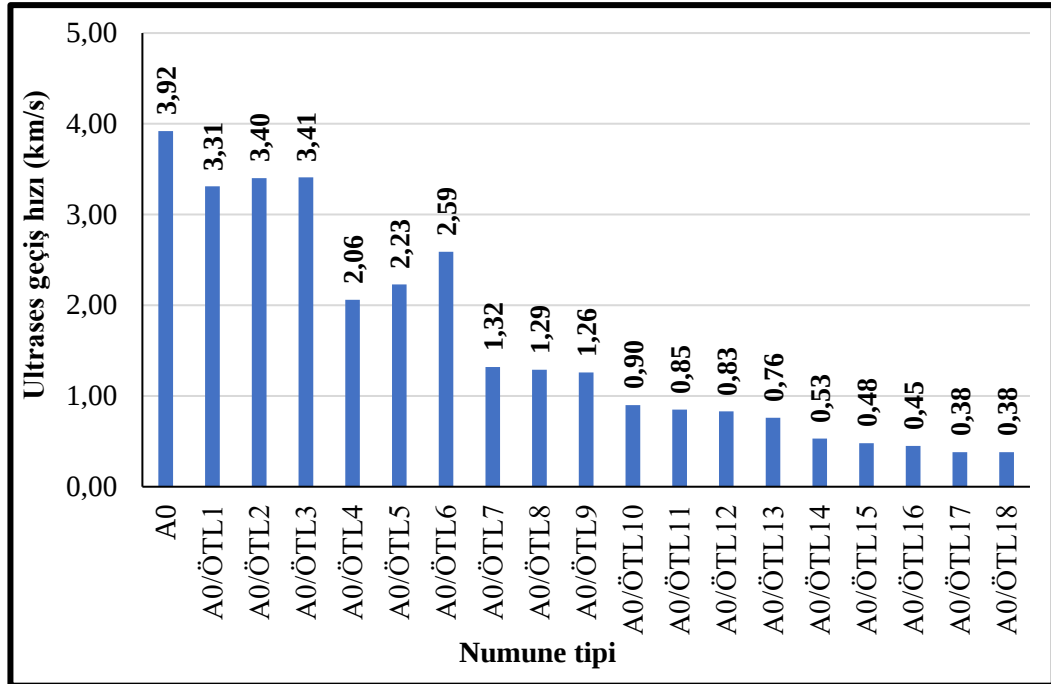
Şekil 6.17’de A0/ÖTL harçları için ultrases geçiş hızının ölçülen değerlerinin ÖTL kullanımı arttıkça düşük seviyelere gerilediğini görmekteyiz. Ultrases geçiş hızı değerlerinin 3,92 km/s ile 0,38 km/s arasında değiştiği görülmektedir. Bu durum, lastik parçacıklarının harç içinde oluşturduğu düşük yoğunluklu yapı ve artan gözeneklilik ile ilişkilendirilebilir. Lastik katkıları genellikle harçların kompakt yapısını azaltarak daha az yoğun bir yapı sunarak ses dalgalarının daha yavaş geçişine neden olmaktadır.

Şekil 6.18’de AY/ÖTL harçları için ölçülen ultrases geçiş hızı değerlerinin 2,68 km/s ile 0,45 km/s arasında değiştiği görülmektedir. %60 ÖTL kullanımından sonra AY/ÖTL harçlarının ultrases geçiş hızı değerlerinin A0/ÖTL harçlarına kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, A0/ÖTL harçlarında %20 ÖTL, AY/ÖTL harçlarında ise %10 ÖTL kullanımında PVA’nın yüzey işleme yöntemi olarak kullanılması ultrases geçiş hızı değerlerini sırasıyla %25,7 ve %3,6 arttırmıştır. Bu

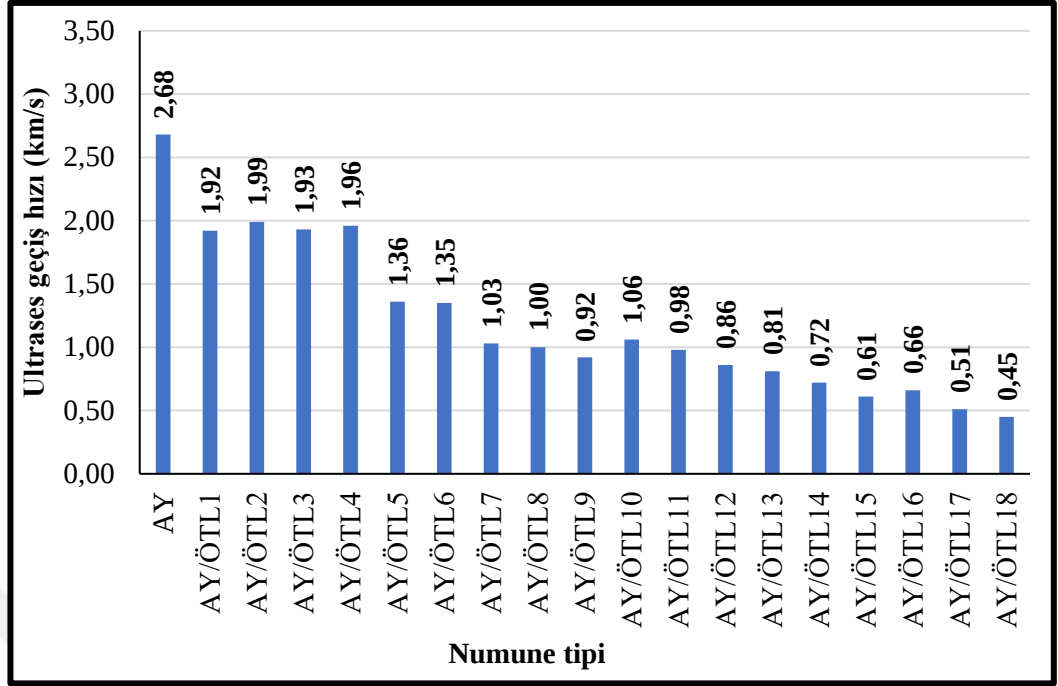
durum, hem A0/ÖTL hem de AY/ÖTL harçlarındaki PVA ile modifiye edilmiş lastiklerin, harç içinde daha homojen ve yoğun bir yapı oluşturduğunu göstermektedir. Bu yapı ultrasonik dalgaların harç boyunca daha hızlı geçişine olanak tanır ve daha yüksek bir UPV değerine katkıda bulunur.



Şekil 6.16. Tasarlanan geopolimer harçların ultrases geçiş hızı değerleri



Şekil 6.17. ÖTL kullanılan A0 harçlarının ultrases geçiş hızı değerleri



Şekil 6.18. ÖTL kullanılan AY harçlarının ultrases geçiş hızı değerleri

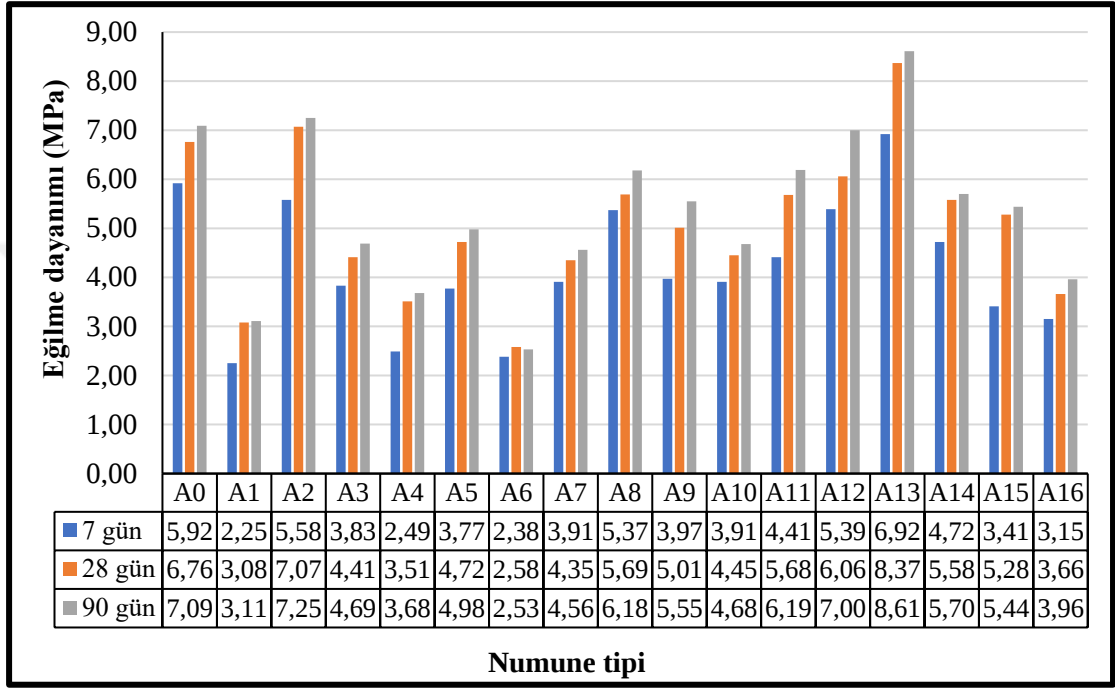
Her iki şekil birlikte değerlendirildiğinde, ÖTL katkısının harçlarda ultrases geçiş hızını düşürme eğiliminde olduğu ancak kullanılan harç tipine bağlı olarak değişiklikler gözlemlendiği anlaşılmaktadır. AY/ÖTL harçlarının daha yüksek ultrasonik geçiş hızına sahip olması, modifiye edilmiş ÖTL katkısının harç matrisine daha iyi entegre olarak daha yoğun bir yapı sağladığını göstermektedir.

6.2.5. Eğilme dayanımı

Şekil 6.19’de sunulduğu üzere 7, 28 ve 90 günlerde eğilme dayanımı deneyleri yapılmıştır ve geopolimer harçların eğilme dayanımı, 7 günden 90 güne kadar önemli bir artış göstermiştir. 7 günlük eğilme dayanımı değerleri 5,28 MPa ile 6,37 MPa arasında, 28 günlük değerler 5,70 MPa ile 8,37 MPa arasında, 90 günlük değerler ise 5,44 MPa ile 8,61 MPa arasında değişmektedir. Eğilme dayanımındaki bu artış, geopolimer matrisin gelişimini ve eğilme kuvvetlerine karşı direncini ortaya koymaktadır.

Geopolimer harçların eğilme dayanımı değerlerinin genel olarak A0 harcına göre daha düşük olduğu görülmüştür. En düşük eğilme dayanımının belirlendiği A6 harcının 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanım değerlerinin A0 harcı değerlerine göre sırasıyla %60, %61,8 ve %64,3 oranlarında daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. En yüksek eğilme dayanımının elde edildiği A13 harcının ise 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanım değerlerinin A0 harcı değerlerine göre sırasıyla %16,9, %23,8 ve %21,4 oranlarında daha

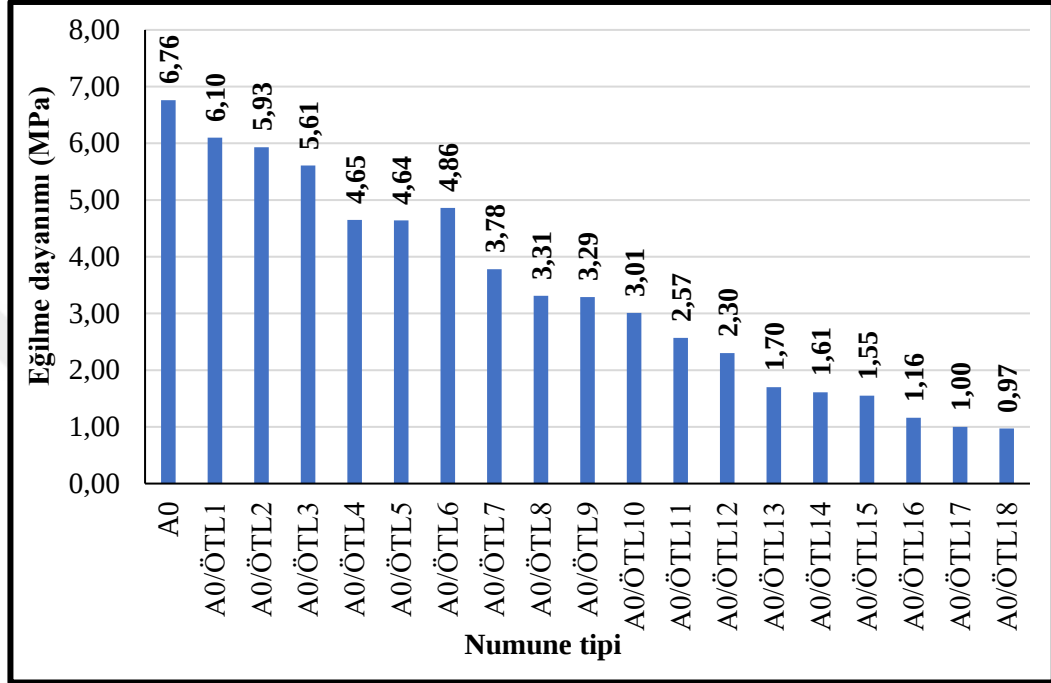
yüksek olduğu gözlenmiştir. Özellikle BA içeren karışımların eğilme dayanımını artırıcı bir etkisi olduğu literatürde de belirtilmiştir (Celik vd., 2018). Ayrıca, SD gibi ince ve reaktif katkıları bağ yapısını güçlendirebilir ancak homojen dağılım sağlanmadığında dayanım değerlerinde düşüş gözlenebilmektedir. Tasarlanan geopolimer harçların eğilme dayanım değerleri, katkı malzemelerinin homojen dağılımı ve matris ile uyumu sağlandığında en yüksek değerleri göstermektedir.



Şekil 6.19. Tasarlanan geopolimer harçların eğilme dayanımları

Geopolimer harçların eğilme dayanımının çimento harçlarına göre daha düşük olmasının başlıca nedeni, iki malzeme arasındaki bağlanma mekanizması farklılıklarıdır. Çimento harçları, C-S-H jeli oluşturarak sertleşir ve bu jel yapı, yüksek yapışma ve bağ kuvveti sağlayarak eğilme dayanımını artırır. Geopolimerlerde ise, alüminosilikatların polikondenzasyon yoluyla bağlanmasıyla oluşan üç boyutlu ağ yapısı, C-S-H jeli kadar güçlü bir mikro çatlak direnci sunmaz ve daha kırılğan bir yapıya sahip olur. Bu kırılğanlık, eğilme gerilmelerine karşı dayanımı azaltan bir faktördür. Ayrıca, geopolimer harçlarda kullanılan alkali aktivatörler ve atık malzemeler nedeniyle gözeneklilik artar ve bu gözenekli yapı, yük altında mikro çatlakların daha kolay yayılmasına yol açar. Çimento bazlı harçlar ise daha yoğun bir matris oluşturduğundan, yük altında daha az çatlama ve deformasyon gösterir. Geopolimer harçlarda kullanılan CFUK mikro yapıda homojen bağ yapısını sınırlayarak eğilme dayanımını olumsuz etkileyebilir. Çimento harçları ise daha homojen bir hidrasyon ürünü oluşturarak, daha kompakt ve dayanıklı

bir yapı sağlar. Ayrıca, çimento bazlı harçlar, hidrasyon sürecinde mikro çatlakları sınırlandıran bir bütünlük oluştururken, geopolimerler bu içsel bütünlüğü tam anlamıyla sağlayamayabilir ve çatlaklara karşı daha düşük direnç gösterebilir. Bu nedenlerden dolayı, geopolimer harçların eğilme dayanımı çimento bazlı harçlardan daha düşük olma eğilimindedir.

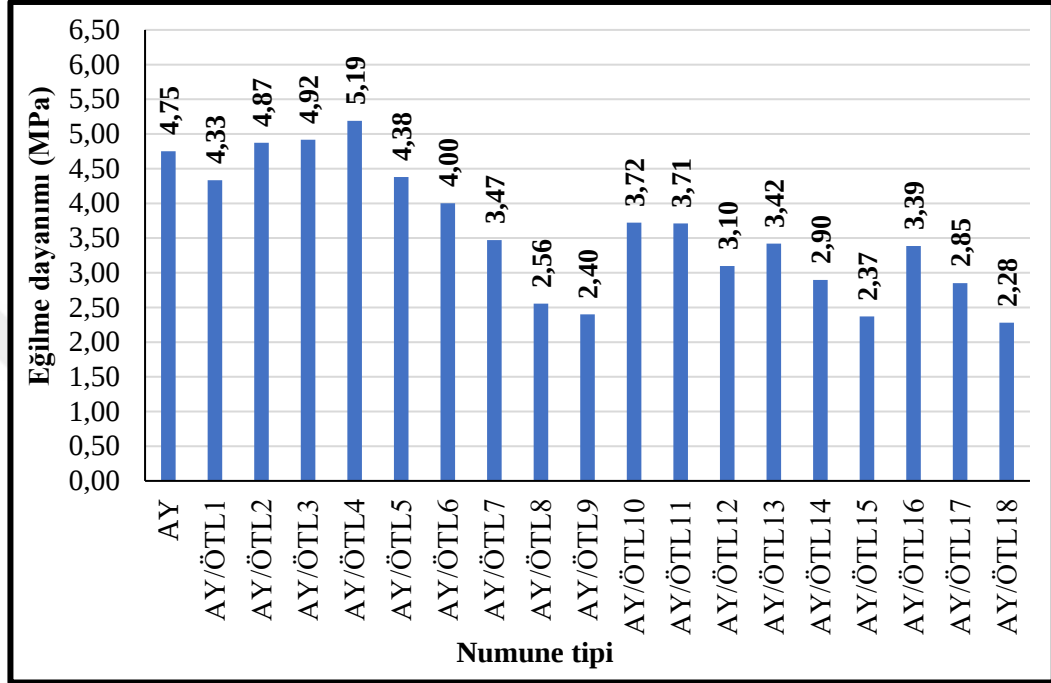


Şekil 6.20. ÖTL kullanılan A0 harçlarının eğilme dayanımları

A0/ÖTL harçlarının eğilme dayanım değerleri Şekil 6.20'de gösterilmektedir. Eğilme dayanımı değerlerinin 0,97 MPa ile 6,76 MPa arasında değiştiği görülmektedir. ÖTL'nin elastik yapısı, harç içindeki eğilme dayanımını artırıcı bir rol oynamaktadır. Ancak, ÖTL parçacıklarının aşırı kullanımı durumunda matris içinde yeterli bağ oluşamayabilir ve harç içinde boşluklu bir yapı meydana gelebilir. Bu da dayanımı olumsuz etkileyebilir. ÖTL oranına göre eğilme dayanımındaki farklılıklar, harç içindeki elastikiyet ve enerji sönümleme kapasitesinin arttığını ancak belirli oranların üzerinde negatif bir etki oluşabileceğini göstermektedir (Thomas ve Gupta, 2016).

AY/ÖTL harçlarının eğilme dayanımları Şekil 6.21'de sunulmaktadır. Eğilme dayanımı değerlerinin 2,28 MPa ile 5,19 MPa arasında değiştiği görülmektedir. Bu harçlarda ÖTL yüzey işleminden geçirilmiştir ve bu işlem, ÖTL parçacıklarının harç matrisine daha iyi bağlanmasını sağlar. Bu yüzey işlemi, parçacıkların bağlayıcı matrisle daha güçlü bir etkileşim kurmasını destekleyerek eğilme dayanımının artmasına katkı sağlar. Ayrıca, A0/ÖTL harçlarında %20 ÖTL, AY/ÖTL harçlarında ise %10 ÖTL

kullanımında PVA'nın yüzey işleme yöntemi olarak kullanılması eğilme dayanımı değerlerini sırasıyla %4,7 ve %13,6 arttırmıştır. ÖTL katkısının geopolimer harçlarda %20'ye kadar kullanılmasının eğilme dayanımının artırma eğiliminde olduğu ancak kullanılan harç tipine bağlı olarak değişiklikler gözlemlendiği anlaşılmaktadır. Yüzey işlemi yapılmış ÖTL, matrisle daha iyi bütünleşerek eğilme dayanımını artırmaktadır.



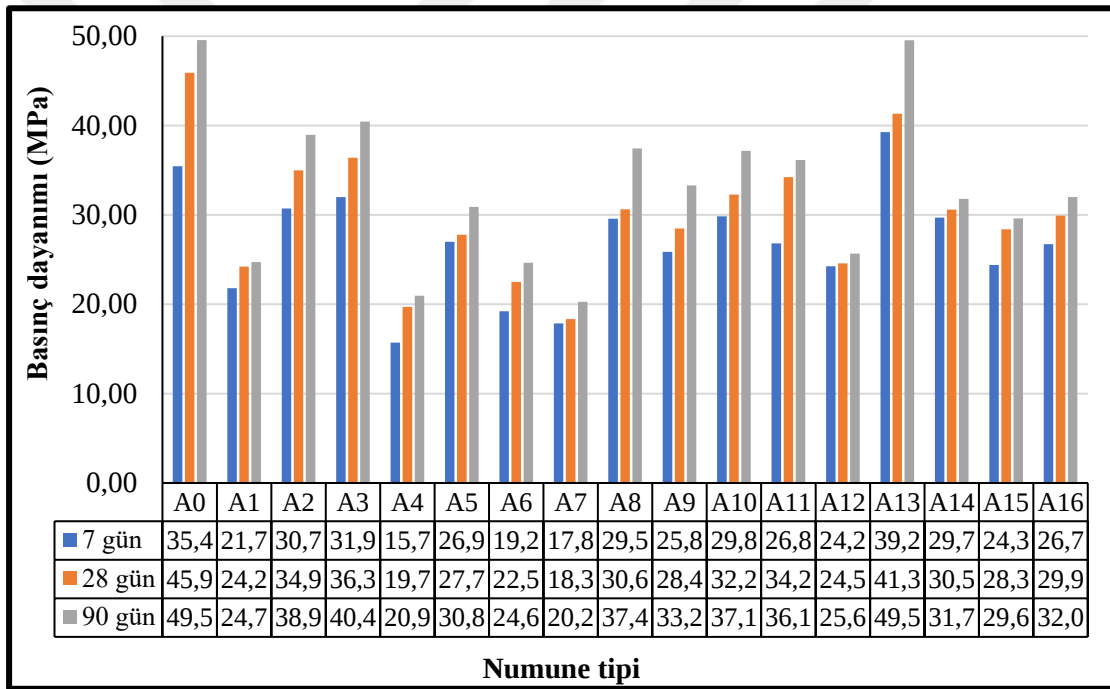
Şekil 6.21. ÖTL kullanılan AY harçlarının eğilme dayanımları

6.2.6. Basınç dayanımı

Şekil 6.22'de sunulduğu üzere 7, 28 ve 90 günlerde gerçekleştirilen basınç dayanımı deneyleri geopolimer harçların zamanla önemli bir dayanım gelişimi gösterdiğini ortaya koymuştur. 7 günlük basınç dayanımı değerleri 28,39 MPa ile 36,93 MPa arasında, 28 günlük değerler 30,87 MPa ile 49,2 MPa arasında ve 90 günlük değerler ise 29,91 MPa ile 50,10 MPa arasında değişmektedir. Bu sonuçlar, kürleme süresi arttıkça geopolimer numunelerin dayanım kazanmaya devam ettiğini göstermekte olup, malzemenin yapısal uygulamalar için taşıdığı potansiyeli ortaya koymaktadır.

CFUK ve YFC malzemesi gibi yüksek kalsiyumlu malzemelerin aktivasyonu yoluyla elde edilen bağlayıcı jellerin yapısı, mekanik özellikleri ve dayanıklılık performansı, reaksiyon mekanizmasını kontrol eden çeşitli kimyasal faktörlere bağlıdır. Bu faktörler genel olarak kullanılan aktivatörle doğrudan ilişkili olanlar ve bağlayıcı malzemelerin karakteristik özellikleriyle ilişkili olanlar olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir (Provis ve Deventer, 2014).

Geopolimer harçtaki Na içeriği, mekanik özellikler üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Na, geopolimerizasyon sürecinde çözünürlüğü ve reaktiviteyi artırarak daha güçlü ve yoğun bir ağ yapısının oluşmasına katkıda bulunur. Uygun bir Na konsantrasyonu, bağlayıcı malzemeler arasında daha iyi bir etkileşim sağlayarak basınç ve çekme dayanımını iyileştirebilir. Ancak, aşırı miktarda Na, yüksek alkali içeriği nedeniyle gözenekliliği artırarak dayanımı düşürebilir. Na ayrıca iç yapı ve yoğunluğu da etkileyerek, doğru miktarda kullanıldığında daha kompakt bir yapı ve geliştirilmiş mekanik özellikler sağlar. Ek olarak, Na içeriği kürlenme süresi ve koşullarıyla etkileşime girerek kürlenme sürecini hızlandırabilir, ancak bu durum çatlama riskini de artırabilir. Bu nedenle, Na oranının uygun şekilde ayarlanması, geopolimer harcın mekanik performansını optimize etmek için kritik öneme sahiptir.



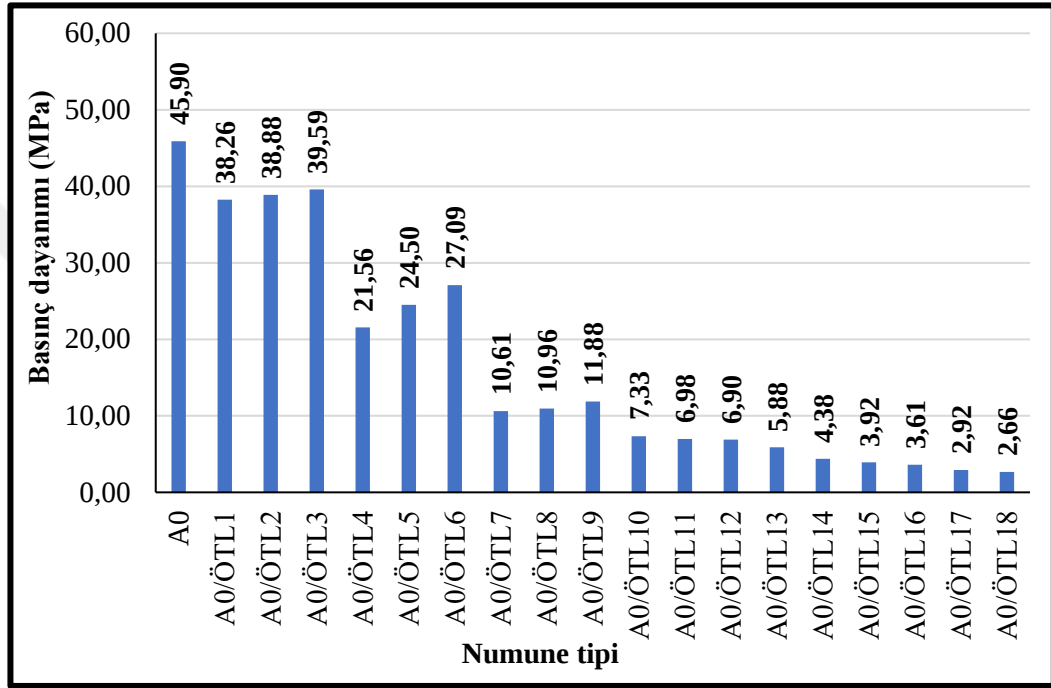
Şekil 6.22. Tasarlanan geopolimer harçların basınç dayanımları

Geopolimer harçta kürlenme sıcaklığı, mekanik özelliklerinin şekillenmesinde kritik bir rol oynar ve özellikle reaksiyon hızlarını ve mikroyapısal gelişimi etkiler. Yüksek kürlenme sıcaklıkları, geopolimerizasyon reaksiyonlarını hızlandırarak daha hızlı sertleşmeyi sağlar ve genellikle daha yoğun ve uyumlu bir iç yapı oluşumu nedeniyle mekanik dayanımı artırır (Duxon vd., 2007). Optimal kürlenme sıcaklıkları, gözenekliliği azaltarak basınç dayanımı ve genel dayanıklılığı iyileştiren bir gözenek yapısı gelişimini destekler. Örneğin, Olivia ve Nikraz (2012), 60-80°C arasında bir kürlenme sıcaklığı aralığının, UK bazlı geopolimerlerde reaksiyon kinetiği ve mikroyapısal gelişim

açısından dengeli olduğunu ve boşluklar ile mikro çatlakları azalttığını bulmuşlardır. Bununla birlikte, çok yüksek kürleme sıcaklıkları bazı dezavantajlar doğurabilir. Aşırı sıcaklıklarda nem kaybı hızlanabilir ve bu da yüzeyde kuruma ve mikro çatlaklar oluşumuna yol açarak yapısal bütünlüğü tehlikeye atabilir (Temuujin vd., 2009). Ek olarak, sıcaklık arttıkça malzemenin yoğunluğu ve elastik modülü genellikle artarak dayanımı artırır, ancak bazen uzun vadeli performansı düşürebilecek bir kırılganlık artışına yol açabilir (Provis ve van Deventer, 2014). Bu nedenle, kürleme sıcaklığı geopolimer harcın mekanik özelliklerini en üst düzeye çıkarmada kritik bir faktördür ve ideal sıcaklık aralıkları en iyi sonuçları sağlamaktadır.

Taguchi yöntemi ile belirlenen 16 harç arasında, en düşük mekanik özelliklere sahip harç A4 (UPV: 18.86 km/s, 28 günlük Eğilme Dayanımı: 3,51 MPa, 28 günlük Basınç Dayanımı: 19,70 MPa), en yüksek mekanik özelliklere sahip harç ise A13 (UPV: 3.99 km/s, 28 günlük Eğilme Dayanımı: 8,37 MPa, 28 günlük Basınç Dayanımı: 41.32 MPa) olmuştur. A4 ve A13 harçlarındaki mekanik özellik farklılıkları, bu harçların bileşiminde kullanılan malzemelerin türü ve miktarından kaynaklanmaktadır. A4 harcında SD, A13 harcında ise BA kullanılmıştır, bu durum her iki harcın mekanik performansını doğrudan etkilemektedir. SD genellikle güçlendirici bir etkiye sahip olsa da uygun koşullar altında ve doğru oranlarda kullanılmadığında istenen sonuçları veremeyebilir. SD çok ince bir malzeme olup bağlayıcı matris içinde homojen olarak dağıtılması gerekmektedir. Dağılımda sorunlar yaşandığında veya matris ile güçlü bir bağ oluşturamadığında istenen dayanım sağlanamayabilir. Ayrıca, SD hidrasyon süreçlerini olumsuz etkileyerek mekanik dayanımı azaltabilir. Buna karşılık, A13 harcında kullanılan BA, geopolimer yapı içinde farklı bir etkileşim sağlayarak daha yüksek mekanik özellikler sunabilir. BA, alüminosilikat yapılarla etkileşime girerek daha güçlü bir bağ oluşturabilir, bu da harcın mikroyapısında daha az gözeneklilik ve mikro çatlak oluşumuna yol açarak dayanıklılığı artırabilir. Literatürde, bor bileşiklerinin mekanik dayanımı artırma ve yapısal bağlanmayı iyileştirme potansiyeline sahip olduğu belirtilmiştir (Çelik vd., 2018; Ali vd., 2020). Ayrıca, BA'nın geopolimerizasyon süreçlerine olumlu etkisi olduğu, daha dayanıklı bir yapı oluşumuna katkıda bulunduğu bilinmektedir. Bu bağlamda, A13 harcı, BA'nın geopolimer matris içindeki bağlanma ve güçlendirme etkisi sayesinde A4 harcına göre daha yüksek mekanik değerlere ulaşmıştır. BA'nın kimyasal özellikleri, harcın mekanik performansını artırmada önemli bir faktör olmuştur.

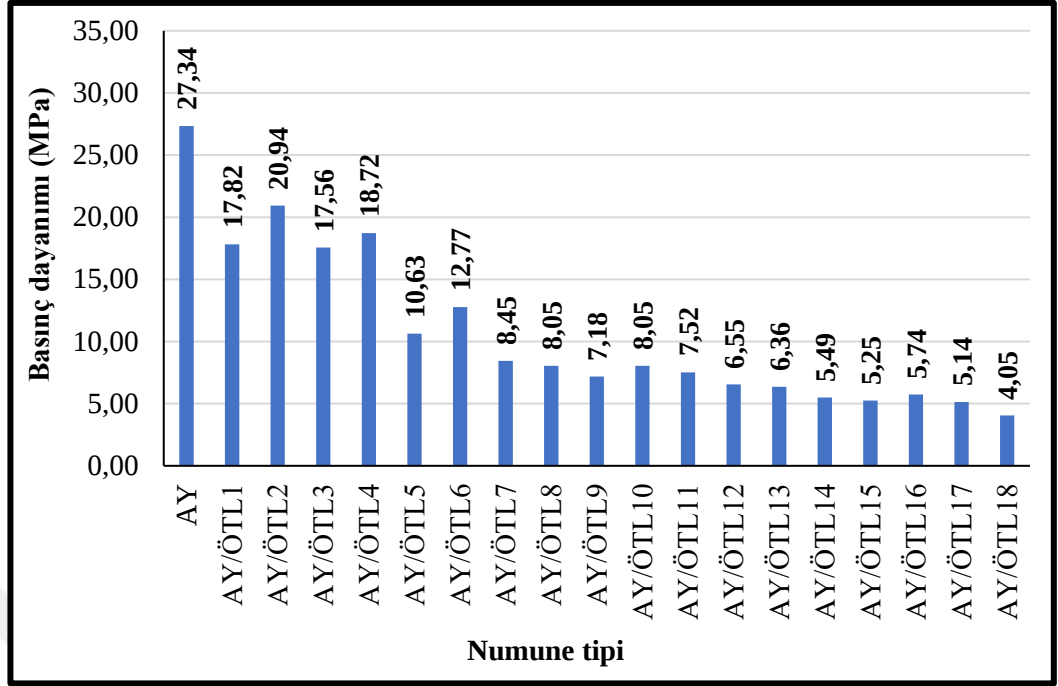
Şekil 6.23, A0/ÖTL harç numunelerinin basınç dayanımı değerlerini göstermektedir. Şekilde gözlemlendiği üzere, A0 harçlarının basınç dayanımları farklı ÖTL oranları ile test edilmiş ve her bir numunenin basınç dayanımında belirli farklılıklar meydana gelmiştir. Düşük ÖTL oranlarında dayanım daha yüksek bir eğilim sergilemiş, ancak %20 kullanımdan sonra dayanımlar azalmaya başlamıştır. Bu durum, ÖTL'nin fiziksel özellikleri ve matrisle olan etkileşimi nedeniyle belirli bir seviyeye kadar pozitif etki sağladığını, ancak oran arttıkça dayanım kaybına yol açabileceğini göstermektedir.



Şekil 6.23. ÖTL kullanılan A0 harçlarının basınç dayanımları

Şekil 6.24, AY/ÖTL harçlarının basınç dayanımlarını göstermektedir. AY harçlarında da A0 harçlarında olduğu gibi benzer bir eğilim gözlemlenmektedir. Bunun nedeni, yüksek ÖTL oranlarının matris içinde homojen bir dağılım sağlamakta zorlanması ve bağ yapısında meydana gelen zayıflamalar olabilir. ÖTL parçacıklarının düşük yoğunluğu ve matrise uyumsuzluğu bu azalmada etkili olabilmektedir.

A0/ÖTL harçlarında %20 ÖTL, AY/ÖTL harçlarında ise %10 ÖTL kullanımında PVA'nın yüzey işleme yöntemi olarak kullanılması basınç dayanımı değerlerini sırasıyla %25,6 ve %17,5 arttırmıştır. ÖTL katkısının geopolimer harçlarda %20'ye kadar kullanılmasının basınç dayanımının artırma eğiliminde olduğu ancak kullanılan harç tipine bağlı olarak değişiklikler gözlemlendiği anlaşılmaktadır. Yüzey işleme yapılmış ÖTL, matrisle daha iyi bütünleşerek basınç dayanımını artırmaktadır.



Şekil 6.24. ÖTL kullanılan AY harçlarının basınç dayanımları

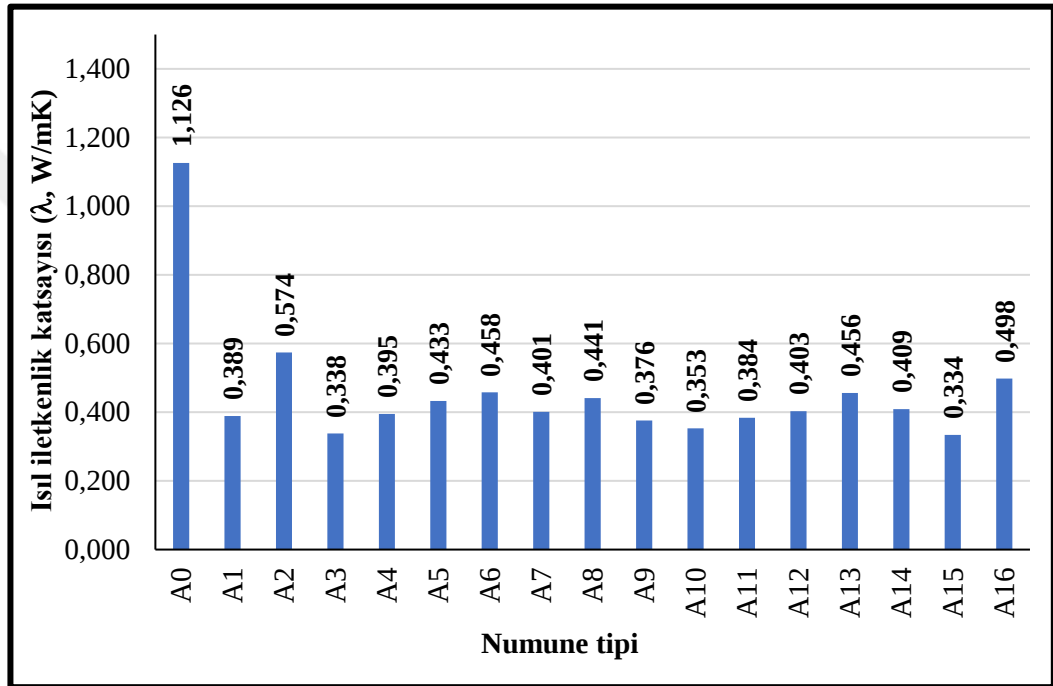
Sonuç olarak, her iki harç türünde de ÖTL kullanımı belirli oranlarda dayanımı artırıcı etki göstermiştir; ancak belirli bir seviyenin üzerine çıktığında mekanik dayanımda olumsuz sonuçlara yol açmıştır. Bu veriler, ÖTL'nin optimum bir oranda kullanılması gerektiğini vurgulamaktadır.

6.3. Isıl İletkenlik Deneyi

Şekil 6.25 harç karışımlarının ısı iletkenlik değerlerini göstermektedir. Geopolimer harçların ölçülen ısı iletkenlik değerleri 0,334 W/mK ile 0,574 W/mK arasında değişmiştir. A0 harcının ısı iletkenlik değerinin ise 1,126 W/mK olduğu görülmüştür. Üretilen karışımlarında en yüksek ısı iletkenlik A0 harcında, en düşük ısı iletkenlik ise A15 harcında gözlenmiştir. A15 harcının ısı iletkenliği, A0 harcından yaklaşık %70,34 oranında daha düşük olduğu belirlenmiştir.

SD içeriği arttıkça (%10'dan %15'e) ısı iletkenlikte önemli bir artış olduğu ortaya konulmuştur. Ek olarak, BA içeriği arttıkça (%5'ten %10'a), ısı iletkenlik değerleri belirgin şekilde azalmaktadır. En yüksek ısı iletkenlik %0 BA ile gözlemlenirken, en düşük değer %15 BA ile meydana gelmektedir. Bu sonuçlar, BA ve SD oranlarının geopolimerlerin termal özelliklerini doğrudan etkilediğini ve bu parametrelerin bu tür malzemelerin termal performansını optimize etmek için dikkatlice ayarlanması gerektiğini göstermektedir.

Kürleme sıcaklığı, geopolimer harcının ısı iletkenliğini etkileyen bir diğer faktördür. Daha yüksek kürleme sıcaklıkları, genellikle geopolimer matrisinin polimerizasyonunu ve yoğunlaşmasını artırır ve daha yüksek yoğunluk ve iyileştirilmiş yapı nedeniyle artan ısı iletkenlikle sonuçlanmaktadır. Tersine, daha düşük kürleme sıcaklıkları, eksik polimerizasyona ve daha gözenekli bir yapıya yol açabilir ve bu da termal iletkenliği azaltabilmektedir. Bu nedenle kürleme sıcaklığı, yoğunluklarını ve yapısal bütünlüklerini etkileyerek geopolimer malzemelerin termal performansını belirlemede önemli bir rol oynar.

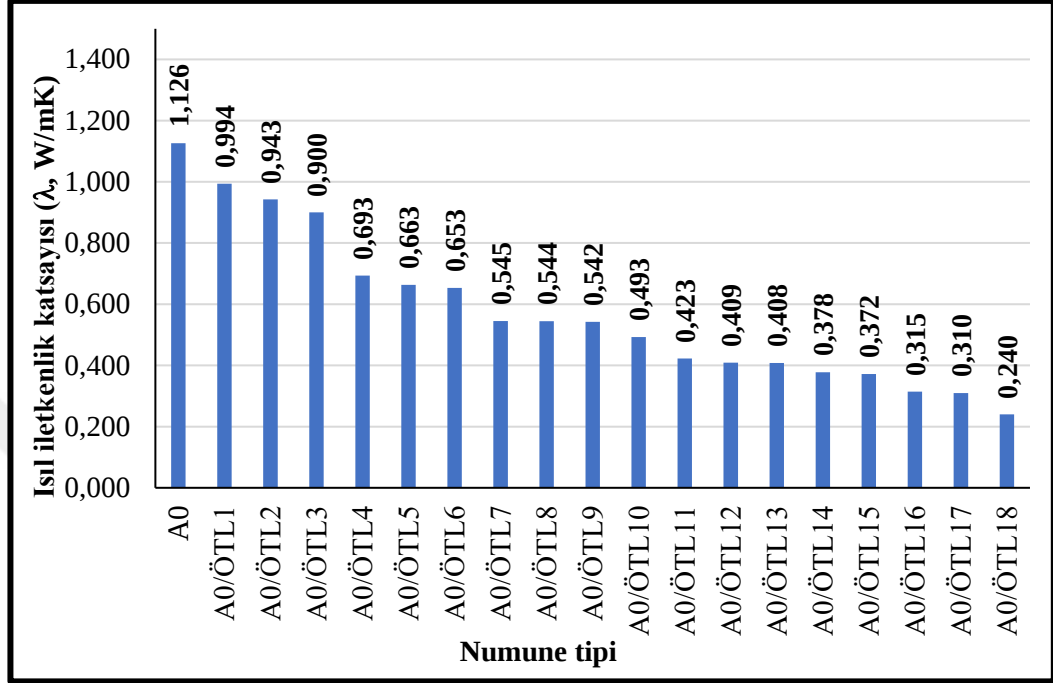


Şekil 6.25. Tasarlanan geopolimer harçların ısı iletkenlik değerleri

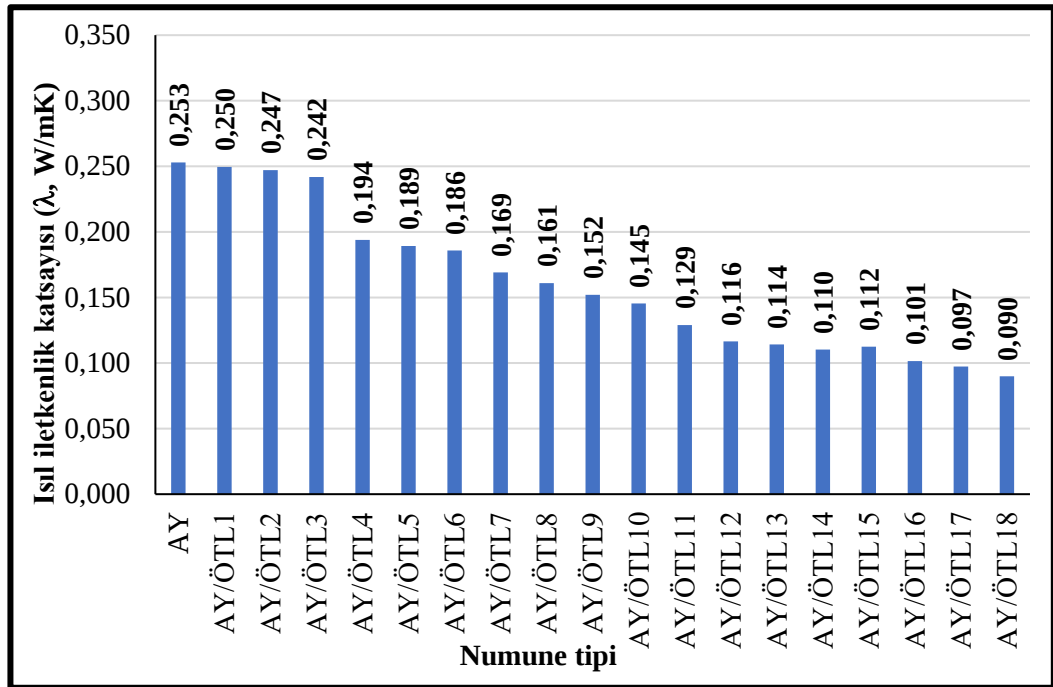
Geopolimer harçtaki Na içeriği, ısı iletkenliğini önemli ölçüde etkiler. Daha yüksek Na seviyeleri genellikle artan amorf içeriğe ve artan yoğunluğa yol açarak termal iletkenliği artırabilmektedir. Na, geopolimer matrisinin yapısını ve özelliklerini değiştiren bir akı görevi görür. Yüksek Na konsantrasyonları genellikle ısı iletkenliği iyileştirirken, dayanım ve kararlılığı tehlikeye atabilmektedir. Bu nedenle, geopolimer malzemelerdeki termal ve mekanik özellikleri dengelemek için Na içeriğini optimize etmek çok önemlidir.

Şekil 6.26, A0/ÖTL harç numunelerinin ısı iletkenlik katsayılarını göstermektedir. Şekilde farklı ÖTL oranları ile test edilen numunelerin ısı iletkenlik değerlerinin belirgin bir eğilim sergilediği gözlemlenmektedir. Özellikle düşük ÖTL oranlarında ısı iletkenlik yüksek kalmakta, ancak ÖTL oranı arttıkça ısı iletkenlik değerlerinde düşüş

yaşanmaktadır. Bu durum, ÖTL'nin matris içerisindeki dağılımı ve düşük yoğunluğunun, ısı iletkenliğin azalmasına neden olduğu şeklinde yorumlanabilir. ÖTL içeriğinin artması ile yapıdaki gözeneklilik de artmakta, bu da ısı iletkenlikte düşüşe yol açmaktadır.



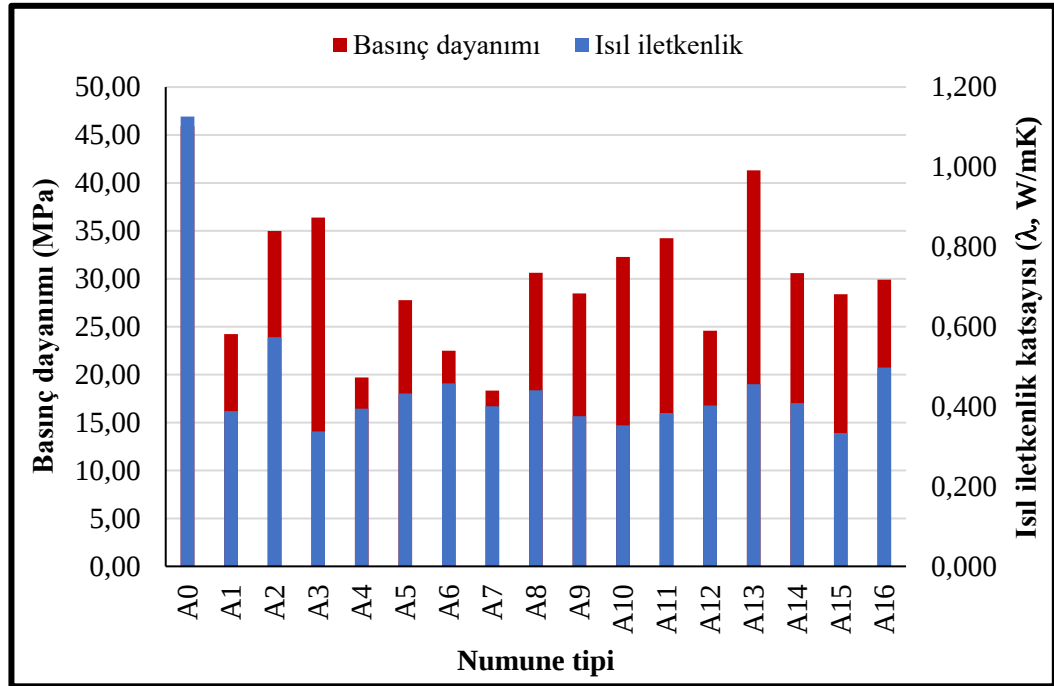
Şekil 6.26. ÖTL kullanılan A0 harçlarının ısı iletkenlik değeri



Şekil 6.27. ÖTL kullanılan AY harçlarının ısı iletkenlik değeri

Şekil 6.27 AY/ÖTL harç numunelerinin ısı iletkenlik değ erlerini sunmaktadır ve benzer bir eğ ilim g östermektedir. ÖTL oranı d üş ükken ısı iletkenlik değ erleri daha y üksek olurken, ÖTL oranı art tı kça ısı iletkenlik değ erlerinde azalma g özlemlenmektedir. Bu durum, ÖTL'nin d üş ük yoğ unluklu yapısının ısı iletimini sınırlandırıcı bir özellik ta ş ı d ı ğ ı ve harç matrisinde g özenekli bir yapı olu ş turduğ u şeklinde a ç ıklanabilir. Isı iletkenlikteki bu d üş üş , ısı yalıtımı gereksinimlerinin ön planda olduğ u yapılar için ÖTL katkı lı AY harç larının uygun bir se ç enek olabileceğ ini g östermektedir. Sonuç olarak, her iki harç t üründe de ÖTL oranının artışı, ısı iletkenlikte bir d üş üş e neden olmu ş tur. Bu durum, ÖTL'nin harç i ç erisinde homojen da ğ ılım sa ğ lama kapasitesi ile ili ş kilendirilmi ş tir.

Bunlara ek olarak, Ş ekil 6.28'te tasarlanan geopolimer harç karışı mlarının basınç dayanımı ve ısı iletkenliğ i analiz edilmi ş tir. Sonuç lar, kullanılan BA ve SD miktarlarındaki de ğ iş ikliklerin bu özellikleri önemli ölç üde etkilediğ ini g östermektedir. Optimum basınç dayanımı, BA ve SD'nin belirli kombinasyonlarıyla elde edilir. Daha y üksek Na konsantrasyonları ve k ürleme sıcaklı kları genellikle artan dayanıma yol a ç maktadır. Isı iletkenlik a ç ısından, BA i ç eriğ indeki bir artışı, ısı iletkenliğ in azalmasına ve harcın yalıtım özelliklerinin artmasına neden olmaktadır. Tersine, SD i ç eriğ indeki de ğ iş iklikler ısı iletkenlik ü zerinde minimum etki g östermektedir.



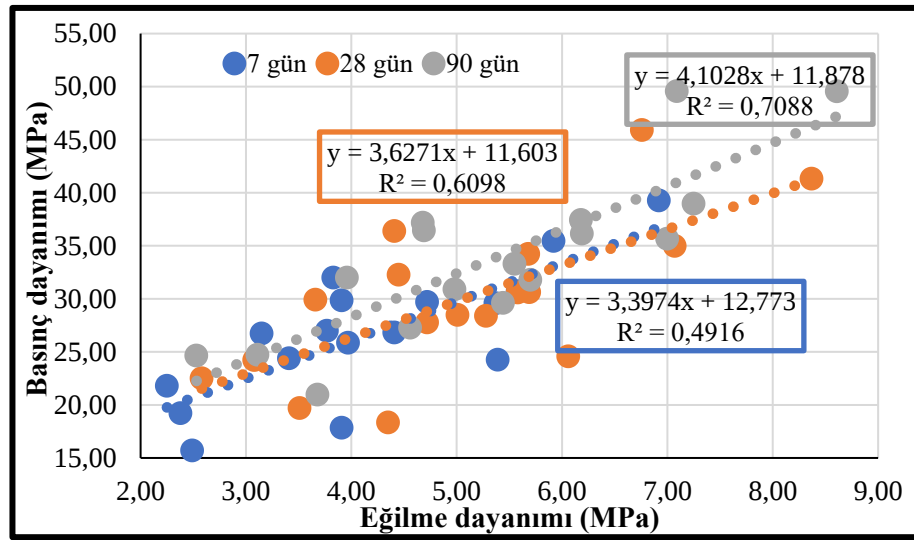
Ş ekil 6.28. Geopolimer harç ların basınç dayanımı ve ısı iletkenliğ i

6.4. Harçların Özellikleri Arasındaki İlişkiler

Deneysel çalışmadan elde edilen geopolimer harçlar ve ÖTL kullanılan harçların fiziksel, mekanik ve termal özellikleri arasındaki ilişkiler aşağıdaki başlıklar altında detaylı bir şekilde incelenmiştir. Genel olarak, özellikler arasında doğrusal bir tahmin denklemi önerilmesine rağmen deneysel sonuçların kesin bir doğrusal ilişkiye sahip olmadığı gözlemlenmiştir. Bu ilişkilerin, kullanılan bağlayıcı malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri, alkali aktivatör tipi, kürleme rejimi gibi birçok faktörden güçlü bir şekilde etkilendiği belirlenmiştir.

6.4.1. Eğilme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki

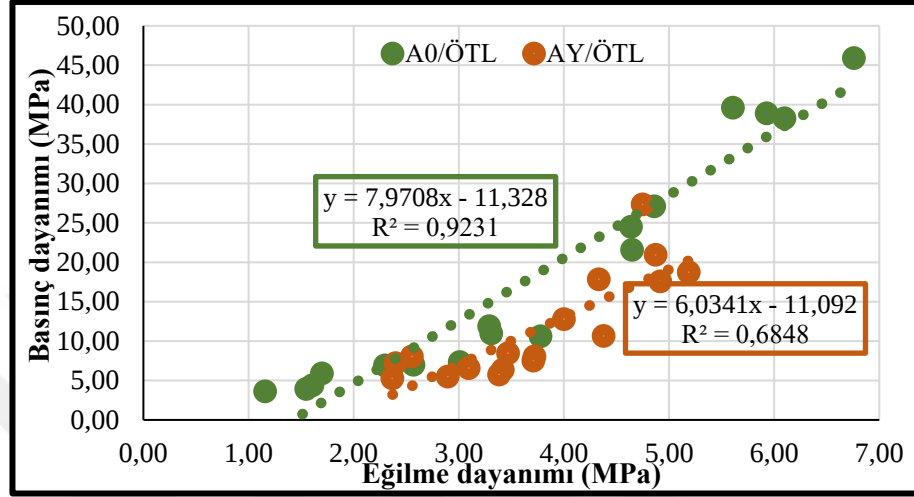
Geopolimer harçların eğilme ile basınç dayanımları arasındaki doğrusal ilişki Şekil 6.29’da gösterilmektedir. Şekilde üç farklı kürleme süresine (7, 28, ve 90 gün) ait regresyon eğrileri bulunmaktadır. Bu eğriler üzerinden yapılan analizler, eğilme dayanımı ile basınç dayanımı arasında doğrudan bir korelasyon olduğunu, ancak bu korelasyonun düşük bir regresyon katsayısına sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu ilişki düşüklüğü, geopolimer reaksiyonunda etkili olan Na oranının ve kür sıcaklığının dayanım sonuçları üzerindeki farklı etkilerinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, harç numuneleri kürleme süresi ile dayanım kazandıkça regresyon katsayısı artma eğilimindedir.



Şekil 6.29. Geopolimer harçların eğilme ve basınç dayanımları arasındaki ilişki

Şekil 6.30, farklı içeriklere sahip olan A0/ÖTL ve AY/ÖTL harçlarının eğilme ve basınç dayanımları arasındaki ilişkiyi incelemektedir. Bu eğriler üzerinden yapılan analizler, eğilme dayanımı ile basınç dayanımı arasında doğrudan bir korelasyon olduğunu, ancak bu korelasyonun AY/ÖTL harçlarında düşük bir regresyon katsayısına

sahip olduğunu ortaya koymaktadır. A0/ÖTL harçlarında regresyon katsayısının yüksek olmasının matrisine daha iyi entegre olan yüzey işlemlili ÖTL parçacıkları sayesinde olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 6.30'daki regresyon katsayıları, yüzey işlemlili ÖTL'nin A0/ÖTL harç içindeki daha homojen dağılımı sayesinde daha yüksek değerlere ulaşmış ve AY/ÖTL harçlarına kıyasla daha sağlam bir ilişki oluşturmuştur.



Şekil 6.30. A0/ÖTL ile AY/ÖTL harçlarının eğilme ve basınç dayanımları arasındaki ilişki

6.4.2. Basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı arasındaki ilişki

Şekil 6.31, ultrases geçiş hızı ile basınç dayanımı arasında güçlü bir doğrusal ilişki olduğunu göstermektedir. 7, 28 ve 90 günlük kürleme sürelerinde yapılan testlerde, özellikle 90 günlük kürlemede bu ilişkinin en yüksek regresyon katsayısına ($R^2 = 0,9822$) ulaşıldığı gözlemlenmiştir.

Şekil 6.32'de, farklı içeriklere sahip A0/ÖTL ve AY/ÖTL harçlarının ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı arasındaki ilişkisi incelenmiştir. 28 günlük kürleme süresi sonucunda yapılan testlerde, doğrusal ilişkinin yüksek regresyon katsayılarına ulaşıldığı belirlenmiştir.

6.4.3. Basınç dayanımı ile birim hacim ağırlık arasındaki ilişki

Şekil 6.33, geopolimer harçların basınç dayanımı ile sertleşmiş BHA arasındaki düşük korelasyon ilişkisini göstermektedir. Bu durum geopolimer reaksiyonunda etkili olan kürleme parametresinin basınç dayanımı ve BHA sonuçları üzerinde farklı oranlarda etkili olmasından kaynaklanmaktadır.

Şekil 6.34'te A0/ÖTL ve AY/ÖTL harçlarının BHA ve basınç dayanımları arasındaki ilişki incelenmiştir. Bu ilişki, yüzey işlemlili ÖTL'nin harç matrisine daha iyi

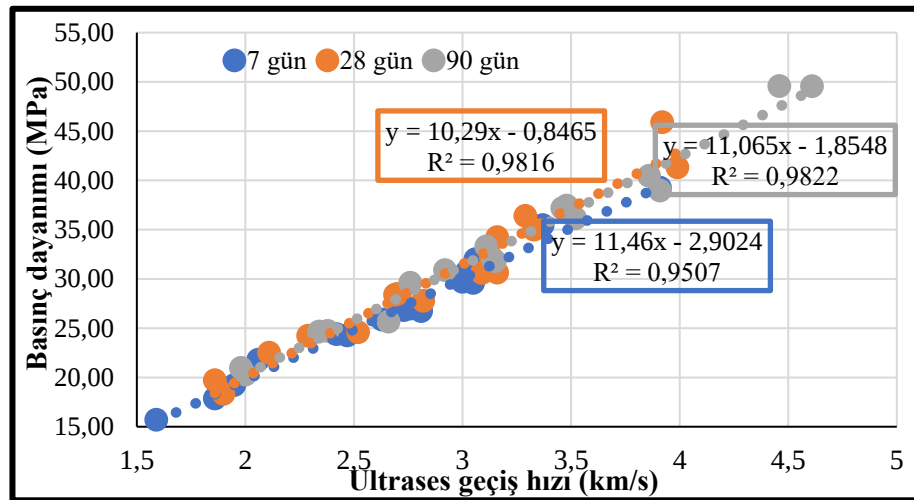
bağlanarak BHA'nın ve basınç dayanımının azalmasına katkıda bulunduğunu göstermektedir.

6.4.4. Isıl iletkenlik ile birim hacim ağırlık arasındaki ilişki

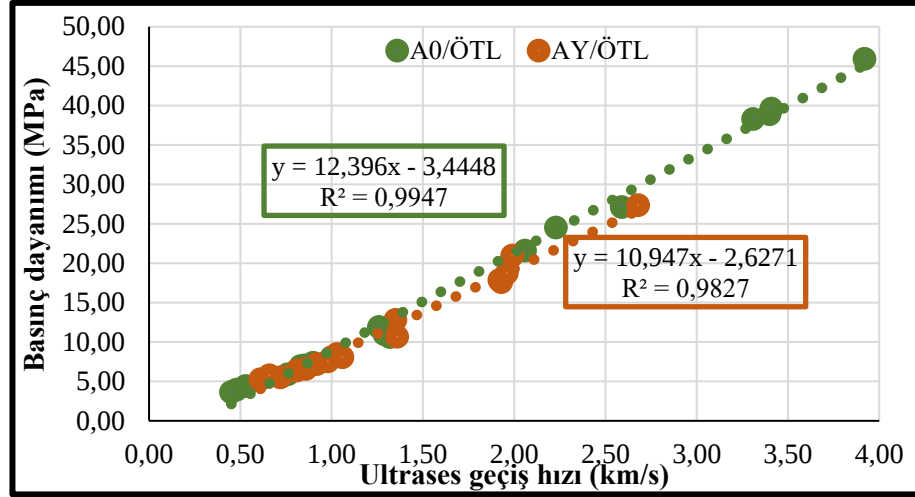
Şekil 6.35, geopolimer harçlarda birim hacim ağırlık ile ısı iletkenlik arasındaki düşük korelasyon ilişkisini göstermektedir. Bu durum geopolimer reaksiyonunda etkili olan kürlenme ve bağlayıcı malzeme parametrelerinin ısı iletkenlik ve BHA sonuçları üzerinde farklı oranlarda etkili olmasından kaynaklanmaktadır.

Şekil 6.36, A0/ÖTL ve AY/ÖTL harç türlerinin BHA ve ısı iletkenlik değerleri arasındaki ilişkileri incelenmiştir. BHA arttıkça ısı iletkenlik katsayısı da artma eğilimindedir, bu da malzeme yoğunluğunun ısı iletkenlik üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır.

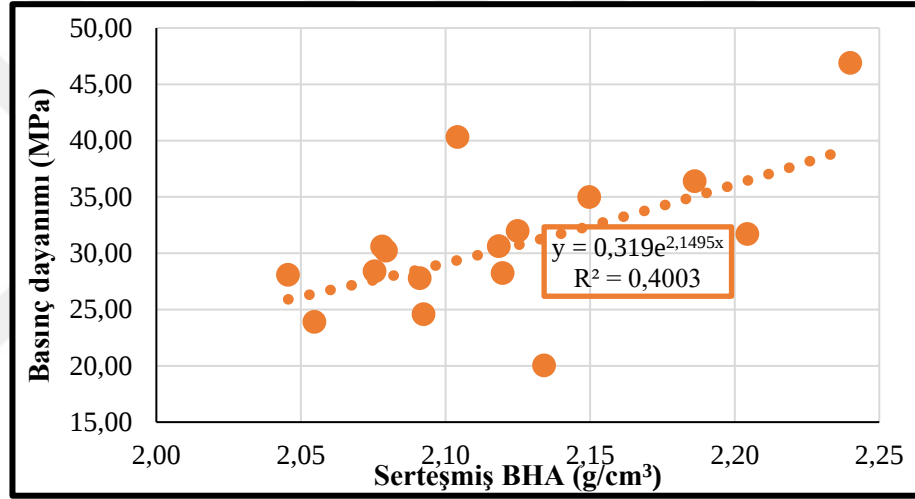
1,0 ile 2,4 g/cm³ arasındaki BHA değerlerinde, ısı iletkenlik katsayısının artış oranı, BHA'nın belirli bir eşik değerini aşmasıyla (yaklaşık 1,8 g/cm³) hızlanmaktadır. Bu durum, yoğunluğun artmasının matrisin daha homojen hale gelmesine ve ısıyı daha hızlı iletmesine yol açtığını göstermektedir. Ayrıca, yüzey işlemlili ÖTL içeren AY harçlarının, yapısal olarak daha gözenekli bir matris oluşturarak daha düşük bir yoğunluk sağladığı ve bu nedenle ısı iletkenliğinin düştüğü görülmektedir. AY/ÖTL harçları, özellikle düşük yoğunluk ve düşük ısı iletkenlik gerektiren yalıtım uygulamalarında avantaj sağlayabilir. A0/ÖTL harçları ise AY/ÖTL harçlarına göre daha yoğun yapıları yüzünden ısı iletkenlik katsayısında yüksek değerlere ulaşmaktadır, bu da yoğunluğun ısı iletkenliği doğrudan etkilediğini doğrulamaktadır.



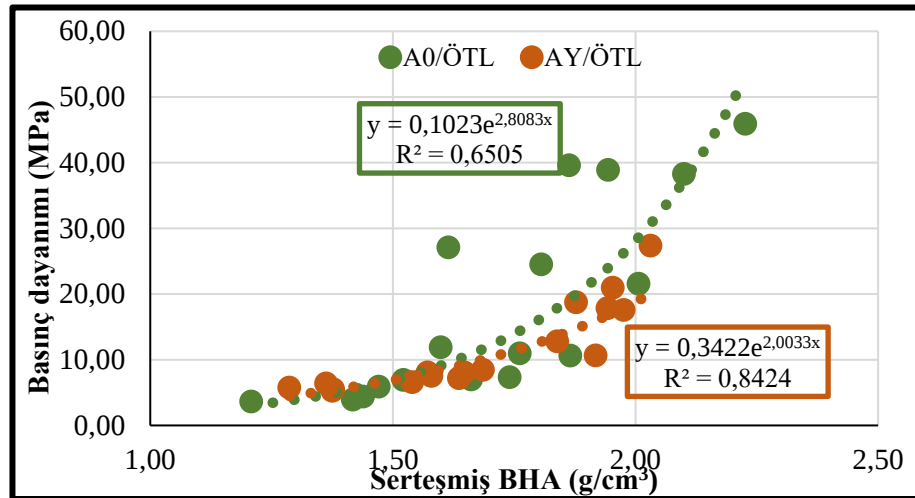
Şekil 6.31. Geopolimer harçların ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımları arasındaki ilişki



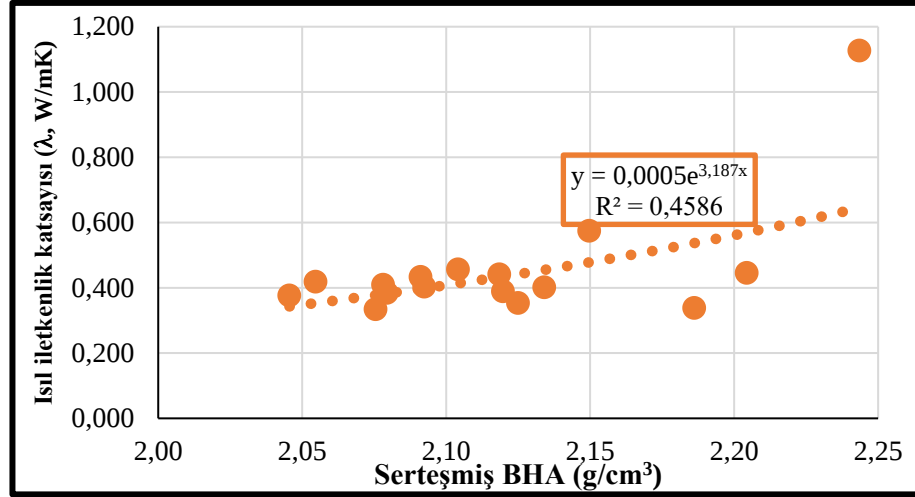
Şekil 6.32. A0/ÖTL ile AY/ÖTL harçlarının ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımları arasındaki ilişki



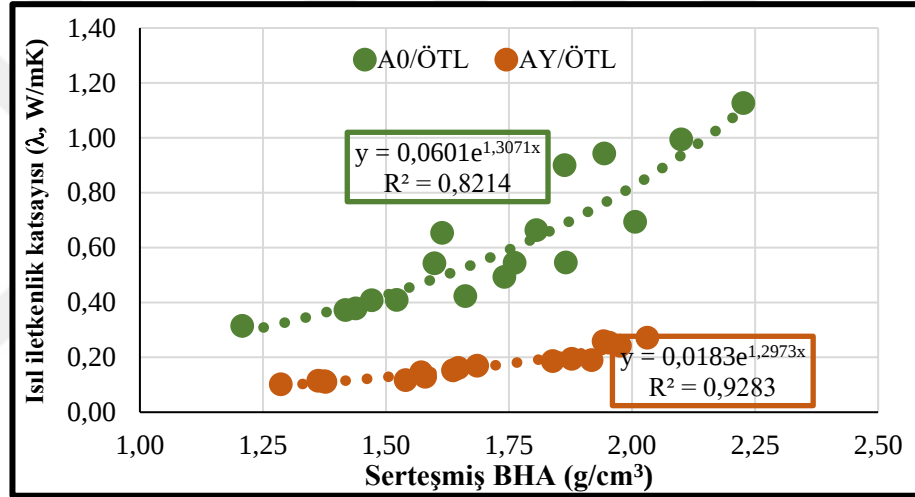
Şekil 6.33. Geopolimer harçların basınç dayanımları ve BHA'ları arasındaki ilişki



Şekil 6.34. A0/ÖTL ile AY/ÖTL harçlarının basınç dayanımları ve BHA'ları arasındaki ilişki



Şekil 6.35. Geopolimer harçların ısı iletkenlik ve BHA'ları arasındaki ilişki



Şekil 6.36. A0/ÖTL ile AY/ÖTL harçlarının ısı iletkenlik ve BHA'ları arasındaki ilişki

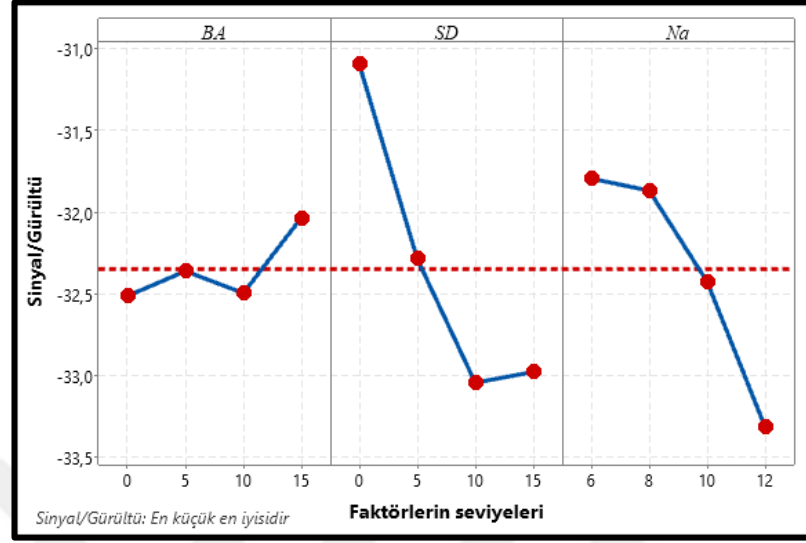
6.5. Taguchi Optimizasyonu

Taguchi yöntemi kullanılarak üretilen 16 karışım grubunun geopolimer harç özellikleri üzerindeki etkisini incelenmiştir. Sonrasında, genel performans değerlendirilerek elde edilen optimum harç karışımlarının doğrulama deneyleri yapılmıştır.

6.5.1. Taze harç sıcaklığı

Çalışmada belirlenen taze harç sıcaklığı sonuçları Taguchi metodu ile “En küçük en iyisidir” prensibine göre analiz edilmiştir. Belirlenen optimum parametreler Şekil 6.37’de verilmiştir. Ayrıca, kür sıcaklığının ve süresinin taze harç sıcaklığına bir etkisi olmadığı için Taguchi hesaplamasında dahil edilmemiştir. Buna göre, optimum parametreler BA=15, SD=0 ve Na=6 olarak bulunmuştur. Faktörlerin etkisi

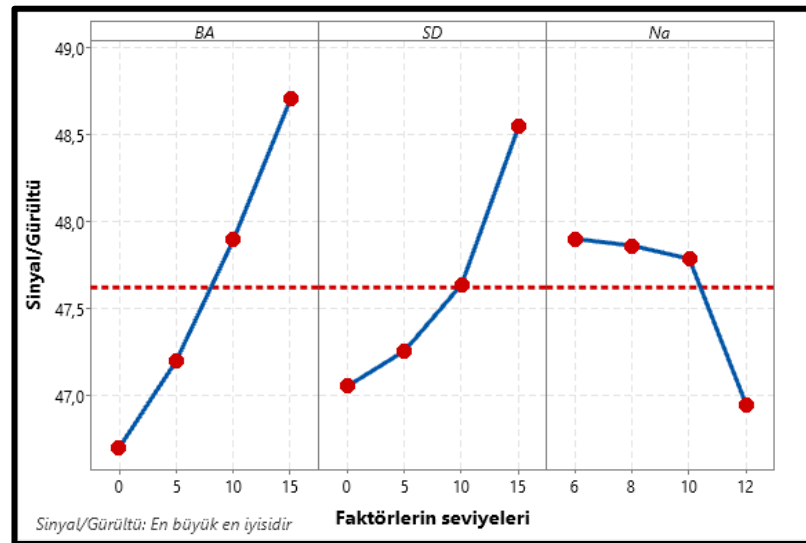
incelendiğinde, BA oranının artmasıyla taze harç sıcaklığını azalttığı görülürken, SD ve Na oranının artmasıyla arttırdığı görülmüştür.



Şekil 6.37. Taze harç sıcaklığı sinyal/gürültü grafiği

6.5.2. Priz süresi

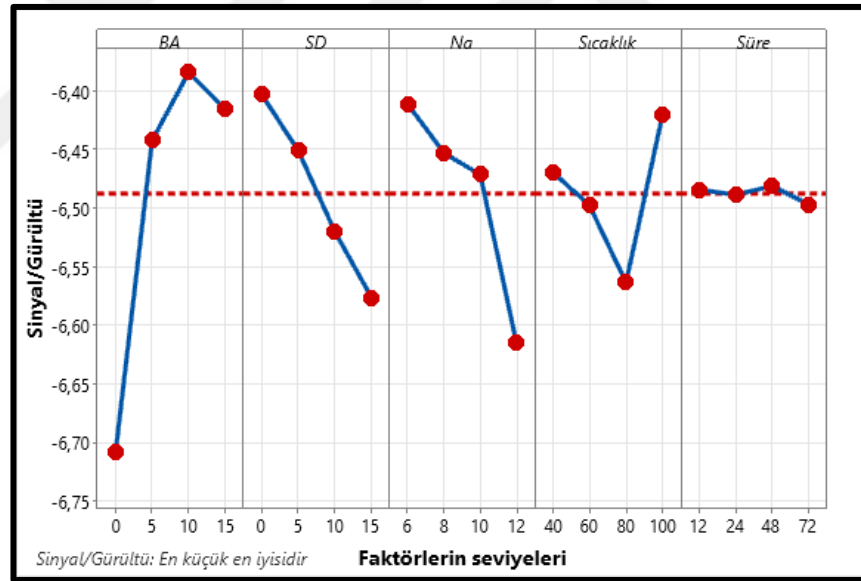
Çalışmada belirlenen başlangıç priz süresi sonuçları Taguchi metodu ile “En büyük en iyisidir” prensibine göre analiz edilmiştir. Belirlenen optimum parametreler Şekil 6.37’de verilmiştir. Ayrıca, kür sıcaklığının ve süresinin priz süresine bir etkisi olmadığı için Taguchi hesaplamasında dahil edilmemiştir. Buna göre, optimum parametreler BA=15, SD=15 ve Na=6 olarak bulunmuştur. Faktörlerin etkisi incelendiğinde, BA ve SD oranının artmasıyla priz süresinin uzadığı görülürken, Na oranının artmasıyla kısaldığı görülmüştür.



Şekil 6.38. Başlangıç priz süresinin sinyal/gürültü grafiği

6.5.3. Birim hacim ağırlık

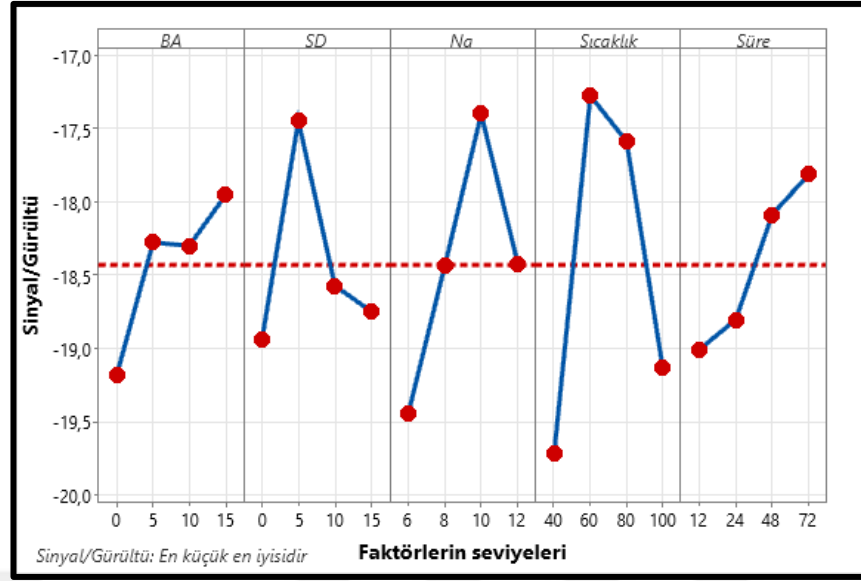
Çalışmada belirlenen BHA sonuçları Taguchi metodu ile “En küçük en iyisidir” prensibine göre analiz edilmiştir. Belirlenen optimum parametreler Şekil 6.39’da verilmiştir. Buna göre, optimum parametreler BA=10, SD=0, Na=6, Sıcaklık=100 ve Süre=48 olarak bulunmuştur. Buna göre, karışımlarda SD ve Na oranının artması sürekli olarak BHA’yı arttırırken, diğer faktörler sürekli bir etki göstermemiştir. BA oranının artması genel olarak BHA’yı azaltmıştır. Kırılma sıcaklığının 40⁰C’den 60⁰C’ye gelmesi kısmı bir yükseliş gösterdi, ancak 80⁰C’ye gelindiğinde yükselme miktarının arttığı görülmüştür. Literatürde geopolimer beton üzerine yapılan çalışmada en yüksek BHA sonuçlarının 70⁰C kırılma sıcaklığında bulunduğu belirlenmiştir (Şinik, 2019). Ayrıca, geopolimer jelin bir kısmının yüksek kırılma sıcaklık (100⁰C) etkisiyle eridiği söylenebilmektedir. Buradan, kırılma sıcaklığının optimum bir değere sahip olduğu düşük ve yüksek kırılma sıcaklıklarının geopolimer harcın BHA’sı üzerinde azaltıcı bir etkiye sahip olduğu sonucuna varılabilmektedir.



Şekil 6.39. BHA'nın sinyal/gürültü grafiği

6.5.4. Su emme oranı

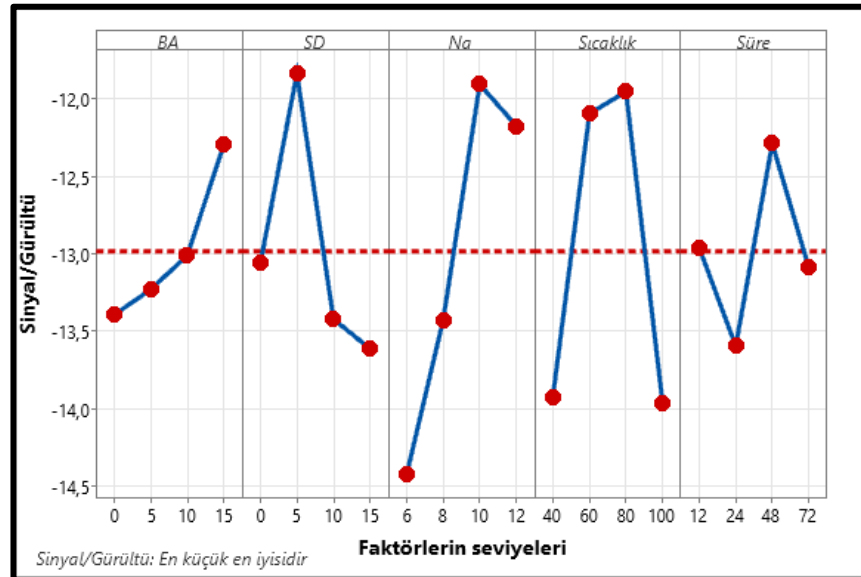
Çalışmada belirlenen su emme oranları Taguchi metodu ile “En küçük en iyisidir” prensibine göre analiz edilmiştir. Belirlenen optimum parametreler Şekil 6.40’ta verilmiştir. Buna göre, optimum parametreler BA=15, SD=5, Na=10, Sıcaklık=60 ve Süre=72 olarak bulunmuştur. Buna göre, faktörlerin etkisi incelendiğinde BA oranının ve kırılma süresinin artması, SD ve Na oranı ile kırılma sıcaklığının belirli bir seviyeye kadar artması ile su emme oranını azaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 6.40. Su emme oranının sinyal/gürültü grafiği

6.5.5. Kılcal su emme derinliği

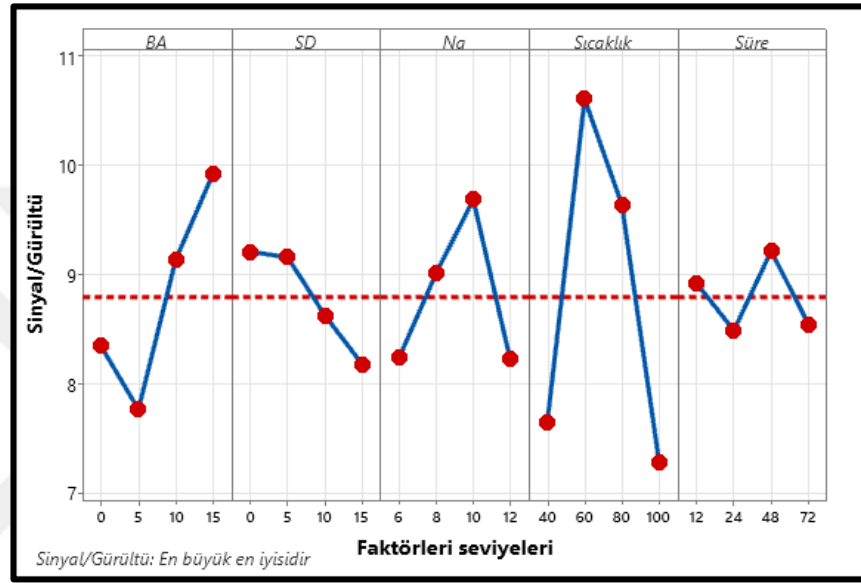
Çalışmada belirlenen kümülatif su emme derinliği Taguchi metodu ile “En küçük en iyisidir” prensibine göre analiz edilmiştir. Belirlenen optimum parametreler Şekil 6.41’de verilmiştir. Buna göre, optimum parametreler BA=15, SD=5, Na=10, Sıcaklık=80 ve Süre=48 olarak bulunmuştur. Faktörlerin etkisi incelendiğinde, BA oranının artmasıyla kılcal su emme derinliğinin azaldığı görülürken, SD oranının artmasıyla arttığı görülmüştür.



Şekil 6.41. Kılcal su emme derinliğinin sinyal/gürültü grafiği

6.5.6. Ultrases geçiş hızı

Çalışmada belirlenen 28 günlük ultrases geçiş hızı değerleri Taguchi metodu ile “En büyük en iyisidir” prensibine göre analiz edilmiştir. Belirlenen optimum parametreler şekil 6.42’de verilmiştir. Buna göre, optimum parametreler BA=15, SD=0, Na=6, Sıcaklık=60 ve Sre=12 olarak bulunmuştur. Faktörlerin etkisi incelendiğinde, BA ve Na oranının artmasıyla ultrases geçiş hızının arttığı görülürken, SD oranının artmasıyla azaldığı grlmştir.



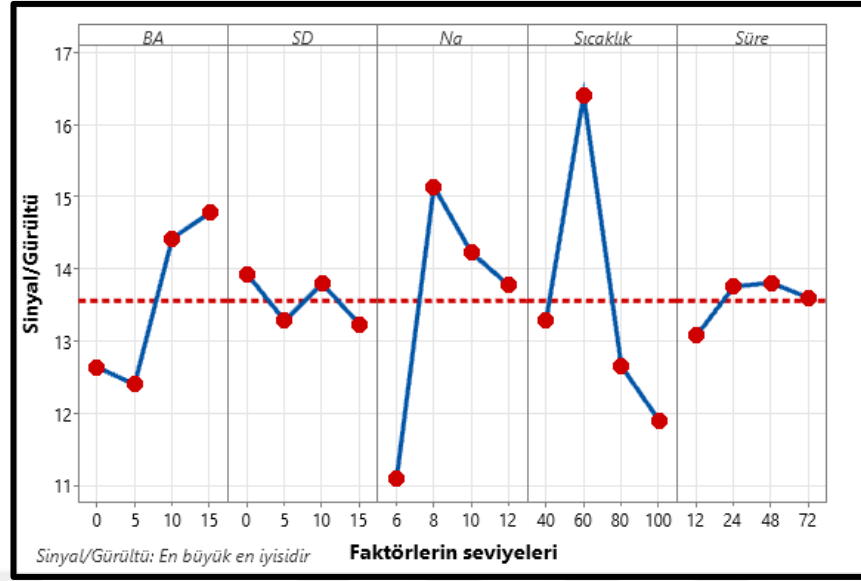
şekil 6.42. Ultrases geçiş hızı sinyal/gürültü grafiği

6.5.7. Eğilme dayanımı

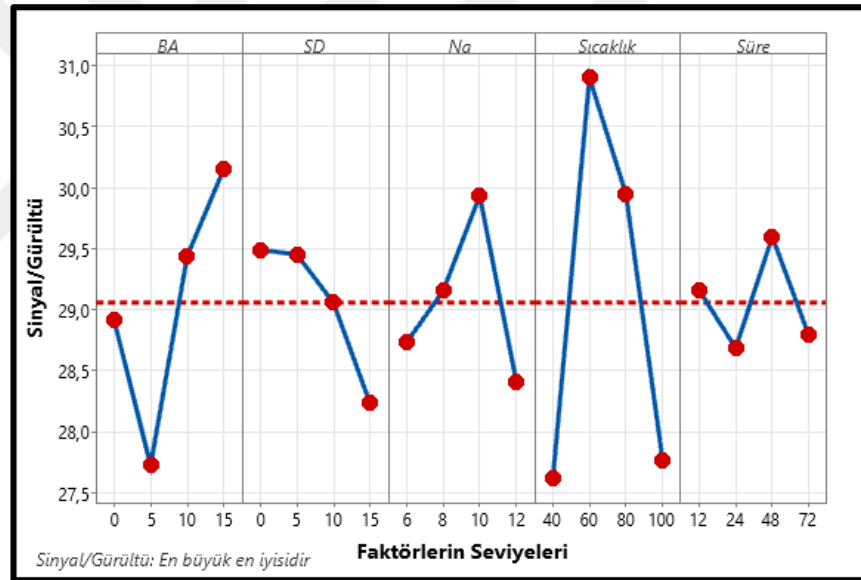
Çalışmada belirlenen 28 günlük eğilme dayanım değerleri Taguchi metodu ile “En büyük en iyisidir” prensibine göre analiz edilmiştir. Belirlenen optimum parametreler şekil 6.43’te verilmiştir. Buna göre, optimum parametreler BA=15, SD=0, Na=8, Sıcaklık=60 ve Sre=48 olarak bulunmuştur. Faktörlerin etkisi incelendiğinde, BA oranının artmasıyla eğilme dayanımının arttığı görülürken, Na oranının ve kürleme sıcaklığının belli bir seviyeden sonra artmasıyla azaldığı grlmştir.

6.5.8. Basınç dayanımı

Çalışmada belirlenen 28 günlük basınç dayanım değerleri Taguchi metodu ile “En büyük en iyisidir” prensibine göre analiz edilmiştir. Belirlenen optimum parametreler şekil 6.44’te verilmiştir. Buna göre, optimum parametreler BA=15, SD=0, Na=10, Sıcaklık=60 ve Sre=48 olarak bulunmuştur. Faktörlerin etkisi incelendiğinde, BA ve Na oranının artmasıyla basınç dayanımının arttığı görülürken, SD oranının artmasıyla ve kürleme sıcaklığının belirli bir orandan sonra artmasıyla azaldığı grlmştir.



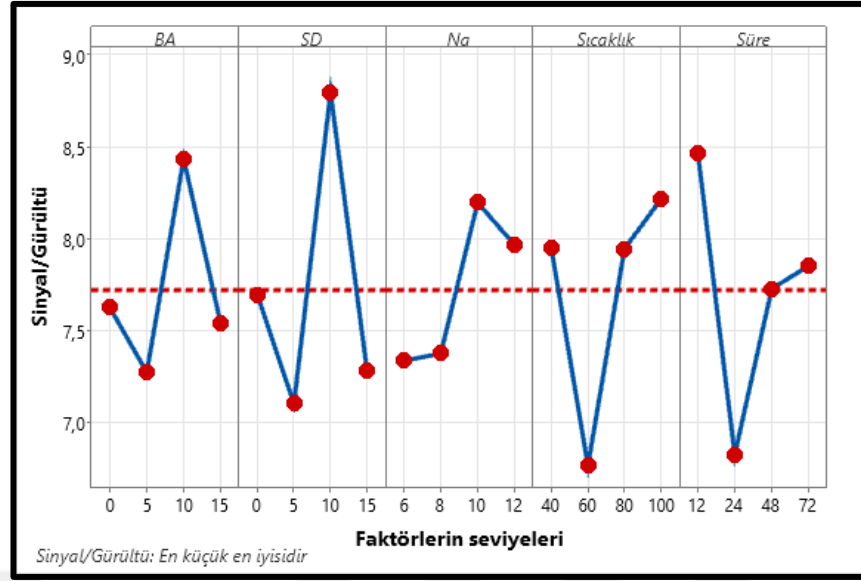
Şekil 6.43. Eğilme dayanımı sinyal/gürültü grafiği



Şekil 6.44. Basınç dayanımı sinyal/gürültü grafiği

6.5.9. Isıl iletkenlik

Çalışmada belirlenen ısı iletkenlik katsayıları Taguchi metodu ile “En küçük en iyisidir” prensibine göre analiz edilmiştir. Belirlenen optimum parametreler Şekil 6.44’te verilmiştir. Buna göre, optimum parametreler BA=10, SD=10, Na=10, Sıcaklık=100 ve Süre=12 olarak bulunmuştur. Faktörlerin etkisi incelendiğinde, Na oranının artmasıyla ısı iletkenlik katsayısının azaldığı görülürken, kürlleme sıcaklığı ve süresinin belli bir orandan sonra artmasıyla azaldığı görülmüştür.



Şekil 6.45. Isıl iletkenlik katsayısının sinyal/gürültü grafiği

6.6. İstatiksel Analiz

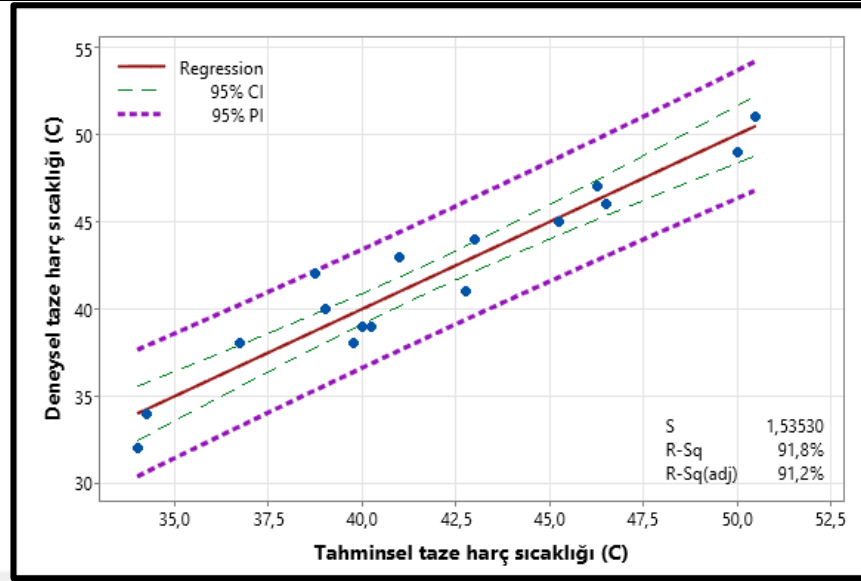
Tablo 6.2’de gösterilen taze harç sıcaklığının ANOVA analiz sonuçlarına göre, taze sıcaklığı etkileyen en önemli faktörler SD ve Na’dır. SD ve Na’nın etkileri sırasıyla %52,48 ve %34,99 olarak belirlenmiştir. Bu iki faktörün F-değerleri ve p-değerleri, sıcaklık üzerindeki etkilerinin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir (SD: $F=12,82$, $p=0,005$; Na: $F=8,55$, $p=0,014$). SD’nin daha yüksek etkisi, geopolimer harçların sıcaklığını kontrol etmede önemli bir bileşen olduğunu göstermektedir. Bu, geopolimer uygulamalarında optimum performans için hammadde seçiminin, karıştırma koşullarının ve kürlleme ortamlarının dikkatli bir şekilde kontrol edilmesinin gerekli olduğu anlamına gelmektedir.

Tablo 6.2. Taze harç sıcaklığı ANOVA analiz sonucu

Faktörler	SD	SS	MS	EO	F-değeri	P-değeri
BA	3	17,50	5,83	%4,34	1,06	0,433
SD	3	211,50	70,50	%52,48	12,82	0,005
Na	3	141,00	47,00	%34,99	8,55	0,014
Hata	6	33,00	5,50	%8,19		
Toplam	15	403,00		%100		

SD: Serbestlik Derecesi, SS: Kareler Toplamı, MS: Kareler Ortalaması, EO: Etki Oranı

Şekil 6.46’da geopolimer harçların taze harç sıcaklıkları için deneysel ve tahminsel sonuçların karşılaştırılması verilmiştir. Analiz sonucunda modelin doğruluğu $R^2=\%91,81$ ile belirlenmiştir.



Şekil 6.46. Taze harç sıcaklığı için deneysel ve tahminsel sonuçların karşılaştırılması

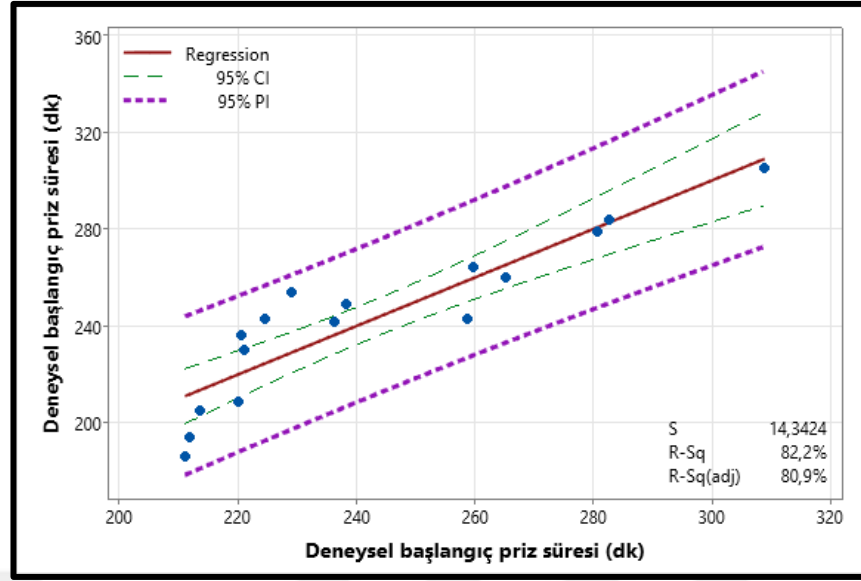
Tablo 6.3'te geopolimer harçların başlangıç priz süresi sonuçlarına ait ANOVA analizi sonuçları verilmiştir. Varyans analizi sonuçlarına göre faktörlerin etki sırası, SD, Na ve BA olarak bulunmuştur. Bununla birlikte, sadece BA faktörünün P değerinin 0,05'ten küçük olduğu, diğer faktörlerin P değerlerinin ise 0,05 değerinden daha büyük olduğu belirlenmiştir. BA'nın P değerinin de 0,05'e çok yakın olmasından kaynaklı ise H0 hipotezi kabul edilmiştir. Başlangıç priz süresi üzerinde; BA, SD ve Na oranlarının istatistiksel olarak anlamlı bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Bu gözlem ile parametrelerin başlangıç priz süresine olan etkilerinin daha net görülebilmesi için parametre değişimlerinin daha büyük oranlarda yapılması gerektiği söylenebilir.

Tablo 6.3. Başlangıç priz süresi ANOVA analiz sonucu

Faktörler	SD	SS	MS	EO	F-değeri	P-değeri
BA	3	7092	2364,1	%4,34	4,93	0,047
SD	3	4191	1397,1	%52,48	2,91	0,123
Na	3	2012	670,7	%34,99	1,40	0,332
Hata	6	2880	480,0	%8,19		
Toplam	15	16175		%100		

SD: Serbestlik Derecesi, SS: Kareler Toplamı, MS: Kareler Ortalaması, EO: Etki Oranı

Şekil 6.47'de geopolimer harçların başlangıç priz süreleri için deneysel ve tahminsel sonuçların karşılaştırılması verilmiştir. Analiz sonucunda modelin doğruluğu $R^2 = \%82,20$ ile belirlenmiştir.



Şekil 6.47. Başlangıç priz süresi için deneysel ve tahminsel sonuçların karşılaştırılması

Tablo 6.4'te geopolimer harçların BHA sonuçlarına ait ANOVA analizi sonuçları verilmiştir. Varyans analizi sonuçlarına göre faktörlerin etki sırası, BA, Na, SD, Sıcaklık ve süre olarak bulunmuştur. Geopolimer harçlarının BHA'larının kullanılan bağlayıcı ve aktivatör miktarına bağlı olarak büyük ölçüde değiştiğini görülmüştür. Bu sonuçlar, özgül ağırlıktaki değişikliklerin büyük ölçüde kullanılan BA ve Na miktarından kaynaklandığını göstermektedir. En yüksek etkinin %56,68 ile BA oranının yaptığı, en yüksek ikinci etkiyi ise %19,84 ile Na oranının yaptığı belirlenmiştir. Kırılma sıcaklığının %8,67 etki değeriyle üçüncü etkiyi yaptığı görülmüştür. Kırılma sıcaklığı geopolimerizasyon reaksiyonunu ve su çıkışını doğrudan etkilemesi ile önemini göstermektedir. Ayrıca, kırılma süresi değişimin BHA üzerinde önemli bir etki yapmadığı görüldü. Bu faktörlerin etkilerini anlayarak, geopolimer harçların bileşimini belirli uygulamalar için istenen özellikleri elde edecek şekilde uyarlayabiliriz.

Tablo 6.4. Birim hacim ağırlık ANOVA analiz sonucu

Faktörler	SD	SS	MS	EO	F-değeri	P-değeri
BA	3	0,01605	0,00535	%56,68	*	*
SD	3	0,00415	0,00138	%14,68	*	*
Na	3	0,00562	0,00187	%19,84	*	*
Sıcaklık	3	0,00245	0,00081	%8,67	*	*
Süre	3	0,00003	0,00013	%0,13	*	*
Hata	0	*	*	*		
Toplam	15			%100		

SD: Serbestlik Derecesi, SS: Kareler Toplamı, MS: Kareler Ortalaması, EO: Etki Oranı

Tablo 6.5’te geopolimer harçların su emme oranlarına ait ANOVA analizi sonuçları verilmiştir. Varyans analizi sonuçlarına göre faktörlerin etki sırası, Sıcaklık, Na, SD, Süre ve BA olarak bulunmuştur. Su emme oranı için bulunan sonuçların, basınç dayanımı sonuçları ile uyumlu geldiğini söylemek mümkündür.

Tablo 6.5. *Su emme oranı ANOVA analiz sonucu*

Faktörler	SD	SS	MS	EO	F-değeri	P-değeri
BA	3	4,760	1,587	%10,79	*	*
SD	3	6,159	2,053	%13,96	*	*
Na	3	9,462	3,154	%21,44	*	*
Sıcaklık	3	18,760	6,253	%42,52	*	*
Süre	3	4,983	1,661	%11,29	*	*
Hata	0	*	*	*		
Toplam	15			%100		

SD: Serbestlik Derecesi, SS: Kareler Toplamı, MS: Kareler Ortalaması, EO: Etki Oranı

En yüksek etkinin %42,52 ile kürleme sıcaklığının yaptığı, en yüksek ikinci etkiyi ise %21,44 ile Na oranının yaptığı belirlenmiştir. Diğer faktörlerin etki oranlarının birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Özellikle sıcaklık, diğer faktörlere kıyasla su emme oranı üzerinde daha belirgin bir etkiye sahiptir. Sıcaklık, geopolimerin mikro yapısını ve kimyasal reaksiyonlarını ve dolayısıyla su emme kapasitesini etkileyebilmektedir. Bu etki, kullanılan malzemelere, karışım oranlarına ve sıcaklık koşullarına bağlı olarak değişebilir. İdeal sıcaklık aralıklarında gerçekleştirilen reaksiyonlar, daha düşük su emme oranına yol açabilmektedir.

Tablo 6.6’da geopolimer harçların kılcal su emme yüksekliğine ait ANOVA analizi sonuçları verilmiştir. Varyans analizi sonuçlarına göre faktörlerin etki sırası, Na, Sıcaklık, SD, Süre ve BA olarak bulunmuştur. En yüksek etkinin %36,89 ile Na oranının yaptığı, en yüksek ikinci etkiyi ise %33,87 ile kürleme sıcaklığının yaptığı belirlenmiştir. Kürleme süresi ve BA oranının faktörlerin etki oranlarının birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Geopolimer reaksiyonu sonucu oluşan C-A-S-H ve N-A-S-H jellerin gözenek yapısının kılcal su emme yüksekliğini etkilediği düşünülmektedir.

Tablo 6.7’de geopolimer harçların ultrases geçiş hızına ait ANOVA analizi sonuçları verilmiştir. Varyans analizi sonuçlarına göre faktörlerin etki sırası, Sıcaklık, BA, Na, SD ve Süre olarak bulunmuştur.

Tablo 6.6. *Kılcal su emme yüksekliği ANOVA analiz sonucu*

Faktörler	SD	SS	MS	EO	F-değeri	P-değeri
BA	3	0,6908	0,2303	%6,17	*	*
SD	3	1,8579	0,6193	%16,59	*	*
Na	3	4,1309	1,3770	%36,89	*	*
Sıcaklık	3	3,7926	1,2642	%33,87	*	*
Süre	3	0,7252	0,2417	%6,48	*	*
Hata	0	*	*	*		
Toplam	15			%100		

SD: Serbestlik Derecesi, SS: Kareler Toplamı, MS: Kareler Ortalaması, EO: Etki Oranı

Tablo 6.7. *Ultrases geçiş hızı ANOVA analiz sonucu*

Faktörler	SD	SS	MS	EO	F-değeri	P-değeri
BA	3	0,9897	0,32990	%20,06	*	*
SD	3	0,2846	0,09487	%5,77	*	*
Na	3	0,4304	0,14347	%8,73	*	*
Sıcaklık	3	3,0536	1,01787	%61,90	*	*
Süre	3	0,1745	0,05817	%3,54	*	*
Hata	0	*	*	*		
Toplam	15			%100		

SD: Serbestlik Derecesi, SS: Kareler Toplamı, MS: Kareler Ortalaması, EO: Etki Oranı

En yüksek etkinin %61,90 ile kürleme sıcaklığının yaptığı, en yüksek ikinci etkiyi ise %20,06 ile BA oranının yaptığı belirlenmiştir. Bu faktörlerin ultrases geçiş hızı, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı sonuçlarına etkisi geopolimer reaksiyon oluşumu üzerine etkisi ile açıklanabilir. Artan kürleme sıcaklıklarının ve BA oranının genel olarak geopolimer reaksiyonu oluşumunu olumlu yönde etkilediği belirlenmiştir.

Tablo 6.8. *Eğilme dayanımı ANOVA analiz sonucu*

Faktörler	SD	SS	MS	EO	F-değeri	P-değeri
BA	3	5,1325	1,7108	%15,64	*	*
SD	3	0,6693	0,2231	%2,04	*	*
Na	3	8,9182	2,9727	%27,18	*	*
Sıcaklık	3	16,9751	5,6584	%51,73	*	*
Süre	3	1,1180	0,3727	%3,41	*	*
Hata	0	*	*	*		
Toplam	15			%100		

SD: Serbestlik Derecesi, SS: Kareler Toplamı, MS: Kareler Ortalaması, EO: Etki Oranı

Tablo 6.8’de geopolimer harçların eğilme dayanımlarına ait ANOVA analizi sonuçları verilmiştir. Varyans analizi sonuçlarına göre faktörlerin etki sırası, Sıcaklık, Na, BA, Süre ve SD olarak bulunmuştur. En yüksek etkinin %51,73 ile kütleme sıcaklığının yaptığı, en yüksek ikinci etkiyi ise %27,17 ile Na oranının yaptığı belirlenmiştir.

Tablo 6.9’da geopolimer harçların basınç dayanımlarına ait ANOVA analizi sonuçları verilmiştir. Varyans analizi sonuçlarına göre faktörlerin etki sırası, Sıcaklık, BA, SD, Na ve Süre olarak bulunmuştur. En yüksek etkinin %59,34 ile kütleme sıcaklığının yaptığı, en yüksek ikinci etkiyi ise %21,64 ile BA oranının yaptığı belirlenmiştir.

Tablo 6.9. Basınç dayanımı ANOVA analiz sonucu

Faktörler	SD	SS	MS	EO	F-değeri	P-değeri
BA	3	124,01	41,337	%21,64	*	*
SD	3	44,85	14,949	%7,83	*	*
Na	3	36,79	12,262	%6,42	*	*
Sıcaklık	3	340,11	113,371	%59,34	*	*
Süre	3	27,38	9,127	%4,78	*	*
Hata	0	*	*	*		
Toplam	15			%100		

SD: Serbestlik Derecesi, SS: Kareler Toplamı, MS: Kareler Ortalaması, EO: Etki Oranı

Tablo 6.10’da geopolimer harçların mekanik özelliklerine ait ANOVA analizi sonuçları verilmiştir. Mekanik özelliklerini etkileyen en önemli faktörün sıcaklık olduğunu, bunu BA ve Na içeriğinin izlediğini gösterilmiştir. Öte yandan, SD miktarının etkisi daha sınırlıydı.

Tablo 6.10. Mekanik özelliklerin ANOVA analiz sonucu

Mekanik özellikler	Gün	EO (%)				
		BA	SD	Na	Sıcaklık	Süre
Ultras ses geçiş hızı	7	20,63	7,38	12,13	55,03	4,83
	28	20,06	5,77	8,73	61,90	3,54
	90	14,35	6,16	8,26	64,97	6,29
Eğilme dayanımı	7	11,09	1,02	24,15	55,91	7,83
	28	15,64	2,04	27,18	51,73	3,41
	90	17,17	1,53	27,93	49,27	4,10
Basınç dayanımı	7	18,46	9,23	12,71	52,70	6,90
	28	21,64	7,83	6,42	59,34	4,77
	90	12,75	7,49	9,32	64,12	6,32

Tablo 6.11’de geopolimer harçların ısı iletkenlik katsayılarını ait ANOVA analizi sonuçları verilmiştir. Varyans analizi sonuçlarına göre faktörlerin etki sırası, SD, Süre, Sıcaklık, BA ve Na olarak bulunmuştur. En yüksek etkinin %28,58 ile SD oranının yaptığı, en yüksek ikinci etkiyi ise %25,33 ile kürleme süresinin yaptığı belirlenmiştir.

Analiz, geopolimerin termal performansını optimize etmek için sıcaklık EÖntrolünün çok önemli olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, geopolimerin termal özelliklerini geliştirmede sıcaklığın önemini vurgularken, diğer faktörlerinde istenen termal özelliklere ulaşmada önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Daha yüksek kürlenme sıcaklıkları genellikle geopolimer matrisinin polimerizasyonunu ve yoğunlaşmasını artırarak daha yüksek yoğunluk ve iyileştirilmiş yapı nedeniyle artan ısı iletkenliğe neden olmaktadır. Aksine, daha düşük kürleme sıcaklıkları eksik polimerizasyona ve daha gözenekli bir yapıya yol açabilir, bu da termal iletkenliği azaltabilir.

Tablo 6.11. *Isı iletkenlik ANOVA analiz sonucu*

Faktörler	SD	SS	MS	EO	F-değeri	P-değeri
BA	3	0,00718	0,00239	%12,61	*	*
SD	3	0,01628	0,00542	%28,58	*	*
Na	3	0,00601	0,00200	%10,56	*	*
Sıcaklık	3	0,01306	0,00435	%22,93	*	*
Süre	3	0,01442	0,00481	%25,33	*	*
Hata	0	*	*	*		
Toplam	15			%100		

SD: Serbestlik Derecesi, SS: Kareler Toplamı, MS: Kareler Ortalaması, EO: Etki Oranı

6.7. Optimum Harcın Belirlenmesi

Geopolimer harç teknolojisindeki son gelişmeler, mekanik özellikleri ve dayanıklılığı artırmak amacıyla kürleme koşullarının ve malzeme bileşimlerinin optimize edilmesine odaklanmıştır. Hardjito ve Rangan (2005), UK bazlı geopolimer betonun, 90°C kürleme sıcaklığında maksimum basınç dayanımına ulaştığını ve yüksek sıcaklıkların polimerleşme sürecini hızlandırmada önemli bir rol oynadığını gözlemlemiştir. Ancak, Rangan (2008), düşük kalsiyumlu UK için 60°C'nin üzerindeki kürleme sıcaklıklarının basınç dayanımını anlamlı derecede artırmadığını, bu nedenle optimal bir sıcaklık eşiği bulunduğunu belirtmiştir. Yön ve Karataş (2022) ise %10 BA içeren harçlarda en yüksek dayanımın 60°C kürleme sıcaklığında elde edildiğini tespit etmiştir. Bu bulgu, BA'nın geopolimer harç karışımlarında bir bileşen olarak kullanımının kürleme sürecini optimize ederek dayanımı artırmada etkili olduğunu

vurgulamaktadır. Belirli oranda BA kullanımı, endüstriyel yan ürünleri değerlendirerek sürdürülebilirliğe katkıda bulunmakla kalmayıp harcın mekanik özelliklerini iyileştirmede de önemli bir rol oynamaktadır. 60°C kürleme sıcaklığının, geopolimer matriste kimyasal reaksiyonları ve bağlanmayı kolaylaştırdığı, bu sayede yapı bütünlüğü ve performansını artırdığı gözlemlenmiştir. Bu sıcaklığın maksimum basınç dayanımına ulaşmak için en uygun olduğu, dayanıklı ve sağlam geopolimer malzemelerin geliştirilmesinde kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Öte yandan, Soutsos vd. (2016), 70°C’de kürlenen UK’nin mikro yapısal özelliklerinin ve mekanik dayanımının iyileştiğini göstermiştir; bu da uçucu kül tipi ve özel kürleme koşullarının geopolimer harçların performansında önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Bu bulgular, geopolimer harcın performansını en üst düzeye çıkarmak için kürleme rejimlerinin malzeme özelliklerine göre özel olarak uyarlanması önemini ortaya koymaktadır.

Kürleme koşullarına ek olarak, geopolimerlerin özelliklerini iyileştirmek amacıyla BA ve geri dönüştürülmüş tuğla tozu gibi ek malzemelerin kullanımı da araştırılmıştır. Ali vd. (2020), %10 BA kullanmanın basınç dayanımını artırdığını, ancak daha yüksek oranların (%20 ve %30) dayanımı azalttığını belirleyerek bileşim dengesinin önemini vurgulamıştır. Benzer şekilde, Wong vd. (2020), %10’un üzerinde geri dönüştürülmüş tuğla tozu eklemenin, heterojen bir mikro yapı oluşturarak geopolimerlerin mekanik dayanımını olumsuz etkilediğini rapor etmiştir. Ayrıca, Chokkalingam vd. (2022), seramik tozu oranının artırılmasının hem basınç hem de eğilme dayanımını iyileştirdiğini belirtmiş ve geopolimer harç bileşimlerini optimize etmek için Taguchi yönteminin faydasına dikkat çekmiştir. Bu durum, belirli uygulamalar için malzeme özelliklerini sistematik olarak iyileştirmek amacıyla istatistiksel yöntemlerin kullanımının arttığını vurgulamakta olup, daha dayanıklı ve sürdürülebilir yapı malzemelerinin geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

Çalışmada taze, mekanik ve termal özellikler için ayrı ayrı optimum faktörler belirlenmiştir. Taguchi yöntemi ile elde edilen sonuçlara göre, deneysel verilerdeki en iyi mekanik performansını sağlayan bileşim, optimum harç olarak seçilmiştir. Deney analiz sonuçları en iyi şartlar altında tekrarlanmaktadır. En iyi şartları belirleyerek yapılan deney doğrulama deneyidir. Deney sonucunda bulunan faktör-seviye kombinasyonu en iyi performans karakteristiği değerine ulaştırırsa istenen durum gerçekleşmiş ve deney amacına ulaşmış olur. Tablo 6.12, farklı bileşimlere sahip harç numuneleri için çeşitli özelliklerin tahmin edilen ve deneysel değerlerinin karşılaştırmasını sunarak, bu

özelliklerin tahmin edilmesinde kullanılan modellerin doğruluğunu göstermektedir. Bu tabloda, BA, SD ve Na oranı ile kürleme sıcaklığı ve süresi ile taze harç sıcaklığı, priz süresi, BHA, su emme oranı, kılcal su emme yüksekliği, ultrases geçiş hızı, eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve ısı iletkenlik özelliklerine ait tahmin edilen ve deneysel değerler bulunmaktadır. Hata yüzdeleri, tahmin edilen değerlerin deneysel sonuçlardan sapma oranını göstererek kullanılan tahmin modellerinin güvenilirliğini ve doğruluğunu değerlendirmeye imkân tanımaktadır. Çalışmada, bu hata marjları değerlendirilerek modellerin farklı harç bileşimlerinin değişen koşullarda davranışı belirlenebilmektedir. Bu sayede, geliştirilmiş modelleme ve deney tasarımları ile malzeme performans analizinde iyileştirmelere rehberlik edebilmektedir.

Minimum BHA, maksimum mekanik dayanımı ve minimum ısı iletkenlik kriterlerine göre harçlar sırasıyla AS, AX ve AY olarak sınıflandırılmıştır. AS harcı; BA=%10, SD=%0, Na=%6, Sıcaklık=100°C ve Süre=48 s, AX harcı; BA=%15, SD=%5, Na=%10, Sıcaklık=60°C ve Süre=48 s, AY harcı ise BA=%10, SD=%10, Na=%10, Sıcaklık=100°C ve Süre=12 s olarak belirlenmiştir. Bu sınıflandırma, istenen uygulama ve performans özelliklerine göre harç özelliklerinin hedefe yönelik olarak optimize edilmesine olanak tanımaktadır. AS, düşük BHA'nın gerekli olduğu hafif uygulamalar için optimize edilirken, AX yüksek dayanım gereksinimlerine odaklanmaktadır. AY ise minimum ısı iletkenlik ile termal verimliliği hedeflemektedir. Bu özel karışımlar, belirli yapısal ve çevresel gereksinimleri karşılayan özel inşaat malzemelerinin geliştirilmesini sağlamaktadır.

Tablo 6.12'de gözlemlenen hata payları hem deneysel prosedürlerden hem de kullanılan tahmin modellerinden kaynaklanan çeşitli faktörlere dayandırılabilir. Taze sıcaklık için %0,95'lik bir hata, ölçüm sırasında çevresel koşullar veya cihaz kalibrasyonundan kaynaklanan küçük farklılıkları işaret eder. %1,47'lik küçük bir BHA hatası, BHA hesaplamalarında tahmin modelinin oldukça doğru olduğunu, ancak numunenin heterojenliğine bağlı olarak küçük değişikliklerin meydana gelebileceğini göstermektedir. %9,46'lık su emme hatası ise, emilim hızını etkileyen bileşenlerin karmaşık etkileşimleri, numune hazırlama veya deney yöntemindeki tutarsızlıklardan kaynaklanabilecek nispeten yüksek bir hata oranıdır. Ultrases geçiş hızı, %2,08'lik düşük bir hata ile ses dalgalarının malzemede yayılma hızını doğru bir şekilde yakalayan güçlü bir model olduğunu gösterir. Eğilme dayanımı için %1,67'lik hata, güvenilir bir model öngörüsü olduğunu belirtse de numune geometrisi veya deney koşullarındaki farklılıklar

küçük sapmaların yol açabildiği belirtmektedir. %2,65’lik basınç dayanımı hatası, tahmin edilen ve deneysel değerler arasında çok yakın bir uyum olduğunu göstererek modellemenin etkinliğine işaret etmektedir. Isıl iletkenlikteki %3,69’luk hata ise, modelin homojen ısı özellikler varsayımlarından veya harici deney koşullarından kaynaklanmış olabilir.

Tablo 6.12. *Optimum harçlar*

Deney	BW (%)	SF (%)	Na (%)	Sıcaklık (°C)	Süre (s)	Tahmin edilen	Deneysel sonuç	Hata (%)
Taze harç sıcaklığı (°C)	15	0	6	-	-	31,5	31,8	+0,95
Priz süresi (dk)	15	15	6	-	-	308,88	314	+1,66
BHA (g/cm ³)	10	0	6	100	48	2,03	2,00	-1,47
Su emme oranı (%)	15	5	10	60	72	4,12	4,51	+9,46
Kılcal su emme yüksekliği (mm)	15	5	10	80	48	2,21	2,33	+5,43
Ultras ses geçiş hızı (km/s)	15	0	10	60	48	4,33	4,24	-2,08
Eğilme dayanımı (MPa)	15	0	8	60	48	8,98	8,83	-1,67
Basınç dayanımı (MPa)	15	0	10	60	48	44,57	43,46	-2,49
Isıl iletkenlik (W/mK)	10	10	10	100	12	0,244	0,253	+3,69

Genel olarak, gözlemlenen hata payları, tahmin modellerinin genellikle etkili olduğunu, ancak su emme gibi bazı parametrelerin doğruluğunu artırmak için daha fazla iyileştirmeye ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Bu farklılıklar, modelde karışımın homojenliği gibi varsayımlardan veya deney sırasında çevresel koşullardan kaynaklanabilir. Ayrıca, malzeme özelliklerindeki değişiklikler, numune hazırlama ve deney teknikleri de gözlemlenen hatalara katkıda bulunabilir. Gelecekteki çalışmalarda bu faktörlerin ele alınması, tahmin modellerinin doğruluğunu artırarak farklı harç bileşimlerine uygulanabilirliğini iyileştirebilir.

Tablo 6.12’de sağlanan verilere göre, optimum AX harç karışımının %15 BA içeriği, basınç dayanımı ve ısı iletkenlik üzerindeki olumlu etkisiyle iyi bir denge

sağlayarak daha iyi ısı yalıtım özelliklerine katkıda bulunmaktadır. %5 SD ile karışım, yüksek basınç dayanımı (43,46 MPa) sağlarken harcın mikro yapısını da geliştirerek dayanıklılığı ve dayanımı artırmaktadır. %10 Na konsantrasyonu ise daha yüksek mekanik özellikler sunmaktadır. Seçilen oranlar, mekanik dayanım ile ısı yalıtımı arasında denge kurarken, kürlleme sıcaklığı yüksek enerji maliyetleri gerektirmeden optimum performans için etkili bir ortam sağlar. Bu karışım, tahmin hatalarını en aza indirmektedir ve deneysel sonuçlarla yakından uyum göstererek hem dayanıklılığı hem de enerji verimliliğini artırmak için ideal bir seçenek sunmaktadır.

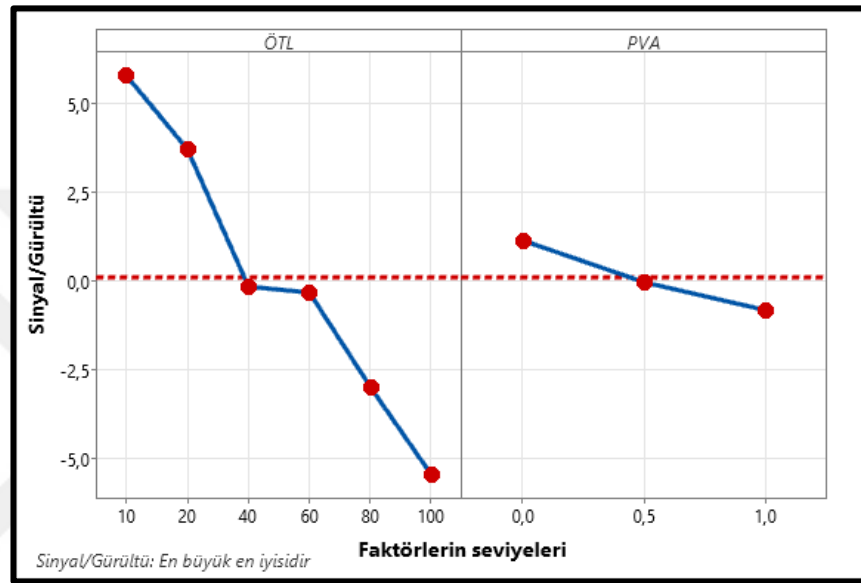
Taguchi yöntemi ile belirlenen optimum AS harç karışımı için tahmin olarak 33,75°C taze sıcaklık, 243,38 dk priz süresi, 2,03 g/cm³ BHA, %10,27 su emme, 5,51 mm kılcal su emme yüksekliği, 2,53 km/s ultrases geçiş hızı, 3,92 MPa eğilme dayanımı, 27,94 MPa basınç dayanımı ve 0,334 W/mK ısı iletkenlik belirlenmiştir. Deneysel olarak karşılık gelen değerler ise 34,2°C taze sıcaklık, 248 dk priz süresi, 2,00 g/cm³ BHA, %11,38 su emme, 5,79 mm kılcal su emme yüksekliği, 2,49 km/s ultrases geçiş hızı, 3,85 MPa eğilme dayanımı, 28,78 MPa basınç dayanımı ve 0,346 W/mK ısı iletkenlik olarak bulunmuştur.

Optimum AX harç karışımı için tahmin olarak 39,75°C taze sıcaklık, 265,13 dk priz süresi, 2,08 g/cm³ BHA, %4,37 su emme, 2,27 mm kılcal su emme yüksekliği, 4,29 km/s ultrases geçiş hızı, 7,99 MPa eğilme dayanımı, 42,34 MPa basınç dayanımı ve 0,481 W/mK ısı iletkenlik belirlenmiştir. Deneysel olarak karşılık gelen değerler ise 40,1°C taze sıcaklık, 270 dk priz süresi, 2,06 g/cm³ BHA, %4,85 su emme, 2,44 mm kılcal su emme yüksekliği, 4,20 km/s ultrases geçiş hızı, 7,95 MPa eğilme dayanımı, 44,06 MPa basınç dayanımı ve 0,501 W/mK ısı iletkenlik olarak bulunmuştur.

Optimum AY harç karışımı için ise tahmin olarak 45,75°C taze sıcaklık, 252,88 dk priz süresi, 2,07 g/cm³ BHA, %8,66 su emme, 4,69 mm kılcal su emme yüksekliği, 2,62 km/s ultrases geçiş hızı, 4,25 MPa eğilme dayanımı, 28,31 MPa basınç dayanımı ve 0,244 W/mK ısı iletkenlik belirlenmiştir. Deneysel olarak karşılık gelen değerler ise 45,1°C taze sıcaklık, 258 dk priz süresi, 2,05 g/cm³ BHA, %9,53 su emme, 4,95 mm kılcal su emme yüksekliği, 2,68 km/s ultrases geçiş hızı, 4,75 MPa eğilme dayanımı, 27,34 MPa basınç dayanımı ve 0,253 W/mK ısı iletkenlik olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, Taguchi yönteminin harç karışımlarının özelliklerini öngörmedeki etkinliğini göstermektedir. Deneysel sonuçlarda gözlemlenen küçük sapmalar, modelleme veya deney koşullarında daha fazla iyileştirme gerektiren alanları işaret etmekte olup, tahmin edilen ve deneysel

değerlerin yakın uyumu, bu metodolojinin inşaat uygulamaları için harç özelliklerini optimize etmede güvenilirliğini göstermektedir.

Optimum harçlar belirlendikten sonra çalışmada, en iyi termal özelliklere sahip AY harcının içindeki standart kum yerine farklı ÖTL yüzdeleri kullanılmıştır. AY/ÖTL harçlarının ultrases geçiş hızı, eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve ısı iletkenlik katsayıları önceki bölümlerde verilmiştir. Kullanılan ÖTL'nin ve PVA'nın bu özellikleri nasıl etkilediği ANOVA analizi yapılarak belirlenmiştir.



Şekil 6.48. AY/ÖTL harçlarının ultrases geçiş hızı sinyal/gürültü grafiği

Çalışmada belirlenen AY/ÖTL harçları için 28 günlük ultrases geçiş hızı değerleri Taguchi metodu ile “En büyük en iyisidir” prensibine göre analiz edilmiştir. Belirlenen optimum parametreler Şekil 6.48’de verilmiştir. Buna göre, optimum parametreler ÖTL=10 ve PVA=0 olarak bulunmuştur. Faktörlerin etkisi incelendiğinde, ÖTL ve PVA oranının artmasıyla ultrases geçiş hızının azaldığı görülmüştür.

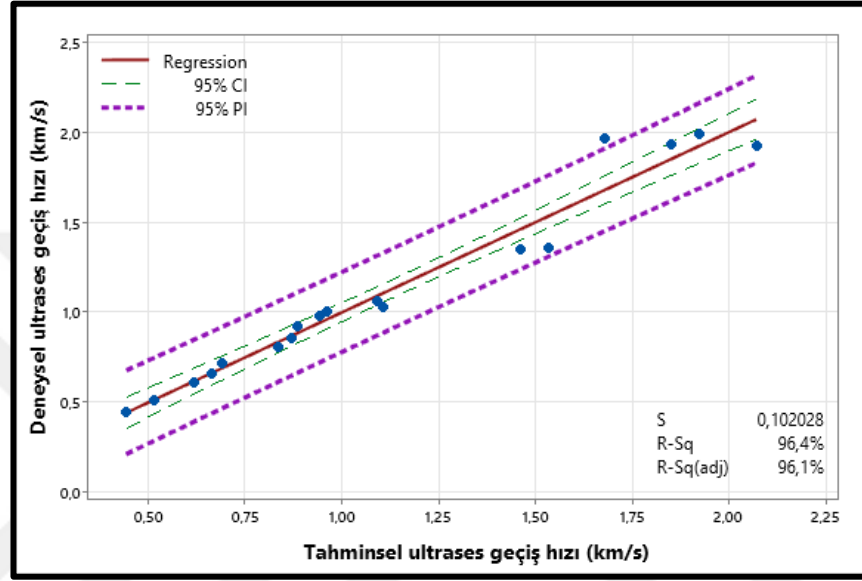
Tablo 6.13’te AY/ÖTL harçlarının ultrases geçiş hızına ait ANOVA analizi sonuçları verilmiştir. Varyans analizi sonuçlarına göre ÖTL faktörünün etkisi %93,06 olarak bulunmuştur. İki faktöründe p-değerlerinin 0,05’ten küçük olması sebebiyle, ultrases geçiş hızı üzerindeki etkilerinin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu belirlenmiştir.

Şekil 6.49’da AY/ÖTL harçlarının ultrases geçiş hızı için deneysel ve tahminsel sonuçların karşılaştırılması verilmiştir. Analiz sonucunda modelin doğruluğu $R^2 = \%96,40$ ile belirlenmiştir.

Tablo 6.13. AY/ÖTL harçlarının ultrases geçiş hızı ANOVA analiz sonucu

Faktörler	SD	SS	MS	EO	F-değeri	P-değeri
ÖTL	5	4,2540	0,85080	%93,06	51,08	0,0000
PVA	2	0,1506	0,07529	%3,29	4,52	0,0399
Hata	10	0,1666	0,01666	%3,64		
Toplam	17	4,5711		%100		

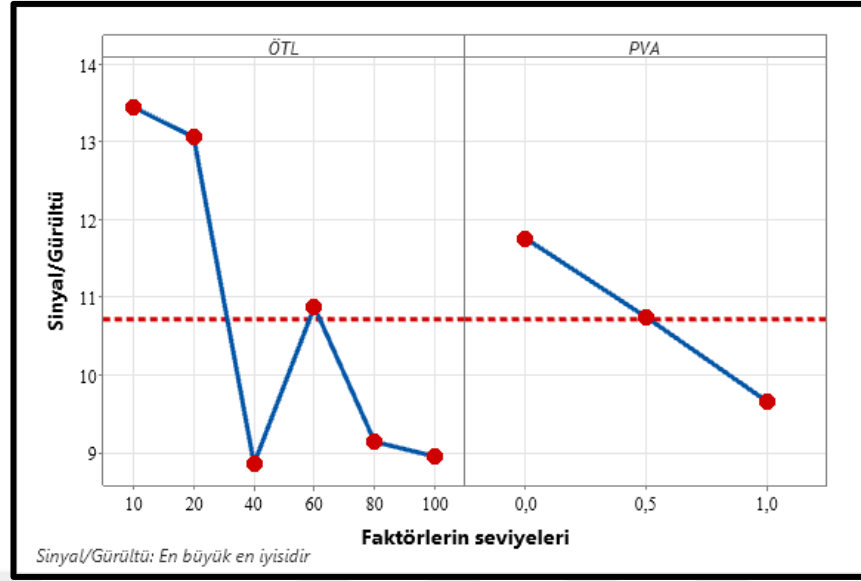
SD: Serbestlik Derecesi, SS: Kareler Toplamı, MS: Kareler Ortalaması, EO: Etki Oranı



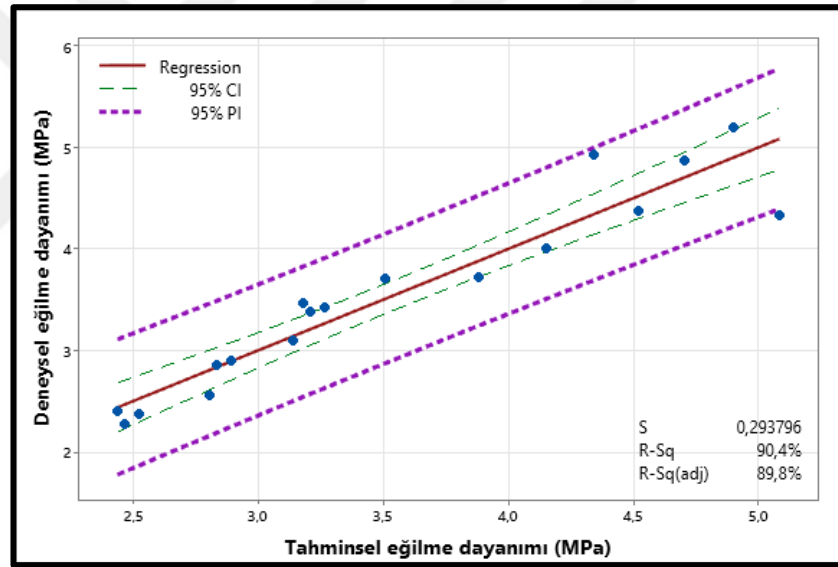
Şekil 6.49. Ultrases geçiş hızı için deneysel ve tahminsel sonuçların karşılaştırılması

Çalışmada belirlenen AY/ÖTL harçları için 28 günlük eğilme dayanımı değerleri Taguchi metodu ile “En büyük en iyisidir” prensibine göre analiz edilmiştir. Belirlenen optimum parametreler Şekil 6.50’de verilmiştir. Buna göre, optimum parametreler ÖTL=10 ve PVA=0 olarak bulunmuştur. Faktörlerin etkisi incelendiğinde, ÖTL ve PVA oranının artmasıyla eğilme dayanımının azaldığı görülmüştür.

Tablo 6.14’te AY/ÖTL harçlarının eğilme dayanımına ait ANOVA analizi sonuçları verilmiştir. Varyans analizi sonuçlarına göre ÖTL faktörünün etkisi %78,77 olarak bulunmuştur. İki faktöründe p-değerlerinin 0,05’ten küçük olması sebebiyle, eğilme dayanımı üzerindeki etkilerinin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu belirlenmiştir. Şekil 6.51’de AY/ÖTL harçlarının eğilme dayanımı için deneysel ve tahminsel sonuçların karşılaştırılması verilmiştir. Analiz sonucunda modelin doğruluğu R^2 =%90,38 ile belirlenmiştir.



Şekil 6.50. AY/ÖTL harçlarının eğilme dayanımı sinyal/gürültü grafiği



Şekil 6.51. Eğilme dayanımı için deneysel ve tahminsel sonuçların karşılaştırılması

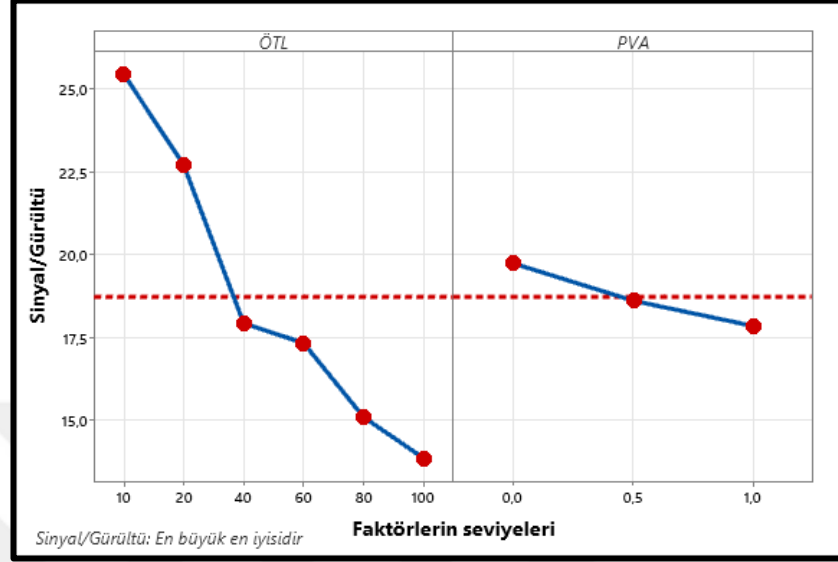
Tablo 6.14. AY/ÖTL harçlarının eğilme dayanımı ANOVA analiz sonucu

Faktörler	SD	SS	MS	EO	F-değeri	P-değeri
ÖTL	5	11,327	2,2654	%78,77	16,40	0,00015
PVA	2	1,652	0,8267	%11,51	5,99	0,01953
Hata	10	1,381	0,1381	%9,62		
Toplam	17	14,362		%100		

SD: Serbestlik Derecesi, SS: Kareler Toplamı, MS: Kareler Ortalaması, EO: Etki Oranı

Çalışmada belirlenen AY/ÖTL harçları için 28 günlük basınç dayanımı değerleri Taguchi metodu ile “En büyük en iyisidir” prensibine göre analiz edilmiştir. Belirlenen

optimum parametreler Şekil 6.52’de verilmiştir. Buna göre, optimum parametreler ÖTL=10 ve PVA=0 olarak bulunmuştur. Faktörlerin etkisi incelendiğinde, ÖTL ve PVA oranının artmasıyla basınç dayanımının azaldığı görülmüştür.



Şekil 6.52. AY/ÖTL harçlarının basınç dayanımı sinyal/gürültü grafiği

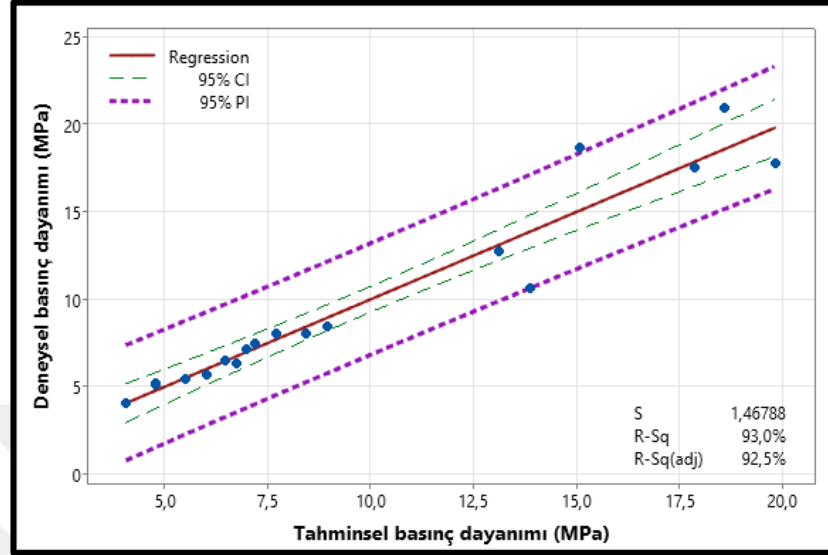
Tablo 6.15. AY/ÖTL harçlarının basınç dayanımı ANOVA analiz sonucu

Faktörler	SD	SS	MS	EO	F-değeri	P-değeri
ÖTL	5	444,27	88,854	%90,57	25,77	0,000021
PVA	2	11,79	5,894	%2,40	1,71	0,229787
Hata	10	34,47	3,447	%7,03		
Toplam	17	490,53		%100		

SD: Serbestlik Derecesi, SS: Kareler Toplamı, MS: Kareler Ortalaması, EO: Etki Oranı

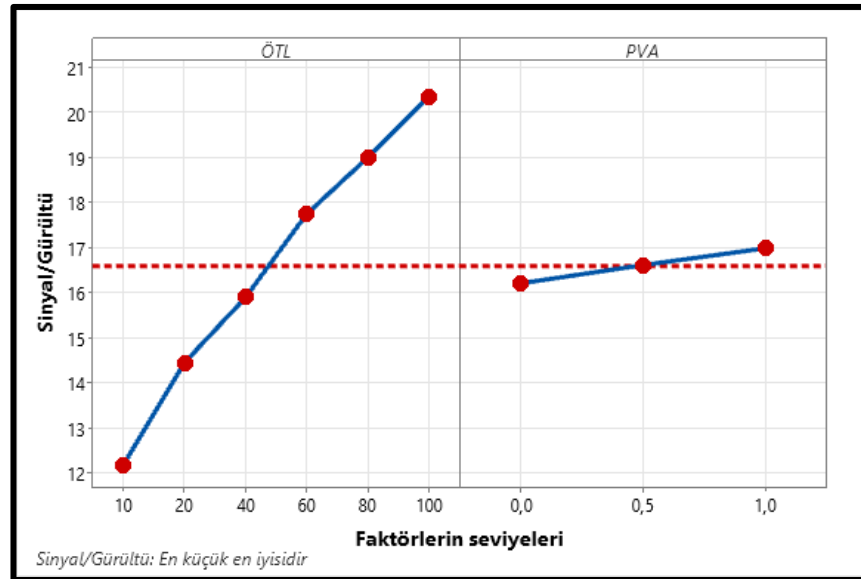
Tablo 6.15’te AY/ÖTL harçlarının basınç dayanımına ait ANOVA analizi sonuçları verilmiştir. Varyans analizi sonuçlarına göre ÖTL faktörünün etkisi %90,57 olarak bulunmuştur. PVA faktörünün p-değerin 0,05’ten büyük olması sebebiyle, basınç dayanımı üzerinde etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olmadığı belirlenmiştir.

Şekil 6.53'te AY/ÖTL harçlarının basınç dayanımı için deneysel ve tahminsel sonuçların karşılaştırılması verilmiştir. Analiz sonucunda modelin doğruluğu $R^2=92,97\%$ ile belirlenmiştir.



Şekil 6.53. Basınç dayanımı için deneysel ve tahminsel sonuçların karşılaştırılması

Çalışmada belirlenen AY/ÖTL harçları için ısı iletkenlik katsayıları Taguchi metodu ile “En küçük en iyisidir” prensibine göre analiz edilmiştir. Belirlenen optimum parametreler Şekil 6.54'te verilmiştir. Buna göre, optimum parametreler ÖTL=100 ve PVA=1,00 olarak bulunmuştur. Faktörlerin etkisi incelendiğinde, ÖTL ve PVA oranının artmasıyla ısı iletkenlik değerlerini azaldığı görülmüştür.



Şekil 6.54. AY/ÖTL harçlarının ısı iletkenlik sinyal/gürültü grafiği

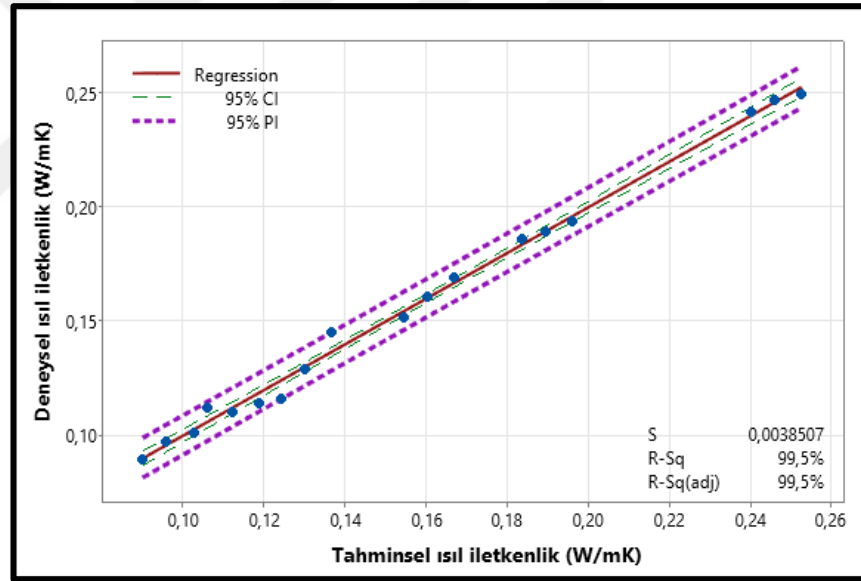
Tablo 6.16’da AY/ÖTL harçlarının ısı iletkenlik katsayılarına ait ANOVA analizi sonuçları verilmiştir. Varyans analizi sonuçlarına göre ÖTL faktörünün etkisi %98,49 olarak bulunmuştur. İki faktöründe p-değerlerinin 0,05’ten küçük olması sebebiyle, ısı iletkenlik üzerindeki etkilerinin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu belirlenmiştir.

Tablo 6.16. AY/ÖTL harçlarının ısı iletkenlik ANOVA analiz sonucu

Faktörler	SD	SS	MS	EO	F-değeri	P-değeri
ÖTL	5	0,046299	0,009260	%98,49	390,29	0,0000
PVA	2	0,000471	0,000236	%1,00	9,93	0,0042
Hata	10	0,000237	0,000024	%0,50		
Toplam	17	0,047007		%100		

SD: Serbestlik Derecesi, SS: Kareler Toplamı, MS: Kareler Ortalaması, EO: Etki Oranı

Şekil 6.55’te AY/ÖTL harçlarının ısı iletkenlik katsayıları için deneysel ve tahminsel sonuçların karşılaştırılması verilmiştir. Analiz sonucunda modelin doğruluğu R^2 =%99,50 ile belirlenmiştir.



Şekil 6.55. Isı iletkenlik için deneysel ve tahminsel sonuçların karşılaştırılması

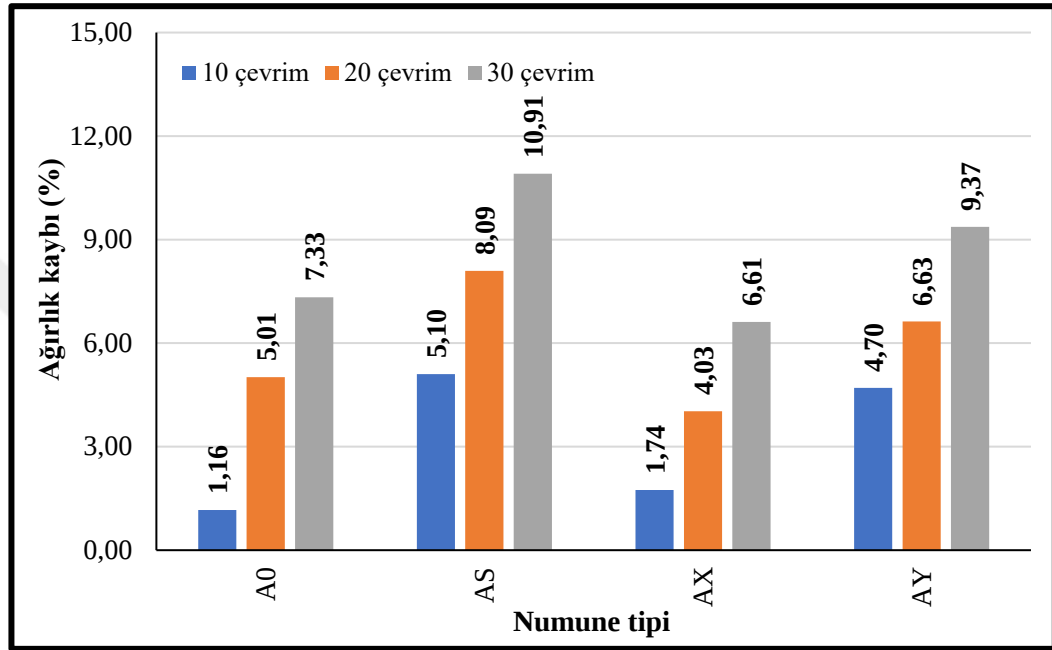
6.8. Durabilite Deneyleri

Durabilite deneyleri belirlenen üç optimum harç (AS, AX ve AY) üzerinde yapılmıştır. Islanma-kuruma, donma-çözülme, yüksek sıcaklık, asit dayanıklılık ve sülfat dayanıklılık deney sonuçlarının bu bölümde incelenmiştir.

6.8.1. Islanma-kuruma deneyi

Islanma-kuruma çevrimleri, malzemenin sürekli olarak suya maruz kalıp sonra kuruduğu döngüsel süreçlerdir. Bu çevrimler, malzeme üzerinde mekanik gerilimler

oluşturmaktadır. Malzeme suyu emerken genişir ve kururken büzülür. Bu da zamanla malzemede mikro çatlakların oluşmasına, yapısının zayıflamasına yol açmaktadır. İslanma-kuruma çevrimlerinden sonra geopolimer harç numuneleri görsel olarak incelendiğinde, AS harcında özellikle numunelerin köşe kısımlarında bazı kayıplar görülmüştür. A0, AX ve AY harçlarında ise ıslanma-kuruma çevrimleri sonrasında numunelerin yüzeylerinde görsel bozulma gözlenmemiştir.

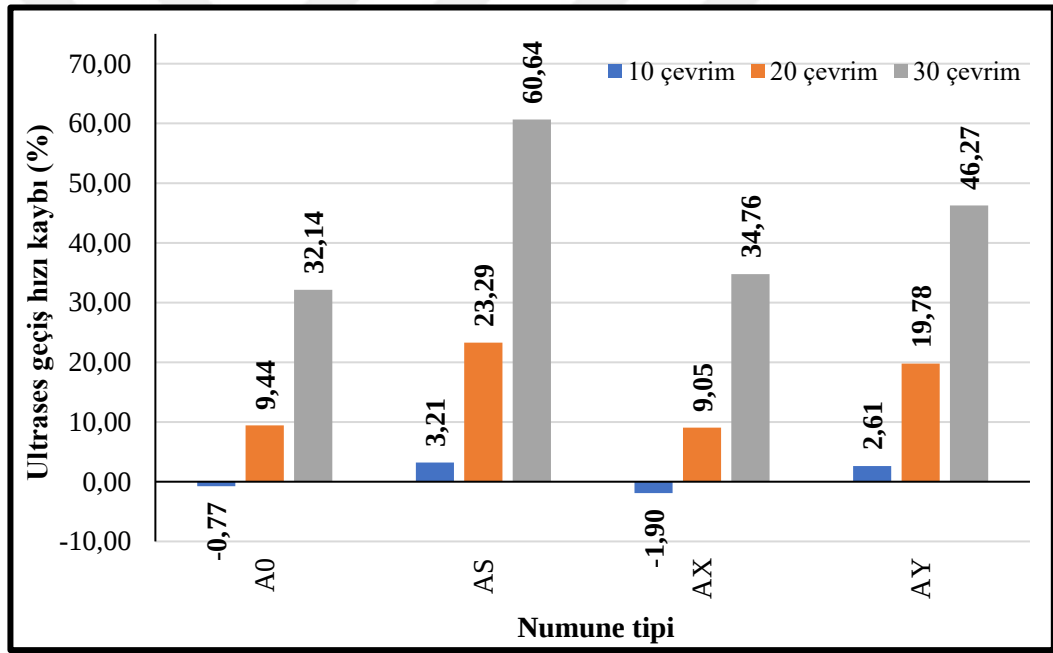


Şekil 6.56. İslanma-kuruma çevrimine maruz kalan optimum harçların ağırlık kaybı

30 ıslanma-kuruma çevrimlerinden sonra harç numunelerinin ağırlığı ölçülmüş ve ağırlık kayıplarının sonuçları Şekil 6.56’da verilmiştir. AS, AX ve AY harçlarının 30 ıslanma-kuruma çevrimlerinden sonraki ağırlık kayıpları sırasıyla %10,91, %6,61 ve %9,37 olarak belirlenmiştir. A0 harcının ağırlık kaybı ise %7,33 olarak belirlenmiştir.

Su emme oranı yüksek AS harcı, ıslanma-kuruma çevrimlerine karşı daha hassas olduğu görülmüştür. Bunun sebebi AS numunesinin suyu hızla emerek daha fazla su depolamasıdır. Diğer harçlara göre daha fazla hacim değişikliği meydana geldiği için AS harcının daha hızlı bozulduğu gözlemlenmiştir. Düşük su emme oranına sahip AX harcı ise ıslanma-kuruma çevrimlerinden daha az etkilenmiştir. Bunun sebebi ise AX numunesinde suyun içeri sızması ve buharlaşması sınırlı olduğu için hacim değişiklikleri daha az olmasıyla mekanik gerilimler ve çatlak oluşumunun daha düşük seviyede kalmasıdır. Sonuç olarak, ıslanma-kuruma çevrimleri, özellikle gözenekli ve suya duyarlı yapı malzemeleri için dayanıklılığı belirleyen kritik bir faktördür.

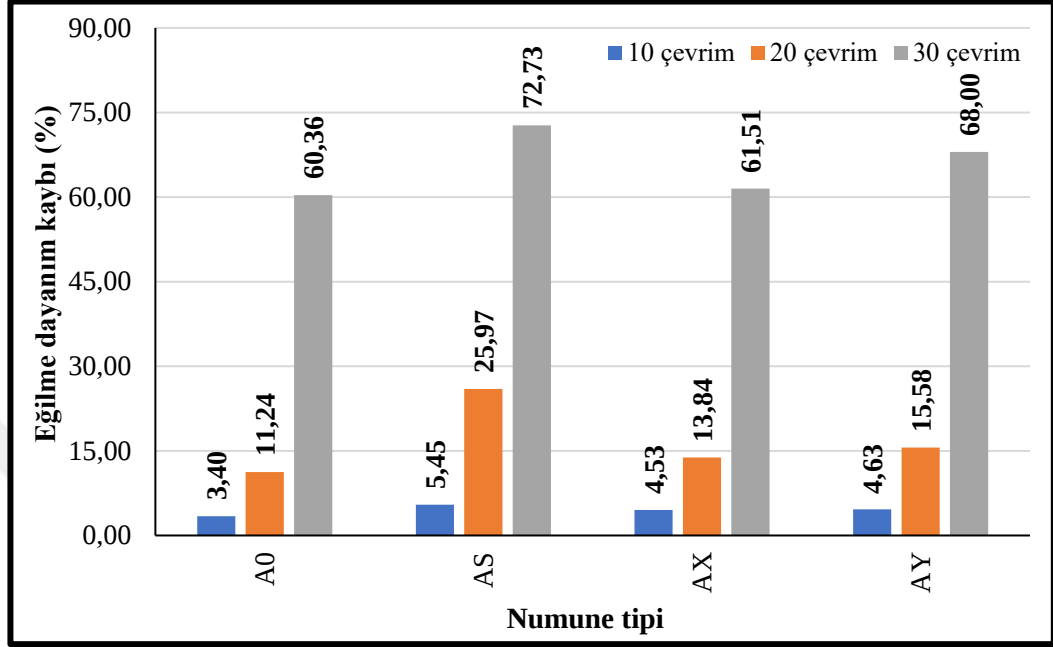
Şekil 6.58, ıslanma-kuruma çevrimleri sonrası ultrases geçiş hızı kayıplarını göstermektedir. AS, AX ve AY harçlarının 30 ıslanma-kuruma çevrimlerinden sonraki ultrases geçiş hızı kayıpları sırasıyla %60,64, %34,76 ve %46,27 olarak belirlenmiştir. A0 harcının ultrases geçiş hızı kaybı ise %32,14 olarak belirlenmiştir. Islanma-kuruma çevrimlerinin ilk aşamalarında, malzemenin gözeneklerinde su emilimi arttığı için ultrasonik dalgalar, suyun varlığı nedeniyle malzeme içinde daha hızlı yayılabilmektedir. Bu nedenle, ilk çevrimlerde ultrases geçiş hızında belirgin bir azalma görülmemiştir. Islanma-kuruma döngüleri arttıkça, malzeme içinde kılcal çatlaklar oluşmaya başlamaktadır. Çatlaklar, ultrases dalgalarının yayılma yolunu engelleyerek hızın azalmasına neden olmuştur. Bu durum, malzemenin iç yapısının bozulduğunun bir göstergesidir. Çatlak genişledikçe ultrases geçiş hızında önemli düşüşler gözlemlenmektedir.



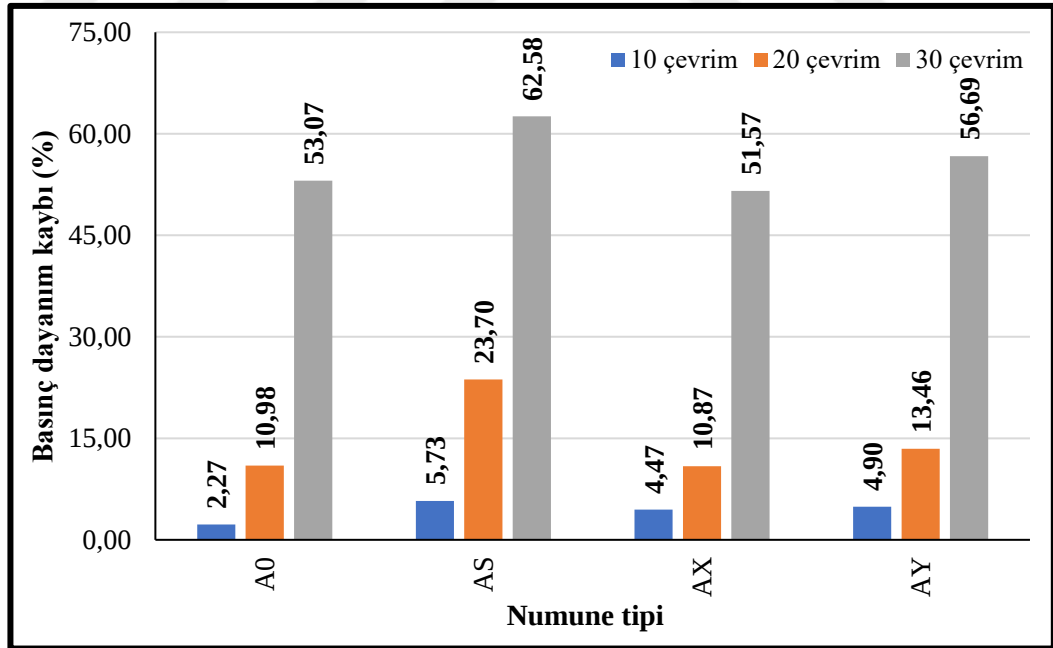
Şekil 6.57. Islanma-kuruma çevrimine maruz kalan optimum harçların ultrases geçiş hızı değerleri

Şekil 6.58, ıslanma-kuruma çevrimleri sonrası eğilme dayanımı kayıplarını göstermektedir. AS, AX ve AY harçlarının 30 ıslanma-kuruma çevrimlerinden sonraki eğilme dayanım kayıpları sırasıyla %10,91, %6,61 ve %9,37 olarak belirlenmiştir. A0 harcının eğilme dayanım kaybı ise %7,33 olarak belirlenmiştir. İlk ıslanma-kuruma döngülerinde, malzemenin su emme kapasitesinin artmasıyla birlikte, hafif genleşme meydana gelmektedir ve eğilme dayanımlarında hafif bir azalma oluşturmuştur. Çevrimlerin ilerlemesiyle malzeme yüzeyinde ve iç yapısında mikro çatlaklar oluştuğu

için çatlaklar, eğilme dayanımını önemli ölçüde azaltmıştır. Eğilme dayanımı, özellikle yüzey hasarına ve gerilme birikimine duyarlı olduğundan, malzemenin kırılgan hale gelmesi kaçınılmazdır.



Şekil 6.58. Islanma-kuruma çevrimine maruz kalan optimum harçların eğilme dayanım kaybı



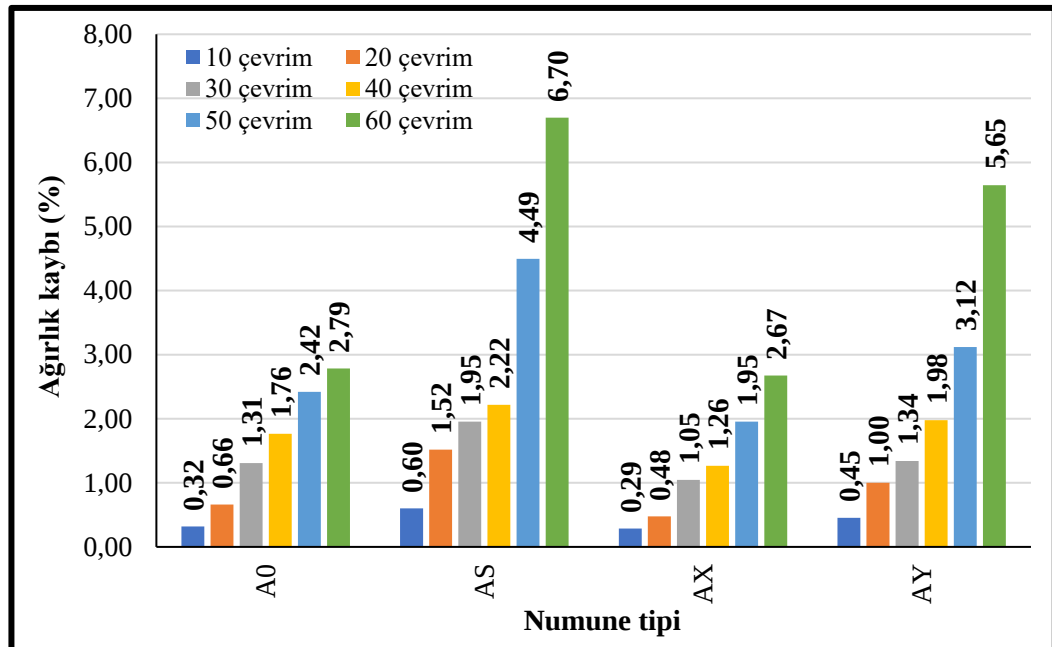
Şekil 6.59. Islanma-kuruma çevrimine maruz kalan optimum harçların basınç dayanım kaybı

Islanma-kuruma çevrimleri sonrası basınç dayanımı kayıpları Şekil 6.59'da verilmiştir. Geopolimer harç numunelerinin basınç dayanımı, geopolimer harçların eğilme dayanımının davranış şekliyle aynı eğilimde olduğu görülmüştür. AS, AX ve AY

harçlarının 30 ıslanma-kuruma çevrimlerinden sonraki basınç dayanım kayıpları sırasıyla %10,91, %6,61 ve %9,37 olarak belirlenmiştir. A0 harcının basınç dayanım kaybı ise %7,33 olarak belirlenmiştir. İlk ıslanma-kuruma çevrimlerinde numunelerin basınç dayanımında çok belirgin bir azalma gözlemlenmemiştir. Çevrimler devam ettikçe, gözenekler arasındaki bağlar zayıflayarak kılcal çatlaklar gelişmiştir. Bu, malzemenin basınç dayanımının önemli ölçüde azalmasına yol açar. Her çevrim, basınç dayanımında kademeli bir düşüşe neden olarak numunenin bütünlüğü zayıflamaktadır.

6.8.2. Donma-çözülme direnci deneyi

Donma-çözülme çevrimleri, yapı malzemelerinin yüzeyinde çatlaklar, pul pul dökülme, tuz birikintisi, renk değişimi, hacimsel genleşme, kopmalar ve gözenek oluşumu gibi görsel bozulmalara neden olmaktadır. Bu görsel belirtiler, malzemenin iç yapısında meydana gelen bozulmaların bir yansımasıdır ve malzemenin dayanıklılığının azaldığını göstermektedir. Donma-çözülme çevrimlerinden sonra geopolimer harç numuneleri görsel olarak incelendiğinde, AS harcında özellikle numunelerin yüzeyinde pul pul dökülmeler, AY harcında ise yüzeysel kabarmalar görülmüştür. A0 ve AX harçlarında donma-çözülme çevrimleri sonrasında numunelerin yüzeylerinde ince kılcal çatlaklar gözlemlenmiştir.



Şekil 6.60. Donma-çözülme çevrimine maruz kalan optimum harçların ağırlık kaybı

60 donma-çözülme çevrimlerinden sonra harç numunelerinin ağırlığı ölçülmüş ve ağırlık kayıplarının sonuçları Şekil 6.60'ta verilmiştir. AS, AX ve AY harçlarının 60

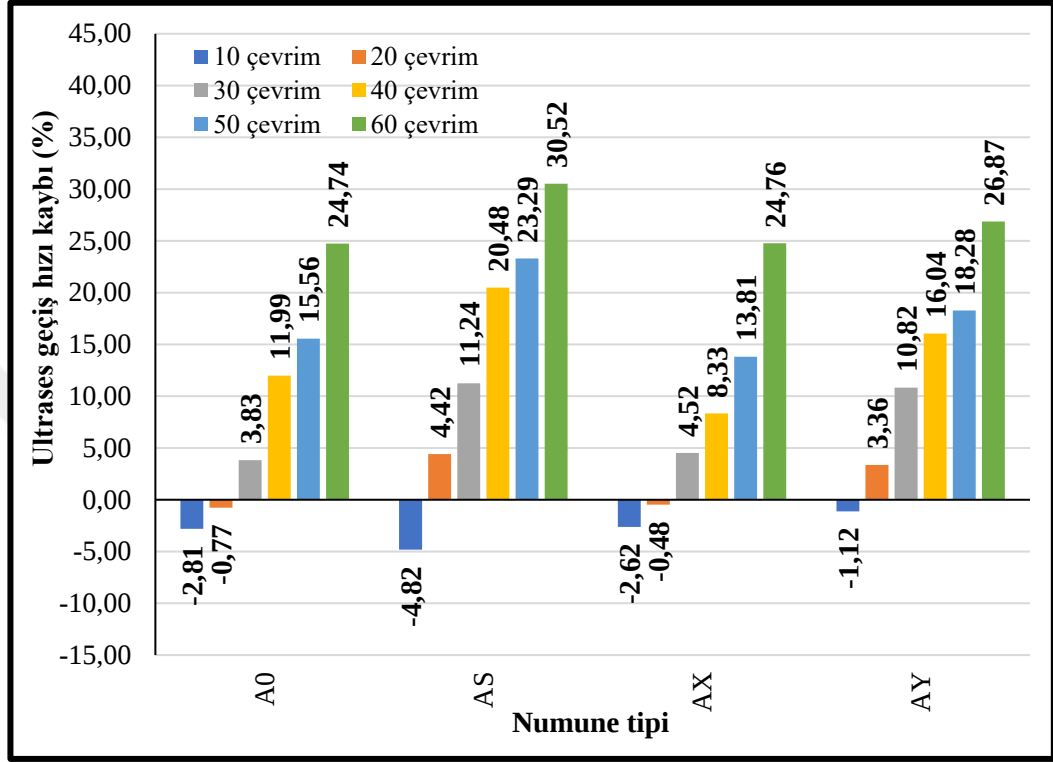
donma-çözülme çevrimlerinden sonraki ağırlık kayıpları sırasıyla %10,91, %6,61 ve %9,37 olarak belirlenmiştir. A0 harcının ağırlık kaybı ise %7,33 olarak belirlenmiştir.

Su emme oranı, donma-çözülme çevrimleri sırasında malzemenin dayanıklılığını doğrudan etkileyen önemli bir faktördür. Yüksek su emme oranına sahip AS harcında, donma sırasında daha fazla iç basınç ve gerilme oluşmuş, dolayısıyla çatlak ve hasar riskinin artmasına neden olmuştur. Düşük su emme oranına sahip AX harcı ise bu çevrimlere karşı daha dirençli olup, uzun vadede daha az bozulma göstermiştir. Bu nedenle, yapı malzemelerinin donma-çözülme dayanıklılığı açısından su emme oranını minimum seviyede tutmak önemlidir.

Şekil 6.61, donma-çözülme çevrimleri sonrası ultrases geçiş hızı kayıplarını göstermektedir. AS, AX ve AY harçlarının 60 donma-çözülme çevrimlerinden sonraki ultrases geçiş hızı kayıpları sırasıyla %60,64, %34,76 ve %46,27 olarak belirlenmiştir. A0 harcının ultrases geçiş hızı kaybı ise %32,14 olarak belirlenmiştir. Donma-çözülme çevrimlerinin ilk aşamalarında, malzeme iç yapısında henüz büyük hasarlar meydana gelmediği için ultrases geçiş hızı çok fazla etkilenmemiştir. İlk birkaç döngüde malzemenin gözeneklerinde donan suyun varlığı, ultrases dalgalarının yayılım hızını artırabilir veya suyun kısmi emilmesi nedeniyle hızda hafif bir azalma görülebilir. A0 ve AX harçlarında ultrases geçiş hızında artma görülürken, AS ve AY harçlarında azalma görülmüştür. Döngüler ilerledikçe malzeme içinde mikro çatlaklar oluşmaya başlamaktadır. Bu çatlaklar ultrasonik dalgaların yayılma yolunu engeller ve ultrases geçiş hızında düşüşe neden olmaktadır. Her çevrimde numuneler daha fazla çatlak ve boşluk biriktirilerek, ultrases geçiş hızının kademeli olarak azalmasına yol açmıştır. Özellikle yoğun çatlaklar ve bozulmaların olduğu ileri çevrimlerde, ultrases geçiş hızı önemli ölçüde düşmektedir ve iç yapısal bozulmanın olduğu anlaşılmaktadır.

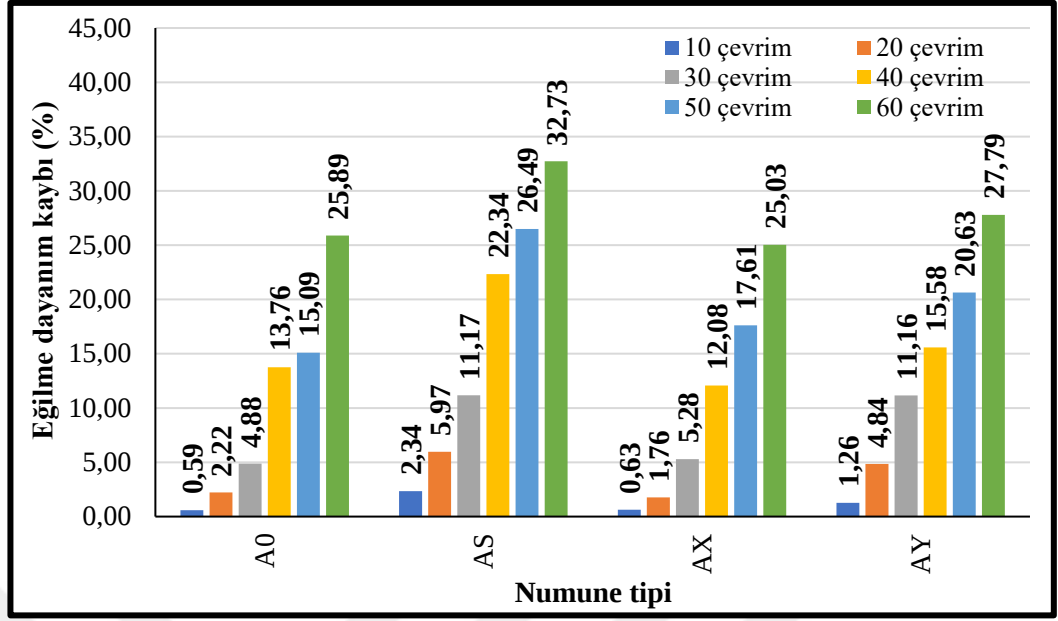
Şekil 6.62, donma-çözülme çevrimleri sonrası eğilme dayanımı kayıplarını göstermektedir. AS, AX ve AY harçlarının 60 donma-çözülme çevrimlerinden sonraki eğilme dayanım kayıpları sırasıyla %10,91, %6,61 ve %9,37 olarak belirlenmiştir. A0 harcının eğilme dayanım kaybı ise %7,33 olarak belirlenmiştir. İlk donma-çözülme çevrimlerinde eğilme dayanımında hafif bir düşüş gözlemlenmiştir. Suyun donarken genleşmesi nedeniyle malzeme içinde küçük çatlaklar oluşmaya başlar, ancak bu çatlaklar genellikle yüzeyseldir ve eğilme dayanımı üzerinde belirgin bir etkisi olmaz. Numunelerin eğilme dayanımında büyük bir azalma ilk birkaç çevrimde gözlenmemiştir. Donma-çözülme döngüleri arttıkça bu çatlaklar genişlediği için eğilme dayanımında

belirgin bir azalma meydana gelmiştir. Eğilme dayanımı, malzemenin yüzeyindeki çatlaklar ve bozulmalardan daha fazla etkilendiği için ileri çevrimlerde dayanım kaybı hızlanmıştır. Her çevrimde malzemenin çatlaması ve hasar görmesi, eğilme dayanımında önemli kayıplara ve numunelerin daha kırılgan hale gelmesine sebebiyet vermiştir.

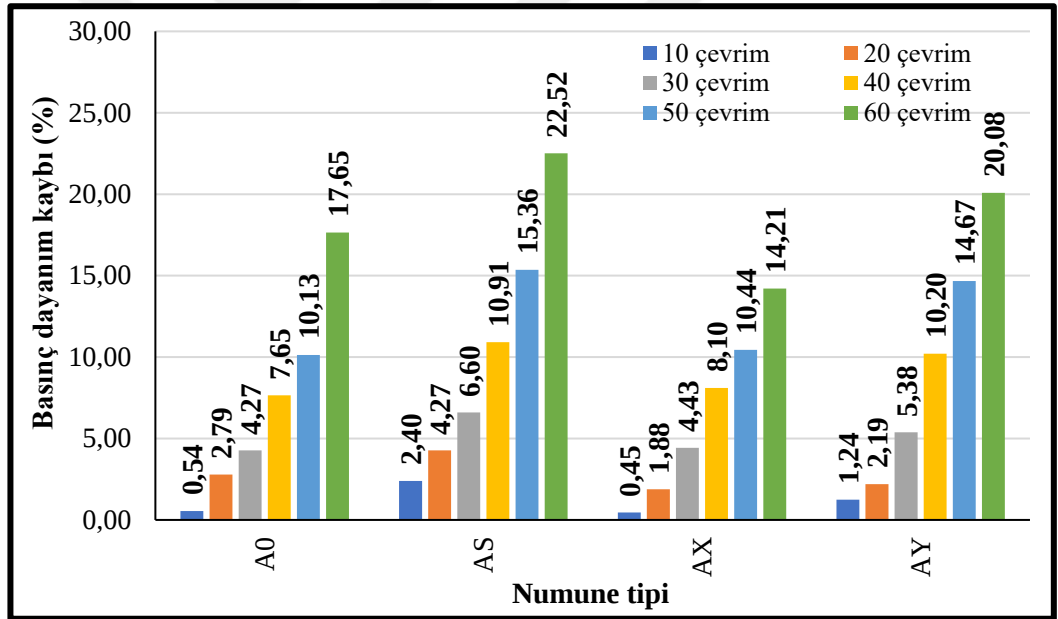


Şekil 6.61. Donma-çözülme çevrimine maruz kalan optimum harçların ultrases geçiş hızı değerleri

Donma-çözülme çevrimleri sonrası basınç dayanımı kayıpları Şekil 6.63'te verilmiştir. Geopolimer harç numunelerinin basınç dayanımı, geopolimer harçların eğilme dayanımının davranış şekliyle aynı eğilimde olduğu görülmüştür. AS, AX ve AY harçlarının 60 donma-çözülme çevrimlerinden sonraki basınç dayanım kayıpları sırasıyla %10,91, %6,61 ve %9,37 olarak belirlenmiştir. A0 harcının basınç dayanım kaybı ise %7,33 olarak belirlenmiştir. İlk donma-çözülme çevrimlerinde basınç dayanımında da genellikle hafif bir azalma gözlemlenmiştir. Numune içinde donma sırasında suyun genleşmesiyle iç basınç oluşur, ancak başlangıçta bu basınç dayanımını dramatik şekilde etkilemez. Mikro çatlaklar sınırlı olduğundan basınç dayanımı nispeten korunmuştur.



Şekil 6.62. Donma-çözülme çevrimine maruz kalan optimum harçların eğilme dayanım kaybı



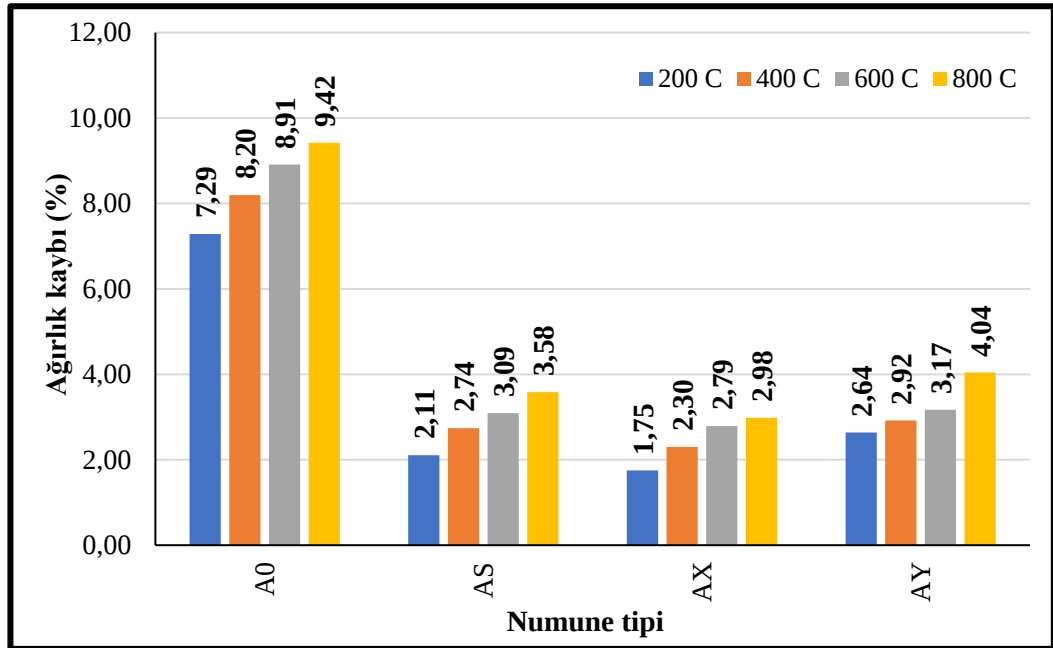
Şekil 6.63. Donma-çözülme çevrimine maruz kalan optimum harçların basınç kaybı

Donma-çözülme döngüleri ilerledikçe malzeme içindeki gözeneklerde biriken su tekrar tekrar donup çözüldüğünde, mikro çatlaklar büyür ve birleşir. Bu süreç, numunelerin basınç dayanımında kademeli bir düşüşe neden olmuştur. Her döngüde çatlakların artması ve genişlemesi, numunelerin iç yapısındaki bağların zayıflamasına ve basınç dayanımının ciddi şekilde azalmasına yol açmaktadır.

6.8.3. Yüksek sıcaklık deneyi

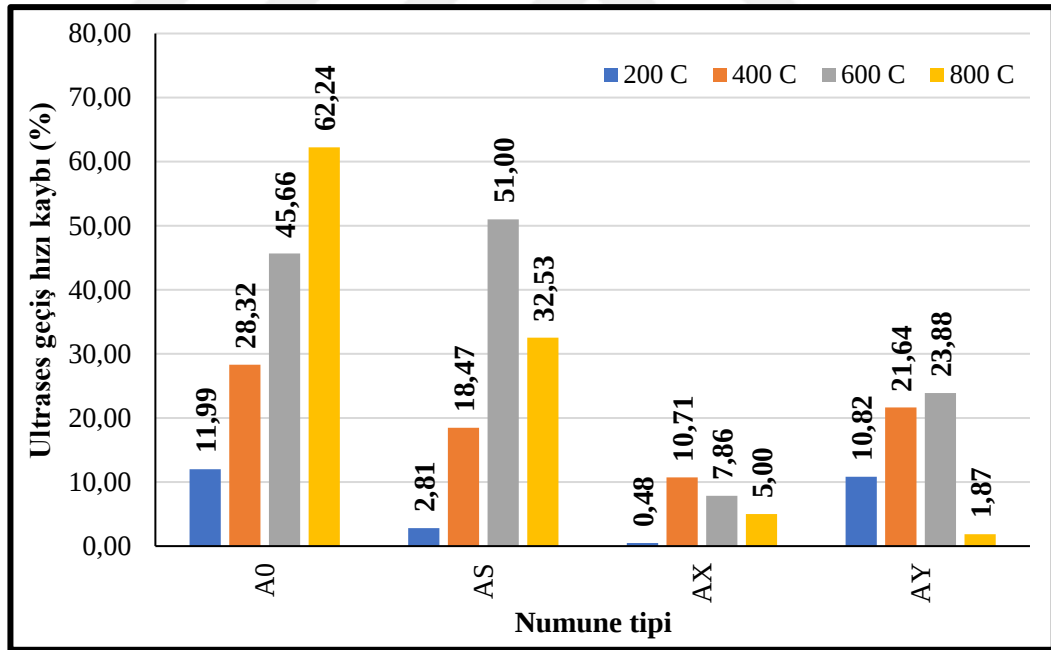
Yüksek sıcaklıklara (200, 400, 600 ve 800°C) maruz kalmış çimento ve geopolimer harçlarda oluşabilecek görsel bozulmalar, malzemelerin iç yapısındaki değişimlere bağlı olarak gelişmektedir. Yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra geopolimer harç numuneleri görsel olarak incelendiğinde, 200°C’de hafif renk değişimi dışında belirgin bozulma görülmemiştir, 400°C’de mikro çatlaklar ve hafif renk değişiklikleri başlamıştır, 600°C’de yüzeyde çatlaklar ve dökülmeler görülmeye başlanmıştır, 800°C’de ise özellikle A0 harcında derin çatlaklar, ciddi dökülmeler, renk değişimi ve yapısal bozulmalar gözlemlenmiştir. AS, AX ve AY harçlarında A0 harcına göre daha az çatlama ve dökülme görülmüştür. 800°C’de A0 harcının daha gevrek hale gelerek el ile dokunulduğunda kolayca parçalanabilir olduğu gözlemlenmiştir.

200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklığa maruz bırakılan harç numunelerinin ağırlığı ölçülmüş ve ağırlık kayıplarının sonuçları Şekil 6.64’te verilmiştir. AS, AX ve AY harçlarının 800°C’den sonraki ağırlık kayıpları sırasıyla %3,58, %2,98 ve %4,04 olarak belirlenmiştir. A0 harcının ağırlık kaybı ise %9,42 olarak belirlenmiştir. Harçların ağırlıkları sıcaklık arttıkça azalmıştır. Bununla birlikte, yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan A0 harcının ağırlık kaybı AS, AX ve AY harçlarına göre daha fazla olmuştur. Bunun nedeni olarak A0 harcının farklı kür koşullarında bekletilmesi gösterilebilir. Geopolimer harç numunelerinde en fazla kayıp AY harcında gözlenmiştir. Geopolimer harçların ağırlık kayıpların harçlardaki SD içeriğinin artması ile arttığı görülmüştür.



Şekil 6.64. Yüksek sıcaklığa maruz kalan optimum harçların ağırlık kaybı

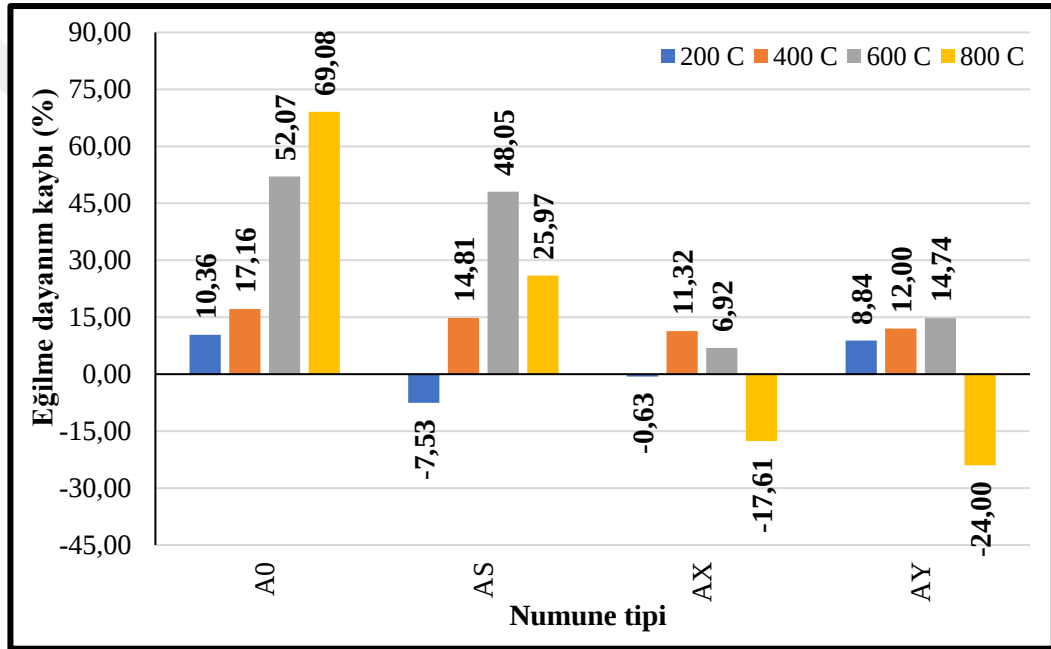
Şekil 6.65, yüksek sıcaklık sonrası ultrases geçiş hızı kayıplarını göstermektedir. AS, AX ve AY harçlarının 800⁰C'den sonraki ultrases geçiş hızı kayıpları sırasıyla %32,53, %5,00 ve %1,87 olarak belirlenmiştir. A0 harcının ultrases geçiş hızı kaybı ise %62,24 olarak belirlenmiştir. AS ve AY harcında 600⁰C'den, AX harcında ise 400⁰C'den sonra ultrases geçiş hızı kaybında azalmalar görülmüştür. 200⁰C'de ultrases geçiş hızında geopolimer harçlarda hafif bir azalma gözlemlenmiştir. 400⁰C'de A0 harçlarında mikro çatlakların oluşmasıyla ultrases geçiş hızında azalma başlamıştır. Geopolimer harçlar bu sıcaklığa daha dayanıklı olma eğilimi göstermiştir. 600⁰C'de A0 harcında ultrases geçiş hızındaki azalma belirginleşmesinin sebebi, iç yapıda daha büyük hasarlar oluşması olabilir. Geopolimer harçlar ise sıcaklık dayanımı açısından daha iyi performans gösterse de ultrases geçiş hızındaki azalma devam etmiştir. 800⁰C'de ise A0 harcının ultrases geçiş hızında dramatik bir düşüş meydana gelmiştir, çünkü malzemenin iç bütünlüğü büyük ölçüde zarar görmüştür. Geopolimer harçlarda ise BA'nın kullanımı, geopolimer matrisinde sinterleme etkisi yaratmış olabilir. Bu, malzemedeki gözeneklerin azalmasına ve iç yapının daha yoğun hale gelmesine neden olmuştur.



Şekil 6.65. Yüksek sıcaklığa maruz kalan optimum harçların ultrases geçiş hızı değerleri

Şekil 6.66, yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanımı kayıplarını göstermektedir. AS, AX ve AY harçlarının 800⁰C'den sonraki eğilme dayanım kayıpları sırasıyla %25,97, -%17,61 ve -%24 olarak belirlenmiştir. A0 harcının eğilme dayanım kaybı ise %69,08 olarak belirlenmiştir. 200⁰C'de A0 harcının eğilme dayanımında %10,36 azalma

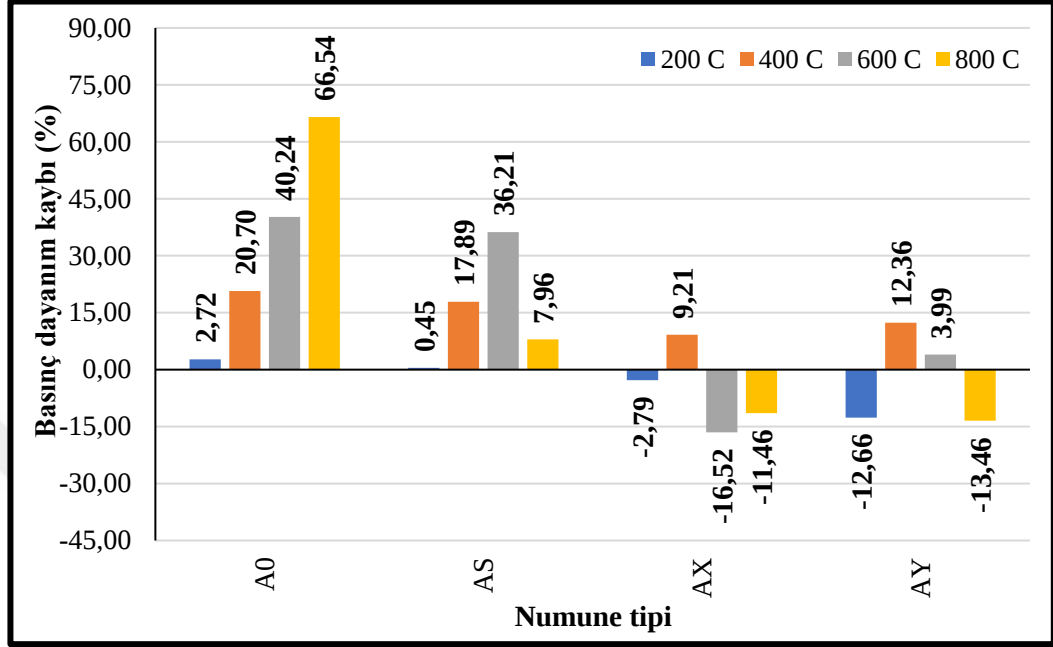
görüldüğünde, AS,AX ve AY harçlarının eğilme dayanımında artma meydana gelmiştir. 400°C’de A0 harcında eğilme dayanımında belirgin bir azalma gözlemlenmesinin sebebi C-S-H yapısının kısmi olarak bozulmaya başlamasıdır. Geopolimer harçlar daha iyi performans göstermesine rağmen bu sıcaklıkta eğilme dayanımında azalmalar başlamıştır. 600°C’de A0 harcının eğilme dayanımı iç yapıda mikro çatlaklar ve mineral bozulmalar sebebiyle önemli ölçüde azalmıştır. Geopolimer harçlar bu sıcaklıkta da daha dayanıklı olabilir, ancak onların da dayanımında azalma görülmüştür. 800°C’de A0 harcında ciddi çatlaklar ve yapı bozulmaları nedeniyle en yüksek eğilme dayanımı kaybı gözlemlenmiştir. AX ve AY harçlarının eğilme dayanımlarında ise artışlar meydana gelmiştir.



Şekil 6.66. Yüksek sıcaklığa maruz kalan optimum harçların eğilme dayanım kaybı

Yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı kayıpları Şekil 6.67’de verilmiştir. AS, AX ve AY harçlarının 800°C’den sonraki basınç dayanım kayıpları sırasıyla %7,96, -%11,46 ve -%13,46 olarak belirlenmiştir. A0 harcının basınç dayanım kaybı ise %66,54 olarak belirlenmiştir. 200°C’de harçların basınç dayanımında küçük bir azalma gözlemlenmiştir, ancak bu sıcaklıkta genellikle dayanım büyük oranda korunmuştur. 400°C’de A0 harcının basınç dayanımı C-S-H jellerinin kısmen bozulması sebebiyle düşmeye başlamıştır. Geopolimer harçlar ise daha dirençli olma eğilimindedir. 600°C’de A0 harcında Portlanditin ayrışması ve C-S-H fazının büyük ölçüde bozulması gerçekleştiği için önemli bir azalma görülmüştür. Geopolimer harçlar daha iyi performans

gösterse AS ve AY harçlarının basınç dayanımında kayıplar yaşanırken AX harcında dayanım kazanılması görülmüştür. 800°C'de A0 harcı basınç dayanımının büyük bir kısmını kaybetmiştir. AX ve AY harcında dayanım kazanılması görülmüştür.



Şekil 6.67. Yüksek sıcaklığa maruz kalan optimum harçların basınç dayanım kaybı

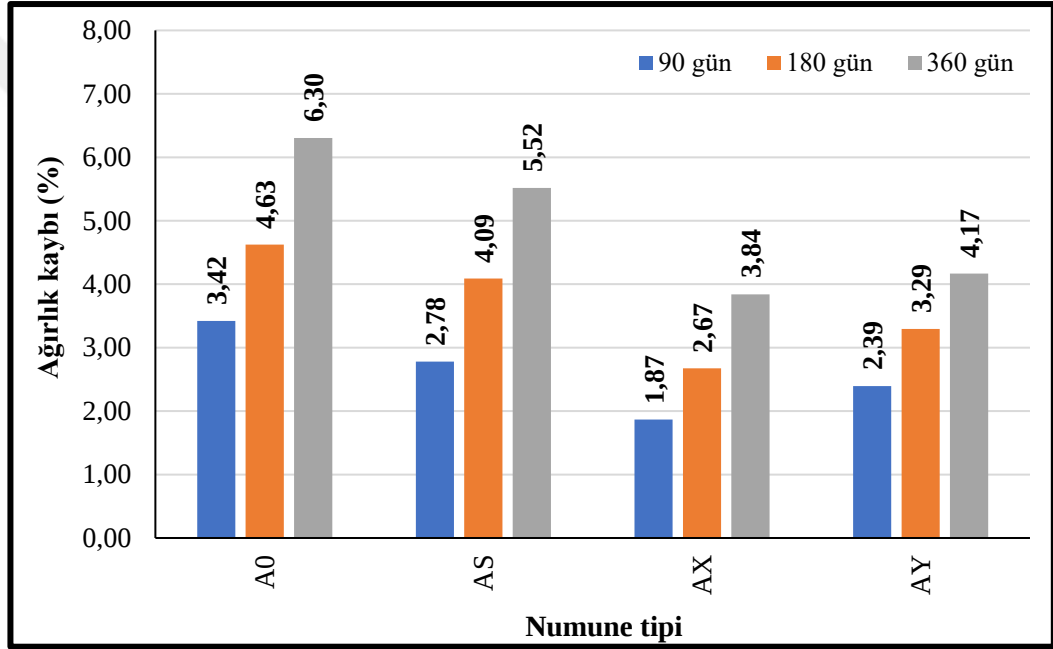
Geopolimerizasyonda yüksek sıcaklığa maruz bırakma (kalsinasyon işlemi), malzemelerin kristal yapılarını amorf hale getirerek basınç dayanımını artırmaktadır. Kalsinasyon genellikle 600-800°C arasında gerçekleşir ve bu süreçte CaO içeriği artar. Yüksek CaO içeriği, mikroyapısal poroziteyi azaltarak amorf C-A-S-H jelinin oluşumunu teşvik eder ve geopolimer harçların mekanik özelliklerini artırır (Khale ve Chaudhary, 2007).

6.8.4. Asit dayanıklılık deneyi

%5 HCl'ye 90, 180 ve 360 gün boyunca maruz kalan A0, AS, AX ve AY harçlarının görsel bozulmaları zamanla artan kimyasal reaksiyonların bir sonucu olarak farklı şekillerde gelişmektedir. Her iki malzeme de HCl'nin aşındırıcı etkilerine maruz kaldıkça görsel değişiklikler gösterir, ancak geopolimer harçlar daha dayanıklı olduğundan, bozulmalar çimento harcına göre daha sınırlı olmuştur. A0 harcında 90 gün içinde yüzeyde hafif bozulmalar gösterirken, zamanla daha ciddi erozyon ve çatlaklar gelişmiştir. 360 gün sonunda ise ciddi renk değişikliği, yüzeydeki katmanların dökülmesi ve derin çatlaklar oluşmuştur. AS, AX ve AY harçları ise, HCl'ye karşı A0 harcına göre çok daha dirençlidir. 90 gün içinde sınırlı görsel bozulmalar gösterirken ve 360 gün

sonunda yüzeyde orta dereceli çatlaklar ve gözenekler oluşmuştur. Yüzeydeki pürüzleşme daha belirgindir. Yüzeydeki çatlaklar ve aşınmalar A0 harcına göre daha sınırlı kalmıştır.

90, 180 ve 360 günden sonra harç numunelerinin ağırlığı ölçülmüş ve ağırlık kayıplarının sonuçları Şekil 6.68’de verilmiştir. AS, AX ve AY harçlarının 360 günden sonraki ağırlık kayıpları sırasıyla %5,52, %3,84 ve %4,17 olarak belirlenmiştir. A0 harcının ağırlık kaybı ise %6,30 olarak belirlenmiştir. A0 harcı asidik saldırı sonucunda ciddi ağırlık kayıpları yaşarken, geopolimer harçlar çok daha az etkilenmiştir. Geopolimerlerin asit dayanımının, kimyasal bileşimlerinden dolayı daha iyi olduğu söylenebilir.

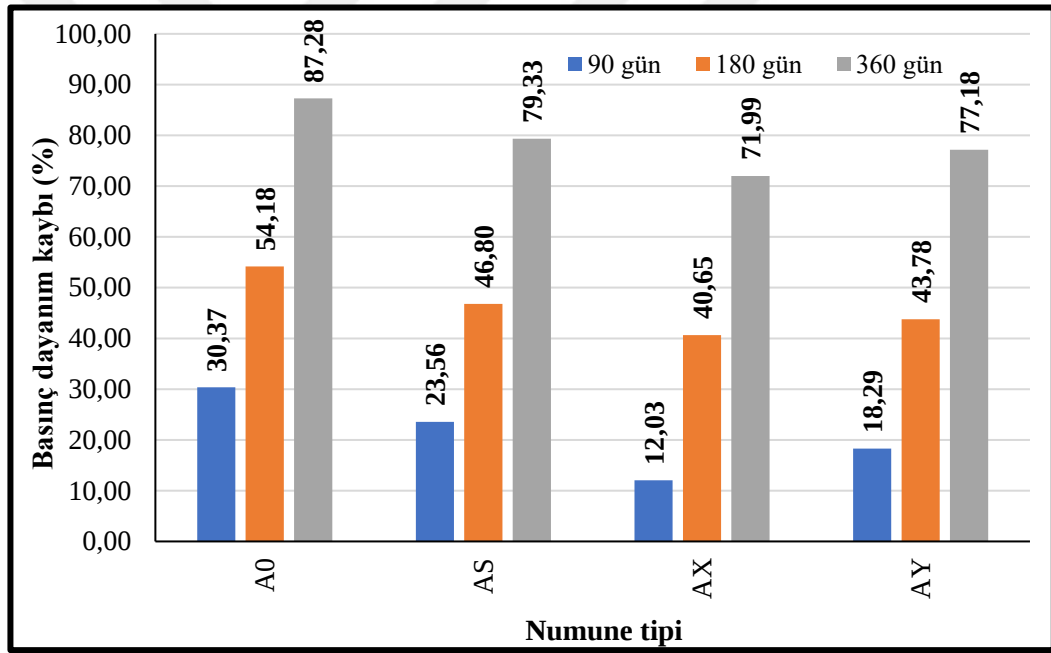


Şekil 6.68. HCl’ye maruz kalan optimum harçların ağırlık kaybı

İlk 90 günde A0 harcında, HCl yüzeydeki kalsiyum bazlı bileşiklerle ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) reaksiyona girerek kalsiyum klorür (CaCl_2) ve su oluşmasına neden olarak yüzey erozyonuna yol açar, ancak ağırlık kaybı sınırlıdır. Sonraki 90 günde $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tükenmeye başladıkça, çimento matrisindeki C-S-H yapısı bozulur. Asit penetrasyonu daha derin katmanlara ulaşır, bu da daha ciddi bir ağırlık kaybına neden olur. Sonraki 180 günde ise A0 harcı ciddi oranda ağırlık kaybı yaşamıştır. Kalsiyum esaslı bileşiklerin tamamen çözünmesi ve C-S-H yapısının parçalanması sonucu malzeme önemli ölçüde bozulmalar görülmüştür.

AS, AX ve AY harcı için ilk 90 gün içinde yüzeyde çok sınırlı bir ağırlık kaybı gözlemlenmiştir. Bu durum, geopolimerlerin kimyasal yapısının asidik çözeltilere karşı daha kararlı olmasından kaynaklanmış olabilir. Sonraki 90 günde geopolimer harçlarda da bazı ağırlık kayıpları gözlenmeye başlanmıştır. Ancak bu kayıplar A0 harcına göre daha azdır. Sonraki 180 günde ise ağırlık kaybı yaşanmıştır ancak yapısal bütünlük büyük ölçüde korunmuştur.

90, 180 ve 360 gün sonrası basınç dayanımı kayıpları Şekil 6.69’da verilmiştir. AS, AX ve AY harçlarının 360 günden sonraki basınç dayanım kayıpları sırasıyla %79,33, - %71,99 ve -%77,18 olarak belirlenmiştir. A0 harcının basınç dayanım kaybı ise %87,28 olarak belirlenmiştir. A0 harcının basınç dayanımı HCl’ye maruz kaldıkça ciddi oranda azalmıştır. Özellikle 180 gün ve sonrasında dayanım kaybı hızlanmıştır. Geopolimer harçların ise basınç dayanım kaybı daha sınırlıdır.



Şekil 6.69. HCl’ye maruz kalan optimum harçların basınç dayanım kaybı

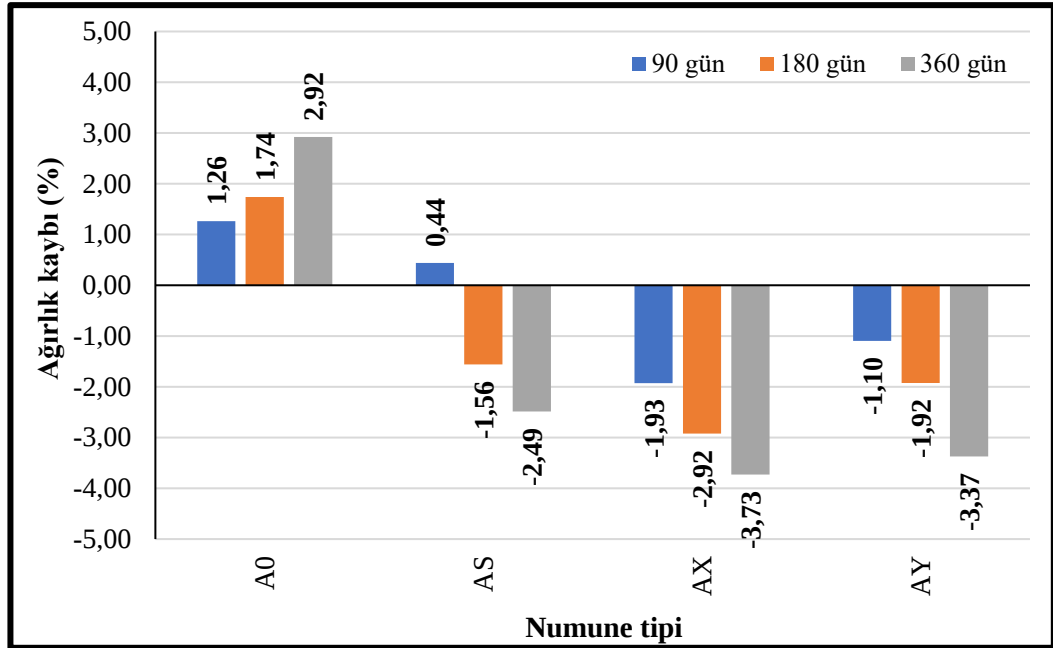
İlk 90 Gün HCl çimento yüzeyine nüfuz ettikçe Ca(OH)_2 çözünmesi nedeniyle yüzeyde zayıflama başlar. Ancak, bu süreç ilk etapta derinlemesine yayılmadığı için basınç dayanımında çok büyük bir düşüş gözlenmemiştir. Sonraki 90 günde C-S-H yapısında bozulduğu için basınç dayanımı belirgin şekilde düşmüştür. HCl daha derin katmanlara nüfuz ederek çimentonun bağlayıcı özelliklerini kaybetmesine yol açmaya başlamıştır. Sonraki 180 günde ise A0 harcı daha kırılgan hale gelmiştir.

İlk 90 gün boyunca geopolimer harçlar, çimento harçlarına kıyasla asit saldırısına karşı çok daha dayanıklıdır. Basınç dayanımında minimum bir azalma görülmüştür. Sonraki 90 günde basınç dayanımı daha da azalmaya başlamıştır, ancak A0 harcına göre çok daha düşük orandadır. Asit penetrasyonu sınırlı kalmıştır ve C-S-H yerine oluşan alüminosilikat yapılar asit saldırısına daha dirençli olduğundan dayanım daha yavaş azalır. Sonraki 180 günde ise dayanım kaybı giderek artmıştır, ancak A0 harcına kıyasla daha az olduğu görülmüştür.

6.8.5. Sülfat dayanıklılık deneyi

%5 $MgSO_4$ çözeltisine 90, 180 ve 360 gün boyunca maruz kalan A0, AS, AX ve AY harçların görsel bozulmaları zamanla belirginleşmektedir. A0 harcında, özellikle 180 gün sonrasında renk değişiklikleri meydana gelmiştir. Geopolimer harçlar, sülfat saldırısına karşı daha dirençli olduğundan, görsel bozulmalar çimento harçlarına göre daha sınırlıdır. AS, AX ve AY harçlarının yüzeyinde hafif renk değişiklikleri ve pürüzlenmeler oluşsa da 360 gün sonunda bile ciddi bozulmalar gözlemlenmemiştir.

90, 180 ve 360 günden sonra harç numunelerinin ağırlığı ölçülmüş ve ağırlık kayıplarının sonuçları Şekil 6.70’te verilmiştir. AS, AX ve AY harçlarının 360 günden sonraki ağırlık kayıpları sırasıyla -%2,49, -%2,92 ve -%3,37 olarak belirlenmiştir. A0 harcının ağırlık kaybı ise %2,92 olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.70. $MgSO_4$ 'e maruz kalan optimum harçların ağırlık kaybı

İlk 90 günlük A0 hacında ağırlık kaybı genellikle düşük seviyededir. Bunun nedeni, sülfat iyonlarının çimentonun iç yapısına tam olarak nüfuz edememiş olmasıdır. Bu aşamada $MgSO_4$, çimento hidrat fazlarıyla reaksiyona girerek etrenjit ve taumasit gibi genişleyici ürünler oluşturur, ancak yapısal bozulma henüz belirgin değildir. 180 gün itibarıyla A0 harcında ağırlık kaybı artmıştır. $MgSO_4$ çözeltisi, $Ca(OH)_2$ ve C-S-H yapısını bozarak çözülmelere ve gözeneklilikte artışa neden olmuştur. Ağırlık kaybı bu aşamada hızlanmaya başlamıştır. 360 gün sonunda ise çimento harcında ağırlık kaybı oldukça belirgindir. Sülfatın etkisiyle malzemenin dış katmanları soyulmaya başlayarak kimyasal bozulma nedeniyle büyük miktarda malzeme kaybı oluşmuştur.

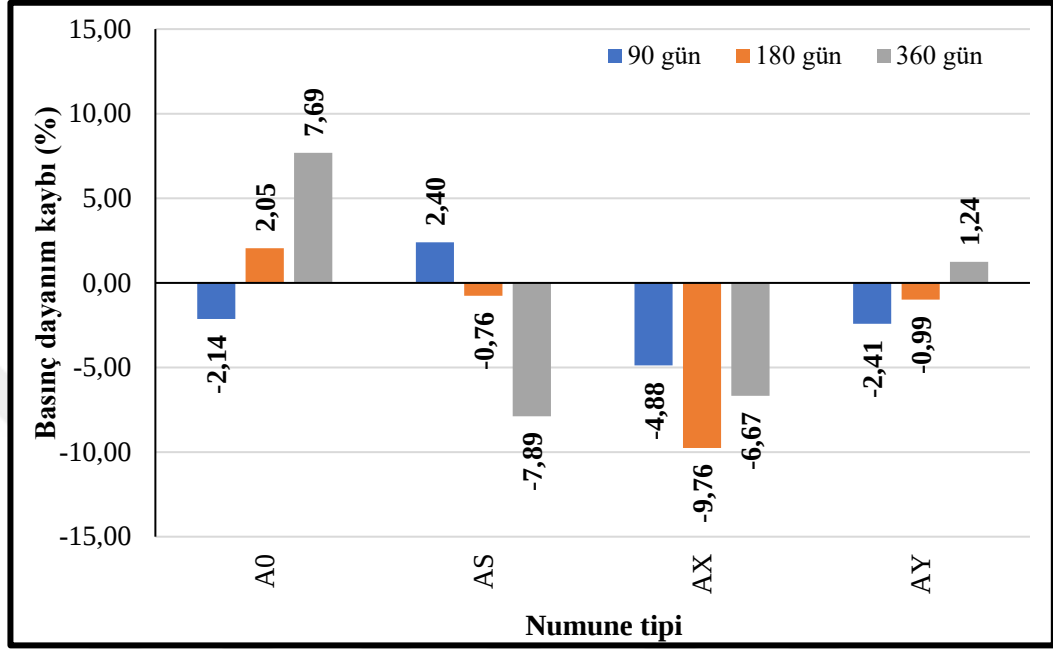
AS, AX ve AY harçları, ilk 90 günlük sürede $MgSO_4$ çözeltisine karşı iyi bir direnç göstermiştir. Bu aşamada ağırlık kaybı sadece AS harcında minimal olarak gözlemlenmiştir. Geopolimerlerin alkali aktivasyonu sayesinde daha yoğun bir yapı oluşturulur ve sülfat iyonları bu yapıya nüfuz edemez. 180 gün sonunda ağırlık artışı belirginleşmeye başlamıştır. 360 gün sonunda ise geopolimer harçların ağırlık artışı sınırlı seviyede kalmıştır.

Literatürde sülfat saldırısına karşı geopolimer harçların, Portland çimentosu ile üretilen A0 harcına göre daha dayanıklı olduğu bildirilmiştir (Džunuzović vd., 2017). Geopolimer harçların sülfat dayanımının yüksek olmasının temel nedeni, Portland çimentosunun hidratasyonu sonucu oluşan $Ca(OH)_2$ bileşiğinin geopolimer harçlarda oluşmamasıdır. Portland çimentosunda $Ca(OH)_2$, sülfat iyonlarıyla reaksiyona girerek genişleyici ürünler oluşturur. Bu ürünler betonda çatlaklara ve bozulmalara neden olurken, geopolimer harçlar daha stabil ve dayanıklı bir matris yapısı oluşturur. Bu durum sülfat etkisine karşı daha yüksek direnç sağlamaktadır (Thunuguntla ve Rao 2018).

90, 180 ve 360 gün sonrası basınç dayanımı kayıpları Şekil 6.71’de verilmiştir. AS, AX ve AY harçlarının 360 günden sonraki basınç dayanım kayıpları sırasıyla -%7,89, -%6,67 ve -%1,24 olarak belirlenmiştir. A0 harcının basınç dayanım kaybı ise %7,69 olarak belirlenmiştir. A0 harcının basınç dayanımı $MgSO_4$ ’e maruz kaldıkça azalmıştır. Özellikle 180 gün ve sonrasında dayanım kaybı hızlanmıştır. Geopolimer harçların ise basınç dayanım kaybı daha sınırlıdır.

Geopolimerlerin sülfat çözeltisine maruz kalması durumunda dayanım kayıpları ve artışları üzerine Bakharev vd. (2002) ve Thokchom vd. (2010) çalışmalarında vurgulanmaktadır. Sülfat çözeltisinin alkali geçmesi sonucu geopolimer yapısının bozulması, dayanım kayıplarının temel nedeni olarak gösterilmektedir. Geopolimer

yapıları, alkali aktivatörlerle oluşturulan alüminosilikat ağlarından meydana gelmektedir. Sülfat iyonları bu yapıyı zayıflatarak kimyasal bozulmalara yol açabilmektedir. Özellikle sülfat çözeltisindeki iyonların geopolimer içindeki boşluklara geçmesi, yapısal bütünlüğü zedeleyerek mekanik özelliklerin bozulmasına neden olabilmektedir.



Şekil 6.71. $MgSO_4$ 'e maruz kalan optimum harçların ağırlık kaybı

Sülfat çözeltisi ve geopolimer arasındaki kimyasal reaksiyonlar sonucu tortuların oluşması ve bu tortuların daha sonra sertleşerek geopolimerdeki boşlukları doldurması, dayanım artışlarına yol açabilmektedir. Bu reaksiyonlar, gözeneklerin ve mikro çatlakların dolmasıyla daha yoğun bir yapı oluşturur, bu da mekanik dayanımın artmasına katkıda bulunabilir. Diğer bir neden de sülfata maruz kalma süresi arttıkça geopolimerizasyon reaksiyonunun devam etmesi olabilir. Bu devam eden reaksiyonlar, geopolimer ağını daha kararlı hale getir ve basınç dayanımında artış gözlemlenebilir. Tortu oluşumu ve reaksiyon devamlılığı olumlu bir etki yaparken, alkali iyonlarının geçişi olumsuz etkilere neden olmaktadır.

6.9. Mikroyapı Analizi

XRF analizleri hammaddelerin oksit bileşenlerini belirlemek, XRD analizleri ise kristal ve amorf fazları belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. TGA/DTA analizleri seçilen harçların sıcaklık altında değişimlerini incelemek, SEM-EDS analizleri ise durabilite deneyleri sonucunda harçların faz karakterizasyonu ve mikroyapısal evrimini sergilemek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

6.9.1. XRF analizi

Hammaddelerin XRF analizine göre oksit bileşenleri Tablo 6.17’de ayrıntılı olarak verilmiştir. Malzemeler makul miktarda silika ve alümina içeriğine sahiptir.

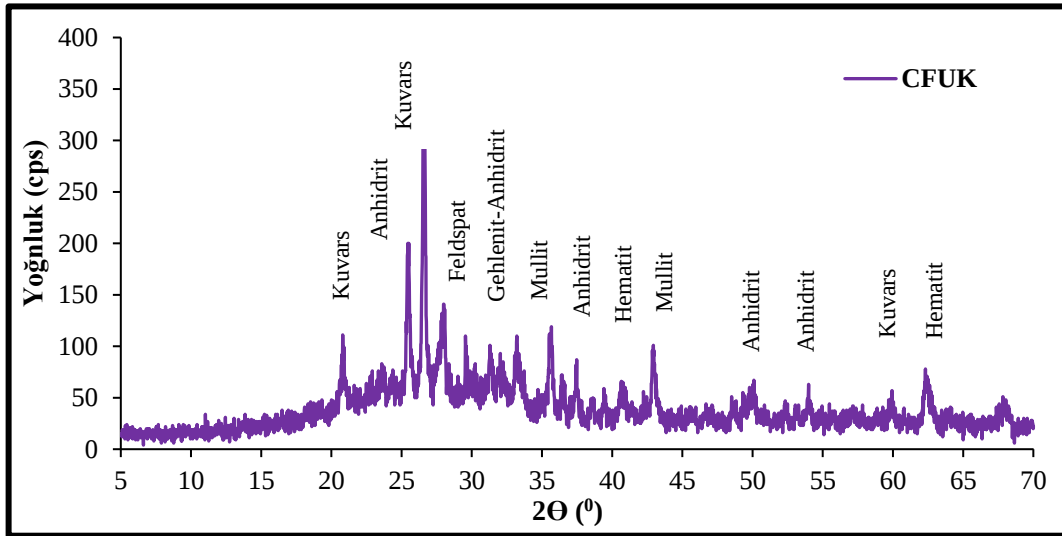
Tablo 6.17. Geopolimer harç üretiminde kullanılan hammaddelerin oksit kompozisyonu

Bileşik (%)	Hammaddeler				
	Ç	CFUK	BA	SD	YFC
SiO ₂	19,65	50,08	18,76	91,57	37,53
Al ₂ O ₃	4,42	13,96	1,85	0,38	11,39
Fe ₂ O ₃	3,29	9,49	0,81	0,15	1,31
ΣP	27,36	73,53	23,42	92,10	50,23
CaO	63,06	12,95	15,06	0,32	35,27
B ₂ O ₃	-	-	11,08	-	-
Na ₂ O	0,30	1,66	7,36	0,42	0,60
K ₂ O	0,60	2,07	0,59	0,10	0,77
MgO	1,50	4,80	13,37	4,05	5,21
SO ₃	3,12	2,66	0,29	0,19	0,82
KK	3,65	0,60	29,43	-	2,07

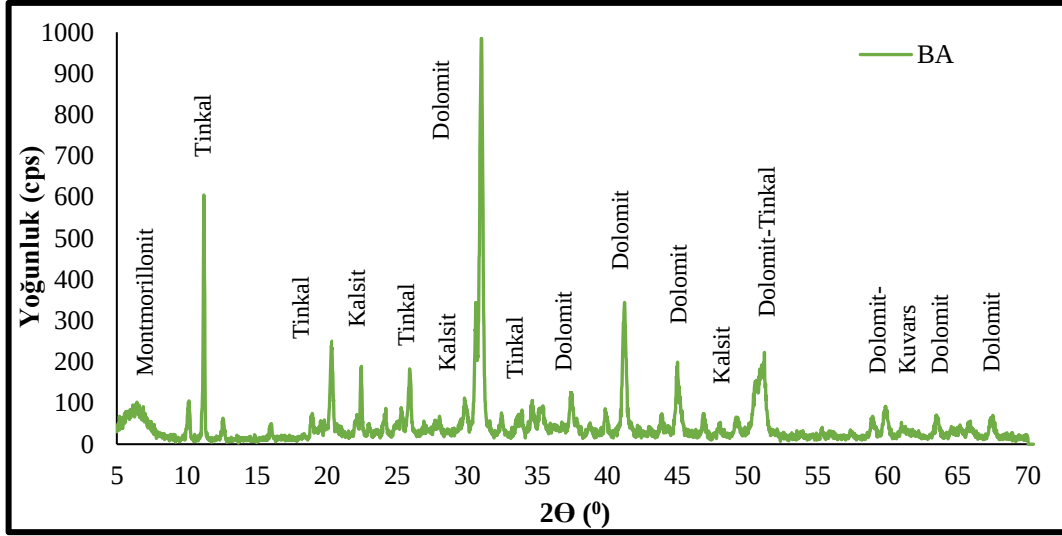
ΣP: SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ (Puzolonik oksit toplamı), KK: Kızdırma kaybı

6.9.2. XRD analizi

Öncelikle hammaddelerin XRD desenlerinin karşılaştırılmıştır. Şekil 6.72’de görüldüğü üzere CFUK’nin XRD deseni camsı ve kristalin fazlardan oluşmaktadır. Kristalin fazlar alkali feldspatlar, kuvars, hematit, anhidrit ve mullitten oluşmaktadır. Camsı fazın 23-28° 2θ arasında maksimuma ulaştığı ve camsı fazın silisli bir karaktere sahip olduğu görülmektedir.

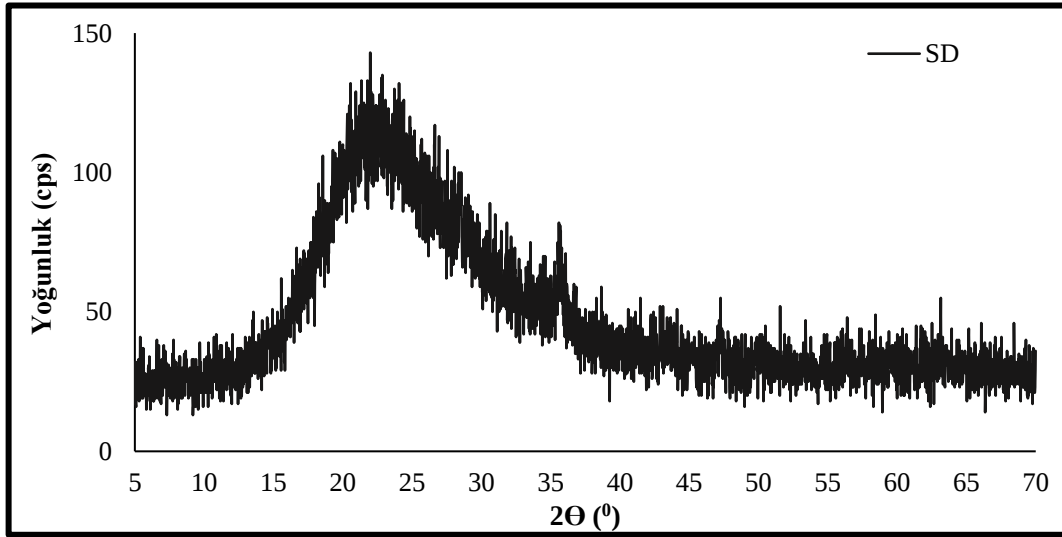


Şekil 6.72. CFUK malzemesinin XRD deseni



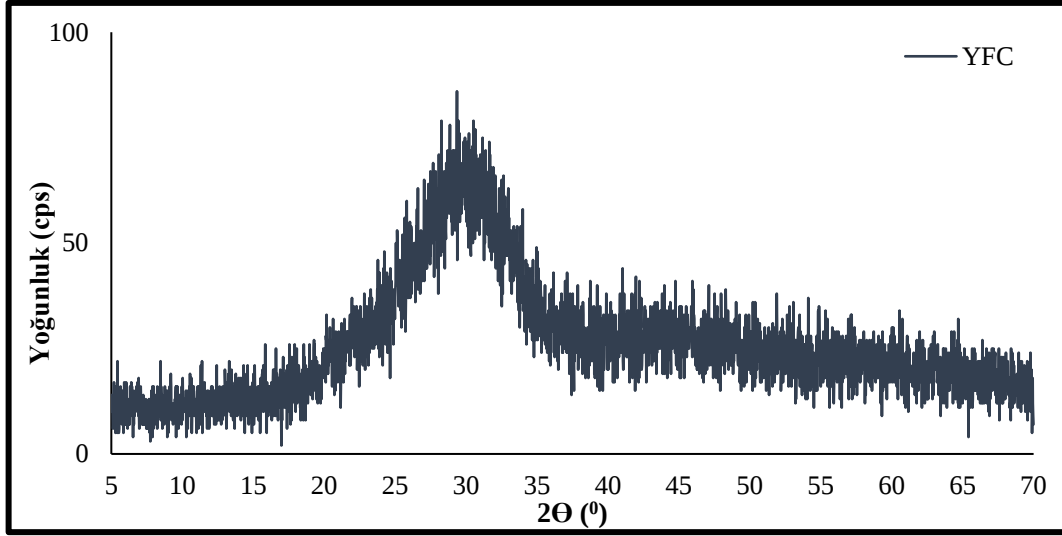
Şekil 6.73. BA malzemesinin XRD deseni

Şekil 6.73'te ise BA'nın XRD deseni sunulmuştur. XRD sonuçları BA'nın dolomit, tinkal ve kuvars gibi bazı kristalin fazlardan oluştuğunu göstermektedir. Yoğunluk ve sayı bakımından en baskın faz dolomittir. BA'de tanımlanan kil minerali montmorillonittir. Baysal (1974), Kırka-Eskişehir bölgesinde gözlenen kil minerallerinin Mg-montmorillonit tipinde olduğunu ve DTA eğrilerinin Kaliforniya'daki hektoritin DTA eğrilerine benzer olduğunu belirtmiştir.



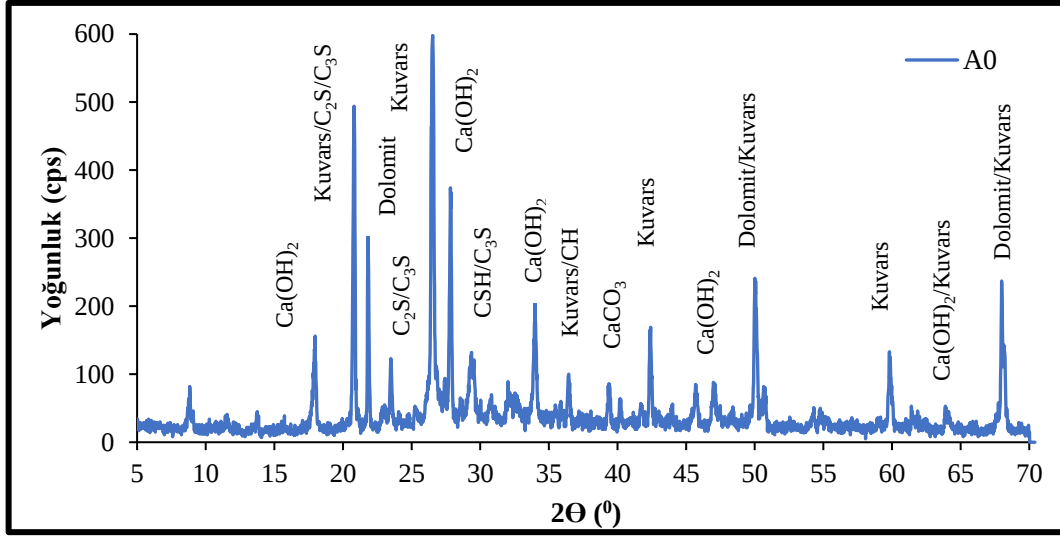
Şekil 6.74. SD malzemesinin XRD deseni

Şekil 6.74'te SD'nin, Şekil 6.75'te ise YFC'nin XRD deseni verilmiştir. Bu desenlere göre malzemelerin amorf faza sahip olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6.75. YFC malzemesinin XRD deseni

Şekil 6.76’da gösterilen geleneksel çimento harcının (A0 harcı) XRD desenleri, malzemenin mikro yapısı ve mineralojik bileşimi hakkında önemli bulgular sunmaktadır. Desenler, çimentolu malzemelerde yaygın olarak bulunan kuvars (SiO_2), kalsit (CaCO_3) ve portlandit (Ca(OH)_2) gibi kristal fazların varlığını göstermektedir. Kuvars ile ilişkili zirveler keskin ve yoğundur; bu, kuvarsın kristal yapısını ve bu mineralin harcın mekanik dayanımına katkısını yansıtmaktadır. Karbonatlaşma süreciyle oluşan kalsit de harcın dayanımına ve dayanıklılığına katkıda bulunmaktadır. Ca(OH)_2 varlığı ise, çimentonun hidrasyonu ile ilgili olup priz alma ve sertleşme süreçlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Difraksiyon desenleri ayrıca C_3S ve C_2S gibi kalsiyum silikat fazlarının varlığını da göstermektedir; bu fazlar, çimento esaslı sistemlerde dayanım gelişimi için kritik öneme sahiptir. XRD desenleriyle ortaya çıkan mikro yapısal özellikler incelendiğinde, A0 harcının iyi tanımlanmış bir kristal yapıya sahip olduğu, bu yapının harcın basınç dayanımı ve dayanıklılığına katkıda bulunduğu açıktır. Kalsiyum silikat fazlarına ait belirgin zirveler, harca dayanım kazandıran birincil bağlayıcı faz olan C-S-H jelini oluşturan hidrasyon reaksiyonlarının göstergesidir. Büyük ölçüde amorf olan C-S-H jeli, boşlukları doldurarak harcın geçirgenliğini azaltarak mekanik özelliklerini ve çevresel bozulmalara karşı direncini artırmaktadır. Ayrıca, alit ve belit gibi reaksiyona girmemiş klinker fazlarının varlığı, uzun vadede dayanım artışına katkıda bulunabilecek devam eden hidrasyon reaksiyonlarını da göstermektedir.



Şekil 6.76. A0 harcının XRD deseni

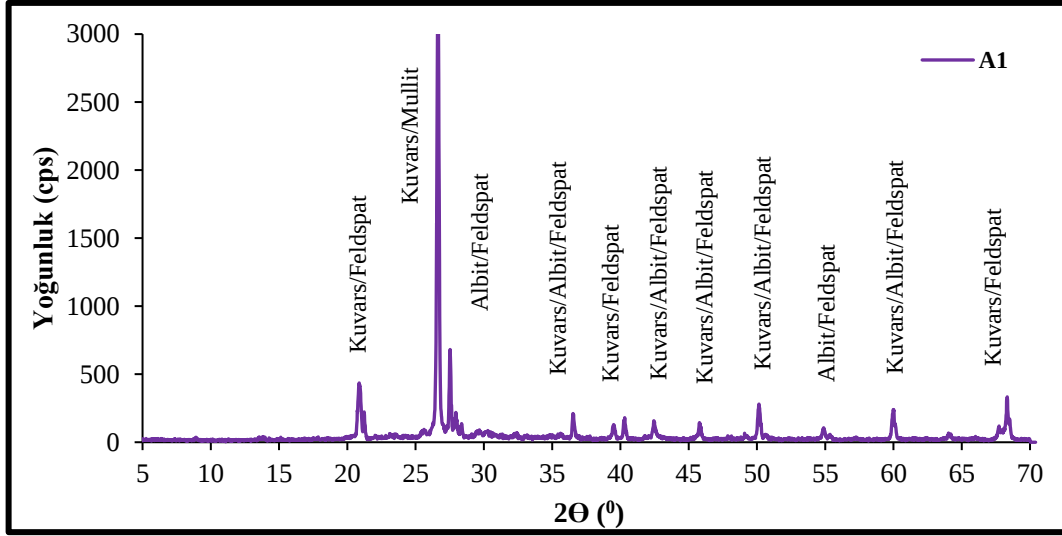
Geopolimer harçların mikro yapısal analizi, malzeme içindeki kristal ve amorf fazların anlaşılmasını gerektirmektedir. XRD desenleri, bu fazlar hakkında kritik bilgiler sağlayarak geopolimerleşme derecesini ve malzemenin yapısal bütünlüğünü göstermektedir. Bu tezde, çeşitli geopolimer bileşimlerine ait XRD desenlerini gösteren birkaç şekil yer almakta olup, her birinin ham madde bileşimindeki farklılıklar nedeniyle kendine özgü özellikleri bulunmaktadır. Farklı alüminosilikat hammaddelerden hazırlanan geopolimerlerin makroskobik özelliklerinin aynı olmasına rağmen mikroyapıları, fiziksel, mekanik, kimyasal ve ısı özellikleri çok farklı olabilmektedir (Duxon vd. 2007b). Başka deyişle geopolimerler aynı kimyasal kompozisyona ancak farklı mikroyapılara sahiptir olabilirler (Khale ve Chaudhary 2007). Geopolimerler genellikle ‘X-ışınına amorf’ olarak tanımlanmaktadır (Duxon vd. 2007b). Burada 20-40° 2θ arasında yapının büyük çoğunlukla amorfudur. Kristal olmayan kısımların, XRD desenlerinde keskin kırınım piklerinden ziyade geniş yaygın bir tümsek görülmektedir (Khale ve Chaudhary 2007b).

XRD desenlerinin en önemli özelliği merkezi yaklaşık 27-29° 2θ’da olup 18-36° 2θ’da bulunan özelliksiz/niteliksiz tümsektir (Duxon vd. 2007b; He vd. 2012). Burada gözlenen tümseklerin genişliği, geopolimerizasyon derecesinin büyüklüğünü ve oluşan geopolimer bağlayıcının saflığını belirtebilmektedir (He vd. 2012). Amorf yapının baskın olduğu birçok malzemenin XRD’si, geopolimerler ile benzerdir (Duxon vd. 2007b). Hammaddelerde bulunan bütün kristal fazlara ait pikler, geopolimerlerin yapılarında da gözlenmektedir. Piklerin varlığı kristal fazların geopolimerik reaksiyonlarda yer almadığını ve bağlayıcı içerisinde aktif olmayan dolgu malzemeleri olarak bulunduğunu

göstermektedir (He vd. 2012). Bu pikler uçucu külde kristal kısımlardan kaynaklanan kuvars, mullit ve hematite ait olabilir. 20-30° 2θ arasındaki geniş pikler uçucu külün camsı kısmından, 6-10° ve 16° 2θ bölgesindeki pikler ise alüminosilikat jelden kaynaklanmaktadır (Khale ve Chaudhary 2007). Xu ve Van Deventer (2000) tarafından yapılan bir çalışmada da XRD difraktogramları incelendiğinde kullanılan hammaddelerin içerisindeki kristal fazların yapıda kaldığı ancak şiddetlerinde bir miktar azalma olduğu ve yapıda yeni ana kristal faz oluşmadığı görülmüştür. Kristal fazların yapıda kalmasının nedeni amorf fazlara göre daha zor çözünmesidir. Amorf fazlar çözünerek geopolimerizasyonun ilk basamağını oluştururlar. Kristal fazlar ise UK'nin aktivasyonunun ardından ürün içinde kalmaya devam etmektedir (Diaz vd. 2010; Font vd. 2010).

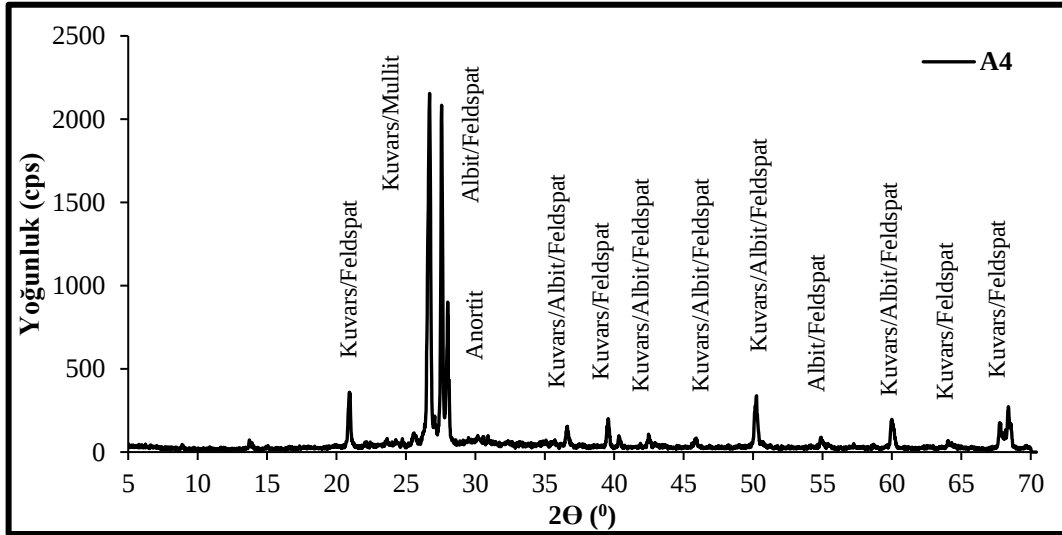
Geopolimer harçların tümünde albit ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) ve feldspat (KAlSi_3O_8 - $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ - $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) için XRD piklerinin varlığı, sodyum alüminosilikat hidrat (N-A-S-H), sodyum katkılı kalsiyum alüminosilikat hidrat (C-(N)-A-S-H) ve kalsiyum alüminosilikat hidrat (C-A-S-H) tiplerinde jellerin oluşumunu göstermektedir. Bu jel oluşumları, geopolimer matrisinin dayanım ve dayanıklılığının gelişimi için kritik öneme sahiptir, çünkü yapıdaki bağlayıcı fazlar olarak görev yaparak yapıyı bir arada tutmaktadırlar. N-A-S-H jeli, esas olarak alüminosilikatların alkali aktivatörlerle reaksiyonundan oluşur ve birincil bağlayıcı ağı sağlamaktadır. Buna karşılık, C-(N)-A-S-H ve C-A-S-H jelleri, kalsiyum içeren bileşiklerin alkali ortamla etkileşimi sonucu oluşur ve malzemenin mekanik özelliklerini ve kimyasal stabilitesini artırmaktadır. Bu jellerin geopolimer yapısına entegrasyonu, harcın genel performansına katkıda bulunarak, çeşitli çevresel koşullar altında daha iyi basınç dayanımı ve dayanıklılık sağlamaktadır.

Şekil 6.77'de yer alam %100CFUK (A1) harcının XRD deseni, geopolimer matrisindeki kristal fazlara karşılık gelen belirli 2θ değerlerinde önemli zirveler göstermektedir. Kuvars ve mullit gibi uçucu külün ana bileşenlerine işaret eden kilit zirveler gözlemlenmektedir. Bu zirvelerin varlığı, geopolimerleşme sırasında UK parçacıklarının tam çözünmediğini ve bunların alüminosilikat matrisinde mikro-agrega olarak işlev görerek harcın mekanik dayanımına katkı sağlayabileceğini göstermektedir. 20-30° arasında gözlemlenen amorf tepe, geopolimerlerde birincil bağlayıcı faz olan N-A-S-H jelinin oluşumunu işaret etmektedir.



Şekil 6.77. A1 (%100 CFUK) harcının XRD deseni

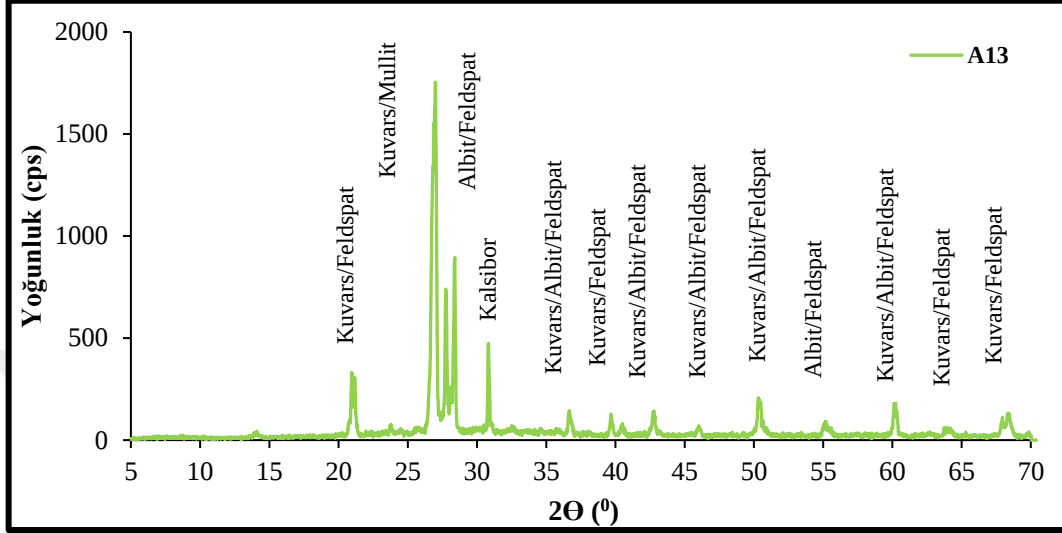
Şekil 6.78'teki %85CFUK + %15SD (A4) harcında, XRD deseni, SD'nin yüksek reaktivitesi nedeniyle artan amorf içerik göstermektedir, bu da geopolimerleşme sürecini hızlandırır. Amorf bölgede ($25-35^\circ$) görülen geniş tepe, %100 CFUK harcıyla karşılaştırıldığında daha belirgin olup, daha yüksek N-A-S-H jel içeriğine işaret etmektedir. Bu durum, SD'nin sağladığı ek silisten kaynaklanmaktadır. Bu durum alüminosilikatların çözünmesini teşvik ederek daha yoğun bir geopolimer matrisine katkıda bulunur.



Şekil 6.78. A4 (%85CFUK+%15SD) harcının XRD deseni

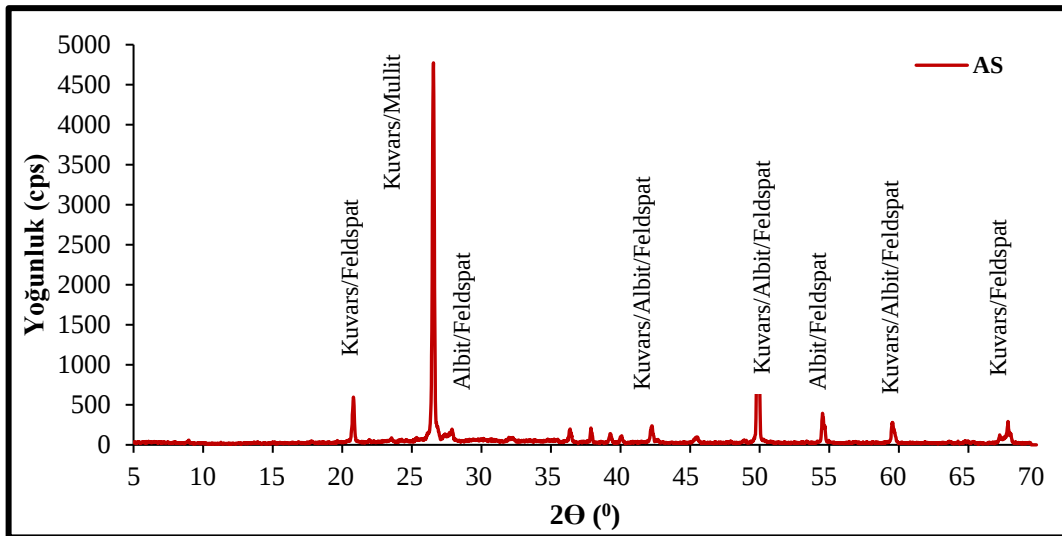
Şekil 6.79'da gösterilen %85CFUK + %15BA (A13) harcı için XRD deseni, kuvars ve mullit ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) ile borat minerallerine (CaB_2O_4) karşılık gelen belirgin pikler göstermektedir. Borat fazlarının varlığı, BA'nın geopolimer matrisine dahil edildiğini

göstermekte olup, malzemenin termal ve mekanik özelliklerini değiştirebilir. Bor bileşikleri, potansiyel olarak daha düşük termal iletkenlik ve iyileştirilmiş termal kararlılık sağlamakta olup, bu bileşimi geliştirilmiş termal dirence ihtiyaç duyulan uygulamalar için uygun hale getirmektedir.



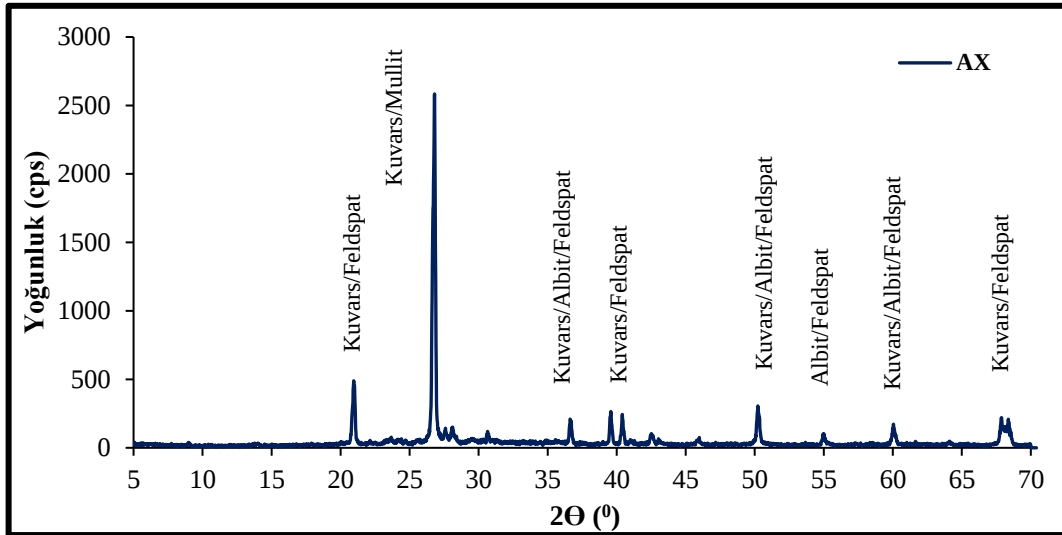
Şekil 6.79. A13 (%85CFUK+%15BA) harcının XRD deseni

Şekil 6.80’de BHA açısından optimum harç (AS) için XRD deseni, azalmış kristalin pikler ve belirgin bir amorf tepe ile dengeli bir bileşim sergilemektedir. Bu durum, çoğu hammaddenin reaksiyona girerek uyumlu bir N-A-S-H jel ağı oluşturduğu iyi optimize edilmiş bir karışımı işaret etmektedir. Reaksiyona girmemiş kristalin fazların azalması, yoğun ve homojen bir geopolimer matrisine işaret etmektedir.



Şekil 6.80. AS harcının XRD deseni

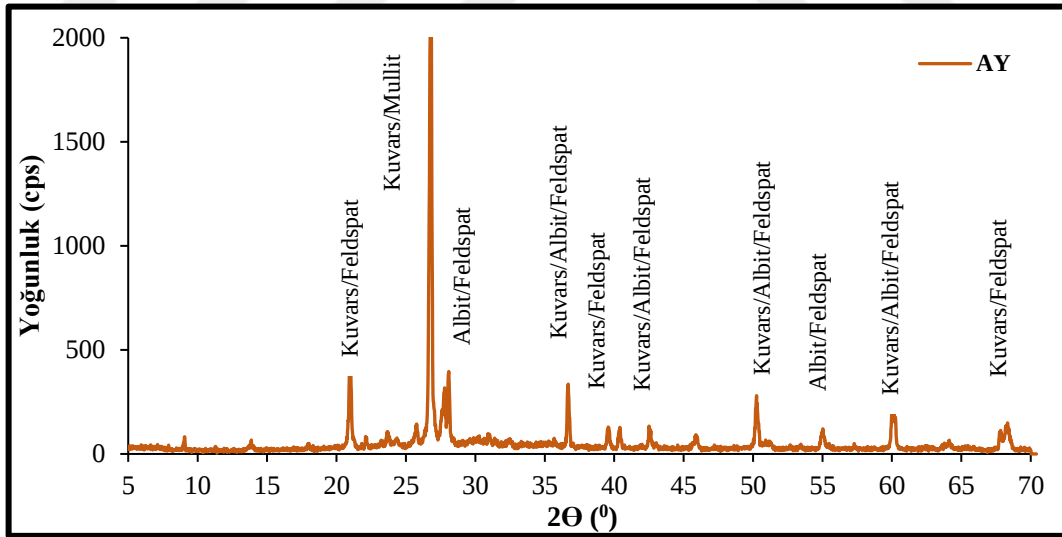
Şekil 6.81’de, basınç dayanımını maksimize etmek için tasarlanan optimum harç (AX) için XRD deseni, geopolimer matrisi içindeki faz bileşimi ve reaksiyon derecesi hakkında önemli ayrıntılar ortaya koymaktadır. Desen, 25-35° 2θ civarında belirgin bir amorf tepe göstermektedir, bu da yüksek bir N-A-S-H jel konsantrasyonunu işaret etmektedir. Bu amorf faz, geopolimerin mekanik özellikleri için kritik öneme sahiptir; tüm matrisi bir arada tutan birincil bağlayıcı olarak görev yapar. Önemli kristalin piklerin olmaması, UK ve eklenen silis veya alümina kaynakları da dahil olmak üzere başlangıç malzemelerinin geniş ölçüde çözündüğünü ve reaksiyona girdiğini göstermektedir. Bu tam reaksiyon, matris içinde kusur veya zayıf noktalar olarak davranabilecek reaksiyona girmemiş parçacıkların varlığını en aza indirmektedir. Sonuç olarak ortaya çıkan yoğun mikro yapı, yükün eşit dağılımını sağlayarak çatlak oluşumunu ve ilerleme olasılığını azaltarak malzemenin yüksek basınç dayanımına katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, alkali aktivatör konsantrasyonunun ve kürlenme koşullarının optimize edilmesi, bu yüksek reaksiyon derecesinin elde edilmesinde muhtemelen kritik bir rol oynamaktadır. Bu parametrelerin dikkatli bir şekilde ayarlanmasıyla, geopolimer, döküm için yeterli akışkanlık ile mekanik dayanım gelişimi için optimum reaktivite arasında bir denge sağlayabilir. İyi bütünleştirilmiş bir N-A-S-H jel ağı ile karakterize edilen mikro yapı, minimum porozite sergileyerek malzemenin yük taşıma kapasitesini daha da artırır.



Şekil 6.81. AX harcının XRD deseni

Şekil 6.82’de ısı iletkenlik açısından optimize edilen (AY) harç için XRD deseni, ısı transferini azaltmaya yönelik özel bir bileşim sunmaktadır. Özellikle belirli borat bileşiklerinin varlığı dikkat çekicidir. Bu bileşikler, düşük termal iletkenlikleri ve ısı akışını engelleme yetenekleri ile bilinir ve bu da onları geopolimerin termal yalıtım

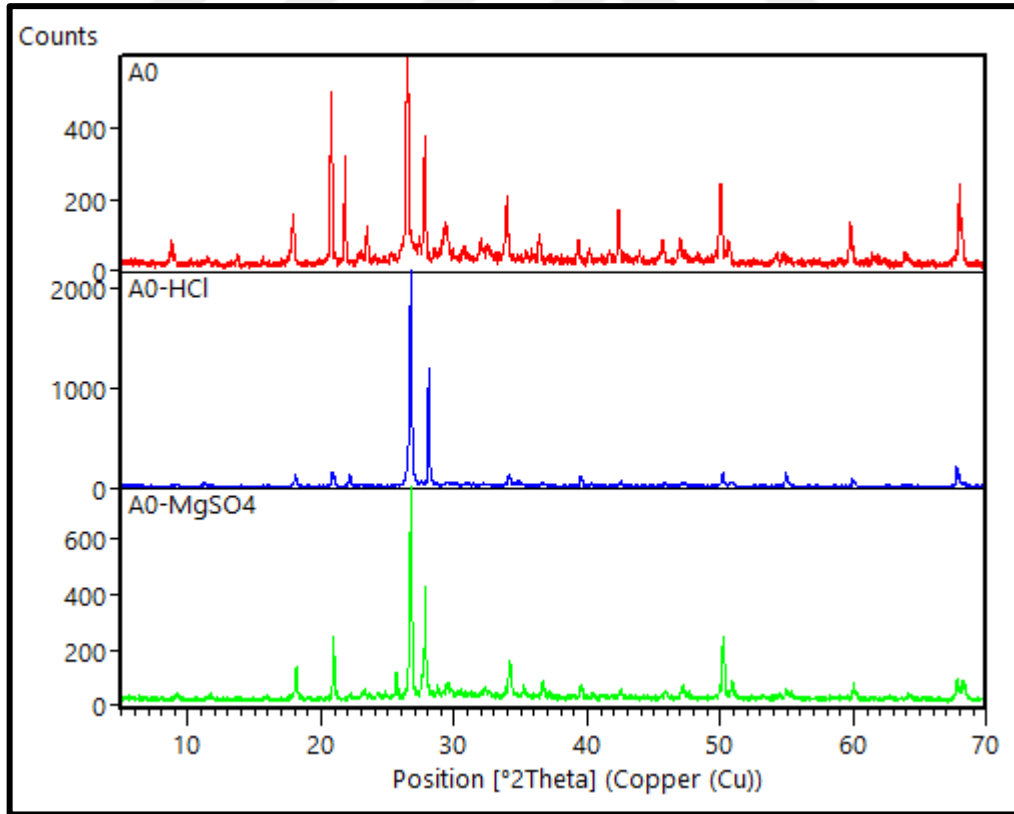
özelliklerini artırmak için değerli kılmalıdır. Borat bileşiklerine ek olarak, XRD deseninde, daha yüksek yoğunlukları ve termal köprüleme etkileri nedeniyle termal iletkenliği artırabilecek kuvars gibi daha yoğun minerallerle ilişkili piklerin azalması da görülebilir. Mikro yapı, geopolimerizasyon sürecinde oluşan ve hava hapsederek malzemenin efektif ısı iletkenliğini azaltabilen gözenek veya mikro boşluk ağı içerebilmektedir. Amorf ve kristalin fazlar arasındaki denge, istenen termal özelliklerin elde edilmesinde kritik öneme sahiptir. Yapısal bütünlüğe katkıda bulunan geniş bir N-A-S-H jel ağı, düşük iletkenlikli fazların stratejik olarak dahil edilmesiyle tamamlanmaktadır. Bu çift yönlü yaklaşım, malzemenin yeterli mekanik dayanımı korumasını sağlarken, termal yalıtkan olarak işlev görme yeteneğini de optimize etmektedir. Ayrıca, hammadde seçimi ve spesifik geopolimer formülasyonu, termal özelliklerin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Doğal olarak düşük termal iletkenliğe sahip veya gözenek oluşumuna katkıda bulunan öncül maddeler ve katkıların seçilmesiyle, genel termal performans, belirli uygulama gereksinimlerini karşılayacak şekilde ince ayar yapılabilir. Bu durum, geopolimerlerin hem mekanik hem de termal performans açısından uyarlanabilirliğini vurgulamakta olup, enerji verimliliğinin kritik olduğu inşaat uygulamaları için sürdürülebilir çözümler sunmaktadır.



Şekil 6.82. AY harcının XRD deseni

Farklı geopolimer formülasyonları arasındaki XRD desenlerinin analizi, hammadde bileşiminin nihai ürünün mikro yapısı ve özellikleri üzerindeki etkisini vurgulamaktadır. XRD aracılığıyla faz bileşiminin anlaşılmasıyla, basınç dayanımı, yoğunluk ve termal iletkenlik gibi özellikleri optimize ederek geopolimerleri belirli uygulamalar için uyarlamak mümkün hale gelmektedir.

HCl'ye ve $MgSO_4$ 'e maruz kalan A0 harcının XRD desenleri Şekil 6.83'te yer almaktadır. A0-HCl harcının asit saldırısına uğradığı ve mineral yapısında değişiklikler olduğunu görülmektedir. HCl, çimento hidratlarında çözünmeye ve ayrılmaya neden olmuştur. A0 harcında bulunan $Ca(OH)_2$ ve C-S-H gibi fazlar, asidik ortamlarda oldukça hassastır. Bu durum, XRD analizinde belirli piklerin azalmasına, kaybolmasına veya yeni fazların oluşumuna yol açabilmektedir. HCl ile reaksiyona giren $Ca(OH)_2$ çözünerek çözünebilir $CaCl_2$ dönüşmektedir. Bu nedenle, XRD analizinde $18^\circ 2\theta$ civarında görülen $Ca(OH)_2$ piki azalmıştır. Ayrıca, C-S-H fazının yapısı da asit etkisiyle bozularak XRD analizinde geniş ve belirgin olmayan C-S-H piklerinin azaldığı görülmüştür. HCl etkisiyle bozulan A0 harcında, yeni fazlar ve amorf yapılar oluşabilmektedir. Ayrıca, $CaCl_2$ gibi klorür içeren yeni bileşiklerin de oluşmuş olabileceği göz ardı edilmemiştir. Ancak bu bileşiklerin fazları çoğunlukla amorf yapıda olmasından dolayı XRD'de belirgin pik vermemektedir. Bu nedenle, HCl'ye maruz kalan çimento harcında XRD analizinde ana bileşen piklerinde azalma, bazı yeni fazların varlığı ve amorf yapının artışı gözlemlenmiştir.



Şekil 6.83. HCl'ye ve $MgSO_4$ 'e 360 gün maruz kalan A0 harcının XRD deseni

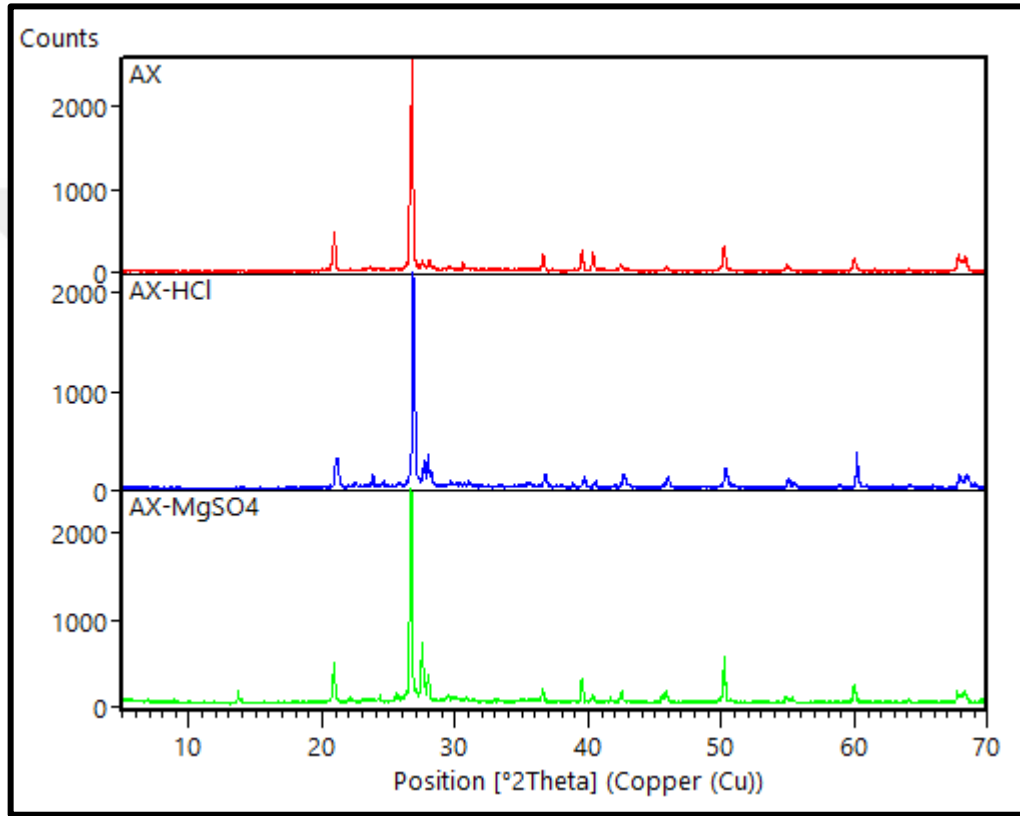
$MgSO_4$ 'e maruz kalan A0- $MgSO_4$ harcının XRD analizinde, $MgSO_4$ 'ün çimento hidratları ile reaksiyona girmesi sonucu önemli mineralojik değişiklikler meydana

gelmektedir. $MgSO_4$ çimentodaki $Ca(OH)_2$ ve C-S-H fazları ile reaksiyona girerek bu fazların ayrışmasına neden olmaktadır. $Ca(OH)_2$, Mg^{+2} ile reaksiyona girip çözünmesinden dolayı XRD analizinde görülen piki zayıflamaktadır. $MgSO_4$ saldırısı sonucunda A0 harcında yeni fazların oluşumu da beklenmektedir. Mg^{+2} ve SO_4^{-2} iyonlarının çimento matrisindeki bileşenlerle reaksiyona girmesi sonucu etrenjit ve alçıtaşı gibi sülfat fazları oluşabilmektedir. Etrenjit ve alçıtaşı oluşumundan sonra, sülfat saldırılarından dolayı süzülen kalsiyum, C-S-H jelinin bozulmasına neden olmaktadır. Bu süreç C-S-H jelinin sertliğini kaybetmesine ve çimento hamuru matrisinin bozulmasına yol açmaktadır. Alçıtaşı, genellikle $11,6^\circ$, $20,7^\circ$, $23,4^\circ$ ve $29,1^\circ$ 2θ açılarında pik verirken, etrenjit $9,1^\circ$ civarında karakteristik bir pike sahiptir. Ayrıca, Mg^{+2} çimento matrisindeki serbest kalsiyumla birleşerek brusit ($Mg(OH)_2$) formunda birikintiler oluşturmuştur bu faz ise XRD’de $18,6^\circ$ civarında pike sahiptir. Bu süreç, çimento hidratlarının ayrışması ve yeni oluşan fazların etkisiyle çimento harcının dayanıklılığını olumsuz etkilemiştir.

HCl’ye ve $MgSO_4$ ’e maruz kalan AX harcının XRD desenleri Şekil 6.84’te yer almaktadır. HCl’ye maruz AX-HCl harcının XRD analizi, geopolimer matrisinin asidik ortamda nasıl bozulduğunu ve mineral yapısının nasıl değiştiğini ortaya koymaktadır. Geopolimerler, amorf bir alüminosilikat yapıya sahip olduklarından asidik ortamlarda kimyasal kararlılıkları sınırlı olabilmektedir. HCl’nin etkisiyle geopolimer matrisinde özellikle Na alkali elementi çözünmüştür. Bu süreç, XRD analizinde geniş amorf tepe yoğunluğunda azalma olarak kendini göstermiştir. Geopolimer matrisinde bulunan alüminyum-silikat yapılarının çözünmesi sonucu XRD’de amorf yapıya özgü geniş piklerin (genellikle $20-30^\circ$ 2θ arasında) zayıflaması beklenmektedir. Asidik ortamda kalsiyum içeren AX harcında yeni fazlar oluşmuştur. HCl, kalsiyum içeriği ile reaksiyona girerek $CaCl_2$ fazların oluşmasına yol açmış olabilir ancak $CaCl_2$ amorf yapıya sahip olduğu için XRD’de belirgin pik vermemiştir. Sonuç olarak, HCl’ye maruz kalan geopolimer harcının XRD analizinde amorf yapının azalması ve bazı ana bileşenlerin kaybolması gözlemlenmiştir.

$MgSO_4$ ’e maruz kalan AX- $MgSO_4$ harcının XRD analizinde, SO_4^{-2} iyonlarının etkisiyle oluşan yeni fazların varlığı ve geopolimer matrisinde meydana gelen mineralojik değişiklikler gösterilmiştir. $MgSO_4$ saldırısı altında, C-S-H, C-A-S-H ve N-A-S-H gibi ana bağlayıcı fazlara ait karakteristik piklerin kaybolmasıyla gözlenmektedir. Bu bağlayıcı fazlar yerine XRD analizinde alçıtaşı ve brusit gibi yeni mineral fazlarına ait pikler ortaya çıkmaktadır. Literatürde C-S-H, C-A-S-H ve N-A-S-H fazlarının daha zayıf

bağlayıcı fazlar olan M-S-H ve M-A-S-H fazlarına dönüştürdüğü bildirilmiştir (İsmail vd. 2013, Alcamand vd. 2018). Amorf yapıya özgü geniş pikler daha belirgin bir hale gelmiştir. M-S-H ve M-A-S-H'nin spesifik olarak ayırt edilebilecek belirgin bir pikleri olmadığından, XRD analizinde bu fazların varlığı amorf yapıdaki yoğunlaşma veya geniş piklerin artmasıyla anlaşılmaktadır. Özellikle Mg^{+2} iyonunun alüminosilikat matrisi ile reaksiyona girmesi sonucu amorf faz yoğunluğu artar, fakat diğer kristal fazlar gibi keskin pike sahip olmadıklarından belirgin bir faz tanımlaması yapılamamıştır.

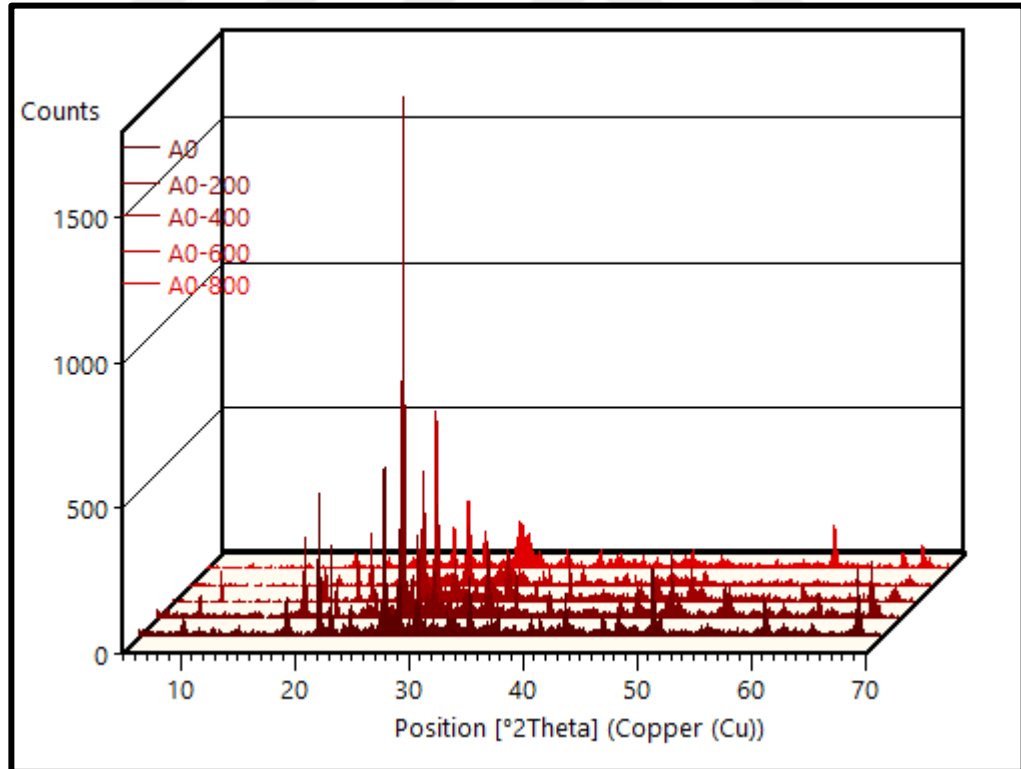
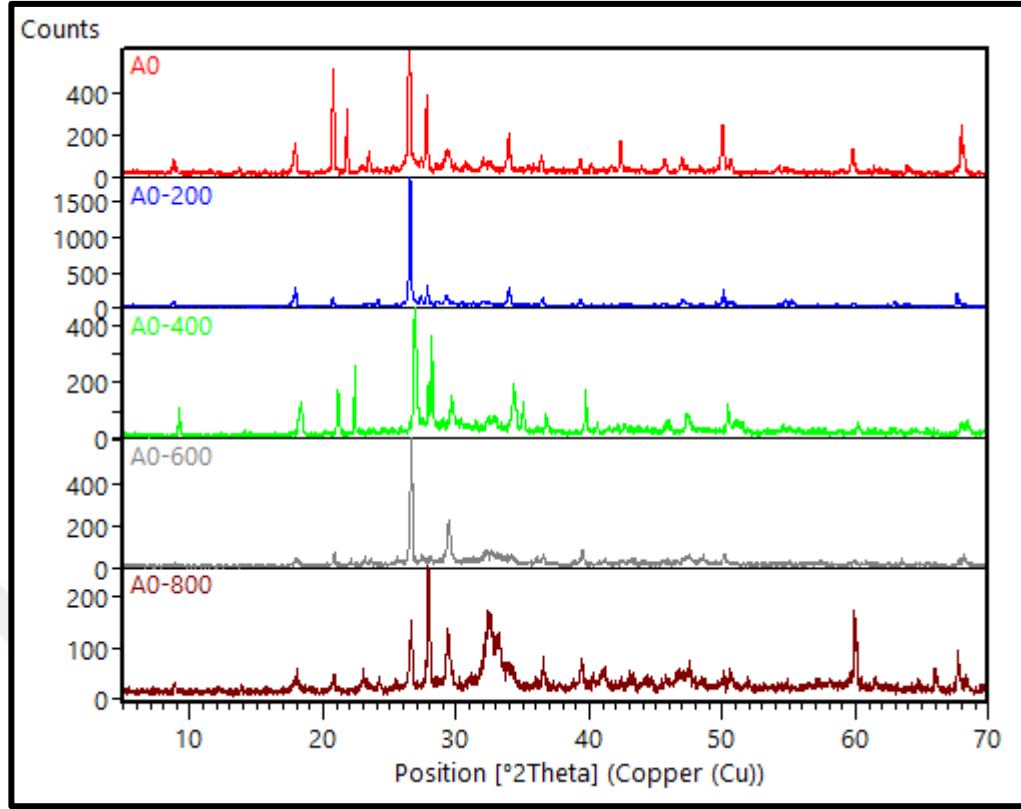


Şekil 6.84. *HCl'ye ve $MgSO_4$ 'e 360 gün maruz kalan AX harcının XRD deseni*

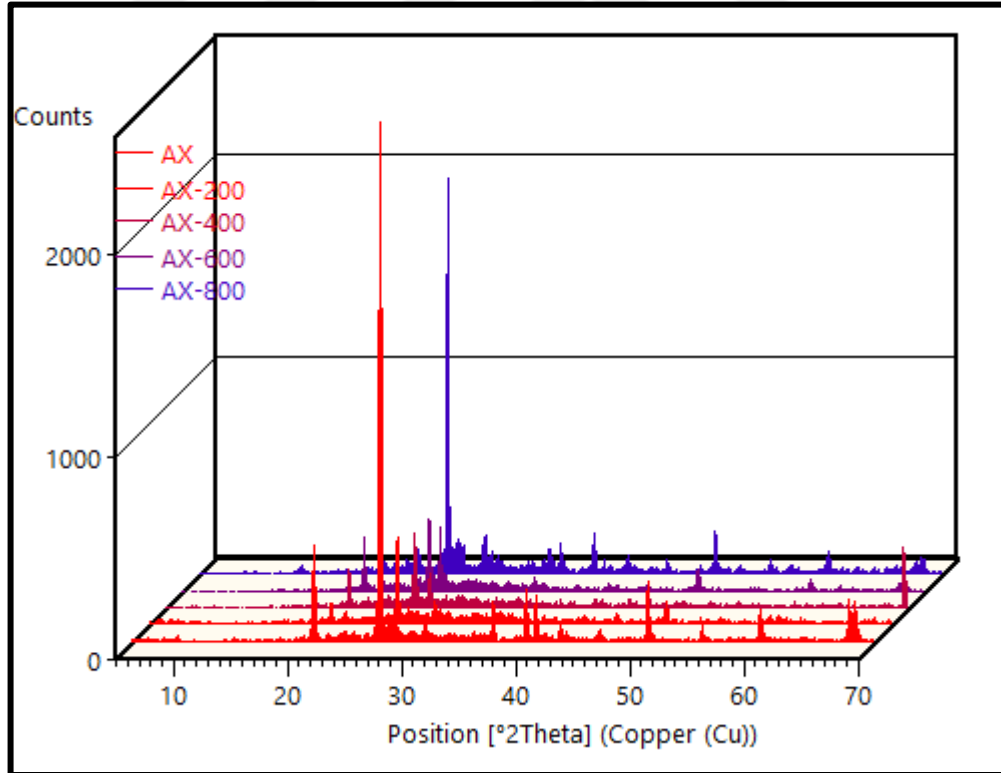
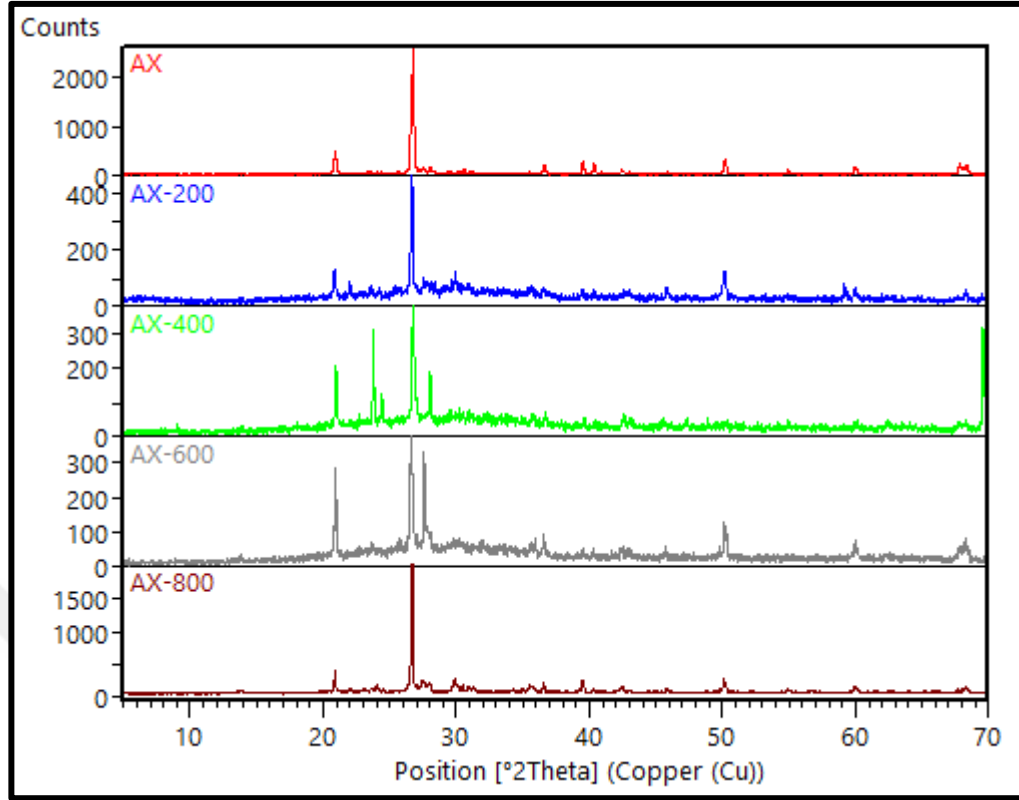
Yüksek sıcaklıklara maruz kalan A0 harcının XRD desenleri Şekil 6.85'te yer almaktadır. XRD analizinde mineral fazlarda belirgin değişiklikler gözlemlenmektedir. Farklı sıcaklık seviyeleri, çimento matrisinde çeşitli faz dönüşümlerine ve ayrışmalara yol açarak XRD desenlerinde pik değişimleri olarak kendini göstermektedir. 200°C'de hidrasyon ürünlerinde ciddi bir ayrışma görülmemiştir. C-S-H fazı ve $Ca(OH)_2$ hala kararlıdır, ancak nem kaybı ve bazı yapısal suyun uzaklaşması nedeniyle C-S-H fazına ait piklerde hafif bir azalma görülmüştür. $Ca(OH)_2$ pikleri (18° 2 θ civarında) hala belirgindir ve bu fazın varlığını koruduğu gözlemlenmiştir. 400°C'de $Ca(OH)_2$ yavaşça ayrışmaya başlar ve CaO oluşur. Bu ayrışma XRD analizinde piklerin kaybolmasına

neden olurken, yeni oluşan CaO fazı amorf veya düşük kristalli olduğundan, bu faz XRD'de belirgin pikler göstermemiştir. C-S-H fazı kısmen de olsa varlığını sürdürmüştür. Ancak su kaybı nedeniyle pik yoğunluğunda belirgin bir azalma gözlemlenmiştir. 600°C'de C-S-H fazı büyük oranda bozularak yapısını kaybetmiştir. Çimento matrisinde CaO miktarı artarken, Ca(OH)₂ tamamen ayrılmış olur. Ayrıca, A0 harcının mikro yapısında gözeneklilik artmıştır. 800°C'de ise çimento matrisinde termal bozulmalar en üst seviyeye ulaşmıştır. C-S-H ve Ca(OH)₂ fazları tamamen ayrılmış, büyük ölçüde CaO ve kalsit gibi termal olarak kararlı fazlara dönüşmüştür. Kalsit pikleri (29.4° ve 36° 2θ civarında) yoğunlaşırken, CaO fazı kristalleşmeye devam etmiş olabilmektedir. Bu sıcaklık seviyesinde XRD deseninde çoğunlukla CaO ve kalsit fazlarına ait pikler kalmıştır. Ayrıca amorf yapıdaki kayıplar ve matrisin yapısındaki gözeneklilik artışı belirgin hale gelmiştir. Sonuç olarak, yüksek sıcaklıklara maruz kalma çimento harcında özellikle Ca(OH)₂'nin ayrışması, C-S-H jelinin yapısal kaybı ve kalsit gibi termal olarak kararlı fazların oluşması ile XRD deseninde ciddi değişimlere neden olmuştur.

Yüksek sıcaklıklara maruz kalan AX harcının XRD desenleri Şekil 6.86'da yer almaktadır. XRD analizi, alüminosilikat matrisinde meydana gelen faz dönüşümleri ve yapısal değişikliklerle ilgili bilgi vermektedir. Geopolimerler amorf bir yapıya sahip olduklarından, sıcaklık arttıkça matris içerisindeki amorf ve kristal fazların davranışlarında belirgin değişiklikler gözlemlenmiştir. 21°, 26°, 36°, 39°, 41°, 46°, 51°, 56°, 61°, 64° ve 66° 2θ da albit ve feldspat için görülen XRD pikleri geopolimer harçlarda N-A-S-H, C-(N)-A-S-H ve C-A-S-H türü jel oluşumlarının varlığına işaret etmektedir. Bu jel oluşumlarının harçlardaki yoğunlukları harçlarda kullanılan bağlayıcı malzeme ve aktivatör içeriğine göre değişebilmektedir. 200°C'de geopolimer matrisinde gözle görülür bir ayrışma beklenmemektedir. Bu sıcaklık, geopolimerin amorf yapısını önemli ölçüde etkilememiştir ancak gözeneklerdeki serbest su buharlaşmış olabilir, bu durum XRD analizinde yoğunluğun hafif azalmasına yol açmıştır. N-A-S-H gibi jel fazlar genellikle 20-30° 2θ aralığında geniş bir amorf pik vermiştir ve bu pik büyük ölçüde korunmuştur. 400°C'de, geopolimer matrisindeki bazı yapısal su kayıpları artmıştır. N-A-S-H fazının kısmi bozulması başlamıştır. Bu sıcaklıkta geopolimer jellerdeki dehidrasyon nedeniyle, 20-30° 2θ aralığında görülen amorf piklerde azalma görülmüştür. 600°C'de, geopolimer matrisinde belirgin faz değişiklikleri başlamıştır. N-A-S-H jel fazı büyük ölçüde ayrılmaya uğramıştır ve XRD analizinde amorf pik yoğunluğunun azalmasıyla belirginleşmiştir.



Şekil 6.85. Yüksek sıcaklığa maruz kalan A0 harcının XRD desenleri

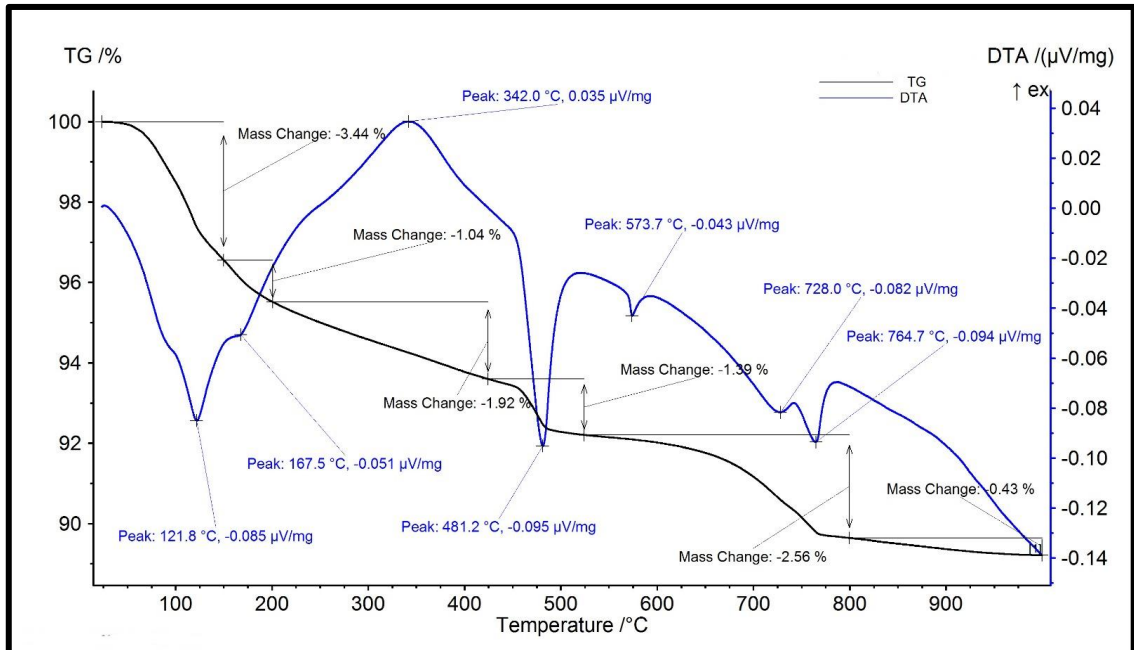


Şekil 6.86. Yüksek sıcaklığa maruz kalan AX harcının XRD desenleri

800°C'de, geopolimer matrisi daha ciddi yapısal değişimlere uğrar. N-A-S-H jeli tamamen yapısını kaybetmiş olur ve XRD'de amorf piklerin kaybolmasıyla sonuçlanmıştır. Bu sıcaklıkta alüminosilikat yapının kısmi kristalleşmesi gözlenir ve mullit gibi yüksek sıcaklığa dayanıklı fazlar oluşabilir. Mullit, XRD'de 16,4⁰, 25,9⁰, ve 33,1⁰ 2θ civarında karakteristik pikler gösterir. Ayrıca, yapısal bozulma nedeniyle mikroyapıda gözeneklerin genişlemesi ve yoğunluk azalması gerçekleşir. Sonuç olarak, XRD analizinde 800°C'de amorf yapının önemli ölçüde azalması ve bazı kristal fazlarının ortaya çıkması beklenir. Genel olarak, geopolimer harçta sıcaklık arttıkça amorf yapının kaybı, N-A-S-H jel fazının ayrışması ve yüksek sıcaklığa dayanıklı yeni kristal fazların oluşumu XRD analizinde gözlemlenmektedir. Ancak, AX harcının XRD piklerinde artış görülmüştür.

6.9.3. TGA-DTA analizi

TGA/DTA analizi, A0, A4, A13 ve AX harçlarının termal kararlılığını, bağlayıcı yapılarını ve bozunma davranışlarını incelemek için yapılmıştır. Böylece, özellikle yüksek sıcaklıklara maruz kalan malzemelerin dayanıklılık özellikleri hakkında bilgi sağlanarak, malzemelerin belirli uygulamalara uygun olup olmadığı değerlendirilmektedir.



Şekil 6.87. A0 harçının TG/DTA analizi

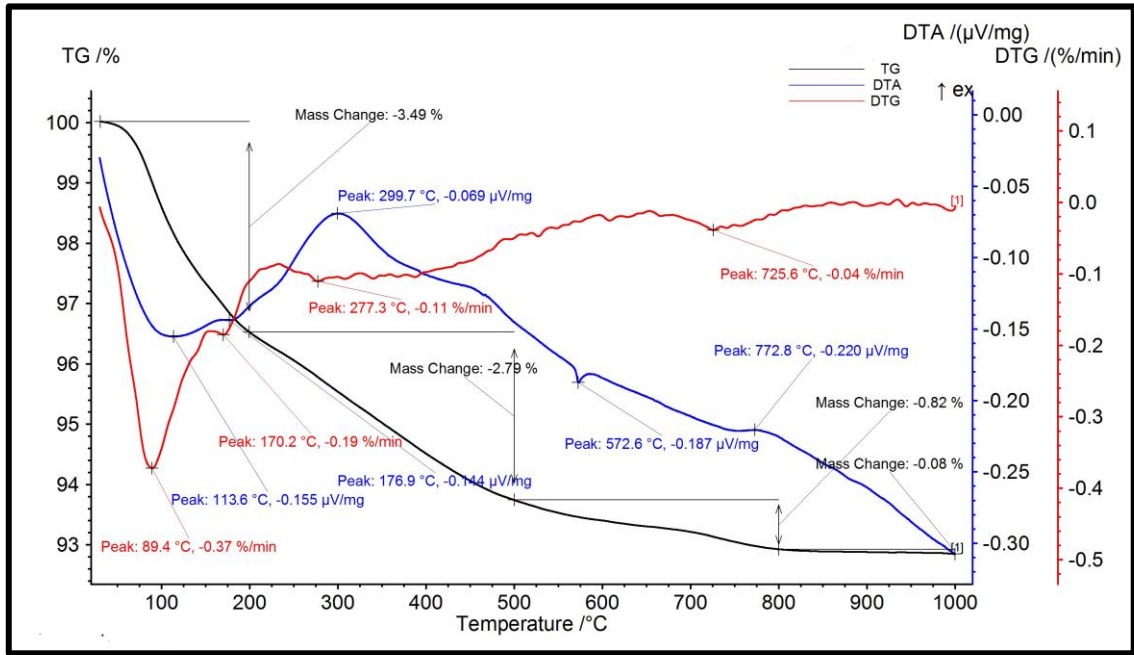
Şekil 6.87’de A0 harcının TG/DTA analizi verilmiştir. TGA/DTA analizinde A0 harcında gözlenen kütle kaybı eğrileri ve endotermik/ekzotermik tepkimeler, çimento içindeki bağlayıcı fazların ayrışma davranışlarını yansıtmaktadır. TG-DTA grafiği incelendiğinde 121,8⁰C, 167,5⁰C, 481,2⁰C, 573,7⁰C, 728⁰C ve 764,7⁰C sıcaklıklarında endotermik piklerin olduğu görülmüştür. 342⁰C, 522⁰C, 259⁰C, 746⁰C ve 790⁰C sıcaklıklarında ise ekzotermik pik değerleri gözlemlenmiştir. TG analiz sonucu göz önünde bulundurulduğunda 800⁰C sıcaklığın üzerinde kütle kaybı olmadığı görülmüştür. 50-200⁰C sıcaklık aralığında, başlangıçta Van der Waals çekim kuvvetlerinden etkilenmeyen kapiler su buharlaşır, ardından fiziksel bir süreç sonucunda katmanlı ve adsorbe olmuş su buharlaşır. Son olarak, kimyasal olarak C-S-H ile ilişkili su kaybolmaktadır (Bolina, 2016). C-S-H dehidrasyonu, mikro gerilmelerin gevşemesine neden olan ve geçici sünmeden sorumlu olan fizikokimyasal bir süreçtir. Bu süreç, 100⁰C’de başlar ve gözeneklerde su buharı birikmesine ek olarak çatlama ve gözeneklilik artışı ile çimento hamuru kaybını başlatır ve bu da betonda kabarmaya ve dökülmeye katkıda bulunur. Bu aşamada yaklaşık %3-4 civarında kütle kaybı görülmektedir. Sıcaklık arttıkça buharlaşma hızı arttığı için numune ağırlığında azalma meydana gelmektedir (Hewlett, 1998; Mehta ve Monteiro, 2006). 200-400⁰C sıcaklık aralığında, kil minerallerinde kimyasal olarak bağlı olan hidrasyon suyu serbest kalır. Genellikle bu aşamada %5-8 oranında kütle kaybı gözlenebilmektedir. Özellikle 400⁰C civarında portlanditin ayrışmaya başlaması gözenekliliği artırmaktadır (Taylor, 1997). Bu süreçte Ca(OH)₂, CaO ve suya ayrışır. Diğer bir değişiklik ise 650⁰C’nin üzerindeki sıcaklıklarda CaO ve CO₂’ye ayrışan CaCO₃ dekarbonizasyonudur. 700⁰C’de C-S-H fazı; belit, volastonit ve suya ayrışmaktadır. Bu da çimento hamurunun büzülmesine ve dayanım azalmasına neden olur. C-S-H ile ilişkili su kaybı, gözeneklilikte bir artışa neden olur ve dayanım kaybına katkıda bulunur (Castellote vd., 2004; Bolina, 2016). Bu analizde ilk sıcaklık aralığında su kaybı ve hidrasyon ürünlerinin dekompozisyonu gözlemlenirken, yüksek sıcaklıklarda ise özellikle dekarbonizasyon ve ana bileşenlerin bozunması gözlemlenmiştir. DTA eğrisinde oluşan endotermik tepe, hidrate fazların ayrışması ile ilişkilendirilebilir.

Şekil 6.88’de A4 harcının TG/DTA analizi verilmiştir. TGA/DTA analizinde, A4 harcında daha yüksek kütle kaybı nedeniyle daha fazla reaksiyon ürünü oluşmuş ve kütle kaybı daha az gözlenmiştir. TG-DTA grafiği incelendiğinde 113,6⁰C, 176,9⁰C ve 572,6⁰C, sıcaklıklarında endotermik piklerin olduğu görülmüştür. 299,7⁰C ve 772,8⁰C

sıcaklıklarında ise ekzotermik pik değerleri gözlemlenmiştir. TG analiz sonucu göz önünde bulundurulduğunda 800°C sıcaklığın üzerinde kütle kaybı olmadığı görülmüştür. 50-200°C sıcaklık aralığında, UK yüzeyinde veya bünyesinde adsorbe olmuş serbest suyu kaybeder. Yaklaşık %1-2 oranında kütle kaybı meydana gelir ve buharlaşma artan sıcaklıkla hızlanır. Bu su kaybı, UK'nin mikro yapısında gözle görünür bir değişiklik yaratmamaktadır (Wang ve Wu, 2006). 200-600°C sıcaklık bölgesinde, amorf fazların hidratları serbest kalmaktadır. Bu süreçte UK'de %3-6 arasında bir kütle kaybı gözlemlenir. Sıcaklık arttıkça bazı mineral yapıların ayrışması başlar ve UK'nin reaktivitesi artar (Bentz vd., 2011). 800-900°C sıcaklık aralığında, amorf fazların kristalleşme eğilimi artar ve UK'deki serbest silis kısmen kristal yapı kazanır. Ayrıca, CaO içeriği yüksek olan uçucu küllerde bu sıcaklıkta CaO oluşumu başlayabilir. Kütle kaybı bu aşamada %8-10 seviyesine ulaşabilir (Paya vd., 2000). 50-200°C sıcaklık aralığında, SD'de adsorbe edilmiş serbest suyun uzaklaşması görülür. Bu aşamada %1-2 civarında kütle kaybı meydana gelir. Su kaybı, SD'nin yüzey alanını korur ve reaktivitesini etkilemez (Garg ve Sing, 1996). 200-600°C sıcaklık aralığında, SD'de düşük miktarda bulunan yüzey oksijen grupları ayrılarak oksijen içeren fonksiyonel grupların kopması sonucu bir miktar kütle kaybı yaşanır. Bu aşamada kütle kaybı yaklaşık %3-5 civarındadır. Amorf yapının büyük ölçüde korunması, SD'nin yüksek sıcaklık reaktivitesini artırır. 600-800°C sıcaklık aralığında, amorf silis kristalize olmaya başlar ve silika yapısında kısmi kristalleşme gözlenir. SD'nin reaktivitesi azalır ve kütle kaybı %6-8 seviyesine ulaşır. Bu kristalleşme süreci, SD'nin puzolan özelliğini sınırlamaktadır. Bu harçta, SD ve CFUK arasındaki uyumlu yapı, amorf fazların oluşumunu desteklemiş ve böylece matrisin termal dayanımı artırılmıştır.

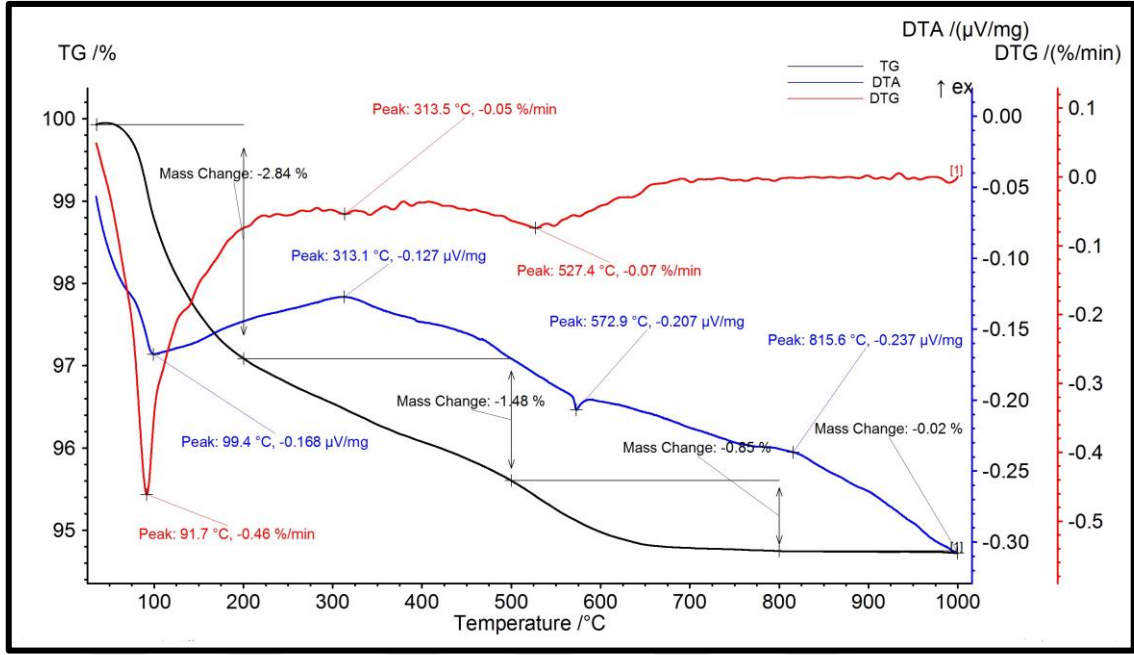
Şekil 6.89'da A13 harcının TG/DTA analizi verilmiştir. TGA analizinde, yüksek Na konsantrasyonu nedeniyle reaksiyon derecesinin diğer harçlara göre daha fazla olduğu ve bu nedenle kütle kaybının daha düşük olduğu görülmektedir. TG-DTA grafiği incelendiğinde 99,4°C ve 572,9°C, sıcaklıklarında endotermik piklerin olduğu görülmüştür. 313,1°C ve 815,6°C sıcaklıklarında ise ekzotermik pik değerleri gözlemlenmiştir. TG analiz sonucu göz önünde bulundurulduğunda 600°C sıcaklığın üzerinde kütle kaybı olmadığı görülmüştür. Literatürdeki çalışmalara göre boraks pentahidratın ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) kalsinasyonu, 73-535°C aralığında, yaklaşık %30 kütle kaybı ile gerçekleşmektedir (Şahin ve Bulutcu, 2003). Proses, yapıdan hidroksil grubunun uzaklaşması ile tamamlanmaktadır (Şahin ve Bulutcu, 2002). Kaolinitin ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$)

dehidrasyonu sonucunda metakaolin ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$) oluşumunun ise 500-600°C aralığında gerçekleştiği bilinmektedir (Cardarelli, 2008). Buna ek olarak, kil içerikli malzemelerin içerisinde bulunan dolomitin ve kalsitin dekarbonizasyon yoluyla dekompoze olmaya başladığı sıcaklıklar ise 600°C ve 800°C olarak belirtilmektedir (Trindade vd., 2010). Aynı zamanda, doğal dolomit mineralinin içerisinde bulunan dolomitin 600°C, kalsitin ise 700°C sıcaklığın üzerinde bozunmaya başladığını ifade eden bir çalışma da bulunmaktadır (Sasaki vd., 2013).

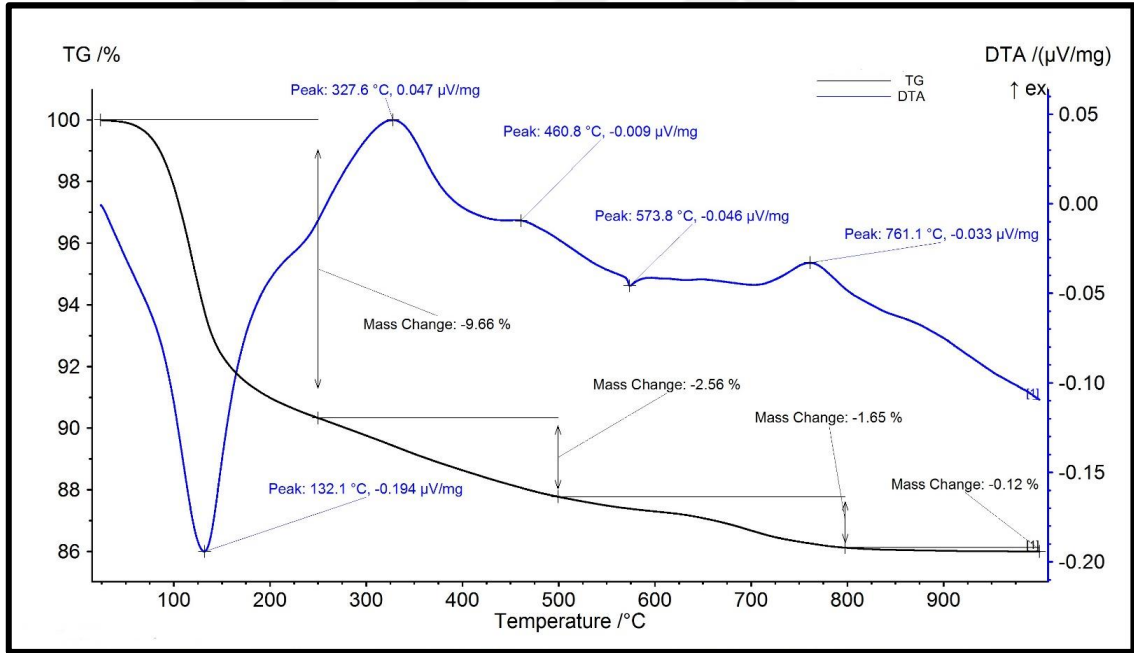


Şekil 6.88. A4 harcının TG/DTA analizi

Bu bilgilerden yola çıkılarak 99,4°C sıcaklıkta görülen endotermik pik değerinin, harcın içerisindeki kimyasal bağlı olmayan/olan suyun uzaklaştığı sıcaklığı belirtmektedir. Yaklaşık olarak 600°C sıcaklığa kadar olan %5 değerine yakın kütle kaybının, boraks pentahidrat ve kaolinitin yapısında bulunan su ve hidroksil gruplarının uzaklaşmasına bağlı olduğu düşünülmektedir. Literatürde yar alan bilgilere göre çalışmalar incelendiğinde doğal dolomit ve kalsitin bozunma reaksiyonlarının 950°C'ye kadar devam ettiği belirtilmiştir (Gunasekaran ve Anbalagan, 2007; McIntosh vd., 1990). Ancak TG analiz sonuçlarına göre, sistemde 600°C'den sonra kütle kaybı görülmemiştir. Bu sonuç, bozunma reaksiyonlarının yaklaşık 300-350°C daha düşük sıcaklıkta tamamlandığını ifade etmektedir.



Şekil 6.89. Al3 harcını TG/DTA analizi



Şekil 6.90. AX harcının TG/DTA analizi

Şekil 6.90’da AX harcının TG/DTA analizi verilmiştir. TGA analizinde, bu harçta UK, BA ve SD’nin varlığı nedeniyle belirgin bir kütle kaybı gözlemlenmiştir. TG-DTA grafiği incelendiğinde 132,1°C ve 573,8°C, sıcaklıklarında endotermik piklerin olduğu görülmüştür. 327,6°C, 460,8°C ve 761,1°C sıcaklıklarında ise ekzotermik pik değerleri gözlemlenmiştir. TG analiz sonucu göz önünde bulundurulduğunda 800°C sıcaklığın üzerinde kütle kaybı olmadığı görülmüştür. Yukarıda verilen açıklamalara göre ilk

sıcaklık aralığında gözeneklerdeki suyun buharlaşması sonucu kütle kaybı gözlemlenirken, DTA eğrisinde düşük sıcaklık aralığında endotermik tepkimeler belirgindir. Bor bileşiklerinin ayrışma sıcaklıkları, harcın termal kararlılığına katkıda bulunur. Ayrıca SD'nin yapıya katkısı sayesinde yoğun bir matris elde edilerek termal stabilite artırılmıştır.

6.9.4. SEM-EDX analizi

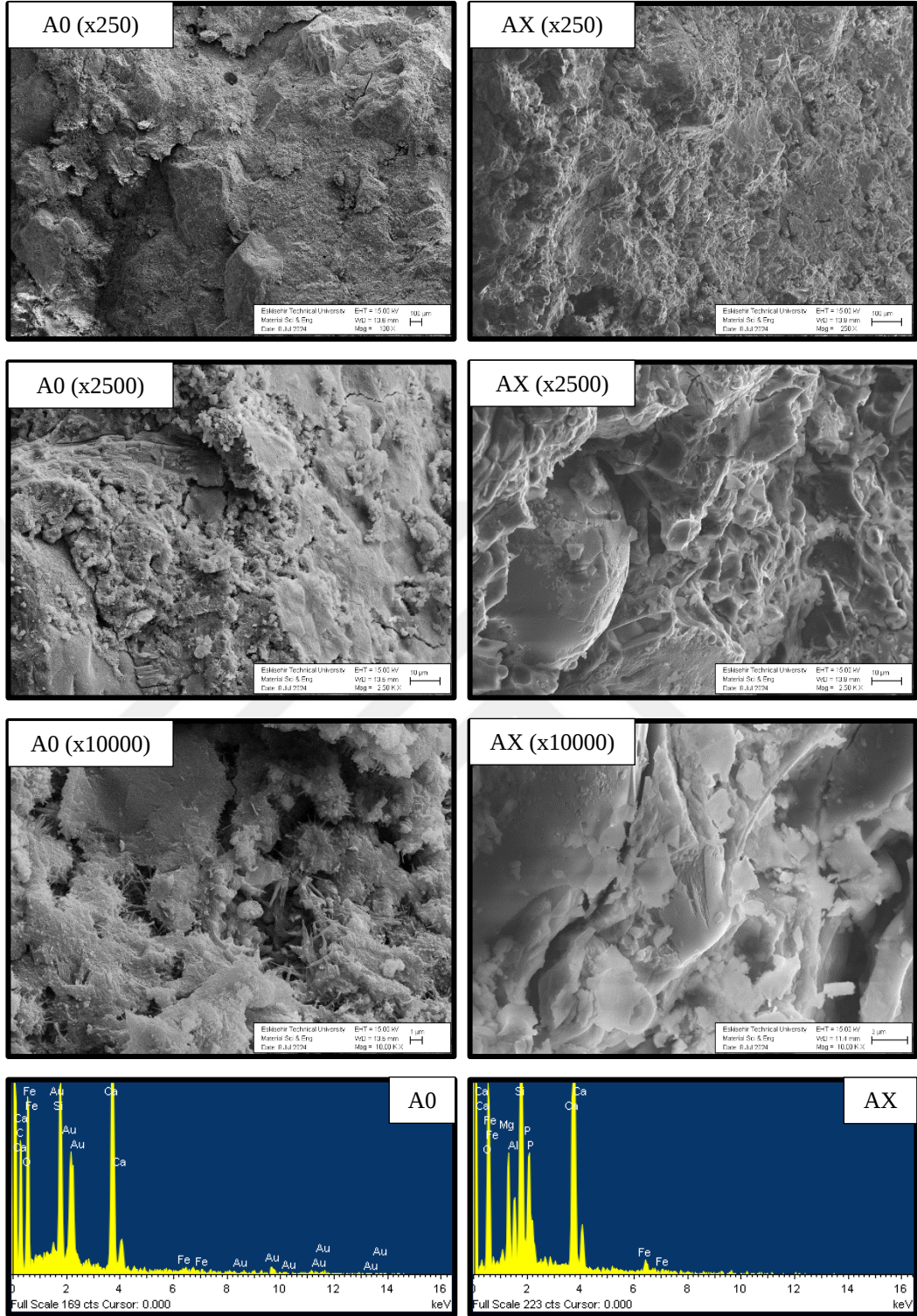
SEM/EDX analizi, A0 ve AX harçları ile asite, sülfata ve yüksek sıcaklığa maruz kalan harçlar üzerinde yapılmıştır. Harçların kendine özgü çeşitli yapısal özelliklerini ve bileşimsel karakteristiklerini ortaya çıkarmak için inceleme farklı büyütme oranlarında (250x, 25000x ve 10000x) gerçekleştirilmiştir.

25°C de bekletilen A0 harcında Portland çimentosunun ana elementleri olan Ca, Al, Si, Fe ve O elementlerinin yanında C elementi de görülmüştür. Düşük bir büyütmede (x250) A0 harcının SEM görüntüleri nispeten yoğun ve kompakt bir mikro yapı ortaya koymaktadır. Yüzey, hidratlı çimento hamurunun karakteristiği olan içsel gözeneklilik ve mikro çatlakların göstergesi olan görünür çatlaklar ve boşluklarla düzensiz görünmektedir. Bu düzensiz yüzey, gerilim konsantrasyon noktaları nedeniyle daha zayıf mekanik özelliklere yol açabilmektedir. Daha yüksek bir büyütmede (x2500 ve x10000), SEM görüntüleri iğne benzeri etrenjit kristallerinin ve altıgen Portlandit plakalarının varlığını göstermektedir. Bu fazlar, Portland çimentosunun tipik hidrasyon ürünleri olup, mekanik mukavemete katkıda bulunurken aynı zamanda nem girişi için yollar sağlayarak donma-çözülme döngülerine veya kimyasal etkilere karşı dayanıklılığı olumsuz yönde etkilemektedir. Şekil 6.91'da verilen A0 harcının SEM analizi, çatlakların, boşlukların ve iğne benzeri etrenjit kristallerinin varlığını göstermektedir.

25°C de bekletilen AX harcında bağlayıcıların temel elementleri olan Ca, Na, Al, O ve Si elementleri gözlenmiştir. Bu elementlerin yanında P, K ve Mg elementleri de ayrıca görülmüştür. AX harcı görüntüleri, x250 büyütmede, A0 harcıyla karşılaştırıldığında daha iyi bir partikül dağılımı ve bağlanma özellikleri sergilemektedir. Partiküller matris içinde daha homojen dağılmış görünmekte, bu da yapıda yük transferinin daha iyi sağlandığını düşündürmektedir. Ayrıca, büyük çatlak ve boşlukların olmaması, geopolimer matris içinde üstün bir bağlanma mekanizmasına işaret etmektedir. Özellikle x2500 ve x10000 büyütme oranlarında, A0 harcına kıyasla oldukça farklı bir mikro yapı gözlemlenmiştir. Matris, geopolimerlerde birincil bağlayıcı faz olan amorf bir alüminosilikat jel tarafından domine edilmektedir. Bu jel, boşlukları etkili bir şekilde

doldurabilen ve gözenekliliği azaltan yoğun bir ağ oluşturur, böylece harcın mekanik özelliklerini ve dayanıklılığını artırır. Şekil 6.91’da verilen AX harcının SEM analizi, daha az çatlak içeren ve iyileştirilmiş partikül dağılımına sahip yoğun bir amorf alüminosilikat jel matrisini göstermektedir. SEM analizlerinde gözlenen boşluksuz, sürekli ve jelimsi alanlar saf geopolimer bağlayıcının oluştuğunu göstermektedir (He vd. 2012). Metakaolin temelli geopolimerlerin mikroyapıları neredeyse bütün bir jel fazından oluşurken, UK tabanlı geopolimerlerin mikroyapıları jel ile bağlanmış kül kompoziti olarak tanımlanabilir (Duxon vd. 2007b).

SEM ile yapılan analizlerde numunelerde mikro çatlaklar gözlenmiştir. Burada mikro çatlaklar, analizlerden önce numunelere uygulanan basınç dayanımı testlerinde yüklemelerden ve kür işleminde suyun buharlaşması esnasında büzülmeden kaynaklanabilmektedir. Geopolimer numunelerinin bazılarında kırılan yüzeylerde büyük ve yarı küresel boşluklar gözlenmiştir. Bu boşluklar geopolimer oluşumu için hammaddelerin karıştırılması veya hazırlanan karışımın kalıplara dökülmesi esnasında içeride kalan hava kabarcıklarından veya suyun buharlaşmasının ardından oluştuğu düşünülmektedir. Bazı geopolimerlerde iğne şeklinde parçacıklar veya kristaller oluşabilmekte, iğne şeklindeki parçacıkların, basınç dayanımı testlerinin ardından kırılmış UK parçacıklarının etrafında oluştuğu düşünülmektedir. İğne şeklindeki parçacıklar incelendiğinde geopolimeri oluşturan Na, Al, Si, O gibi temel elementlere ek olarak Ca ve Fe elementleri de gözlenmiştir. İğne şeklindeki parçacıkların dağınık ve gözenekli yapılarından dolayı elektronlar matrise de temas edebilmekte bu da elementlerin iğne şeklindeki parçacıklardan mı yoksa matristen mi kaynaklandığının anlaşılmasını zorlaştırmaktadır. UK’nin karmaşık kimyasal yapısından dolayı bu yeni oluşan iğne şeklindeki parçacıklar kesin olarak tanımlanamayıp Na_2CO_3 , CaCO_3 veya demir oksitler de olabilmektedir. Prizma şeklinde oluşan parçacıklar ise geopolimer olmayıp Na_2O veya Na_2CO_3 mikrokristalleridir. Alkalitenin yüksek olmasına bağlı olarak kür işlemi esnasında suyun buharlaşmasının ardından reaksiyona girmemiş NaOH çökelek oluşturabilmekte, diğer bir taraftan çözünmüş olan NaOH ise reaksiyona girerek Na_2CO_3 meydana getirebilmektedir (He vd. 2012).



Şekil 6.91. A0 ve AX harcının SEM/EDX analizleri (250x, 2500x ve 10000x)

A0 harcının EDX analizi, kimyasal ve yapısal özelliklerini anlamak için çok önemli olan malzemenin kapsamlı bir element bileşimini sağlamaktadır. EDX analiz sonuçları, C, Si, Ca ve Fe gibi ana elementlerin varlığını ve referans olarak Al ve Au gibi ek eser elementlerin varlığını göstermektedir. Analiz, Ca ve Si elementlerinin baskın elementler

olduğunu ve çimentonun birincil bileşenlerini yansıttığını göstermektedir. Bu elementler, çimentoya bağlayıcı özelliklerini sağlayan hidrasyon ürünlerinin oluşumunda temeldir. Ayrıca C, karbonatlaşma sürecinin veya hammadde olarak kireç taşının varlığının göstergesidir. Elementlerin ağırlık yüzdeleri O (%50), C (%13,48-12,59), Si (%6,15-5,38), Ca (%16,14-18,27), Fe (%0,77), Al (%0,69-0,59) ve Au (%12,38-17,67) şeklindedir. Bu değerler, A0 harcının, mukavemet gelişimi için çok önemli olan C-S-H oluşumuyla sonuçlanan standart hidrasyon ve karbonatlaşma işlemlerinden geçtiğini göstermektedir. Yüksek Ca ve Si içeriği, malzemeye bağlayıcı özelliklerini kazandıran hidrasyon reaksiyonları için gerekli olan kalsiyum silikat fazlarının yaygınlığını doğrulamaktadır. Belirlenen CaO ve SiO₂ gibi bileşikler, çimentolu malzemelerde mekanik mukavemet ve dayanıklılığın gelişimi için çok önemli olan C-S-H ve Ca(OH)₂ oluşumundaki ana reaktanlara karşılık gelmektedir. Al₂O₃'ün az miktarda bulunması, kalsiyum alüminat fazlarının oluşumunu artırabilir ve harcın erken mukavemetine katkıda bulunabilir. Au'nun varlığı ise deneysel koşullardan kaynaklanmaktadır. Element dağılımı, harcın beklenen kimyasal yapısını doğrulamaktadır.

AX harcının EDX analiz sonuçları, Na, Mg, Al, Si, P, Ca ve Fe gibi temel elementlerin varlığını göstermektedir. Örneğin, bir spektrum Na (%6,98), Mg (%2,43), Al (%7,49), Si (%27,68), K (%1,96), Ca (%3,01), Fe (%5,15) ve O (%45,30) için ağırlık yüzdelerini göstermektedir. Bu elementler oksit formlarında mevcuttur ve geopolimer ağının oluşumundaki rolleri nedeniyle SiO₂ ve Al₂O₃ özellikle önemlidir. Yüksek Si içeriği (bazı örneklerde %31,49'a kadar) ve belirgin Al varlığı, geopolimer matrisinin temelini oluşturan alüminosilikat türlerinin yaygınlığını göstermektedir. Genellikle alkali aktivatörler aracılığıyla eklenen Na varlığı, bunların alüminosilikat öncüllerini çözme ve geopolimerizasyon reaksiyonunu kolaylaştırmadaki rolünü vurgulamaktadır. Geleneksel çimentoya kıyasla daha düşük miktarlarda mevcut olmasına rağmen Ca, geopolimerin mekanik özelliklerine katkıda bulunabilen bir miktar C-A-S-H veya C-S-H oluşumunu göstermektedir.

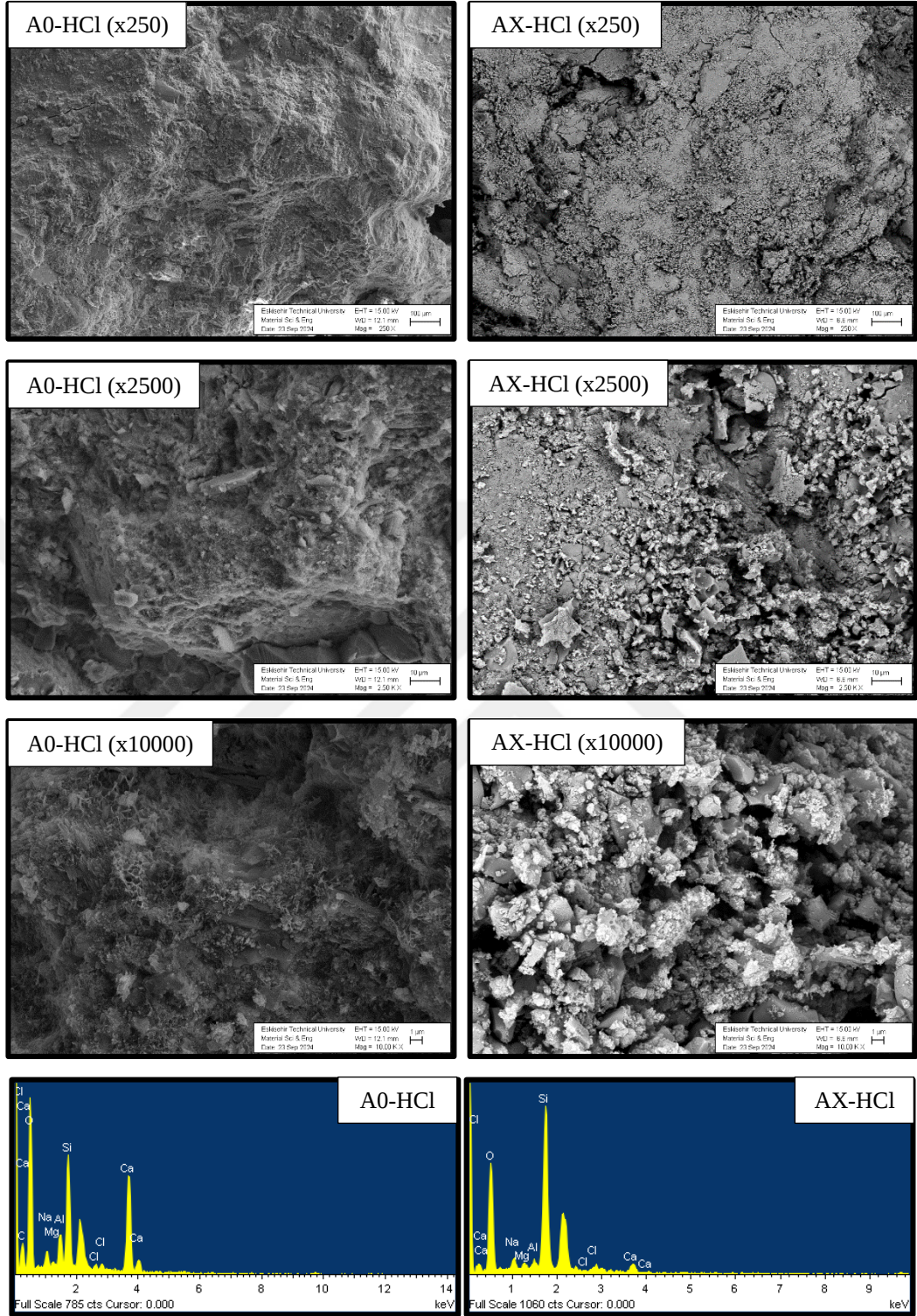
Element analizi, malzemenin yapısal bütünlüğü ve dayanıklılığı için gerekli olan güçlü bir alüminosilikat ağının varlığını doğrulamaktadır. Yüksek Si ve Al içeriği, Na varlığıyla birlikte, birçok geopolimer sisteminde birincil bağlayıcı faz olan N-A-S-H jelinin oluşumunu göstermektedir. N-A-S-H jeli, yüksek basınç dayanımı ve kimyasal saldırıya karşı direnç sağlayan üç boyutlu bir Si-O-Al bağları ağı oluşturur. Bu faz, geleneksel Portland çimento harcındaki C-S-H fazına benzer, ancak agresif ortamlarda

üstün kimyasal direnç ve dayanıklılık sağlamaktadır. Ek olarak, Ca varlığı, geopolimerin dayanıklılığını ve dayanımını artırabilen C-A-S-H gibi ek bağlayıcı fazların potansiyel oluşumuna işaret etmektedir. Jeldeki Al varlığı, jel ağı içinde ek çapraz bağların oluşumuna yol açarak daha yoğun ve daha kararlı bir mikro yapı ile sonuçlanmaktadır.

HCl'de 360 gün bekletilen A0 harcının SEM analizi Şekil 6.92'de verilmiştir. HCl çözeltilerine maruz kalma, çimento matrisine ciddi zararlar vermiştir. HCl çimento matrisindeki $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'yi çözerek Ca^{+2} iyonlarını uzaklaştırır. SEM görüntülerinde, bu süreç sonucu mikro çatlaklar ve gözeneklilikte artış gözlemlenmiştir. HCl etkisiyle çimentoda CaCl_2 oluşabilmektedir. Ayrıca, C-S-H fazı da saldırıya uğrayarak çözülür ve SEM'de daha bozulmuş, düzensiz bir mikroyapı izlenebilmektedir. Sürekli kimyasal saldırı, yüzeyde malzeme kaybına neden olmaktadır.

A0-HCl harcının EDX analizi, kimyasal ve yapısal özelliklerini anlamak için çok önemli olan malzemenin kapsamlı bir element bileşimini sağlamaktadır. EDX analiz sonuçları, C, O, Ca ve Cl gibi elementlerin varlığını göstermektedir. Analiz, Ca ve O elementlerinin baskın elementler olduğunu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'nin çözüldüğünü göstermektedir. Ayrıca Ca ve Cl, asite maruz kalmanın bir sonucu olan CaCl_2 varlığının göstergesidir. Elementlerin ağırlık yüzdeleri O (%54,78), C (%12,27), Si (%10,22), Ca (%17,38) ve Cl (%0,83) şeklindedir.

HCl'de 360 gün bekletilen AX harcı asidik bir ortamda uzun süre kaldığında, özellikle UK ve SD üzerindeki etkiler gözlemlenebilmektedir. HCl ortamında, geopolimer harcın N-A-S-H jelindeki Na iyonları çözünerek yıkanır; bu durum, jel yapısının bozulmasına ve stabilitesinin azalmasına yol açmaktadır. SEM analizinde, jel yapısının zayıfladığı ve mikro çatlakların oluştuğu görülmüştür. Ayrıca, asidik ortam N-A-S-H jelinin Al ve Si zincirlerini bozarak gözenekliliği artırarak, jeli daha amorf bir yapıya dönüştürür. Aynı zamanda HCl, AX harç matrisindeki Ca içeriğini çözerek mikro çatlaklar ve gözeneklilik artışına neden olmaktadır. Ancak, A0 harcına göre daha düşük Ca içeriğine sahip olan geopolimer harcında Ca kaybı sınırlı düzeyde olabilmektedir. Sonuç olarak, Ca fazlarının çözülmesi, matrisin daha gözenekli hale gelmesine neden olduğu için SEM görüntülerinde mikro gözenekler ve çatlak oluşumunun daha yaygın olduğu görülmüştür. AX-HCl harcının EDX analiz sonuçları, C, O, Ca ve Cl gibi elementlerin varlığını göstermektedir. Ca ve Cl, asite maruz kalmanın bir sonucu olan CaCl_2 varlığının göstergesidir. Elementlerin ağırlık yüzdeleri O (%46,31), Na(%4,76), Al(%11,43), Si (%28,92), Ca (%6,51) ve Cl (%0,47) şeklindedir.



Şekil 6.92. HCl'ye 360 gün maruz kalan A0 ve AX harcının SEM/EDX analizleri (250x, 2500x ve 10000x)

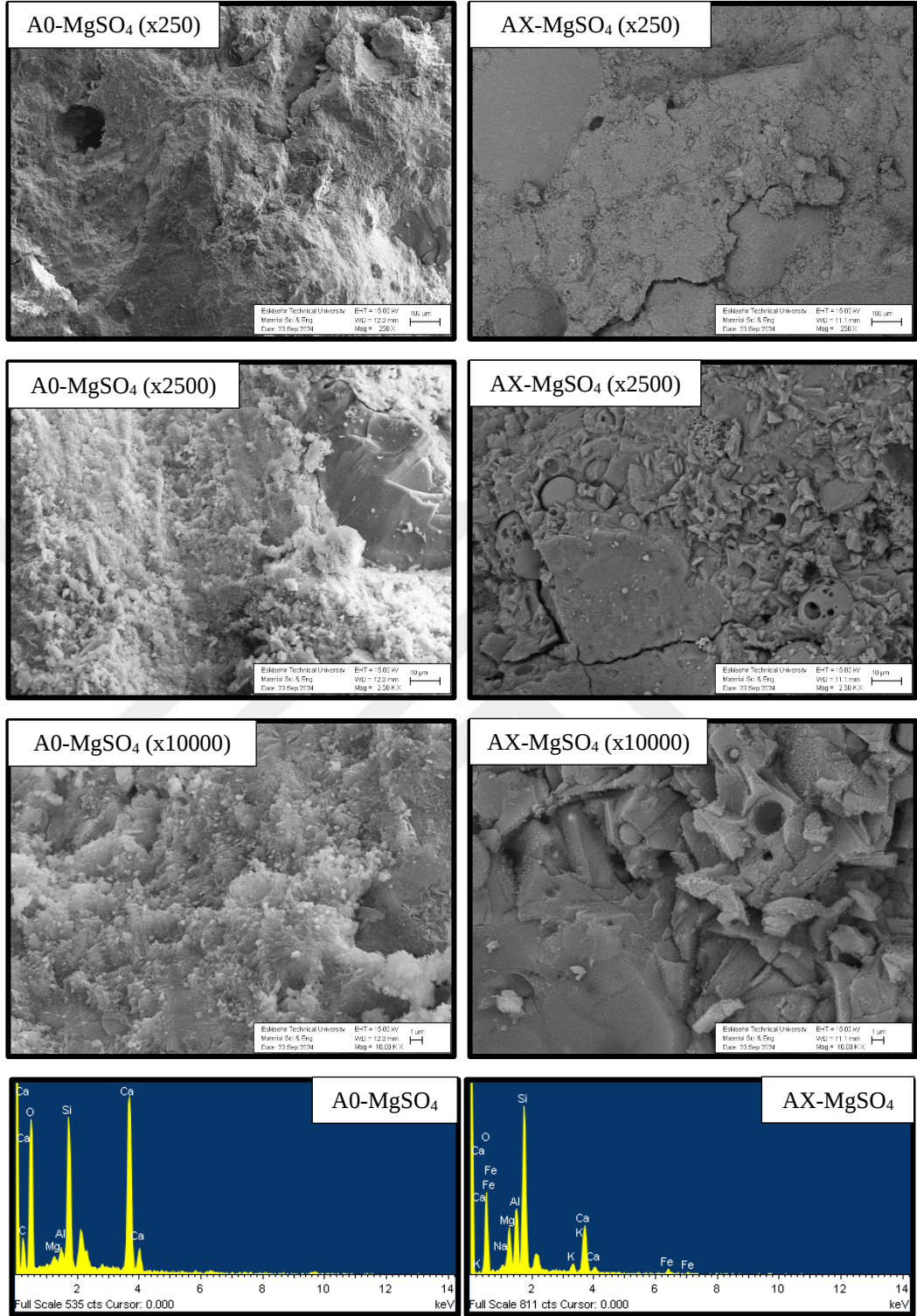
MgSO₄'te 360 gün bekletilen A0 harcının SEM analizi Şekil 6.93'te verilmiştir. MgSO₄ çözeltisine maruz kalan A0 harcı, özellikle sülfat saldırısına karşı hassastır ve bu durum çimento fazlarında ve mikroyapısında belirgin değişimlere yol açmaktadır. Öncelikle, SO₄²⁻ iyonları, çimento içindeki kalsiyum alüminat fazlarıyla reaksiyona

girerek etrenjit ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) oluşumuna sebep olmaktadır. Bu yeni faz, SEM analizlerinde iğne benzeri veya sütun şeklindeki kristal yapılar olarak gözlemlenmiştir ve matris içinde gerilim yaratarak mikro çatlaklara neden olmuştur. Ayrıca, Mg^{+2} iyonları, C-S-H fazıyla reaksiyona girerek Ca'nın uzaklaşmasına ve C-S-H fazının bozulmasına yol açmıştır. Bu süreç, aynı zamanda farklı bir mikroyapıya sahip olan ve daha düşük dayanım gösteren magnezyum silikat hidrat (M-S-H) oluşumuna neden olmuştur. Mg^{+2} iyonları çimento matrisindeki $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyona girerek brusit ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) oluşturabilir; bu faz, SEM'de katılmış yapılar veya düzensiz kristal morfolojisi şeklinde görülebilmektedir.

A0-MgSO₄ harcının EDX analizi sonuçları, C, O, Mg, Si ve Ca gibi elementlerin varlığını göstermektedir. Analiz, Mg ve Si elementleri, sülfata maruz kalmanın bir sonucu olan M-S-H jel varlığının göstergesidir. Elementlerin ağırlık yüzdeleri O (%60,18), C (%6,08), Si (%4,70), Ca (%46,69) ve Mg (%9,33) şeklindedir.

MgSO₄'te 360 gün bekletilen AX harcı sülfat saldırısına karşı belirli tepkiler göstermiştir, bu değişimler SEM analizlerinde net olarak gözlemlenebilmektedir. SO_4^{2-} iyonları, N-A-S-H jelinin kimyasal bileşenleriyle reaksiyona girerek jel yapısının bozulmasına yol açabilir. Mg^{+2} iyonları ise, N-A-S-H jeline nüfuz ederek Na iyonlarıyla yer değiştirir, bu da jel yapısının kimyasal bileşimini değiştirerek daha düzensiz bir mikroyapı ve M-S-H fazının oluşumuna sebep olmaktadır. Bu etki, jelin kırılğan hale gelmesine ve mikroyapısal çatlakların oluşmasına neden olabilmektedir. Mg^{+2} iyonlarının varlığı, çimento harçlarında olduğu gibi, $\text{Mg}(\text{OH})_2$ oluşumuna neden olabilir; bu yeni faz SEM'de kristal yapılar olarak gözlenir ve matrisin yapısında belirgin bozulmalara yol açabilmektedir. AX-MgSO₄ harcının EDX analizi sonuçları, Ca, O, Mg, Si, Na ve Al gibi elementlerin varlığını göstermektedir. Analiz, Mg ve Si elementleri, sülfata maruz kalmanın bir sonucu olan M-S-H jel varlığının göstergesidir. Elementlerin ağırlık yüzdeleri O (%40,04), Ca (%13,48), Si (%24,82), Na (%2,82), Al(%8,27) ve Mg (%5,81) şeklindedir.

200°C, 400°C ve 600°C sıcaklığa maruz bırakılan A0 harcının SEM/EDX analizi sırasıyla Şekil 6.94, Şekil 6.95 ve Şekil 6.96'da verilmiştir. 800°C sıcaklığa maruz kalan A0 harcının SEM görüntüsü ise numunenin aşırı poroz bir yapıya sahip olması sebebiyle alınamamıştır. Ancak, AX-800 harcını SEM/EDX analizi Şekil 6.97'de verilmiştir.



Şekil 6.93. $MgSO_4$ 'e 360 gün maruz kalan A0 ve AX harcının SEM/EDX analizleri (250x, 2500x ve 10000x)

A0-200 numunesinde nem kaybı, çimento matrisindeki serbest suyun ve hidrasyon sırasında oluşmuş suyun büyük kısmının buharlaşmasıyla gerçekleşir, bu durum SEM görüntülerinde yüzeyde küçük çatlaklar olarak görülmüştür. Bu sıcaklıkta temel hidrasyon ürünleri olan kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) stabil kaldığı için yapısal

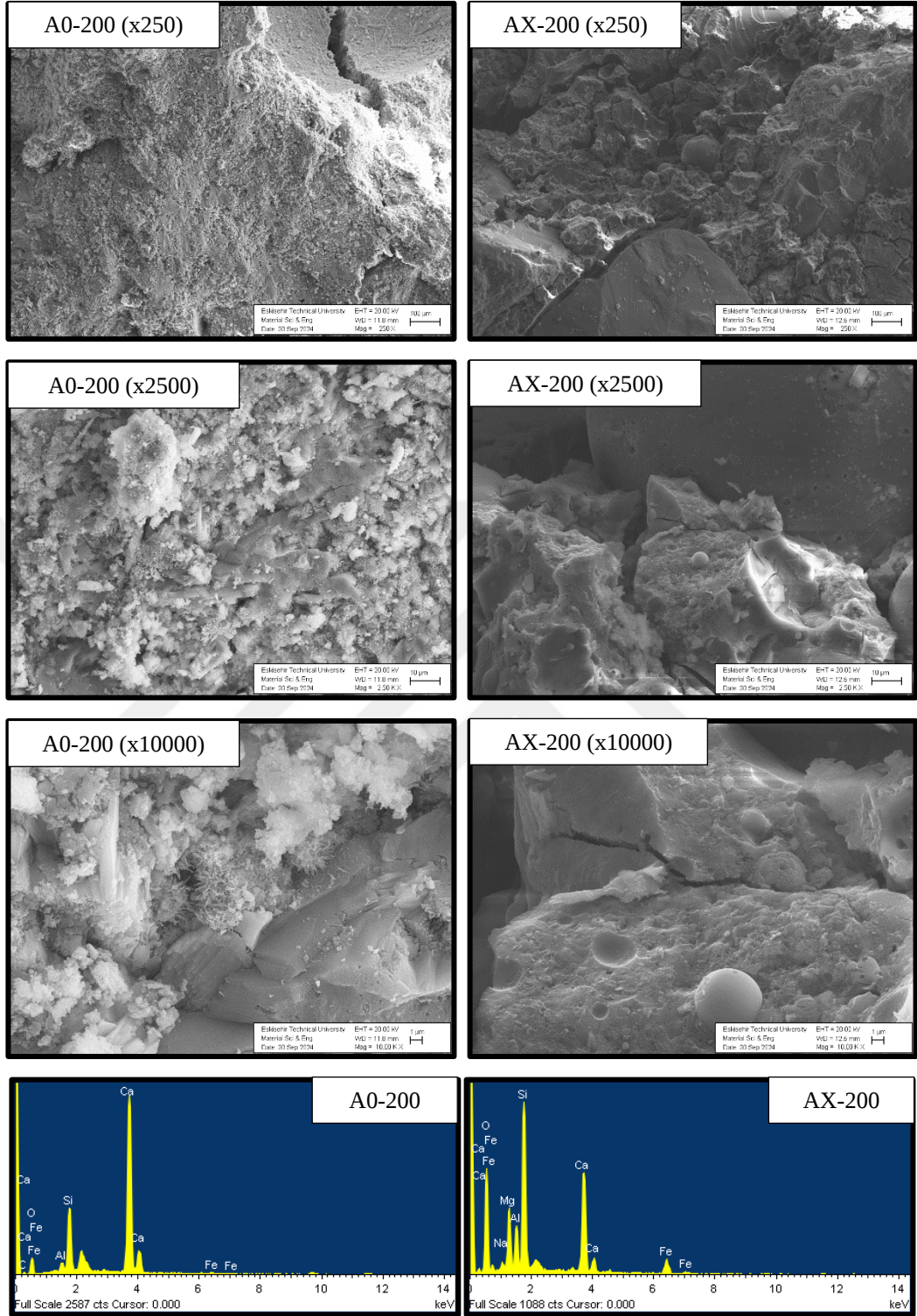
bozulmalar minimal düzeyde kalmıştır. A0-400 numunesinde ise, Ca elementinin Si elementine oranı C-S-H jelinin ve özellikle Ca(OH)_2 'in bileşenlerine ayrışması nedeniyle artmıştır. A0-600 numunesinde C-S-H yapısının belirgin bir şekilde bozulması, SEM görüntülerinde yoğun gözeneklilik, çökmeler ve geniş çatlaklar olarak gözlemlenirken, Ca(OH)_2 'in tamamen bozunması sonucu CaO fazları belirginleşerek daha kaba taneli yapılar oluşturur. A0-800 numunesinde C-S-H fazı tamamen bozulduğu için çimento matrisinde yoğun gözenekler, büyük boşluklar ve geniş çaplı çatlaklar görülmesi beklenir.

AX-200 numunesinde geopolimer matrisindeki ana bağ yapısı genellikle stabildir. Yalnızca serbest suyun buharlaşması gerçekleşmiştir. Nem kaybı nedeniyle mikro gözenekler artmasına rağmen bağlayıcı matris genellikle sağlam kalır. AX-400 numunesinin SEM analizinde daha belirgin gözeneklilik görülmüştür.

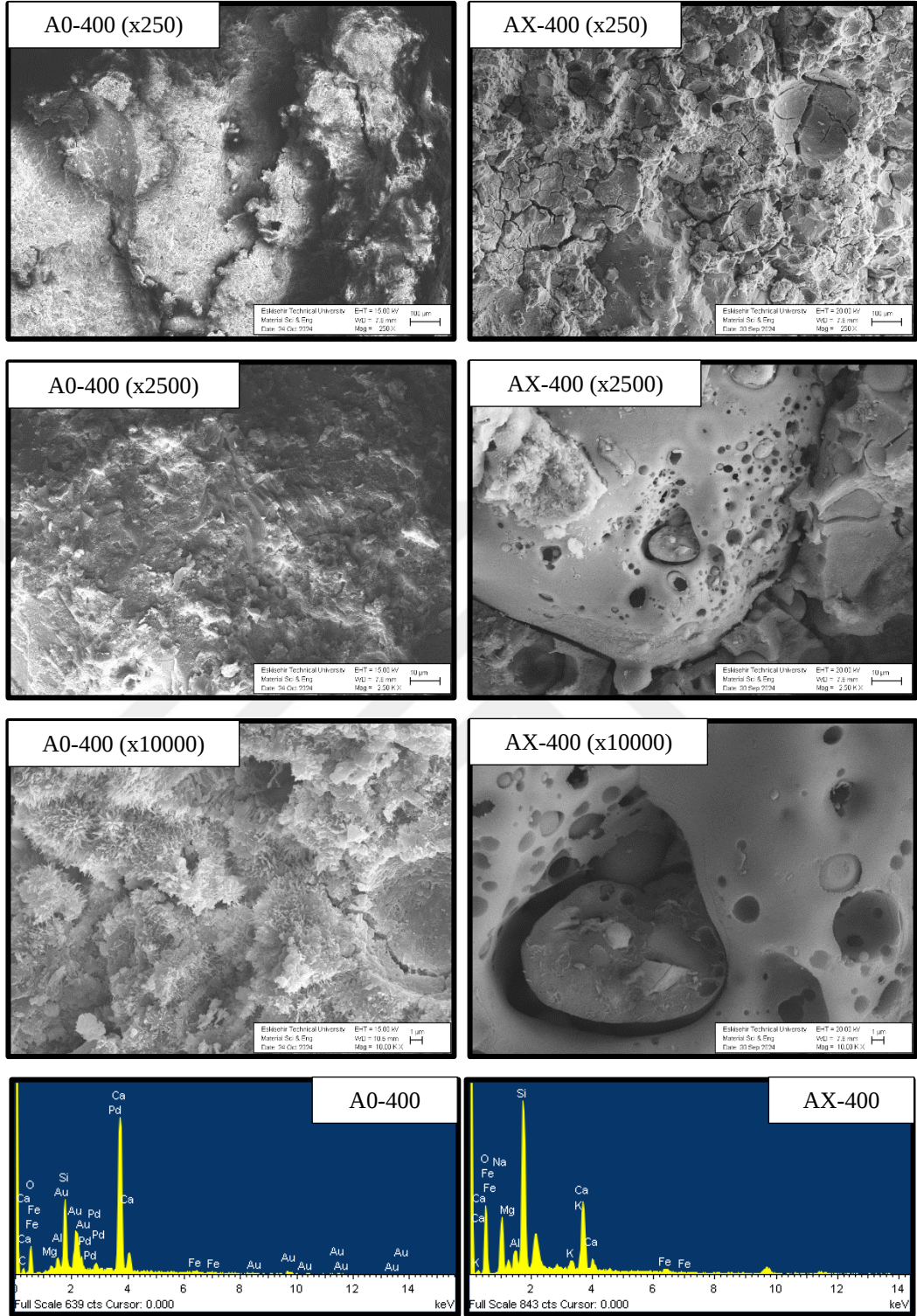
Yüksek sıcaklık etkisi ile geopolimer harçların matrislerindeki Na içeriğinin EDX analizinde arttığı görülmüştür. Na içeriğinin artması, bu harçlarda sıcaklığın artması ile N-A-S-H jeli oluşumunun devam ettiğini göstermektedir.

AX-600 ve AX-800 numunesinin basınç dayanımında yaklaşık %15'lik bir artış görülmesi, yüksek sıcaklıklarda meydana gelen bazı kimyasal ve yapısal değişikliklerle açıklanabilir. Yüksek sıcaklıklarda geopolimer matrisinde camsı faz oluşumu gerçekleşebilmektedir.

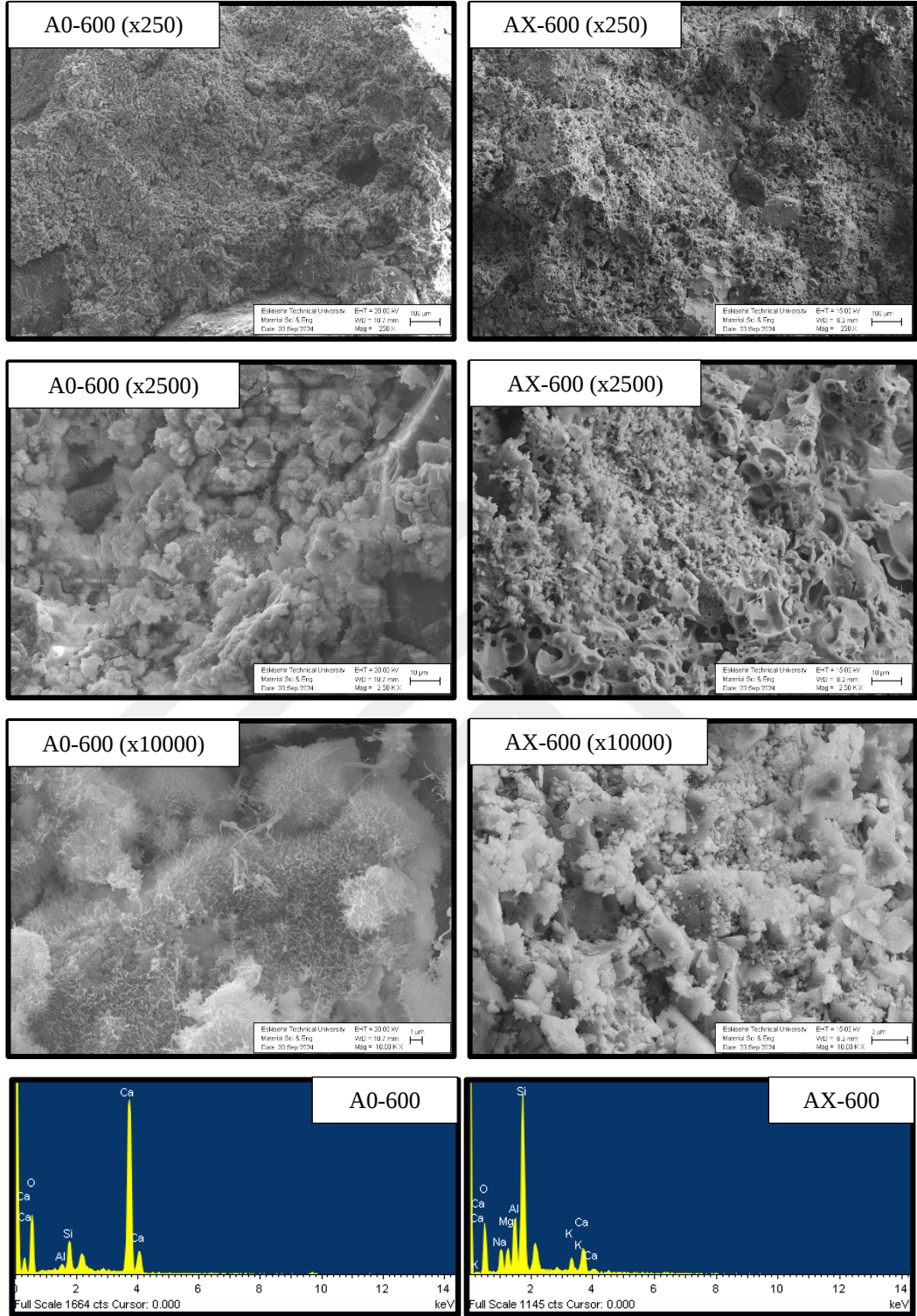
Özellikle BA yüksek sıcaklıklarda kristal yapılar veya camsı fazlar oluşturmaları, mikroyapının daha sert ve dayanıklı hale gelmesine neden olabilir. Ayrıca, 600- 800°C gibi sıcaklıklarda geopolimer yapısında kristal fazların (örneğin mullit) oluşması mümkün olabilir. Bu tür fazlar, malzemenin dayanımını artırabilir.



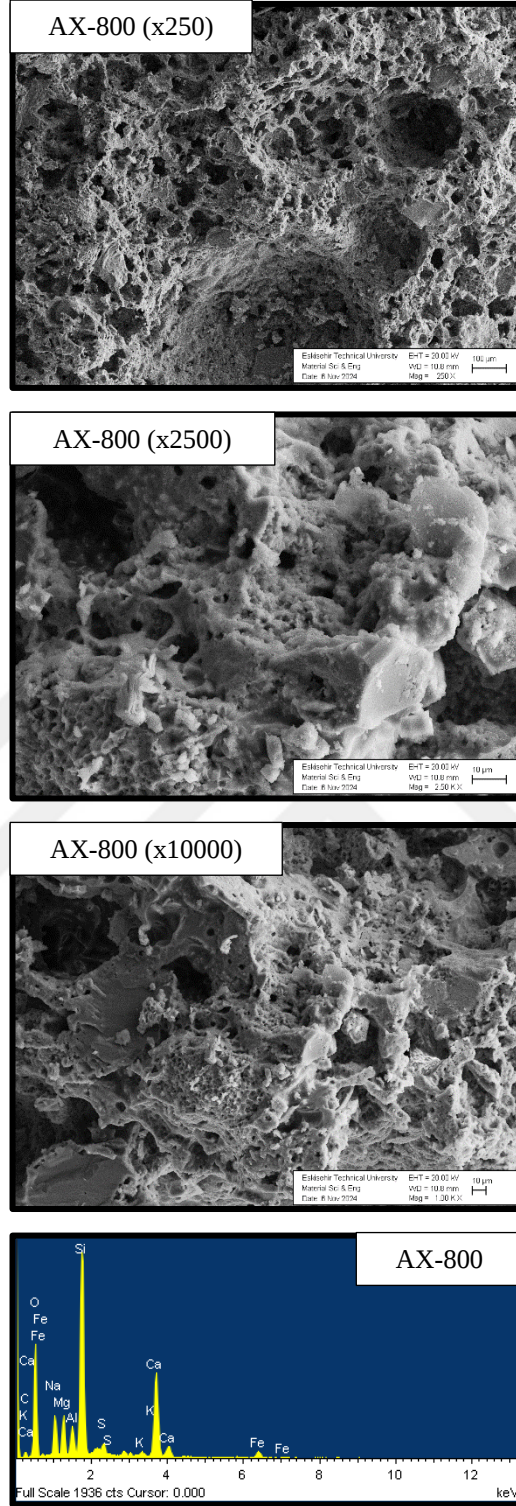
Şekil 6.94. 200⁰C'ye maruz kalan A0 ve AX harcının SEM/EDX analizleri (250x, 2500x ve 10000x)



Şekil 6.95. 400°C'ye maruz kalan A0 ve AX harcının SEM/EDX analizleri (250x, 2500x ve 10000x)



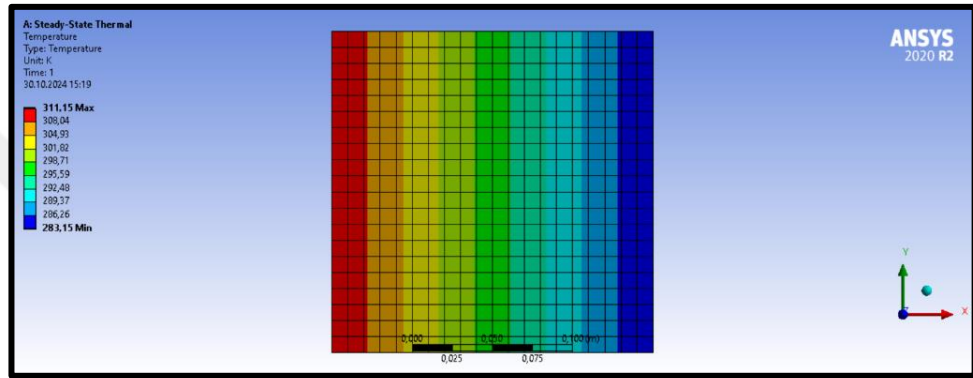
Şekil 6.96. 600°C'ye maruz kalan A0 ve AX harcının SEM/EDX analizleri (250x, 2500x ve 10000x)



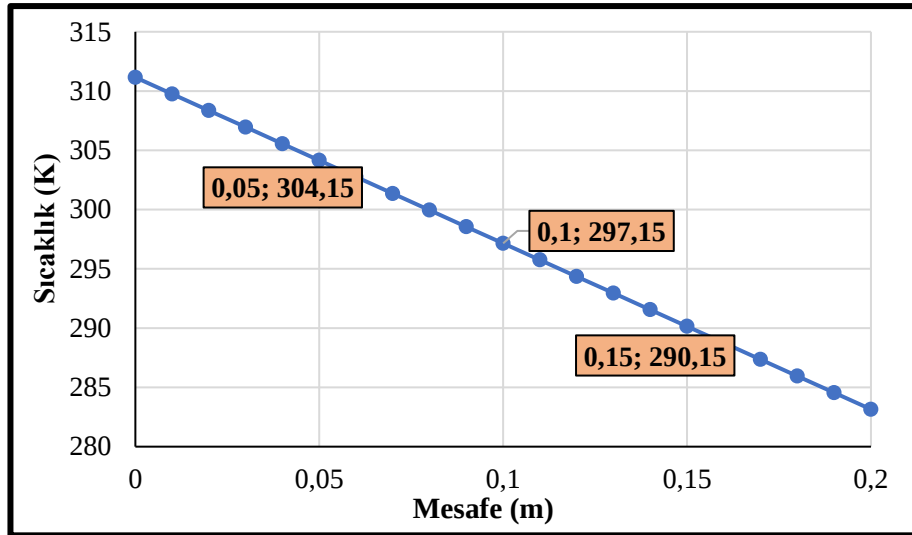
Şekil 6.97. 800^oC'ye maruz kalan AX harcının SEM/EDX analizleri (250x, 2500x ve 10000x)

6.10. Isı Transfer Analizi

Şekil 6.98, 1.model için ANSYS programında gerçekleştirilen kararlı hal ısı transferi analizinin sonuçlarını göstermektedir. Modelde, ısı iletkenlik cihazında ölçüm için kullanılan sıcaklıklar kullanılmıştır, bundan dolayı numunenin dış yüzeyine 38°C ($311,15\text{ K}$), iç yüzeyine ise 10°C ($283,15\text{ K}$) sıcaklık uygulanarak yüzeyler arasındaki sıcaklık farkından kaynaklanan ısı transferi incelenmiştir. Kararlı hal koşullarında, sıcaklık dağılımı homojen bir şekilde gözlenmekte olup ısı transferinin dengeli bir durumda olduğu anlaşılmaktadır. Bu analiz, iç ve dış sıcaklık farklarının malzemenin iç yapısı üzerinde nasıl bir sıcaklık dağılımı oluşturduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 6.98. 1.model kararlı hal ısı transferi

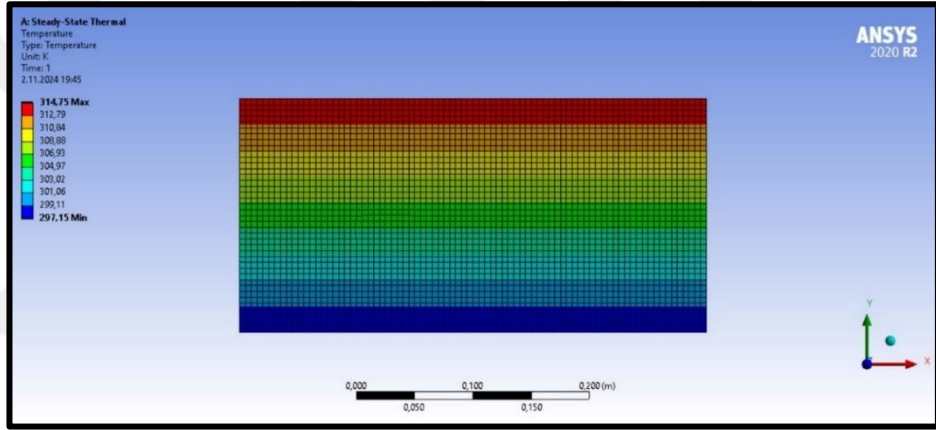


Şekil 6.99. 1.model sıcaklık dağılım grafiği (analitik çözüm)

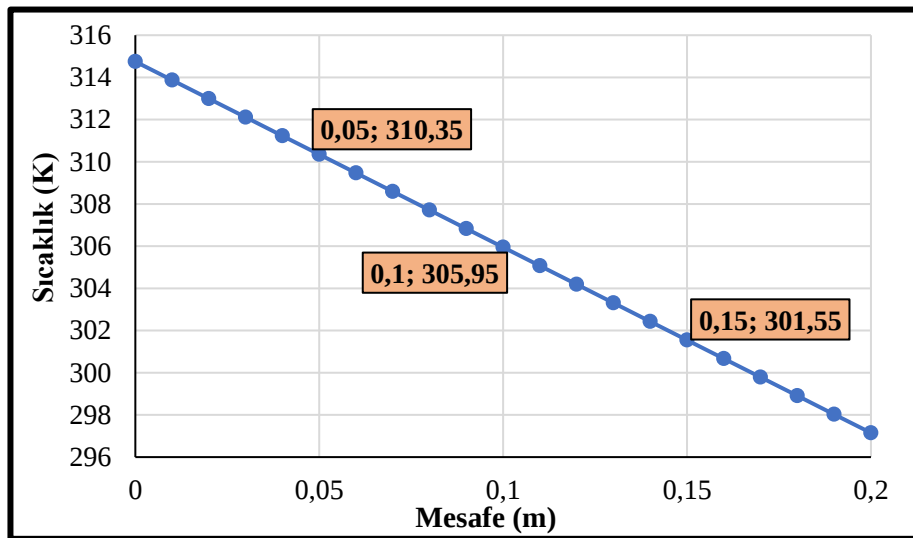
Şekil 6.99, 1.model için analitik çözümden elde edilen sıcaklık dağılımını grafiksel olarak sunmaktadır. Bu grafik, yüzey sıcaklıkları arasındaki farkın numunenin kalınlığı boyunca nasıl bir sıcaklık profili oluşturduğunu göstermektedir. Sıcaklıkların belirli mesafelerde nasıl düştüğü gözlemlenerek, sıcaklık değişimlerinin derinlik boyunca

homojen bir şekilde yayıldığı anlaşılmaktadır. Bu analitik sonuçlar, ANSYS ile yapılan simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, modelin doğruluğunu desteklemektedir. Kararlı hal analiz sonucunda $T_1(0,05)=31^{\circ}\text{C}$ (304,15 K), $T_1(0,1)=24^{\circ}\text{C}$ (297,15 K) ve $T_1(0,15)=17^{\circ}\text{C}$ (290,15 K) bulunmuştur.

Şekil 6.100 ve Şekil 6.102, 2.model için ANSYS programında gerçekleştirilen kararlı hal ısı transferi analizinin sonuçlarını göstermektedir. Modelde, Eskişehir için 1991-2023 yılları arasındaki ölçüm periyodunda yer alan en yüksek dış sıcaklık $41,6^{\circ}\text{C}$ (314,75 K), en düşük dış sıcaklık $-28,6^{\circ}\text{C}$ (311,15 K) sınır koşulları olarak alınırken iç sıcaklık 24°C (297,15 K) uygulanarak yüzeyler arasındaki sıcaklık farkından kaynaklanan ısı transferi incelenmiştir. Kararlı hal koşullarında, sıcaklık dağılımı homojen olduğu için ısı transferinin dengeli bir durumda olduğu anlaşılmaktadır.

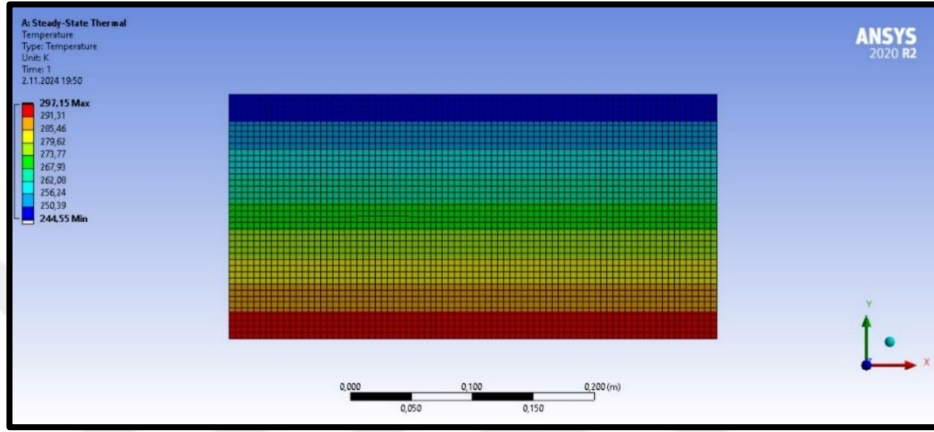


Şekil 6.100. 2.model kararlı hal ısı transferi ($41,6^{\circ}\text{C}$)

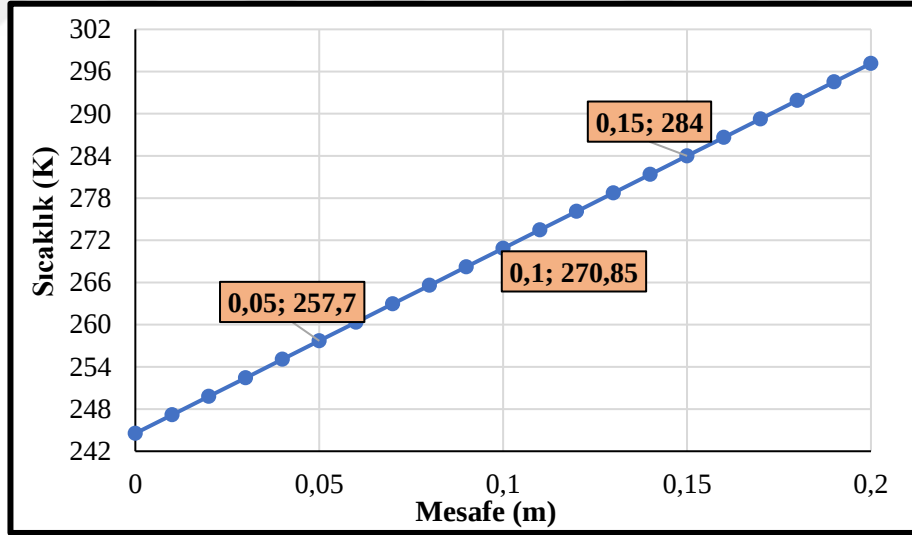


Şekil 6.101. 2.model $41,6^{\circ}\text{C}$ için sıcaklık dağılım grafiği (analitik çözüm)

Şekil 6.101 ve Şekil 6.103, 2.model için analitik çözümden elde edilen sıcaklık dağılımını grafiksel olarak sunmaktadır. Bu analitik sonuçlar, ANSYS ile yapılan simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, modelin doğruluğunu desteklemektedir. Kararlı hal analiz sonucunda $T_{2.1}(0,05)=37,2^{\circ}\text{C}$ ($310,35\text{ K}$), $T_{2.1}(0,1)=32,8^{\circ}\text{C}$ ($305,95\text{ K}$) ve $T_{2.1}(0,15)=28,4^{\circ}\text{C}$ ($301,55\text{ K}$) bulunmuştur. Kararlı hal analiz sonucunda $T_{2.2}(0,05)=-15,45^{\circ}\text{C}$ ($257,70\text{ K}$), $T_{2.2}(0,1)=-2,3^{\circ}\text{C}$ ($270,85\text{ K}$) ve $T_{2.2}(0,15)=10,85^{\circ}\text{C}$ ($284,00\text{ K}$) bulunmuştur.

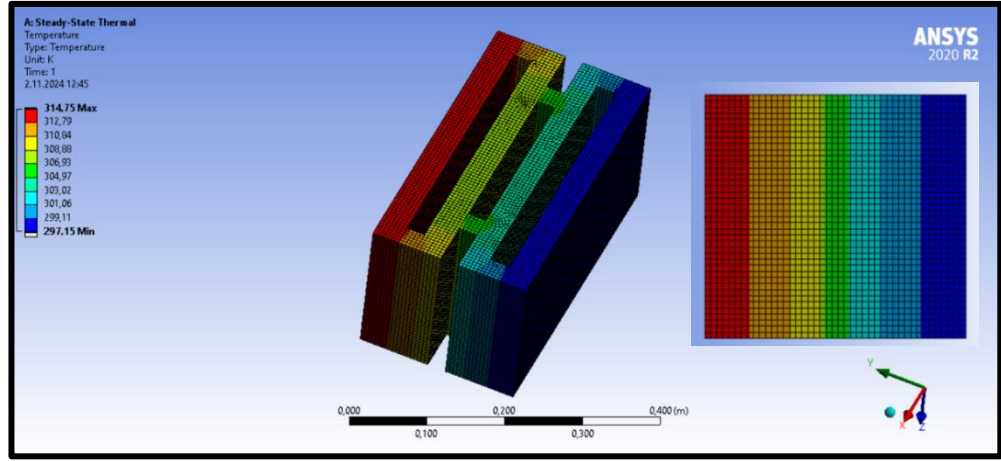


Şekil 6.102. 2.model kararlı hal ısı transferi ($-28,6^{\circ}\text{C}$)

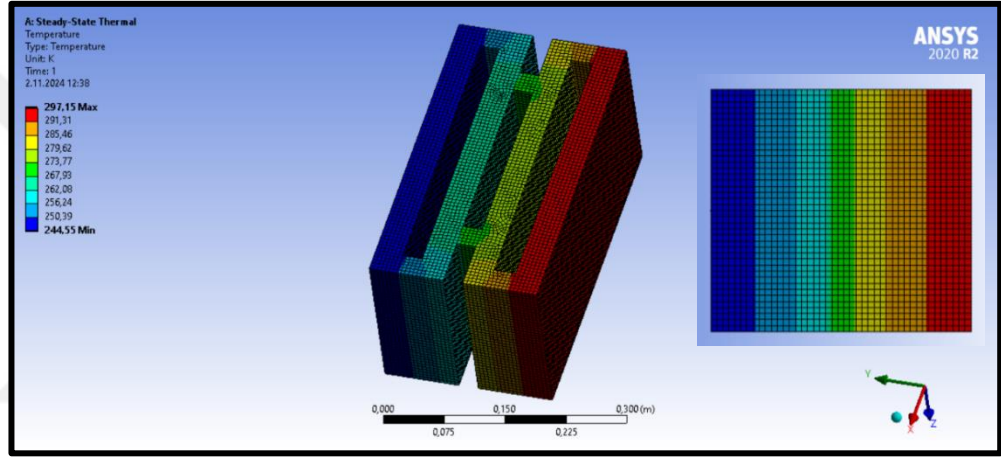


Şekil 6.103. 2.model $-28,6^{\circ}\text{C}$ için sıcaklık dağılım grafiği (analitik çözüm)

Şekil 6.104 ve Şekil 6.105, 3.model için ANSYS programında gerçekleştirilen kararlı hal ısı transferi analizinin sonuçlarını göstermektedir. Modelde, 2.model için kullanılan sınır koşulları uygulanarak yüzeyler arasındaki sıcaklık farkından kaynaklanan ısı transferi incelenmiştir. Sıcaklık dağılımının homojen olmasının sebebi, boşluklara hava tanımlaması yapılmamasıdır.



Şekil 6.104. 3.model kararlı hal ısı transferi ($41,6^{\circ}\text{C}$)



Şekil 6.105. 3.model kararlı hal ısı transferi ($-28,6^{\circ}\text{C}$)

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tezin çalışmasında, Türkiye'deki endüstriyel atık malzemelerin (bor atığı, silis dumanı, uçucu kül) kullanımıyla üretilen geopolimer harçların fiziksel, mekanik, dayanıklılık ve termal özellikleri incelenmiştir. Taguchi deney tasarım yöntemi kullanılarak dört ana faktör (bor atığı, silis dumanı, sodyum konsantrasyonu, kütleme sıcaklığı ve kütleme süresi) beş farklı seviyede test edilmiştir. En iyi termal özelliklere sahip harç karışımında kullanılan kum miktarını azaltmak için ise %10 ile %100 arasında değişen miktarlarda ömrünü tamamlamış lastik kullanılarak dayanım ve termal özellikler araştırılmıştır. Taguchi yöntemi ile parametrelerin optimum seviyeleri bulunduğundan sonra parametrelerin birbiriyle ve deney sonucuyla ilişkisini anlamak için, ANOVA analizi ile, parametrelerin geopolimer harçların fiziksel, mekanik ve ısı özellikleri üzerindeki etkilerini belirlenmiştir. Ayrıca, asit, sülfat ve yüksek sıcaklık etkisi sonucundaki kontrol ve optimum harçların mikro yapıları incelenmiştir. Elde edilen bulgular, aşağıdaki temel sonuçları ortaya koymaktadır:

- Taguchi yöntemi ile tasarlanan harçların, yayılma çaplarının 108-210 mm arasında değiştiği bulunurken, kontrol harcının 124 mm yayılma çapına sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durum, geopolimer harçta kullanılan hammaddeler ve kimyasalların yapısından kaynaklanan yüksek kohezyon ile açıklanabilmektedir. İncelenen harç karışımlarında CFUK ve BA arttıkça yayılma çaplarının arttığı, SD ve Na miktarı arttıkça yayılma çaplarının azaldığı görülmüştür. Yayılma çapında en yüksek etkiye sahip faktörün ise %46,83 ile SD oranının olduğu gözlemlenmiştir.
- Taguchi yöntemi ile tasarlanan harçların, taze harç sıcaklıklarının 32-51⁰C arasında değiştiği bulunurken, kontrol harcının 15⁰C sıcaklığa sahip olduğu belirlenmiştir. İncelenen harç karışımlarında SD ve Na miktarı arttıkça taze harç sıcaklığının arttığı görülmüştür. Geopolimer harçların, A0 harcından daha yüksek taze harç sıcaklığına sahip olmaları polikondenzasyon süreci ile açıklanabilmektedir. Taze harç sıcaklığında en yüksek etkiye sahip faktörün %52,48 ile SD oranının olduğu gözlemlenmiştir.
- Taguchi yöntemi ile tasarlanan harçların, ilk priz süresinin 186-305 dakika arasında, son priz süresinin 250-377 dakika arasında değiştiği bulunmuştur. Kontrol harcının ilk priz süresinin 320 dakika, son priz süresinin 398 dakika olduğu belirlenmiştir. Geopolimer harçların priz süresinin A0 harcının priz süresine göre

daha kısa olmasının, ön dökümlü beton üretiminde olumlu etki yapabileceği düşünülmektedir. İncelenen harç karışımlarında Na miktarı azalırken artan BA ve SD miktarının priz sürelerini arttığı görülmüştür. Priz süresinde en yüksek etkiye sahip faktörün %52,48 ile SD oranının olduğu gözlemlenmiştir.

- Taguchi yöntemi ile tasarlanan harçların, taze birim hacim ağırlığının 2,07-2,22 g/cm³ arasında, sertleşmiş birim hacim ağırlığının 2,05-2,20 g/cm³ arasında değiştiği bulunmuştur. Kontrol harcının taze birim hacim ağırlığının 2,26 g/cm³, sertleşmiş birim hacim ağırlığının 2,23 g/cm³ olduğu belirlenmiştir. İncelenen harç karışımlarında CFUK arttıkça birim hacim ağırlık değerinin azaldığı görülmüştür. Ayrıca, kütleme sıcaklığının 80°C'ye kadar artması ile birim hacim ağırlıkta artış meydana gelmiştir. Birim hacim ağırlığında en yüksek etkiye sahip faktörün %56,68 ile BA oranının olduğu gözlemlenmiştir.
- Taguchi yöntemi ile tasarlanan harçların, su emme oranlarının %6,8-13,5 arasında değiştiği bulunurken, kontrol harcının %7,6 su emme oranına sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durum, geopolimer harçta bulunan N-A-S-H jelinin, kontrol harcında bulunan C-S-H jeline kıyasla gözenekli yapıda olması ile açıklanabilmektedir. İncelenen harç karışımlarında SD ve BA kullanımının su emme değerini azalttığı görülmüştür. Ayrıca, SD ve Na oranı ile kütleme sıcaklığının belirli bir seviyeye kadar artması ile su emme oranında azalma meydana gelmiştir. Su emme oranlarında en yüksek etkiye sahip faktörün %42,52 ile kür sıcaklığı olduğu gözlemlenmiştir.
- Taguchi yöntemi ile tasarlanan harçların, kılcal su emme yüksekliklerinin 3,16-6,18 mm arasında değiştiği bulunurken, kontrol harcının 4,19 mm kılcal su emme yüksekliğine sahip olduğu belirlenmiştir. İncelenen harç karışımlarında SD miktarı arttıkça kılcal su emme yüksekliğinin arttığı, BA ve Na miktarı ile kütleme sıcaklığı arttıkça ise azaldığı görülmüştür. Kılcal su emme yüksekliğinde en yüksek etkiye sahip faktörün %36,89 ile Na oranı olduğu gözlemlenmiştir.
- Taguchi yöntemi ile tasarlanan harçların, 28 günlük ultrases geçiş hızı değerlerinin 1,86-3,99 km/s arasında değiştiği bulunurken, kontrol harcının 3,92 km/s ultrases geçiş hızına sahip olduğu belirlenmiştir. 7, 28 ve 90 günlük ultrases geçiş hızı değerleri incelendiğinde geopolimer matrisin zamanla daha yoğun ve düzgün hale geldiği görülmüştür. İncelenen harç karışımlarında BA ve Na miktarı ultrases geçiş hızının arttığı, SD miktarı arttıkça ise azaldığı görülmüştür. Ayrıca, kütleme

sıcaklığının 60⁰C'den 100⁰C'ye yükselmesi ile su emme oranında artış meydana gelmiştir. Ultrases geçiş hızında en yüksek etkiye sahip faktörün %61,90 ile kürleme sıcaklığı olduğu gözlemlenmiştir.

- Taguchi yöntemi ile tasarlanan harçların, 28 günlük eğilme dayanımlarının 2,58-8,37 MPa arasında değiştiği bulunurken, kontrol harcının 6,76 MPa eğilme dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir. İncelenen harç karışımlarında BA miktarının artmasıyla eğilme dayanımının arttığı, Na miktarı ve kür sıcaklığının belirli bir seviyeden sonra artması ile eğilme dayanımının azaldığı görülmüştür. Ayrıca, kür süresinin 48 saate kadar yükselmesi ile eğilme dayanımında artış meydana gelmiştir. Eğilme dayanımında en yüksek etkiye sahip faktörün %51,73 ile kürleme sıcaklığı olduğu gözlemlenmiştir.
- Taguchi yöntemi ile tasarlanan harçların, 28 günlük basınç dayanımlarının 18,30-41,30 MPa arasında değiştiği bulunurken, kontrol harcının 45,90 MPa basınç dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir. İncelenen harç karışımlarında BA ve Na miktarının artmasıyla basınç dayanımının arttığı, SD miktarı ve kür sıcaklığının belirli bir seviyeden sonra artması ile basınç dayanımının azaldığı görülmüştür. Basınç dayanımında en yüksek etkiye sahip faktörün %59,34 ile kürleme sıcaklığı olduğu gözlemlenmiştir.
- Taguchi yöntemi ile tasarlanan harçların, ısıl iletkenlik katsayılarının 0,334-0,574 W/mK arasında değiştiği bulunurken, kontrol harcının 1,126 W/mK ısıl iletkenlik katsayısına sahip olduğu belirlenmiştir. İncelenen harç karışımlarında Na miktarının artmasıyla, kür sıcaklığı ve süresinin belirli bir seviyeden sonra artması ile ısıl iletkenlik katsayısının azaldığı görülmüştür. Ayrıca, BA ve SD miktarının %10'a kadar yükselmesi ile ısıl iletkenlik katsayısında azalma meydana gelmiştir. Isıl iletkenlik katsayılarında en yüksek etkiye sahip faktörün %28,58 ile SD oranı olduğu gözlemlenmiştir.
- Taguchi yöntemi ile tasarlanan harçların, eğilme ve basınç dayanımları arasında doğrudan bir korelasyon olmasına rağmen düşük R² (0,61) katsayısına sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durum, geopolimer harçta Na ve SD miktarı kullanımı ile kür sıcaklığının dayanım sonuçları üzerindeki farklı etkileri ile açıklanabilmektedir.
- Harçların basınç dayanım değerleri ile ultrases geçiş değerleri de ilişkilendirilmiştir. Değerler arasında oldukça yüksek bir korelasyon olduğu

görülmüştür. R^2 (0,98) değerinin 1'e yakın olması yüksek bir ilişkinin varlığını göstermektedir.

- Harçların basınç dayanım değerleri ile birim hacim ağırlık değerleri de ilişkilendirilmiştir. Düşük R^2 (0,40) katsayısına sahip olunması düşük korelasyon ilişkisini göstermektedir. Bu durum, geopolimer reaksiyonda etkili olan kütleme parametresinin bu özellikler üzerinde farklı oranda etkili olması ile açıklanabilmektedir.
- Harçların ısı iletkenlik katsayıları ile birim hacim ağırlık değerleri de ilişkilendirilmiştir. Düşük R^2 (0,46) katsayısına sahip olunması düşük korelasyon ilişkisini göstermektedir. Bu durum, kütleme ve bağlayıcı malzeme parametrelerinin sonuçlar üzerindeki farklı etkileri ile açıklanabilmektedir.
- Taguchi yöntemi ile minimum birim hacim ağırlığa göre belirlenen optimum AS (%10BA, %0SD, %6Na, 100°C, 48 saat) harç karışımı için tahmin olarak 33,75°C taze sıcaklık, 243,38 dk priz süresi, 2,03 g/cm³ BHA, %10,27 su emme, 5,51 mm kılcal su emme yüksekliği, 2,53 km/s ultrases geçiş hızı, 3,92 MPa eğilme dayanımı, 27,94 MPa basınç dayanımı ve 0,334 W/mK ısı iletkenlik elde edilmiştir. Deneysel olarak karşılık gelen değerler ise 34,2°C taze sıcaklık, 248 dk priz süresi, 2,00 g/cm³ BHA, %11,38 su emme, 5,79 mm kılcal su emme yüksekliği, 2,49 km/s ultrases geçiş hızı, 3,85 MPa eğilme dayanımı, 28,78 MPa basınç dayanımı ve 0,346 W/mK ısı iletkenlik olarak bulunmuştur.
- Taguchi yöntemi ile maksimum basınç dayanımına göre belirlenen optimum AX (%15BA, %5SD, %10Na, 60°C, 48 saat) harç karışımı için tahmin olarak 39,75°C taze sıcaklık, 265,13 dk priz süresi, 2,08 g/cm³ BHA, %4,37 su emme, 2,27 mm kılcal su emme yüksekliği, 4,29 km/s ultrases geçiş hızı, 7,99 MPa eğilme dayanımı, 42,34 MPa basınç dayanımı ve 0,481 W/mK ısı iletkenlik elde edilmiştir. Deneysel olarak karşılık gelen değerler ise 40,1°C taze sıcaklık, 270 dk priz süresi, 2,06 g/cm³ BHA, %4,85 su emme, 2,44 mm kılcal su emme yüksekliği, 4,20 km/s ultrases geçiş hızı, 7,95 MPa eğilme dayanımı, 44,06 MPa basınç dayanımı ve 0,501 W/mK ısı iletkenlik olarak bulunmuştur.
- Taguchi yöntemi ile minimum ısı iletkenlik katsayısına göre belirlenen optimum AY (%10BA, %10SD, %10Na, 100°C, 12 saat) harç karışımı için ise tahmin olarak 45,75°C taze sıcaklık, 252,88 dk priz süresi, 2,07 g/cm³ BHA, %8,66 su emme, 4,69 mm kılcal su emme yüksekliği, 2,62 km/s ultrases geçiş hızı, 4,25 MPa eğilme

dayanımı, 28,31 MPa basınç dayanımı ve 0,244 W/mK ısı iletkenlik elde edilmiştir. Deneysel olarak karşılık gelen değerler ise 45,1°C taze sıcaklık, 258 dk priz süresi, 2,05 g/cm³ BHA, %9,53 su emme, 4,95 mm kılcal su emme yüksekliği, 2,68 km/s ultrases geçiş hızı, 4,75 MPa eğilme dayanımı, 27,34 MPa basınç dayanımı ve 0,253 W/mK ısı iletkenlik olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, Taguchi yönteminin harç karışımlarının özelliklerini öngörmedeki etkinliğini göstermektedir. Deneysel sonuçlarda gözlemlenen küçük sapmalar, modelleme veya deney koşullarında daha fazla iyileştirme gerektiren alanları işaret etmekte olup, tahmin edilen ve deneysel değerlerin yakın uyumu, bu metodolojinin inşaat uygulamaları için harç özelliklerini optimize etmede güvenilirliğini göstermektedir.

- Gözlemlenen hata payları hem deneysel prosedürlerden hem de kullanılan tahmin modellerinden kaynaklanan çeşitli faktörlere dayandırılabilir. Taze sıcaklık için %0,95'lik bir hata, ölçüm sırasında çevresel koşullar veya cihaz kalibrasyonundan kaynaklanan küçük farklılıkları işaret eder. %1,01'lik küçük bir birim hacim ağırlık hatası, birim hacim ağırlık hesaplamalarında tahmin modelinin oldukça doğru olduğunu, ancak numunenin heterojenliğine bağlı olarak küçük değişikliklerin meydana gelebileceğini göstermektedir. %9,46'lık su emme hatası ise, emilim hızını etkileyen bileşenlerin karmaşık etkileşimleri, numune hazırlama veya deney yöntemindeki tutarsızlıklardan kaynaklanabilecek nispeten yüksek bir hata oranıdır. Ultrases geçiş hızı, %2,08'lik düşük bir hata ile ses dalgalarının malzemede yayılma hızını doğru bir şekilde yakalayan güçlü bir model olduğunu gösterir. Eğilme dayanımı için %1,67'lik hata, güvenilir bir model öngörüsü olduğunu belirtse de numune geometrisi veya deney koşullarındaki farklılıklar küçük sapmaların yol açabildiği belirtmektedir. %2,65'lik basınç dayanımı hatası, tahmin edilen ve deneysel değerler arasında çok yakın bir uyum olduğunu göstererek modellemenin etkinliğine işaret etmektedir. Isı iletkenlikteki %3,69'luk hata ise, modelin homojen ısı özellikler varsayımlarından veya harici deney koşullarından kaynaklanmış olabilir.
- Taguchi yöntemi ile belirlenen optimum AY ve kontrol harcında kullanılan standart kum miktarını azaltmak için %10-100 arasında ömrünü tamamlamış lastik kullanılmıştır. Bu harçların yayılma çaplarının 139-198 mm arasında değiştiği bulunurken, kontrol harçlarının ise 101-151 mm arasında değiştiği belirlenmiştir. Bu durum, ÖTL miktarının işlenebilirlik üzerinde önemli bir etkisi olduğu ve

PVA'nın yüzey işleme yöntemi olarak kullanımının işlenebilirliği arttırması ile açıklanabilmektedir.

- AY-ÖTL harçlarının, taze birim hacim ağırlığının $1,20-1,98 \text{ g/cm}^3$ arasında, sertleşmiş birim hacim ağırlığının $1,17-1,94 \text{ g/cm}^3$ arasında değiştiği bulunmuştur. A0-ÖTL harçlarının ise taze birim hacim ağırlığının $1,20-2,13 \text{ g/cm}^3$ arasında, sertleşmiş birim hacim ağırlığının $1,17-2,10 \text{ g/cm}^3$ arasında değiştiği belirlenmiştir. ÖTL miktarı arttıkça birim hacim ağırlığının azalmasının temel nedeni ÖTL parçacıklarının yoğunluğunun standart kuma göre yaklaşık %63 oranında az olmasıdır. Ayrıca, ÖTL'nin çimento matrisi ile uyumlu bir bağ yapısı oluşturamaması gözenekli bir yapının oluşmasına neden olabilmekle birlikte birim hacim ağırlığı azaltıcı etki göstermektedir.
- AY-ÖTL harçlarının, ultrases geçiş hızının $0,45-1,99 \text{ km/s}$ arasında değiştiği bulunmuştur. A0-ÖTL harçlarının ise ultrases geçiş hızının $0,38-3,41 \text{ km/s}$ arasında değiştiği belirlenmiştir. Bu durum, ÖTL kullanımının harçların kompakt yapısını azaltarak daha az yoğun bir yapıdan ses dalgalarının daha yavaş geçmesi ile açıklanabilmektedir. Ultrases geçiş hızında en yüksek etkiye sahip faktörün %93,06 ile ÖTL oranının olduğu gözlemlenmiştir.
- AY-ÖTL harçlarının, eğilme dayanımlarının $2,28-5,19 \text{ MPa}$ arasında değiştiği bulunmuştur. A0-ÖTL harçlarının ise eğilme dayanımlarının $0,97-6,10 \text{ MPa}$ arasında değiştiği belirlenmiştir. ÖTL'nin elastik yapısı eğilme dayanımını arttırıcı bir rol oynamaktadır. Ancak, ÖTL'nin aşırı kullanımı (hacimce %20 ve üstü) harç içinde boşluklu bir yapı meydana getirmesi sebebiyle eğilme dayanımını olumsuz yönde etkilemiştir. Eğilme dayanımında en yüksek etkiye sahip faktörün %78,77 ile ÖTL oranının olduğu gözlemlenmiştir.
- AY-ÖTL harçlarının, basınç dayanımlarının $4,05-20,94 \text{ MPa}$ arasında değiştiği bulunmuştur. A0-ÖTL harçlarının ise basınç dayanımlarının $2,66-39,59 \text{ MPa}$ arasında değiştiği belirlenmiştir. Yüksek ÖTL kullanımının harç içinde homojen bir dağılım sağlayamaması bağ yapısında zayıflamalara neden olarak basınç dayanımını olumsuz yönde etkilemiştir. Basınç dayanımında en yüksek etkiye sahip faktörün %90,57 ile ÖTL oranının olduğu gözlemlenmiştir.
- AY-ÖTL harçlarının, ısıl iletkenlik katsayılarının $0,090-0,250 \text{ W/mK}$ arasında değiştiği bulunmuştur. A0-ÖTL harçlarının ise ısıl iletkenlik katsayılarının $0,240-0,994 \text{ W/mK}$ arasında değiştiği belirlenmiştir. ÖTL oranı arttıkça ısıl iletkenlik

katsayılarında azalma meydana gelmiştir. Bu durum, ÖTL'nin ısı iletimini sınırlandırıcı bir özellik taşıdığı ve harç matrisinde gözenekli bir yapı oluşturması ile açıklanabilmektedir. Isıl iletkenlik katsayılarında en yüksek etkiye sahip faktörün %98,49 ile ÖTL oranının olduğu gözlemlenmiştir.

- AY-ÖTL100 harcı için yapılan ısı transfer analizinde kararlı hal koşulları kullanılmıştır. Bundan dolayı sıcaklık dağılımının homojen bir şekilde olduğu gözlenmiş olup, ısı transferinin dengeli bir durumda olduğu anlaşılmıştır.
- Islanma-kuruma deneyine tabi tutulan AS, AX ve AY optimum harçlarının 30 çevrimde sırasıyla ağırlık kayıpları %10,91, %6,61 ve %9,37, ultrases geçiş hızı kayıpları %60,64, %34,76 ve %46,27, eğilme dayanım kayıpları %72,73, %61,51 ve %68,00, basınç dayanım kayıpları ise %62,58, %51,57 ve %59,69 bulunmuştur. Kontrol harcının ağırlık kaybı %7,33, ultrases geçiş hızı kaybı %32,14, eğilme dayanım kaybı %60,36 ve basınç dayanım kaybı %53,07 olarak belirlenmiştir. AS harcının ıslanma-kuruma çevrimlerine karşı daha hassas olduğu görülmüştür. Dayanım kaybı çevrimler devam ettikçe gözenekler arasındaki bağların zayıflayarak kılcal çatlakların gelişmesi ile açıklanabilmektedir.
- Donma-çözülme direnci deneyine tabi tutulan AS, AX ve AY optimum harçlarının 60 çevrimde sırasıyla ağırlık kayıpları %6,70, %2,67 ve %5,65, ultrases geçiş hızı kayıpları %30,52, %24,76 ve %26,87, eğilme dayanım kayıpları %32,73, %25,03 ve %27,79, basınç dayanım kayıpları ise %22,52, %14,21 ve %20,08 bulunmuştur. Kontrol harcının ağırlık kaybı %2,79, ultrases geçiş hızı kaybı %27,74, eğilme dayanım kaybı %25,89 ve basınç dayanım kaybı %17,65 olarak belirlenmiştir. Su emme oranının, donma-çözülme çevrimleri sırasında malzemenin dayanıklılığını doğrudan etkileyen bir faktör olduğu görülmüştür. Yüksek su emme oranına sahip AS harcında, donma sırasında daha fazla iç basınç oluşarak çatlak ve hasar riski artmıştır. Buna karşı düşük su emme oranına sahip AX harcı ise bu çevrimlere karşı daha az bozulma göstermiştir.
- Yüksek sıcaklık deneyine tabi tutulan AS, AX ve AY optimum harçlarının 800°C'de sırasıyla ağırlık kayıpları %3,58, %2,98 ve %4,04, ultrases geçiş hızı kayıpları %32,53, %5,00 ve %1,87, eğilme dayanım kayıpları %25,97, -%17,61 ve -%24,00, basınç dayanım kayıpları ise %7,96, -%11,46 ve -%13,46 bulunmuştur. Kontrol harcının ağırlık kaybı %9,42, ultrases geçiş hızı kaybı %62,24, eğilme dayanım kaybı %69,08 ve basınç dayanım kaybı %66,54 olarak belirlenmiştir.

Geopolimer harçlardaki kayıpların SD miktarı arttıkça arttığı, BA miktarı arttıkça azaldığı görülmüştür. Bu durum, BA kullanımının geopolimer matrisinde sinterleme etkisi yaratmış olması ile açıklanabilir.

- Asit atağı deneyine tabi tutulan AS, AX ve AY optimum harçlarının 360 günde sırasıyla ağırlık kayıpları %5,52, %3,84 ve %4,17, basınç dayanım kayıpları ise %79,33, %71,99 ve %77,18 bulunmuştur. Kontrol harcının ağırlık kaybı %6,30, ve basınç dayanım kaybı %87,28 olarak belirlenmiştir. Geopolimer harçlarda asit penetrasyonu sınırlı kalmıştır. C-S-H yerine oluşan alüminosilikat yapılar asit saldırısına daha dirençli olduğu için dayanım daha yavaş azalmıştır.
- Sülfat atağı deneyine tabi tutulan AS, AX ve AY optimum harçlarının 360 günde sırasıyla ağırlık kayıpları -%2,49, -%3,73 ve -%3,37 basınç dayanım kayıpları ise -%7,89, -%6,67 ve %1,24 bulunmuştur. Kontrol harcının ağırlık kaybı %2,92, ve basınç dayanım kaybı %7,69 olarak belirlenmiştir. Geopolimer harçlarda basınç dayanımı artışları meydana gelmiştir. Ayrıca, sülfat sonrası numunelerde hiçbirinde ciddi bir bozulma görülmemiştir. Geopolimer harçlardaki bu artışın gözenekleri dolduran sülfat çözeltisi ve oluşan yeni reaksiyonlar sebebiyle olduğu söylenebilmektedir. Özellikle nispeten reaksiyonun tamamlanmadığı karışımlarda yeni M-A-S-H, M-C-A-S-H ve M-N-A-S-H jellerinin oluşması ile mikro yapının güçlendiği böylece dayanımların arttığı düşünülmektedir.
- İncelenen geopolimer harçlardaki albit ve feldspat piklerinin XRD analizinde tespit edilmesi, N-A-S-H, C-(N)-A-S-H ve C-A-S-H gibi jel oluşumlarının varlığına işaret etmiştir. Harçların XRD piklerinin yoğunlukları durabilite deneylerinin etkisiyle birlikte kademeli olarak azalmıştır. TG/DTA analizinde AX harcında 800°C sıcaklığın üzerinde kütle kaybı olmadığı görülmüştür. SEM analizlerinde numunelerde reaksiyona girmemiş parçacıklar, kısmen reaksiyona girmiş parçacıklar, mikro çatlaklar, boşluklar ve geopolimer jeller görülmüştür. Ancak yüksek basınç dayanımları veren numunelerde daha az reaksiyona girmemiş parçacıklar, artmış geopolimer jel matrisi ve daha yoğun bir ara yüzey görülürken, düşük dayanım veren numunelerde ise daha fazla reaksiyona girmemiş parçacıklar, daha düşük yoğunluklu geopolimer jel matrisi ve arayüzeylerde mikro çatlakların olduğu görüldü. SEM görüntülerinin genel olarak basınç dayanımı ile uyumlu geldiği söylenebilir. Bununla birlikte, yüksek sıcaklıkta kürlenmiş numunelerde daha fazla mikro çatlaklar olduğu belirlenmiştir. EDX analizlerinde ise geopolimer

jellerde oluşan Al-O-Si ve Si-O-Si bağlarına, C-A-S-H ve N-A-S-H jellerinin varlığına işaret eden O, Si, Ca, Na, Al elementleri gözlemlenmiştir.

- Geopolimer harçlar arasında yapılan değerlendirmeler sonucunda, maksimum basınç dayanımı ve genel mekanik performansı göz önünde bulundurularak optimum AX karışımı en uygun seçenek olarak belirlenmiştir. Bu harç, %15 bor atığı (BA), %5 silis dumanı (SD) ve %10 sodyum (Na) içermekte olup, 60°C kürleme sıcaklığında ve 48 saatlik kürleme süresinde hazırlanmıştır. Karışımın basınç dayanımı 44,06 MPa, eğilme dayanımı 7,95 MPa ve ısı iletkenlik katsayısı 0,501 W/mK olarak ölçülmüştür. Bu özellikleriyle, optimum AX karışımı dayanıklılık ve mekanik performans açısından diğer karışımlara üstünlük sağlamış ve yapı malzemesi olarak endüstriyel uygulamalar için en uygun seçenek olarak önerilmiştir.

Elde edilen bulgulara göre, geopolimer harcın inşaat sektörü için gelecek vadeden bir malzeme olduğu ortaya çıkmaktadır. Özellikle erken yaşta yüksek dayanım kazanımı ve mükemmel durabilite özellikleri, geopolimer harcı sürdürülebilir yapı malzemesi olarak öne çıkarmaktadır. Çimento yerine endüstriyel atık malzemelerin kullanılması, CO₂ emisyonlarını azaltarak çevresel sürdürülebilirliği desteklemekte ve bu atıkların çevreye verebileceği zararları minimize etmektedir. Geopolimer harçların dayanıklılık testlerinde gösterdiği yüksek direnç ve pozitif dayanım değişimleri, özellikle sülfat atağına maruz kalan yapılar için büyük avantaj sağlamaktadır. Bu dayanım özellikleri, altyapı projelerinde, deniz yapılarında ve kimyasal ortamların bulunduğu endüstriyel tesislerde kullanılmasını teşvik etmektedir. Geopolimer harcın sürdürülebilirlik, dayanıklılık ve çevresel avantajları, gelecekte inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılmasını destekleyen önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Bu tezde belirlenen sonuçlar doğrultusunda, geopolimer harçların özelliklerini geliştirmek ve sürdürülebilir yapı malzemesi olarak kullanımlarını artırmak için öneriler şunlardır:

- Geopolimer harç üretiminde farklı kaynak malzemeler ve kimyasallar kullanarak yapılacak kombinasyon denemeleri, en uygun parametrelerin belirlenmesi açısından kritik bir adımdır. Bu süreçte, her bir parametrenin diğerini nasıl etkilediğini anlamak ve parametreler arasındaki olumlu veya olumsuz karşılıklı ilişkileri incelemek için kapsamlı araştırmalar yapılmalıdır. Bu tür analizler,

optimum dayanım ve durabilite özelliklerine sahip geopolimer beton geliştirmeyi kolaylaştıracaktır.

- Geopolimer yapı malzemelerinin sürdürülebilirliği açısından yüksek maliyetli alkali çözeltiler ve kürleme sıcaklıkları sorun oluşturmaktadır. Yüksek sıcaklıkta kürleme işleminin şantiye koşullarında uygulanmasının zorluğu da önemli bir engeldir. Bu nedenle, daha uygun maliyetli bir seçenek olan soda külü gibi alkali çözeltilerle yapılan çalışmalar teşvik edilebilir. Bunun yanında, hava kürü gibi oda sıcaklığında yapılabilecek kürleme yöntemlerine odaklanarak, geopolimer yapı malzemelerinin üretiminin maliyet etkinliği ve şantiye uyumluluğu artırılabilir. Bu yaklaşım, geopolimer betonun inşaat sektöründe daha geniş bir kabul görmesine ve çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamasına yardımcı olacaktır.
- Geopolimer harçların çeşitli çevresel koşullarda dayanıklılığı ve performansına dair uzun dönemli çalışmalar yapılması, bu malzemelerin yaygın inşaat kullanımına uygunluğunu doğrulamak için önerilmektedir.
- Taguchi yöntemine ek olarak genetik algoritmalar veya makine öğrenimi teknikleri gibi optimizasyon algoritmalarının uygulanması, karışım tasarımlarını daha da iyileştirebilir.
- Geopolimer harçların üretim ve uzun vadeli bakım maliyetlerini göz önünde bulundurarak geleneksel malzemelerle karşılaştırmalı ekonomik analizler yapılabilir.
- Geopolimer harçların inşaat sektöründe benimsenmesini kolaylaştırmak için standart test yöntemleri ve performans kriterlerinin geliştirilmesi gerekmektedir.
- Geopolimer teknolojilerinin pratik uygulamaları ve ticarileştirilmesini teşvik etmek için akademi, sanayi ve devlet kurumları arasında iş birliği yapılabilir.

Özetle, bu tez geopolimer harçların gelecekte geliştirilmesi için temel oluşturarak bu malzemelerin geleneksel yapı malzemelerine sürdürülebilir ve yüksek performanslı alternatifler olarak potansiyelini vurgulamaktadır. Yukarıda belirtilen önerilerin dikkate alınmasıyla, araştırmacılar ve sektör uygulayıcıları bu yenilikçi malzemelerin yaygın olarak benimsenmesi yönünde çalışabilirler.

KAYNAKÇA

- Addis, L. B., Sendekie, Z. B., Habtu, N. G., de Ligny, D., Roether, J. A., & Boccaccini, A. R. (2023). Optimization of process parameters for the synthesis of class F fly ash-based geopolymer binders. *Journal of Cleaner Production*, 415, 137849.
- Alcamand, H. A., Borges, P. H., Silva, F. A., & Trindade, A. C. C. (2018). The effect of matrix composition and calcium content on the sulfate durability of metakaolin and metakaolin/slag alkali-activated mortars. *Ceramics International*, 44(5), 5037-5044.
- Al-Majidi, M. H., Lampropoulos, A., & Cundy, A. (2016). Effect of alkaline activator, water, superplasticiser and slag contents on the compressive strength and workability of slag-fly ash based geopolymer mortar cured under ambient temperature. *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, 10(3), 308-312.
- Ali, N., Canpolat, O., Aygörmez, Y., & Al-Mashhadani, M. M. (2020). Evaluation of the 12–24 mm basalt fibers and boron waste on reinforced metakaolin-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 251, 118976.
- Ali, M. B., Saidur, R., Hossain, M. S. (2011). A review on emission analysis in cement industries, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 2252–2261.
- Al-Tamimi, A. S., Al-Amoudi, O. S. B., Al-Osta, M. A., Ali, M. R., & Ahmad, A. (2020). Effect of insulation materials and cavity layout on heat transfer of concrete masonry hollow blocks. *Construction and Building Materials*, 254, 119300.
- Aly, A. M., El-Feky, M. S., Kohail, M., & Nasr, E. S. A. (2019). Performance of geopolymer concrete containing recycled rubber. *Construction and Building Materials*, 207, 136-144.
- Aslani, F., Deghani, A., & Asif, Z. (2020). Development of lightweight rubberized geopolymer concrete by using polystyrene and recycled crumb-rubber aggregates. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(2), 04019345.
- ASTM C 1012-09, Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution, 2009.
- ASTM C 1064, Standard Test Methods for Temperature of Freshly Mixed Hydraulic-cement concrete, ASTM, International, West Conshohocken, PA, 2011.
- ASTM C 1585-13, Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic Cement Concretes, ASTM International, 2013
- ASTM C 518, Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus. *Annual Book of ASTM Standards*, 2017.
- ASTM C 597-16, Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, ASTM International, 2009.
- ASTM C 618-17a, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International, 2017.

- ASTM C 666, Standard test method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing.
- ASTM C 807-13, Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement Mortar by Modified Vicat Needle, ASTM, International, West Conshohocken, PA, 2008.
- ASTM D 559-96, Standard test methods for wetting and drying compacted soil-cement mixture.
- Atabey, İ. İ., Karahan, O., Bilim, C., & Atış, C. D. (2020). The influence of activator type and quantity on the transport properties of class F fly ash geopolymer. *Construction and Building Materials*, 264, 120268.
- Atış, C. D., Görür, E. B., Karahan, O. K. A. N., Bilim, C., İlkentapar, S. E. R. H. A. N., & Luga, E. (2015). Very high strength (120 MPa) class F fly ash geopolymer mortar activated at different NaOH amount, heat curing temperature and heat curing duration. *Construction and building materials*, 96, 673-678.
- Aydın, S., & Kızıltepe, C. Ç. (2019). Valorization of boron mine tailings in alkali-activated mortars. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(10), 04019224.
- Bajpai, R., Choudhary, K., Srivastava, A., Sangwan, K. S., & Singh, M. (2020). Environmental impact assessment of fly ash and silica fume based geopolymer concrete. *Journal of Cleaner Production*, 254, 120147.
- Bakharev, T. (2005), “Durability of Geopolymer Materials in Sodium and Magnesium Sulfate Solutions,” *Cement and Concrete Research* 35(6), 1233–1346.
- Bakharev, T., Sanjayan, J. G. & Cheng, Y.-B. (1999), “Alkali activation of Australian slag cements”, *Cement and Concrete Research* 29, 113–120.
- Bakharev, T., Sanjayan, J.G. & Cheng, Y.-B. (2002), “Sulfate attack on alkali-activated slag concrete”, *Cement and Concrete Research* 32, 211–216.
- Bakri A.M.A., Kamarudin H., Bnhussain M., Nizar I.K., Rafiza A.R. & Zarina Y. (2011), “Microstructure of different NaOH molarity of fly ash-based green polymeric cement”, *Journal of Engineering and Technology Research*, 3(2), 44-49.
- Barbosa, V. F., & MacKenzie, K. J. (2003). Thermal behaviour of inorganic geopolymers and composites derived from sodium polysialate. *Materials research bulletin*, 38(2), 319-331.
- Baysal, O. (1974). Kırka Borat Yataklarındaki Kil Mineralleri Üzerine Ön Çalışma. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 17(1), 17-30.
- Bentz, D. P., Ferraris, C. F., & Filliben, J. J. (2011). Optimization of particle sizes in high volume fly ash blended cements. US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology.
- Bernal, S. A., de Gutiérrez, R. M., Pedraza, A. L., Provis, J. L., Rodriguez, E. D., & Delvasto, S. (2011). Effect of binder content on the performance of alkali-activated slag concretes. *Cement and concrete research*, 41(1), 1-8.
- Bernal, S. A., Provis, J. L., Walkley, B., San Nicolas, R., Gehman, J. D., Brice, D. G., Kilcullen, A., Duxson, P., & van Deventer, J. S. J. (2013), “Gel Nanostructure in

- Alkali- Activated Binders Based on Slag and Fly Ash, and Effects of Accelerated Carbonation,” *Cement and Concrete Research* 53, 127–144.
- Bernal, S., Gutierrez, R.D., Delvasto, S. & Rodriguez, E. (2010), “Performance of an alkaliactivated slag concrete reinforced with steel fibers”, *Construction and Building Materials* 24, 208–214.
- Bolina, F. L. (2016) Avaliação experimental da influência dos requisitos de durabilidade na segurança contra incêndio de protótipos de pilares pré-fabricados de concreto armado, São Leopoldo. Thesis (Master). Curso de Arquitetura, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 180p.
- Boren, (2021). <https://www.tenmak.gov.tr/boren/tr/>. Son erişim tarihi: 07 Mart 2021.
- Buchwald, A., Hohmann, M., Posern, K., & Brendler, E. (2009). The suitability of thermally activated illite/smectite clay as raw material for geopolymer binders. *Applied Clay Science*, 46(3), 300-304.
- Bütünler, R. (2011). Emet bölgesi düşük tenörlü kolemanit stoklarının değerlendirilebilirliğinin araştırılması.
- Caldas, P. H. C. H., de Azevedo, A. R. G., & Marvila, M. T. (2023). Silica fume activated by NaOH and KOH in cement mortars: Rheological and mechanical study. *Construction and Building Materials*, 400, 132623.
- Cardarelli, F. (2008). *Materials handbook: a concise desktop reference*: Springer Science ve Business Media.
- Castellote, M., Alonso, C., Andrade, C., Turrillas, X., & Campo, J. (2004). Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction. *Cement and concrete research*, 34(9), 1633-1644.
- CEMBUREAU. (2017). Activity Report 2017 of The European Cement Association. (March), 1–48. Retrieved from <https://www.cembureau.eu>
- Chindaprasirt, P., Rattanasak, U., & Taebuanhuad, S. (2013). Resistance to acid and sulfate solutions of microwave-assisted high calcium fly ash geopolymer. *Materials and structures*, 46, 375-381.
- Chokkalingam, P., El-Hassan, H., El-Dieb, A., & El-Mir, A. (2022). Development and characterization of ceramic waste powder-slag blended geopolymer concrete designed using Taguchi method. *Construction and Building Materials*, 349, 128744.
- Criado, M., Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A. (2010). Alkali activation of fly ash. Part III: Effect of curing conditions on reaction and its graphical description. *Fuel*, 89(11), 3185-3192.
- Çelik, A. (2019). Sentetik liflerle güçlendirilmiş bor atığı katkılı metakaolin tabanlı geopolimer kompozitlerin yüksek sıcaklık davranışı ve mekanik özellikleri (Doctoral dissertation, Sakarya Üniversitesi (Turkey)).
- Çelik, A., Yilmaz, K., Canpolat, O., Al-Mashhadani, M. M., Aygörmez, Y., & Uysal, M. (2018). High-temperature behavior and mechanical characteristics of boron waste

- additive metakaolin based geopolymer composites reinforced with synthetic fibers. *Construction and Building Materials*, 187, 1190-1203.
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and calorimetry*, 37(8), 1633-1656.
- Davidovits, J. (1994, October). Properties of Geopolymer Cements. In *First International Conference on Alkaline Cements and Concretes* (Vol. 1, Pp. 131-149). Kiev State Technical University, Ukraine: Scientific Research Institute on Binders and Materials.
- Davidovits, J. (2008), *Geopolymer Chemistry and Applications*, Institut Géopolymère, Saint- Quentin.
- Dehghani, A., Aslani, F., & Panah, N. G. (2021). Effects of initial SiO₂/Al₂O₃ molar ratio and slag on fly ash-based ambient cured geopolymer properties. *Construction and Building Materials*, 293, 123527.
- Diaz E.I., Allouche E.N. & Eklund S. (2010), “Factors affecting the suitability of fly ash as source material for geopolymers”, *Fuel*, 89, 992-996.
- Dong, M., Elchalakani, M., Karrech, A., & Yang, B. (2020). Strength and durability of geopolymer concrete with high volume rubber replacement. *Construction and Building Materials*, 121783.
- Dongxia, Y., Xiaoyan, L., Dingyong, H., Zuoren, N., & Hui, H. (2012). Optimization of weld bead geometry in laser welding with filler wire process using Taguchi’s approach. *Optics and Laser Technology*, 44(7), 2020-2025.
- DPT, 2008. Kimya sanayi özel ihtisas komisyonu, Bor, soda külü, krom kimyasalları çalışma grubu raporu, Ankara, 138.
- Duxon P., Provis J.L., Lukey G.C. & van Deventer J.S.J. (2007a), “The role of inorganic polymer technology in the development of green concrete”, *Cement and Concrete Research*, 37, 1590-1597.
- Duxon P., Fernandez-Jimenez A., Provis J.L., Lukey G.C., Palomo A. & van Deventer J.S.J. (2007b), “Geopolymer technology: The current state of the art”, *Journal of Materials Science*, 42, 2917-293.
- Duxson, P., van Deventer, J., & Provis, J. (2008). Commercialisation of geopolymer concrete in australia: from market push to market pull. *Global Roadmap for Ceramics-ICC2 Proceedings*.
- Džunuzović, N., Komljenović, M., Nikolić, V., & Ivanović, T. (2017). External sulfate attack on alkali-activated fly ash-blast furnace slag composite. *Construction and Building Materials*, 157, 737-747.
- Eldin, N. N., & Senouci, A. B. (1993). Observations on rubberized concrete behavior. *Cement, Concrete, and Aggregates*, 15(1), 74-84.
- Ergeshov, Z. (2021). Uçucu kül tabanlı geopolimer harçlarda silis dumanı ikamesinin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine etkilerinin araştırılması (Doctoral dissertation, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD).

Etimaden, <https://www.etimaden.gov.tr>, (Ocak, 2024)

- Fernández-Jiménez, A., García-Lodeiro, I., & Palomo, A. (2007). Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials. *Journal of materials science*, 42, 3055-3065.
- Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A. (2005). Mid-infrared spectroscopic studies of alkali-activated fly ash structure. *Microporous and mesoporous materials*, 86(1-3), 207-214.
- Fernández-Jiménez, A., Puertas, F., Sobrados, I. & Sanz, J., “Structure of calcium silicate hydrates formed in alkaline-activated slag: influence of the type of alkaline activator”, *Journal of the American Ceramic Society* 86 (8), 1389–1394, 2003.
- Fernández Pereira C., Luna Y., Querol X., Antenucci D. & Vale J. (2009), “Waste stabilization/solidification of an electric arc furnace dust using fly ash-based geopolymers”, *Fuel*, 88, 1185-1193.
- Ferone C., Roviello G., Colangelo F., Cioffi R. & Tarallo O. (2013), “Novel hybrid organic-geopolymer materials”, *Applied Clay Science*, 73, 42-50.
- Font O., Moreno N., Querol X., Izquierdo M., Alvarez E., Diez S., Elvira J., Antenucci D., Nugteren H., Plana F., López A., Coca P. & Peña F.G. (2010), “X-ray powder diffraction-based method for the determination of the glass content and mineralogy of coal (co)- combustion fly ashes”, *Fuel*, 89, 2971-2976.
- García-Lodeiro, I., Maltseva, O., Palomo, Á., & Fernández-Jiménez, A. (2012). *Cimenturi Hibride Alcaline. Partea I: Fundamente Hybrid Alkaline Cements. Part I: Fundamentals. Revista Romana de Materiale*, 42(4), 330.
- Garg, M., & Singh, M. (2006). Strength and durability of cementitious binder produced from fly ash–lime sludge–Portland cement.
- Gharzouni, A. Vidal L. Essaidi, N. Joussien, E. & Rossignol, S. 2016, Recycling of geopolymer waste: Influence on geopolymer formation and mechanical properties. *Material design*, 94: 211-229.
- Gheni, A. A., ElGawady, M. A., & Myers, J. J. (2017). Mechanical Characterization of Concrete Masonry Units Manufactured with Crumb Rubber Aggregate. *ACI Materials Journal*, 114(1).
- Gunasekaran, S., & Anbalagan, G. (2007). Thermal decomposition of natural dolomite. *Bulletin of Materials Science*, 30, 339-344.
- Guo, S., Dai, Q., Si, R., Sun, X., & Lu, C. (2017). Evaluation of properties and performance of rubber-modified concrete for recycling of waste scrap tire. *Journal of Cleaner Production*, 148, 681-689.
- Gupta, T., Sharma, R. K., & Chaudhary, S. (2015). Impact resistance of concrete containing waste rubber fiber and silica fume. *International Journal of Impact Engineering*, 83, 76-87.
- Habert, G., & Ouellet-Plamondon, C. (2016). Recent update on the environmental impact of geopolymers. *RILEM technical Letters*, 1, 17-23.

- Han, Q., Yang, Y., Zhang, J., Yu, J., Hou, D., Dong, B., & Ma, H. (2020). Insights into the interfacial strengthening mechanism of waste rubber/cement paste using polyvinyl alcohol: Experimental and molecular dynamics study. *Cement and Concrete Composites*, 114, 103791.
- Hardjito, D., & Rangan, B. V. (2005). Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete.
- He J., Zhang J., Yu, Y. & Zhang G. (2012), "The strength and microstructure of two geopolymers derived from metakaolin and red mud-fly ash admixture: A comparative study", *Construction and Building Materials*, 30, 80-91.
- He, L., Ma, Y., Liu, Q., & Mu, Y. (2016). Surface modification of crumb rubber and its influence on the mechanical properties of rubber-cement concrete. *Construction and Building Materials*, 120, 403-407.
- Heah CY, Kamarudin H, Al Bakri AM, Binhussain M, Luqman M, Nizar IK, & Liew YM (2011). Effect of curing profile on kaolin-based geopolymers. *Physics Procedia*, 22: 305-311.
- Hewlett, P.C. (1998), *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, Elsevier Ltd., 4th ed, Oxford, United Kingdom.
- Ho, H. L., Huang, R., Lin, W. T., & Cheng, A. (2018). Pore-structures and durability of concrete containing pre-coated fine recycled mixed aggregates using pozzolan and polyvinyl alcohol materials. *Construction and Building Materials*, 160, 278-292.
- Huang, X., Ranade, R., Ni, W., & Li, V. C. (2013). On the use of recycled tire rubber to develop low E-modulus ECC for durable concrete repairs. *Construction and Building Materials*, 46, 134-141.
- Ismail, I., Bernal, S. A., Provis, J. L., Hamdan, S., & van Deventer, J. S. (2013). Microstructural changes in alkali activated fly ash/slag geopolymers with sulfate exposure. *Materials and structures*, 46, 361-373.
- Ismail, I., Bernal, S. A., Provis, J. L., San Nicolas, R., Hamdan, S., & van Deventer, J. S. (2014). Modification of phase evolution in alkali-activated blast furnace slag by the incorporation of fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 45, 125-135.
- Juengsuwattananon, K., Winnefeld, F., Chindaprasirt, P., & Pimraksa, K. (2019). Correlation between initial $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ and $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ratios on phase and microstructure of reaction products of metakaolin-rice husk ash geopolymer. *Construction and Building Materials*, 226, 406-417.
- Kamseu, E., Rizzuti, A., Leonelli, C., & Perera, D. (2010). Enhanced thermal stability in K₂O-metakaolin-based geopolymer concretes by Al_2O_3 and SiO_2 fillers addition. *Journal of Materials Science*, 45, 1715-1724.
- Kani E.N. & Allahverdi A. (2009). Effects of curing time and temperature on strength development of inorganic polymeric binder based on natural Pozzolan. *Journal of Materials Science*, 44(12): 3088-3097.
- Kaplan, G., & Gültekin, A. B. 2010. Yapı sektöründe uçucu kül kullanımının çevresel ve toplumsal etkiler açısından incelenmesi. *International Sustainable Buildings Symposium (ISBS)*, 26-28 May 2010, Ankara, Turkey.

- Karshioğlu, A., Onur, M. İ., & Balaban, E. (2022). Investigation of boron waste usage in civil engineering applications. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(3), 727-735.
- Kashani, A., Ngo, T. D., Hemachandra, P., & Hajimohammadi, A. (2018). Effects of surface treatments of recycled tyre crumb on cement-rubber bonding in concrete composite foam. *Construction and Building Materials*, 171, 467-473.
- Khale D. & Chaudhary R. (2007), “Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: A Review”, *Journal of Materials Science*, 42, 729-746.
- Komnitsas K. (2011), “Potential of geopolymer technology towards green buildings and sustainable cities”, *Procedia Engineering*, 21, 1023-1032.
- Kong L.Y.D., Sanjayan G.J. & Sagoe-Crentsil K. (2007), “Comparative performance of geopolymer made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures”, *Cement and Concrete Research*, 37, 1583-1589.
- Kotwal, A. R., Kim, Y. J., Hu, J., & Sriraman, V. (2015). Characterization and early age physical properties of ambient cured geopolymer mortar based on class C fly ash. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 9, 35-43.
- Leung, C. K., & Grasley, Z. C. (2012). Effect of micrometric and nanometric viscoelastic inclusions on mechanical damping behavior of cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 35, 444-451.
- Li, Z., Liu, L., Yan, S., Zhang, M., Xia, J., & Xie, Y. (2019). Effect of freeze-thaw cycles on mechanical and porosity properties of recycled construction waste mixtures. *Construction and Building Materials*, 210, 347-363.
- Lloyd, N., & Rangan, V. (2009). Geopolymer concrete-sustainable cementless concrete. In *Proceedings of Tenth ACI International Conference* (pp. 33-53). American Concrete Institute.
- Luhar, S., Chaudhary, S., & Luhar, I. (2018). Thermal resistance of fly ash based rubberized geopolymer concrete. *Journal of Building Engineering*, 19, 420-428.
- Lyu S., Hsiao Y., Wang T., Cheng T. & Ueng T. (2013a), “Microstructure of geopolymer accounting for associated mechanical characteristics under various stress states”, *Cement and Concrete Research*, 54, 199-207.
- Lyu S., Wang T., Cheng T. & Ueng T. (2013b), “Main factors affecting mechanical characteristics of geopolymer revealed by experimental design and associated statistical analysis”, *Construction and Building Materials*, 43, 589-597.
- Ma, Y., Hu, J., & Ye, G. (2013). The pore structure and permeability of alkali activated fly ash. *Fuel*, 104, 771-780.
- MacKenzie J.D.K. (2008), “Science of geopolymers: State of the art and possible future developments”, *Global Roadmap for Ceramics ICC2 Proceedings* (Ed: Bellosi A., Babini G.N.), Institute of Science and Technology for Ceramics, National Research Council, Italy, 703-711.

- McIntosh, R., Sharp, J., & Wilburn, F. (1990). The thermal decomposition of dolomite. *Thermochimica Acta*, 165(2), 281-296.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. (2006). *Concrete: microstructure, properties, and materials*.
- Mehta, A., Siddique, R., Singh, B. P., Aggoun, S., Łagód, G., & Barnat-Hunek, D. (2017). Influence of various parameters on strength and absorption properties of fly ash based geopolymer concrete designed by Taguchi method. *Construction and Building Materials*, 150, 817-824.
- Mehta, A., & Siddique, R. (2017). Properties of Low-Calcium Fly Ash Based Geopolymer Concrete Incorporating OPC as Partial Replacement of Fly Ash. *Construction and Building Materials*, 150, 792-807.
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM), <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=ESKISEHIR>, Kasım (2024).
- Mo, B.H., Zhu, H., Cui, X.M., He, Y. & Gong, S.Y., (2014). Effect of curing temperature on geopolymerization of metakaolin-based geopolymers. *Appl. Clay Sci.* 99, 144–148. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.06.024>.
- Moustafa, A. & ElGawady, M.A., 2015. Mechanical properties of high strength concrete with scrap tire rubber. *Construction and Building Materials*, [e-journal] 93, pp.249-256. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.115>.
- Nath, P., & Sarker, P. K. (2014). Effect of GGBFS on setting, workability and Early Strength Properties of Fly Ash Geopolymer Concrete Cured in Ambient Condition. *Construction and Building Materials*, 66, 163-171.
- Ng, C., Alengaram, U. J., Wong, L. S., Mo, K. H., Jumaat, M. Z., & Ramesh, S. (2018). A review on microstructural study and compressive strength of geopolymer mortar, paste and concrete. *Construction and Building Materials*, 186, 550-576.
- Nurruddin, M. F., Sani, H., Mohammed, B. S., & Shaaban, I. (2018). Methods of curing geopolymer concrete: A review. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, 5(1), 31-36.
- Okoye, F. N., Prakash, S., & Singh, N. B. (2017). Durability of Fly Ash Based Geopolymer Concrete in The Presence of Silica Fume. *Journal of Cleaner Production*, 149, 1062-1067.
- Olivia, M. & Nikraz, H. 2012, Properties of fly ash geopolymer concrete designed by Taguchi method. *Materials and Design*, 36, 191-198.
- Onoue, K., Iwamoto, T., & Sagawa, Y. (2019). Optimization of the design parameters of fly ash-based geopolymer using the dynamic approach of the Taguchi method. *Construction and Building Materials*, 219, 1-10.
- Özdemir, M., & Öztürk, N. U. (2003). Utilization of clay wastes containing boron as cement additives. *Cement and Concrete Research*, 33(10), 1659-1661.
- Pacheco-Torgal, F., Lourenço, P. B., Labrincha, J., Chindapasirt, P., & Kumar, S. (Eds.). (2014). *Eco-efficient masonry bricks and blocks: Design, properties and durability*. Woodhead Publishing.

- Pacheco-Torgal, F. Labrincha, J.A. Leobelli, C. Palomo, A. & Chindaprasirt, P. (2015). *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*, Woodhead Publishing, Cambridge, UK, 819.
- Palomo, A., Grutzeck, M. W., & Blanco, M. T. (1999). Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cement and concrete research*, 29(8), 1323-1329.
- Park, S. M., Jang, J. G., Lee, N. K., & Lee, H. K. (2016). Physicochemical properties of binder gel in alkali-activated fly ash/slag exposed to high temperatures. *Cement and Concrete Research*, 89, 72-79.
- Paya, J., Monzo, J., Borrachero, M. V., Peris-Mora, E., & Amahjour, F. (2000). Mechanical treatment of fly ashes: Part IV. Strength development of ground fly ash-cement mortars cured at different temperatures. *Cement and Concrete Research*, 30(4), 543-551.
- Perera, D. S., Uchida, O., Vance, E. R., & Finnie, K. S. (2007). Influence of curing schedule on the integrity of geopolymers. *Journal of materials science*, 42, 3099-3106.
- Phoo-ngernkham T., Chindaprasirt P., Sata V., Hanjitsuwan S. & Hatanaka S. (2014), "The effect of adding nano-SiO₂ and nano-Al₂O₃ on properties of high calcium fly ash geopolymer cured at ambient temperature", *Materials and Design*, 55, 58-65.
- Portland Cement Association. (2016). *USA Cement Industry Annual Yearbook*. 62.
- Provis, J.L. & Bernal, S.A. (2014). "Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials", *The Annual Review of Materials Research* 44(3), 299-327.
- Provis, J.L. & van Deventer, J. (2014), *Alkali Activated Materials, RILEM State-of-the-Art Reports*.
- Prusty, J. K., & Pradhan, B. (2020). Multi-response Optimization Using Taguchi-Grey Relational Analysis for Composition of Fly Ash-Ground Granulated Blast Furnace Slag Based Geopolymer Concrete. *Construction and Building Materials*, 241, 118049.
- Radhi, A., Al-Attar, A. A., & Ahmed, H. M. (2024). Performance of Geopolymer Concrete Against Acid Attacks Using Taguchi Method. *International Journal of Applied Optimization Studies*, 4(1), 1-11.
- Rangan, B. V. (2008). Low-calcium, fly-ash-based geopolymer concrete. In *Concrete construction engineering handbook* (pp. 26-1). CRC press
- Rashad, A. M. (2013). A comprehensive overview about the influence of different additives on the properties of alkali-activated slag—A guide for Civil Engineer. *Construction and building materials*, 47, 29-55.
- Rashidian-Dezfouli, H., & Rangaraju, P. R. (2017). A comparative Study on The Durability of Geopolymers Produced with Ground Glass Fiber, Fly Ash, and Glass-Powder in Sodium Sulfate Solution. *Construction and Building Materials*, 153, 996-1009.

- Rattanasak, U., & Chindaprasirt, P. (2009). Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer. *Minerals Engineering*, 1073-1078.
- Rostami, M., & Behfarnia, K. (2017). The effect of silica fume on durability of alkali activated slag concrete. *Construction and building materials*, 134, 262-268.
- Rovnaník, P. (2010). Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. *Construction and building materials*, 24(7), 1176-1183.
- Ruiz-Santaquiteria, C., Skibsted, J., Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A. (2012). Alkaline solution/binder ratio as a determining factor in the alkaline activation of aluminosilicates. *Cement and Concrete Research*, 42(9), 1242-1251.
- Ryu, G. S., Lee, Y. B., Koh, K. T., & Chung, Y. S. (2013). The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. *Construction and building materials*, 47, 409-418.
- Sagoe-Crentsil, K., & Weng, L. (2007). Dissolution processes, hydrolysis and condensation reactions during geopolymer synthesis: Part II. High Si/Al ratio systems. *Journal of materials science*, 42, 3007-3014.
- Samantasinghar, S., & Singh, S. P. (2019). Fresh and hardened properties of fly ash–slag blended geopolymer paste and mortar. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 13(1), 47.
- Sasaki, K., Qiu, X., Hosomomi, Y., Moriyama, S. & Hirajima, T. (2013). Effect of natural dolomite calcination temperature on sorption of borate onto calcined products. *Microporous and Mesoporous Materials*, 171, 1-8.
- Sasui, S., Kim, G., Nam, J., Koyama, T., & Chansomsak, S. (2019). Strength and microstructure of class-C fly ash and GGBS blend geopolymer activated in NaOH & NaOH+ Na₂SiO₃. *Materials*, 13(1), 59.
- Sharifi, E., Sadjadi, S. J., Aliha, M. R. M., & Moniri, A. (2020). Optimization of high-strength self-consolidating concrete mix design using an improved Taguchi optimization method. *Construction and Building Materials*, 236, 117547.
- Sheelavantar, P. G., Pandit, P., Prashanth, S., Nishit, N., & Jadhav, M. (2024). Taguchi-integrated grey relational analysis for multi-response optimization of mix design for alkali-activated concrete. *Materials Research Express*.
- Shi, C., Chong, L., Hu, X., & Liu, X. (2015). Geopolymer: Current status and research needs. *Indian Concrete Journal*, 89(2), 49-57.
- Siddique, R., & Khan, M. I. (2011). *Supplementary cementing materials*. Springer Science & Business Media.
- Siddique, R., & Naik, T. R. (2004). Properties of concrete containing scrap-tire rubber—an overview. *Waste management*, 24(6), 563-569.
- Somna, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P., & Chindaprasirt, P. (2011). NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature. *Fuel*, 90(6), 2118-2124.

- Soutsos, M., Boyle, A. P., Vinai, R., Hadjierakleous, A., & Barnett, S. J. (2016). Factors influencing the compressive strength of fly ash based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 110, 355-368.
- Sun, P., & Wu, H. C. (2013). Chemical and freeze–thaw resistance of fly ash-based inorganic mortars. *Fuel*, 111, 740-745.
- Şahin, O., ve Bulutcu, A. N. (2002). Dehydration behaviour of borax pentahydrate to anhydrous borax by multi-stage heating in a fluidized. *Turkish Journal of Chemistry*, 26(1), 89-96.
- Şahin, O., ve Bulutcu, A. N. (2003). Evaluation of thermal decomposition kinetics of borax pentahydrate using genetic algorithm method by isothermal analysis. *Turkish Journal of Chemistry*, 27(2), 197-207.
- Şinik, O. (2019). Geopolimer betonlarda dayanıklılık özelliklerinin araştırılması (Master's thesis).
- Taguchi, G. (1986). *Introduction to quality engineering: designing quality into products and processes*.
- Tashima, M. M., Reig, L., Santini Jr, M. A., Moraes, J. C. B., Akasaki, J. L., Payá, J., Borrachero, M. V. & Soriano, L. (2016). Compressive strength and microstructure of alkali-activated blast furnace slag/sewage sludge ash (GGBS/SSA) blends cured at room temperature, *Waste and Biomass Valorization*, 8 (5), 1441–1451. DOI: 10.1007/s12649-016-9659-1.
- Taşdemir, C. (2003). Hafif betonların ısı yalıtım ve taşıyıcılık özellikleri. *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi*, (427), 57-61.
- Taylor, H. F. (1997). *Cement chemistry* (Vol. 2, p. 459). London: Thomas Telford.
- Topark-Ngarm, P., Chindapasirt, P., & Sata, V. (2015). Setting time, strength, and bond of high-calcium fly ash geopolymer concrete. *Journal of materials in civil engineering*, 27(7), 04014198.
- Temuujin, J., Williams, R. P., & Van Riessen, A. (2009). Effect of mechanical activation of fly ash on the properties of geopolymer cured at ambient temperature. *Journal of materials processing technology*, 209(12-13), 5276-5280.
- Thokchom, S., Ghosh, P., & Ghosh, S. (2010). Performance of fly ash based geopolymer mortars in sulphate solution. *Journal of engineering science and technology review*, 3(1), 36-40.
- Thomas, B. S., & Gupta, R. C. (2016). A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1323-1333.
- Thong, C. C., Teo, D. C. L., & Ng, C. K. (2016). Application of polyvinyl alcohol (PVA) in cement-based composite materials: A review of its engineering properties and microstructure behavior. *Construction and Building Materials*, 107, 172-180.
- Thunuguntla, C. S., & Rao, T. G. (2018). Effect of mix design parameters on mechanical and durability properties of alkali activated slag concrete. *Construction and Building Materials*, 193, 173-188.

- Trindade, M. J., Dias, M. I., Coroado, J., & Rocha, F. (2010). Firing tests on clay-rich raw materials from the Algarve basin (southern Portugal): study of mineral transformations with temperature. *Clays and Clay Minerals*, 58(2), 188-204.
- TS EN 1008, mixing water for concrete—specifications for sampling, testing and assessing the suitability of water, including water recovered from processes in the concrete industry, as mixing water for concrete, 2003.
- TS EN 1015-3, Kagit Harcı- Deney Metotları- Bölüm 3: Taze Harç Kıvamının Tayini (Yayılma Tablası İle), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2000.
- TS EN 1015-10, 1999, Methods of test for masonry-Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar.
- TS EN 1363-1, Yangına dayanıklılık deneyleri- Bölüm 1: Genel kurallar, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2013.
- TS EN 196-1, Çimento deney metotları- Bölüm 1: Dayanım tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2016.
- TS EN 197-1, Çimento- Bölüm 1: genel çimentolar - bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2012.
- Turner, L. K., & Collins, F. G. (2013). Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. *Construction and building materials*, 43, 125-130.
- Tuyan, M., Andiç-Çakır, Ö., & Ramyar, K. (2018). Effect of alkali activator concentration and curing condition on strength and microstructure of waste clay brick powder-based geopolymer. *Composites Part B: Engineering*, 135, 242-252.
- Tuyan, M., Boyacı, O. C., Çakır, Ö. A., & Ramyar, K. (2020). Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Betonların Mekanik Özellik Ve Yüksek Sıcaklık Dirençlerinin Araştırılması. *Hazır Beton*, 71-76.
- Türker, P. Erdoğan, B. Katnaş, F. ve Yeğinobalı, A. 2009, Türkiye’deki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri. Ankara.
- Wang, X., Xia, J., Nanayakkara, O., & Li, Y. (2017). Properties of high-performance cementitious composites containing recycled rubber crumb. *Construction and Building Materials*, 156, 1127-1136.
- Wang, S., & Wu, H. (2006). Environmental-benign utilisation of fly ash as low-cost adsorbents. *Journal of hazardous materials*, 136(3), 482-501.
- Weil M., Jeske U., Dombrowski K. & Buchwald A. (2007), “Sustainable design of geopolymers-evaluation of raw materials by the integration of economic and environmental aspects in the early phases of material development”, *Advances in Life Cycle Engineering for Sustainable Manufacturing Businesses-Proceedings of the 14th CIRP Conference on Life Cycle Engineering* (Ed: Takata S., Umeda Y.), Japan, 279-283.
- Wong, C. L., Mo, K. H., Alengaram, U. J., & Yap, S. P. (2020). Mechanical strength and permeation properties of high calcium fly ash-based geopolymer containing recycled brick powder. *Journal of Building Engineering*, 32, 101655.

- Wongsa, A., Sata, V., Nematollahi, B., Sanjayan, J., & Chindaprasirt, P. (2018). Mechanical and thermal properties of lightweight geopolymer mortar incorporating crumb rubber. *Journal of Cleaner Production*, 195, 1069-1080.
- Xiao, Q., Liu, X., Qiu, J., & Li, Y. (2020). Capillary Water Absorption Characteristics of Recycled Concrete in Freeze-Thaw Environment. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020(1), 1620914.
- Xue, J., & Shinozuka, M. (2013). Rubberized concrete: A green structural material with enhanced energy-dissipation capability. *Construction and Building Materials*, 42, 196-204.
- Xu H. & van Deventer J.S.J. (2000), "The geopolymerization of alumina-silicate minerals", *International Journal of Mineral Processing*, 59, 427-266.
- Van Deventer, J. S. J., Provis, J. L., Duxson, P., & Lukey, G. C. (2007). Reaction mechanisms in the geopolymeric conversion of inorganic waste to useful products. *Journal of hazardous materials*, 139(3), 506-513.
- Van Deventer, J. S., Provis, J. L., & Duxson, P. (2012). Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement. *Minerals Engineering*, 29, 89-104.
- Van Jaarsveld, J. G. S., Van Deventer, J. S. J., & Lorenzen, L. (1997). The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: Part I. Theory and applications. *Minerals engineering*, 10(7), 659-669.
- Yang, H., Liu, L., Yang, W., Liu, H., Ahmad, W., Ahmad, A., ... & Joyklad, P. (2022). A comprehensive overview of geopolymer composites: A bibliometric analysis and literature review. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00830.
- Yılmazoğlu, A., (2022) Kauçuk Lif Katkılı Geopolimer Betonların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 744799.
- Yip, C. K., & Van Deventer, J. S. J. (2003). Microanalysis of calcium silicate hydrate gel formed within a geopolymeric binder. *Journal of Materials Science*, 38, 3851-3860.
- Yön, M. Ş., & Karataş, M. (2022). Evaluation of the mechanical properties and durability of self-compacting alkali-activated mortar made from boron waste and granulated blast furnace slag. *Journal of Building Engineering*, 61, 105263.
- Zaharaki, D., Komnitsas, K., & Perdikatsis, V. (2010). Use of analytical techniques for identification of inorganic polymer gel composition. *Journal of Materials Science*, 45, 2715-2724.
- Zhang, H. Y., Kodur, V., Wu, B., Cao, L., & Qi, S. L. (2016). Comparative thermal and mechanical performance of geopolymers derived from metakaolin and fly ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(2), 04015092.
- Zhang, Z., Provis, J. L., Reid, A., & Wang, H. (2014). Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction. *Construction and Building Materials*, 56, 113-127.

- Zhang, J., Shi, C., Zhang, Z., & Ou, Z. (2017). Durability of alkali-activated materials in aggressive environments: A review on recent studies. *Construction and Building Materials*, 152, 598-613.
- Zhao, R., Yuan, Y., Cheng, Z., Wen, T., Li, J., Li, F., & Ma, Z. J. (2019). Freeze-thaw resistance of Class F fly ash-based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 222, 474-483.
- Zhuang, X. Y., Chen, L., Komarneni, S., Zhou, C. H., Tong, D. S., Yang, H. M., ... & Wang, H. (2016). Fly Ash-Based Geopolymer: Clean Production, Properties and Applications. *Journal of Cleaner Production*, 125, 253-267.



ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO: 0000-0001-5178-4069

Ad Soyad : Asena KARSLIOĞLU KAYA

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim:

- 2013-2018, Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği (İngilizce), Lisans
- 2018-2024, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yapı Malzemeleri, İnşaat Mühendisliği, Bütünleşik Doktora

Yayınları:

- Kaya, A. K., Yavuz, E. H., Ekici, İ., Balaban, E., & Onur, M. İ. (2023). Comparison of gyratory compaction effect on coarse and fine-grained soils. Journal of Engineering Research.
- Karşlıoğlu, A., Onur, M. İ., & Balaban, E. (2022). Investigation of boron waste usage in civil engineering applications. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 11(3), 727-735.
- Alkayış, M. H., Karşlıoğlu, A., & Onur, M. İ. (2022). Muğla ili Menteşe yöresi orman yangını risk potansiyeli haritasının coğrafi bilgi sistemleri ile belirlenmesi. Geomatik, 7(1), 10-16.
- Cetin, A., Evirgen, B., Karşlıoğlu, A., & Tuncan, A. (2021). The effect of basalt fiber on the performance of stone mastic asphalt, Periodica Polytechnica Civil Engineering, 65(1), 299-308.
- Evirgen, B., Cetin, A., Karşlıoğlu, A., & Tuncan, A. (2021). An evaluation of the usability of glass and polypropylene fibers in SMA mixtures. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 27(3), 318-328.
- Karşlıoğlu, A., Balaban, E., & Onur, M. İ. (2021). Insulation Properties of Bricks with Waste Rubber and Plastic: A. Journal of Nature, 1, 20-27.

Destekler:

- 2018-2023, YÖK 100-2000 Doktora Bursu
- 2020-2024, Tübitak Bideb 2211-A Genel Yurt İçi Doktora Bursu