T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI AKTİVATÖR İÇEREN SERAMİK TOZU TABANLI GEOPOLİMER KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

İlyas KOTANCI

YÜKSEK LİSANS

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Programı

Danışman

Prof. Dr. Mücteba UYSAL

Temmuz, 2024

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI AKTİVATÖR İÇEREN SERAMİK TOZU TABANLI GEOPOLİMER KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

İlyas KOTANCI tarafından hazırlanan tez çalışması 24.07.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mücteba UYSAL
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Mücteba UYSAL, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Orhan CANPOLAT, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Anıl NİŞ, Üye
İstanbul Gelişim Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Mücteba UYSAL sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Farklı Aktivatör İçeren Seramik Tozu Tabanlı Geopolimer Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

İlyas KOTANCI

İmza

Aileme,

Eşime

ve

Çocuklarım Mithat ve Miray’a

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam sırasında bana destek olan, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan danışman hocam Prof. Dr. Mücteba Uysal'a, laboratuvar çalışmalarımda bana desteklerini esirgemeyen hocam Prof. Dr. Orhan CANPOLAT'a, savunma sınav jürimde bilgi birikiminden yardım aldığım Doç. Dr. Anıl NİŞ hocama, tüm tez aşamasında desteğini hissettiğim Doktora öğrencisi arkadaşım Beyza Fahriye AYGÜN'e, yazım aşamasında tüm sorularıma bıkmadan cevap veren Doktora öğrencisi Mazem BALABAN'a yüksek lisans eğitimim boyunca hep yardımlarını gördüğüm Fen Bilimleri Enstitüsü çalışanı abim Cemal UZUN'a, emekleri asla ödenemez tüm enstitü personeline ve tabiki canım eşim Sezen KOTANCI ve aileme çok teşekkür ederim.

İlyas KOTANCI

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ vii
KISALTMA LİSTESİ viii
ŞEKİL LİSTESİ ix
TABLO LİSTESİ x
ÖZET xiii
ABSTRACT xv
1 GİRİŞ 1
2 GENEL BİLGİLER 4
2.1 Geopolimer....4
2.2 Geopolimer Bileşenleri……...……...…….....5
2.2.1 Metakaolin…...……...…….....5
2.2.2 Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu....6
2.2.3. Mermer Tozu 8
2.2.4. Seramik Tozu....9
2.2.5. Cam Tozu....10
2.2.6. Alkali Aktivatörler.……..…….....12
3 MALZEME VE DENEYSEL YÖNTEMLER 15
3.1. Deneme Karışımları....15
3.2. Malzemeler....18
3.3. Karışım Tasarımı....19
3.4. Deneysel Yöntemler....20
4 TARTIŞMA 25
4.1 Fiziksel Özellikler....25
4.1.1 Su Emme.... 26
4.2 Mekanik Özellikler....29
4.2.1 UPV....29
4.2.2 Basınç Dayanımı....31
4.2.3 UPV-Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki....32
4.2.4 Eğilme Dayanımı....33
4.3 Dayanıklılık Özellikleri....36

4.3.1 Yüksek Sıcaklık Etkisi.....**36**
4.3.2 Artık UPV.....**37**
4.3.3 Artık Basınç ve Eğilme Dayanımı.....**38**
4.3.4 Donma-Çözülme Direnci.....**41**
4.3.5 Mikroyapısal Analiz.....**43**
5 SONUÇ **50**
KAYNAKÇA **51**
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **56**

SİMGE LİSTESİ

Al_2O_3	Alimünyum Oksit
Fe_2O_3	Demir Oksit
CaO_2	Kalsiyum Dioksit
SO_3	Kükürt Trioksit
MgO	Magnezyum Oksit
KOH	Potasyum Hidroksit
K_2CO_3	Potasyum Karbonat
Ka_2SiO_3	Potasyum Silikat
SiO_2	Silisyum Dioksit
NaOH	Sodyum Hidroksit
Na_2CO_3	Sodyum Karbonat
Na_2SiO_3	Sodyum Silikat
TiO_2	Titanyum Dioksit

KISALTMA LİSTESİ

BD	Basınç Dayanımı
CT	Cam Tozu
CO_2	Karbondioksit
ED	Eğilme Dayanımı
FA	Uçucu Kül
GDA	Geri Dönüştürülmüş Agrega
GGBS	Granüle Yüksek Fırın Cürufu
GH	Geopolimer Harç
KOH	Potasyum Hidroksit
KS	Potasyum Silikat
MK	Metakaolin
MT	Mermer Tozu
PÇ	Portland Çimentosu
SEM	Taramalı Elektron Mikroskopu
ST	Seramik Tozu
UPV	Ultrases Geçiş Hızı
WS	Sudaki Doymuş Ağırlık
WD	Kuru Ağırlık
XRD	X-Işını Difraktometrisi

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Geopolimerlerin malzeme içeriğine göre gruplandırılması.....**4**
Şekil 2.2 Metakaolin **6**
Şekil 2.3 Öğütülmüş yüksek fırın cürufu (GYFC) **7**
Şekil 2.4 Cüruf için SEM içyapı görüntüleri 1000 kez büyütülmüş…….....**8**
Şekil 2.5 Mermer tozu.....**9**
Şekil 2.6 Seramiktozu **10**
Şekil 2.7 (a) bir kristalde düzenli iç yapı, (b) bir camda düzensiz iç yapı.....**10**
Şekil 2.8 Atık camın tipik geri dönüşüm süreci.....**11**
Şekil 2.9 Cam tozu.....**12**
Şekil 2.10 Potasyum hidroksit.....**13**
Şekil 2.11 Potasyum silikat.....**14**
Şekil 3.1 Yıldız Teknik Üniversitesi laboratuvar fırınları.....**17**
Şekil 3.2 Geri dönüştürülmüş agrega aşamaları.....**17**
Şekil 3.3 Los Angeles makinesi.....**18**
Şekil 3.4 UPV ölçümü.....**22**
Şekil 3.5 Eğilme dayanımı testleri.....**23**
Şekil 3.6 Basınç dayanım testleri.....**24**
Şekil 4.1 GH'nin birim ağırlıkları.....**25**
Şekil 4.2 GH'nin su emme oranları.....**27**
Şekil 4.3 GH'nin su emme değeri.....**29**
Şekil 4.4 GH'nin 3, 7 ve 28. günlerinde UPV'ler.....**30**
Şekil 4.5 GH'nin 3, 7 ve 28. günlerinde BD'ler.....**32**
Şekil 4.6 UPV ve BD arasındaki ilişki.....**33**
Şekil 4.7 GH'nin 3, 7 ve 28. günlerinde ED'ler.....**35**
Şekil 4.8 BD ve ED arasındaki korelasyon.....**36**
Şekil 4.9 GH'nin yüksek sıcaklığa maruz kalmasından sonraki UPV'ler.....**38**
Şekil 4.10 Yüksek sıcaklıktan sonra GH'nin BD'leri.....**40**
Şekil 4.11 Yüksek sıcaklıktan sonra GH'nin ED'leri.....**41**
Şekil 4.12 GDA50MT50'nin SEM görüntüleri.....**44**
Şekil 4.13 GDA50CT50'nin SEM görüntüleri..... **45**
Şekil 4.14 GDA50MT50 (a) ve GDA50CT50 (b)'nin 400 °C'den sonraki XRD desenleri.....**47**

Şekil 4.15 GDA50MT50 (a) ve GDA50CT50 (b)'nin 800 °C'den sonraki XRD desenleri.....**48**
Şekil 4.16 GH'lerin FTIR spektrumları.....**49**

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Mermer tozunun kimyasal içerik yüzdeleri.....**8**
Tablo 3.1 7 günlük deneme karışımlarının BD sonuçları.....**15**
Tablo 3.2 7 günlük deneme karışımlarının BD sonuçları.....**15**
Tablo 3.3 7 günlük deneme karışımlarının BD sonuçları.....**16**
Tablo 3.4 7 günlük deneme karışımlarının BD sonuçları.....**16**
Tablo 3.5 Bağlayıcıların ve dolgu maddelerinin kimyasal bileşimi.....**19**
Tablo 3.6 KOH ve KS'nin kimyasal bileşimi.....**19**
Tablo 3.7 GH'nin karışım oranları (g).....**20**
Tablo 4.1 GH'nin birim ağırlıkları.....**26**
Tablo 4.2 GH'nin su emme oranları..... **27**
Tablo 4.3 GH'nin birim ağırlığı ve su emme değişimi…….....**28**
Tablo 4.4 3, 7 ve 28. günlerdeki UPV'ler (m/s).....**30**
Tablo 4.5 GH'nin 3, 7 ve 28. günlerinde basınç dayanımı(BD).....**32**
Tablo 4.6 GH'nin 3, 7 ve 28. günlerinde eğilme dayanımı(ED).....**35**
Tablo 4.7 Yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra kalan ağırlıklar (%).....**36**
Tablo 4.8 Yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonraki UPV'ler (m/s).....**37**
Tablo 4.9 Yüksek sıcaklıktan sonra GH'nin BD'leri.....**39**
Tablo 4.10 Yüksek sıcaklıktan sonra GH'nin ED'leri.....**40**
Tablo 4.11 Donma-çözülmeye maruz kaldıktan sonra GH'nin birim ağırlıkları (g/cm^3) **42**
Tablo 4.12 Donma-çözülmeye maruz kaldıktan sonra GH'nin UPV'leri (m/s).....**42**
Tablo 4.13 Donma-çözülmeye maruz kaldıktan sonra GH'nin BD'leri (MPa).....**42**
Tablo 4.14 Donma-çözülmeye maruz kaldıktan sonra GM'nin ED'leri (MPa).....**43**

ÖZET

Farklı Aktivatör İçeren Seramik Tozu Tabanlı Geopolimer Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

İLYAS KOTANCI

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Mücteba UYSAL

Portland Çimentosu (PÇ) dünya karbondioksit salınımlarının yaklaşık %7 'sinden PÇ sorumludur. Bu nedenle çimentosuz beton üretimine odaklanılmıştır. Uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu (GYFC) ve metakaolin (MK) gibi atık malzemeleri hammadde olarak kullanarak CO_2 emisyonlarını azaltırken aynı zamanda maliyetler de azaltılabilir.

Bu çalışmada inşaat yıkıntılarından elde edilen betonlar agrega olarak geri dönüştürülerek hem azalan doğal kaynakların korunması sağlanmış hemde atıkların ortadan kaldırılmasıyla sürdürülebilirliğe katkı sunulması planlanmıştır. Geri dönüştürülmüş agrega atık cam tozu ve atık mermer tozu ile yer değiştirilmiştir. Alkali olarak da Potasyum Hidroksit (KOH) çözeltisi ve Potasyum Silikat (KS) kullanılmıştır. 6M, 8M, 10M ve 12M olmak üzere dört farklı molaritede deneyler yapılmıştır. 60°C, 80°C, 100℃ farklı sıcaklıklar için kürleme yapılmıştır. Geri dönüştürülmüş agrega çeşitli oranlarda (%25, %50, %75) seramik tozu ile

değiştirilerek en iyi mekanik dayanım sonucu belirlenmiştir. En iyi sonuç olarak %75 GYFC+%25CT, kürleme sıcaklığı 80°C ve KH molaritesi olarak da 8M seçilmiştir.

Alkali ile aktifleştirilen harçların mekanik mukavemetini belirlemek için 3. 7. ve 28. günde basınç ve eğilme mukavemeti deneyleri yapılmıştır. Yine 3. 7. ve 28. günlerde ultrases geçiş hızı(UPV) ölçümleri yapılmıştır. Ek olarak numuneler 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklıklarda yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılarak hem sıcaklık öncesi hem de sonrası ağırlık testleri ile ağırlık kayıplarına bakılmıştır. Her bir numune için UPV, basınç ve eğilme dayanımları ile kılcal su emme kapasiteleri incelenmiştir. Ayrıca numuneler 54 döngü donma çözülmeye maruz bırakılıp, sonrasında basınç ve eğilme dayanımları test edilerek numunelerin donma çözülme etkisi altındaki performansı belirlenmiştir. Üretilen numunelerin mikro analiz sonuçları ile birlikte tüm bu veriler ışığında farklı aktivatör içeren geopolimer kompozitlerin içyapısal özellikleri ile bu özelliklerin deneysel çalışma sonuçlarıyla ilişkisi belirlenmeye çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Seramik atık tozu, geri dönüştürülmüş agrega, geopolimer harcı, cam tozu, mermer tozu.

ABSTRACT

Investigation of Mechanical Properties of Ceramic Powder Based Geopolymer Composites Containing Different Activators

İLYAS KOTANCI

Department of Cıvıl Engıneerıng

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Mücteba UYSAL

Portland Cement (PÇ) is responsible for approximately 7% of the world's carbon dioxide emissions. Therefore, the focus has been on cement-free concrete production. By using waste materials such as fly ash, granulated blast furnace slag (GYFC) and metakaolin (MK) as raw materials, CO_2 emissions can be reduced while costs can also be reduced.

In this study, it is planned to contribute to sustainability by eliminating waste by recycling concrete obtained from construction debris as aggregate. Recycled aggregate was replaced by waste glass powder and waste marble powder. Potassium Hydroxide (KOH) solution and Potassium Silicate(KS) were used as alkali. Experiments were carried out with four different molarity: 6M, 8M, 10M and 12M. Curing was done for different temperatures of 60°C, 80°C, 100°C. The best mechanical strength result was determined by replacing recycled aggregate with ceramic powder in various proportions (25%, 50%, 75%). As the best result, 75% GYFC+25%CT, curing temperature 80°C and 8M molarity were selected.

Compressive and bending strength tests were carried out on days 3, 7 and 28 to determine the mechanical strength of alkali-activated mortars. Again, ultrasound

transmission velocity (UPV) measurements were made on days 3, 7 and 28. The samples were exposed to high temperature effects of 200°C, 400°C, 600°C and 800°C and weight losses were examined through pre- and post-heat weight tests. UPV, compressive and bending strengths and capillary water absorption capacities were examined for all samples. The samples were exposed to 54 cycles of freeze-thaw and then their compressive and bending strengths were tested to determine their performance under the influence of freeze-thaw. In the light of all these data, together with the micro analysis results of the samples, the internal structural properties of geopolymer composites containing different activators and the relationship of these properties with the experimental study results were tried to be determined.

Keywords: Ceramic waste powder, recycled aggregate, geopolymer mortar, glass powder, marble powder

1
GİRİŞ

İnşaat sektörü ülkemizde de dünyada da en çok istihdamın olduğu alanlardan biridir. Dünya genelinde bu ihtiyacı karşılamak için yılda 5 milyar tondan fazla üretim yapılmıştır [1]. İnşaat sektörünün bu denli yoğun olması sebebiyle önemli miktarda moloz miktarı ile karşı karşıya kalınmaktadır. Hâlihazırda, dünya genelinde en fazla inşaat molozu; Amerika, Çin ve Avrupa Birliği ülkeleri tarafından üretilmektedir [2]. Çin yaklaşık 200 milyon ton ile bu listede en üst sırada yer almaktadır. Amerika'da yaklaşık olarak 143 milyon ton [3] Avrupa birliği ülkelerinde ise toplam atıkların %35'ini inşaat molozları oluşturmaktadır ve bu atıklar yıllık 700 milyon ton civarındadır [4]

Dünyada beton üretiminde en yaygın olarak kullanılan ana bileşen Portland çimentosudur. Çimento endüstrisinin uzun süredir Portland Çimentosu'na (PÇ) bağlı olması, dünyadaki CO_2 emisyonlarının yaklaşık %7'sine karşılık gelen önemli sera gazı emisyonlarına önemli bir katkıda bulunmuştur [5, 6, 7]. Bu çevresel kaygı, araştırmalarda, genellikle çimentosuz beton olarak adlandırılan geopolimer harç (GH) gibi daha sürdürülebilir alternatiflerin geliştirilmesine yol açmıştır. Bu durum doğal olarak Portland çimentosunun kullanımında azalmalara neden olmuştur. Birçok çalışmada uçucu kül katkılı geopolimerin pozitif özelliklere sahip olduğu kanıtlanmıştır. Geopolimer harç(GH) yalnızca CO_2 emisyonu sorununu ele almakla kalmıyor , aynı zamanda granüle yüksek fırın cürufu (GBFS), uçucu kül, kırmızı çamur, pirinç kabuğu külü ve metakaolin gibi atık malzemeleri birincil bileşenler olarak kullanarak uygun maliyetli çözümler sunmaktadır [8, 9]. GH'nin çok yönlülüğü, erken yüksek mekanik mukavemet, yüksek sıcaklık etkisi, hızlı sertleşme, sağlam agrega-matris arayüzü, erken yüksek mekanik mukavemet, yüksek donma-çözülme döngüsü direnci, atık malzeme geri dönüşümü, ekonomik uygulanabilirlik ve çevre dostu olma gibi avantajlarıyla öne çıkmaktadır.[10, 11, 12]. Inşaat sektörünün kaynağının sonsuz olmaması ve kaynak sorunu nedeniyle, ayrıca atık birikimi endişesiyle geri dönüştürülmüş agreganın (GDA) devreye sokulması, çevreci yaklaşım ve uygun maliyetli çözümler için umut verici gelişmeler olarak görünmektedir. Bununla birlikte, doğal agregalı betonla karşılaştırıldığında artan su

gereksinimi, azalan işlenebilirlik ve azalan mukavemet özellikleri gibi %100 GDA-beton kullanımıyla ilgili zorluklar, bu konuların araştırılmasını gerektirmektedir. Bu dezavantajları hafifletebilmek için cam tozu (CT) veya mermer tozu (MT) ile kısmi değişimler faydalı bir yol gösteriyor.[13]. Nazir ve arkadaşlarının çalışmalarında da gösterildiği gibi puzolanik malzeme olarak bilinen ince öğütülmüş atık cam, Geopolimer harç(GH) 'ın mekanik özelliklerinde dikkate değer gelişmeler göstermiştir. [13]. Geri dönüştürülmüş cam tozunun (CT) puzolanik reaktivitesi, geliştirilmiş mukavemet ve dayanıklılığa katkıda bulunmaktadır. Geopolimer betonda geri dönüştürülmüş cam tozunun ve mermer tozunun kullanılması, kaynak verimliliğine katkıda bulunur ve ekonomik faydalar sunar; bu da onu çevre dostu ve yüksek performanslı inşaat malzemeleri için avantajlı bir seçim haline getirmektedir. Metakaolin, uçucu kül ve cüruf gibi malzemeler geopolimer harç (GH) üretiminde, silika ve alüminyum kaynakları olarak görev yapar. Bu malzemeler arasında özellikle seramik karo üretiminden elde edilen seramik tozu (ST) araştırmaya değer görülmektedir. İnşaat ve yıkım atıklarının yaklaşık %45'i seramik olduğundan ST'nin olumlu kimyasal bileşimi ve çevresel kaygıları giderme potansiyeli dikkate değerdir. [14], Seramik tozunun harç üretimine entegre edilmesi, verimli ve çevre dostu bir şekilde çok başarılı bir şekilde uyum sağlamaktadır [15]. Üstün malzeme özellikleri ve sürdürülebilir atık yönetimi seramik tozunu geopolimer harç bileşenleri içerisinde önemli bir seçenek olarak konumlandırmaktadır. Ayrıca Medina ve arkadaşları [16], seramik atıklarının harç üretimine dahil edilmesinin olumlu etkisini vurgulamaktadır. Seramik atıklarının doğal iri agregaların yerini alması nedeniyle ortaya çıkan geopolimer karışımları, inşaat uygulamalarındaki seramik atıklarını önemli gelişmiş mekanik özellikler sergiler [14, 15].

Geopolimer Harç üretiminde kritik bir bileşen olan alkali aktivatörler olarak, genellikle potasyum silikat ile potasyum hidroksit veya sodyum silikat ile sodyum hidroksit kullanılır [17]. Reaktivitelerinin iyi bilinmesi nedeniyle, Geopolimer harçlar (GH) üzerine araştırma çabaları ağırlıklı olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit etrafında olmaktadır. Silika kaynağı sağlayan sodyum silikatın ve alkali aktivatör olarak görev yapan sodyum hidroksitin sinerjistik etkileri kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Bu aktivatörler, GH'lere güç ve dayanıklılık kazandıran üç boyutlu bir geopolimerik ağ oluşturarak polimerizasyon reaksiyonunu başlatmaktadır. Sodyum bazlı aktivatörler üzerine yapılan çok sayıda çalışma,

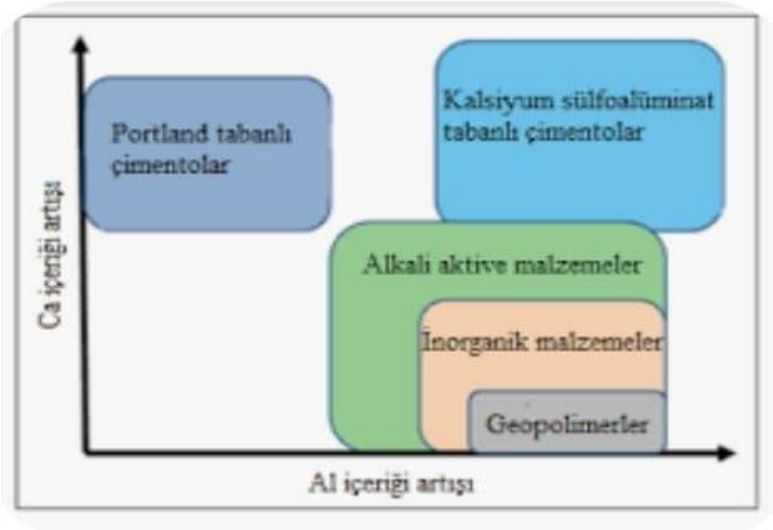
geopolimerizasyon süreci, etkileyen faktörler ve sonuçta ortaya çıkan malzeme özellikleri hakkında önemli bilgiler sağlamıştır. Bununla birlikte literatürde GH'lerde potasyum hidroksit (KOH) ve potasyum silikat (KS) gibi potasyum bazlı aktivatörler üzerine nispeten sınırlı bir araştırma olduğu görünmektedir. Sodyuma benzer bir alkali metal olan potasyum, GH formülasyonlarında benzersiz etkileşimler ve sonuçlar yaratabilir. Rocha ve arkadaşlarının [18] farklı alkali aktivatörlerin metakaolin bazlı GH üzerindeki etkisine ilişkin araştırması, kullanılan aktivatöre bağlı olarak farklı mikroyapısal özellikleri ortaya çıkarmaktadır. Bu çalışmada alkali aktivatörler olarak potasyum hidroksit (KOH) çözeltisi ve potasyum silikat (KS) kullanılmıştır.

Bu araştırma, geleneksel mineral katkı maddelerinden farklı olarak seramik üretiminin bir yan ürünü olan seramik tozunu (ST) dahil ederek geopolimer harç(GH) üretiminde yenilik yapmayı amaçlamaktadır. Bu bağlamda, seramik tozu atıklarını ekonomik bir ürüne dönüştürerek sürdürülebilirliğe önemli katkı sağlamayı hedeflemektedir. Ortaya çıkan çevre dostu GH, geri dönüştürülmüş agrega (GDA) ile tamamlanan seramik tozu (ST) ve granüle yüksek fırın cürufunu (GYFC) içermektedir. Ön deneyler kapsamında potasyum hidroksit (KOH) molariteleri, sertleştirme sıcaklıkları ve GYFC'nin farklı oranlarda ST ile kısmen yer değiştirilmesi dahil olmak üzere çeşitli yönleriyle araştırılmıştır. Sonraki karışımlarda geri dönüştürülmüş agrega mermer tozu ve cam tozu ile kısmen değiştirilerek kapsamlı bir değerlendirme, fiziksel ve mekanik özellikleri, yüksek sıcaklıklara ve donma-çözülme etkilerine karşı dayanıklılığı ve SEM, XRD, FTIR ve diğer yöntemlerle yapılan ayrıntılı analizleri kapsamakta olup, bu çalışmayı önerilen geopolimer harç tasarımının potansiyeli ve uygulanabilirliği konusunda kapsamlı bir araştırma haline getirmektedir.

2
GENEL BİLGİLER

2.1 Geopolimer

Geopolimer isim olarak ilk defa 1978 yılında Fransız bilim insanı Prof. J. Davidovits tarafından inorganik moleküllerin oluşturduğu yapılar için kullanılmıştır. Geopolimerler inorganik, sert ve 1250°C sıcaklığa kadar kararlı değildir. Alümino-silikat ürünlerinin alkali aktivatörlerle (sodyum hidroksit ve sodyum silikat karışımı ya da potasyum hidroksit ve potasyum silikat karışımı) yüksek sıcaklıklarda reaksiyona sokulması işlemiyle birlikte Si-O-Al-O bağlarını da içeren üç boyutlu bir polimer zinciri oluşmaktadır [8]. Geopolimerizasyon işleminde kullanılan alümino-silikat ürünleri birçok malzemenin birleşiminden oluşabilir [9]. Kimyasal açıdan sınıflandırılan bağlayıcılar Şekil 2.1'de gösterilmiştir. İçeriği düşük alüminyum yüksek kalsiyum olan malzemeler Portland tabanlı çimento olarak gruplandırılırken düşük kalsiyum yüksek alüminyum içerikli malzemeler geopolimer olarak gruplandırılmıştır. Yüksek alüminyum ve kalsiyum içerikli malzemeler ise alkali aktive malzeme olarak adlandırılmıştır.



Şekil 2.1 Geopolimerlerin malzeme içeriğine göre gruplandırılması [19]

Çimento endüstrisinin uzun süredir Portland Çimentosu'na (PÇ) bağlı olması, dünyadaki CO_2 emisyonlarının önemli bir kısmının nedenini ortaya çıkarmaktadır. Bu çevresel kaygı, araştırmalarda, genellikle çimentosuz beton olarak adlandırılan Geopolimer Harç (GH) gibi daha sürdürülebilir alternatiflerin geliştirilmesi gerekliliği farkedilmiştir. Araştırmalar sonucunda geopolimerlerin, Portland çimentosu ile karşılaştırıldığında hem çevreci bakış açısıyla hemde dayanım ve dayanıklılık açısından uygun bir alternatif olabileceği görülmüştür.

Geopolimer malzemelerinin geçtiğimiz yüzyıl içerisinde inşaat sektöründe araştırılması ve geliştirilmesinde önemli mesafeler katedilmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde istenilen özellikte, düşük maliyetli geopolimer malzeme üretimi başarıyla sağlanmıştır. Geopolimer beton teknolojisiyle birlikte çevrenin korunması, endüstriyel atıklardan faydalanılması, enerjinin veriminin artması gibi farklı avantajları bulunmaktadır. Ayrıca yüksek dayanımlı geopolimer beton üretme çalışmaları da sürdürülebilir bir malzeme çeşidi olarak kullanılmasında fayda sağlayacaktır.[20]

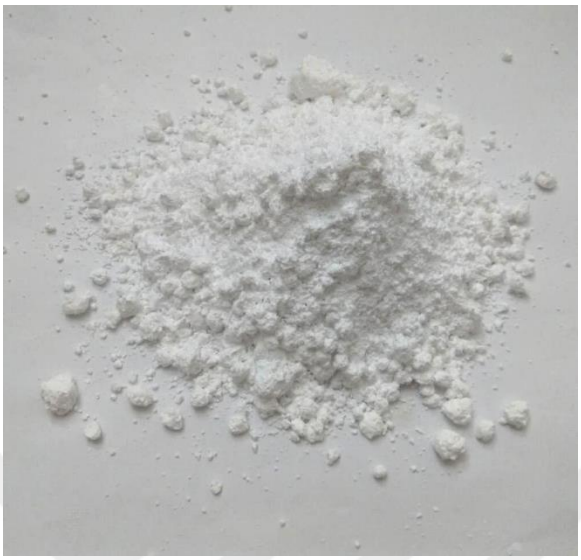
Geopolimerler endüstriyel mineral atıklar kullanılarak üretilirler. Bu sayede hem düşük maliyetli, hemde çevre kirliliğinin önüne geçilmesi gibi avantajlarının yanında alkali aktivasyonu ile hızlı reaksiyon veren yüksek basınç ve yüksek sıcaklık dayanımı, düşük enerji tüketimi sağlaması, önemli avantajlarından bazılarıdır. Bu özelliklerle birlikte geopolimer üretiminin artması karbondioksit salınımını önemli ölçüde azaltmaktadır [13].

2.2. Geopolimer Bileşenleri

2.2.1 Metakaolin

Metakaolin, kaolin veya kaolin kil mineralinin yüksek sıcaklıklarda (yaklaşık 600-800°C) kalsine edilmesi sonucu elde edilen bir yan üründür. Kalsinasyon işlemi, kaolin mineralinin yapısındaki kristal suyunu ve organik maddeleri çıkartarak, mineralin amorf bir yapıya dönüşmesine neden olur. Yüksek sıcaklık ile kaolinin içindeki suyun yaklaşık %12- %14 ünü kaybederek metakaolini ortaya çıkarmaktadır. Kalsine işlemi doğru bir şekilde yapılırsa güçlü puzolanik özellikleri olan amorf yapıda bir metakaolin oluşumu sağlanır. İnşaat sektöründe ilk kez

Brezilyada 1962 yılında Jupia barajının yapımında kullanılmıştır. Sonrasında ise inşaat sektöründe kullanımında önemli miktarda artış olmuştur. Günümüzde de yüksek dayanımlı betonlarda kullanımı oldukça yaygındır.



Şekil 2.2 Metakaolin

Metakaolin kökeni ve inceliğine bağlı olarak çimentonun kıvamında artışa neden olmaktadır. Kıvamındaki artış da suya olan ihtiyacını artıracaktır. Agrega segregasyonu riskini ise artırmayacaktır. Hızlı dayanımı ve alkali aktivatörler ile iyi bir reaksiyon oluşturması nedeniyle metakaolin, geopolimerin en önemli unsurlarından biri olarak kabul edilmektedir. Yapılan araştırmalar neticesinde metakaolinin, betonun ileri yaşlarında önemli ölçüde olumlu etki yaptığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle de yaygın bir şekilde betonda kullanılmaya başlanmıştır [15, 21].

2.2.2 Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu

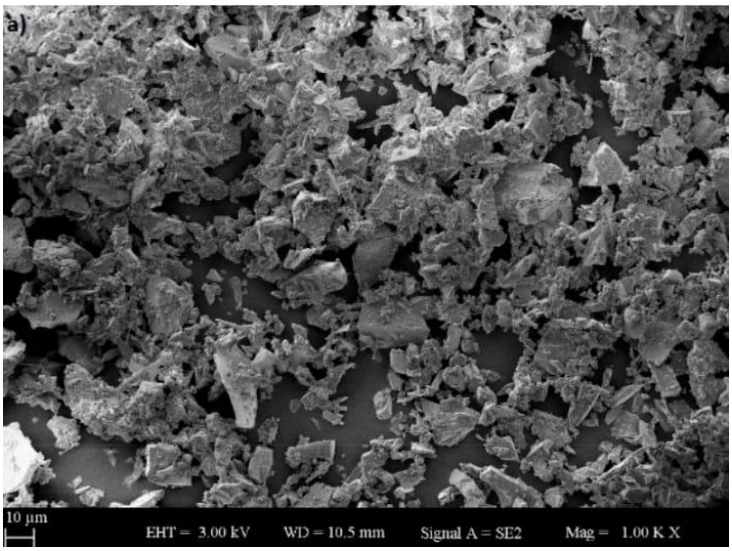
Yüksek fırın cürufu, demir-çelik fabrikalarında pik demirin üretimi esnasında açığa çıkan, endüstriyel atık konumunda olan bir mineral katkı malzemesidir. Demir elde edebilmek için demir cevherinin yaklaşık 1600°C 'ye kadar ısıtılması ile eriyen demir filizleri akkor halinde akmaya başlar. Etrafta kayaç kalıntıları kalır. Sonrasında ortam koşullarında soğuması için bırakılan kalıntıları 2-4 mm tane boyutlarında toz şeklinde bir yapıya sahiptirler. Kayaç kalıntılarının bu hali Yüksek Fırın Cürufu (YFC) olarak adlandırılır.

1862 yılında Langens öğütülmüş yüksek fırın cüruflarının bağlayıcı özellik taşıdığını gözlemlemiştir. 1865 yılına gelindiğinde kireç ve yüksek fırın cürufu karışımı ile elde edilen bağlayıcılar piyasada yer almaya başlamıştır. 1883 yılından itibaren ise öğütülmüş yüksek fırın cürufları, çimentoda hammadde olarak kullanılmaya başlanmıştır. 1892 yılında Almanya'da ilk kez Portland çimentosu klinkerinin, yüksek fırın cürufu ile birlikte öğütülerek Portland Yüksek Fırın Cürufu çimentosunun üretimi gerçekleşmiştir. Stutterheim'in yaptığı çalışmalar sonucunda, betonda katkı maddesi olarak kullanılmaya başlanmıştır [14].



Şekil 2.3 Öğütülmüş yüksek fırın cürufu

Çimento ile yüksek fırın cürufu ile %30-%40 oranında ikame edilebilmektedir. Yapılan çalışmalarda yüksek fırın cürufu katkılı betonlarda çimentoya göre erken yaş dayanımlarında önemli düşüşler saptanmıştır. 28 günlük dayanımlarda puzolanik reaksiyonun gelişmesiyle birlikte farkın kapandığı görülmektedir. Daha uzun sürelerde dayanım parametresi katkı maddesiz beton ile benzer hatta daha da yüksek olduğu görülmüştür. Yüksek fırın cürufu içeren betonlar su ve sülfatta bekletildiğinde, genleşmelerin azaldığı ve standart limitlerinin gerçekleştiği görülmüştür [22].



Şekil 2.4 Cüruf için SEM içyapı görüntüleri 1000 kez büyütülmüş.[4]

2.2.3. Mermer Tozu

Mermer günümüzde oldukça sık kullanılan bir yapı malzemesidir. Kalkerin yapısında kimyasal değişimler sonucu oluşmaktadır. Genellikle inşaat malzemesi olarak yada dekoratif amaçlı kullanılmaktadır. Mermer ocaklarından çıkarılan mermerlerin yarısına yakını işleme esnasında atıl duruma düşmektedir. Mermer tozunun doğaya olumsuz etkileri vardır. Bu etkileri ortadan kaldırmak için atık durumundaki mermer tozlarının geri dönüştürülmesi hem endüstriyel anlamda hemde çevresel anlamda kazançlar sağlayacaktır. Son dönemlerde mermer tozlarının seramik ve inşaat sektöründe kullanılmasıyla ilgili geniş çalışmalar yapılmaktadır. Mermer tozu, 2.70g/cm^3 'lük özgül ağırlığa ve 8687 cm^2 /g'lık özgül yüzey alanına sahiptir. Mermer tozunun kimyasal içerik yüzdeleri Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1 Mermer tozunun kimyasal içerik yüzdeleri

Oksitler	**SiO_2**	**Al_2O_3**	**Fe_2O_3**	**CaO_2**	**SO_3**	**Kızdırma Kaybı**
İçerik (%)	**1,12**	**0,73**	**0,05**	**83,22**	**0,56**	**14,8**



Şekil 2.5 Mermer tozu

2.2.4. Seramik Tozu

Seramik hammaddesi kuvars olan ve kilden oluşmuş bir üründür. Geçmişten itibaren kap ve tabaklarda, su taşımak için kullanılan sürahilerde, sıhhi tesisat malzemeler gibi ürünlerin oluşturulmasında kullanılan bir malzemedir. Seramik malzemelerin birçok şekilde kullanıldığı diğer alanlar ise fayans, seramik döşeme, farklı killerden oluşan tuğlalar olurken, inşaat malzemeleri olarak da yaygın biçimde kullanılan bir malzemedir. Bu durum, dünyanın yenilenebilir kaynak kullanmaya ve sürdürülebilir kalkınmaya daha çok dikkat ettiği bir dönemde, çevreyi korumak ve yeşil alanı arttırmak için atıkların azaltılması, kalkınmanın sürdürülebilirliğini arttırmanın bir parçası olarak bir çok araştırmacı tarafından da kabul gören ortak strateji, atık malzemelerin tekrar kullanımı ve geri dönüştürülmesidir.

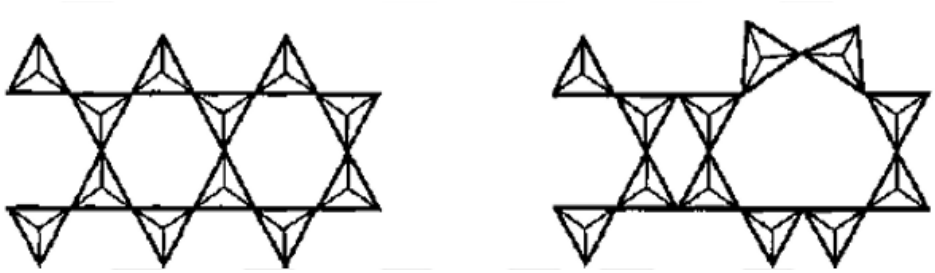
Seramik tozunun partikül yapısı fiziksel olarak çimentonunkilere benzer olmakla birlikte SiO_2 ve Al_2O_3 içerdiği bilinmektedir. Seramik tozunun yapısal özellikleri, malzemenin kısmen de olsa çimento yerine alternatif bir bileşen olarak kullanılabileceğini ve bu konuda bir potansiyel taşıdığını, sürdürülebilir ve ekonomik karışımlar üretilebileceğini ortaya koymaktadır [23].



Şekil 2.6 Seramik tozu

2.2.5. Cam Tozu

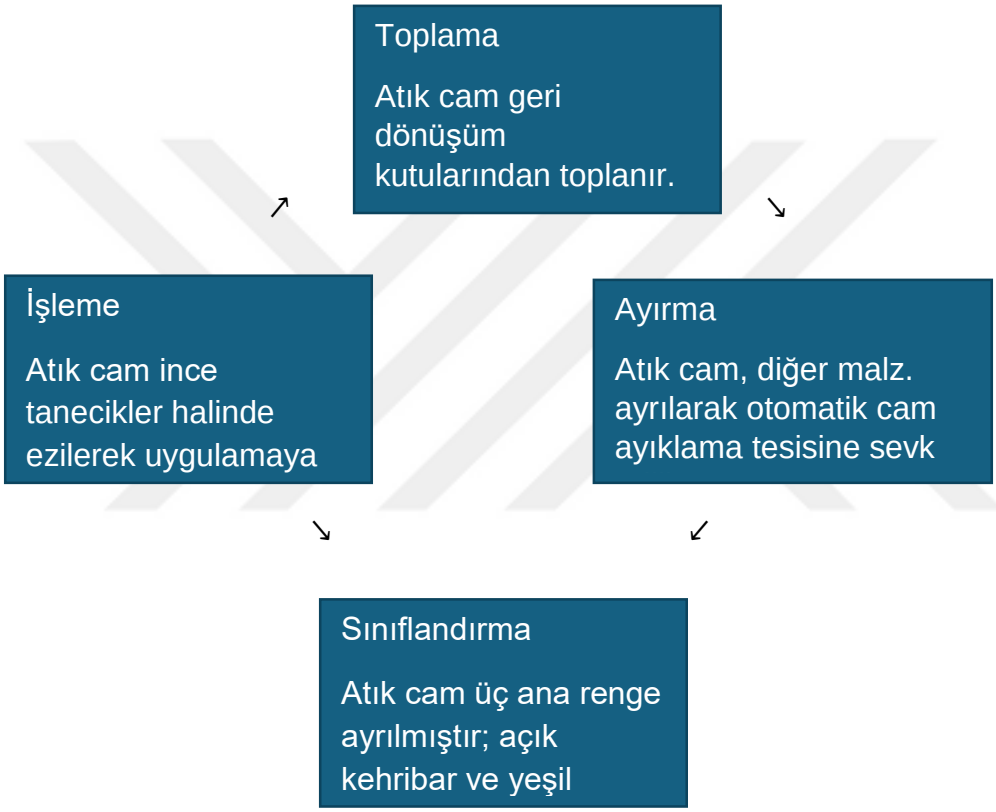
Cam kuvarsit başta olmak üzere feldspat, dolomit, kireçtaşı ve sodanın önce eritilip, sonra aniden soğutulması ile oluşmaktadır. Ani soğutma işlemiyle sıvı haldeki molekül yapısını korur ve katılaşır. Yüksek akışkanlığa sahip olduğundan düzgün kristal bir yapıda değildir. Bu sebeple sert ve katı olan cam, sıvı gibi düzensizdir [24].



(a) **(b)**

Şekil 2.7. (a) bir kristalde düzenli iç yapı (SiO4 dört yüzlü), (b) bir camda düzensiz iç yapı [24]

Günümüzde, hızla büyüyen sanayileşme, endüstriyel atık yönetiminin çevresel etkilerine ilişkin endişeleri artırmıştır [25]. Cam ürünlerinin yoğun olarak kullanımı nedeniyle tüm dünyada büyük miktarlarda atık cam oluşmaya başlamıştır. Bu atıklar biyolojik olarak parçalanmaz ve bu da süreci çevrenin korunması açısından olumsuz bir hale getirir. Sürdürülebilir ve çevreci bir kalkınma için yeni bir çözüme ihtiyaç duyulmaktadır. Sürdürülebilir katı atık yönetiminin en iyi çözümlerinden biri, bu atığın mümkün olduğunca azami düzeye indirilmesi, yeniden kullanılması ve geri dönüştürülmesidir [26].



Şekil 2.8 Atık camın tipik geri dönüşüm süreci [27]

Cam tozunun inşaat mühendisliğinde kullanım alanları şunlardır [28]:

- Kaldırım malzemelerinde cam kırıntıları için kullanımı: Cam kırıntı, asfalt serimi için yol yapım agregası olarak kullanılmıştır.
- Bina yapımında beton için agrega olarak geri dönüştürülmüş cam partikülü (kum) için kullanımı.
- Geri dönüştürülmüş camın puzolanik ikame olarak kullanımı.
- Geri dönüştürülmüş camın renkli cam agrega için kullanımı.
- Camın çimento ile reaksiyonu üzerine kullanımı.



Şekil 2.9. Cam tozu

2.2.6. Alkali Aktivatörler

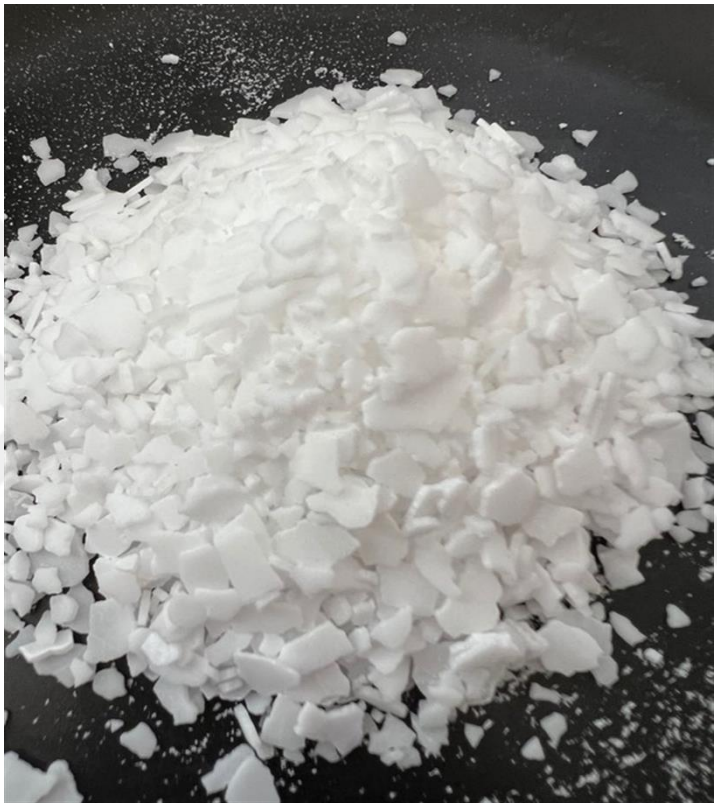
Son zamanlarda gerçekleştirilen çalışmalarda uçucu kül, metakaolin, zeolit, yüksek fırın cürufu, kırmızı çamur, kaolinitik kil, kaolin ve silis dumanı ve kaolin gibi ısıl işleme uğramamış maddelerin kullanım olanakları üzerinde çalışılmıştır. Alümino-silikat ürünlerinin kimyasal yapısı alkaliler ile aktive olmuş malzemelerin dayanım ile dayanıklılık özelliklerini belirlemektedir [29].

Geopolimer üretiminde en çok kullanılan alkali aktivatörler sodyum hidroksit-potasyum hidroksit ile sodyum silikat-potasyum silikat karışımıdır. Alkali aktivatörün cinsi ve konsantrasyonu geopolimerizasyon reaksiyonunu etkilemektedir. Geopolimerizasyon reaksiyonunda kullanılan alkali aktivatörlerin etki sıralaması aşağıdaki gibidir (Singh ve Middendorf, 2020). Na_2SiO_3(Sodyum silikat) > NaOH (Sodyum hidroksit) > NaOH + Na_2CO_3 (Sodyum hidroksit ve sodyum karbonat) > KOH (Potasyum hidroksit)

2.2.6.1. Potasyum Hidroksit

Potasyum hidroksit(KOH), bir alkali aktifleştiricidir, katı halde bulunmaktadır. Beyaz renge sahip kristal cam paçacıkları şeklinde bir kimyasal madde olarak

bilinmektedir. Bu kimyasal hammadde suda çözdürüldüğünde ekzotermik bir reaksiyon meydana gelir ve suda eriyerek ortama ısı yayar. Bunun yanısıra potasyum hidroksitin nem tutabilme özelliği de bulunmaktadır. Potasyum hidroksit ortamdaki nemi emebilir ve sonuç olarak zamanla eriyebilen bir hale gelebilir. Bu kimyasal hammadde sanayi ürünlerinde kullanılabilir. Ayrıca temizlik sektöründe de kullanımı söz konusu olabilir. Tarımda ve gübre sektöründe de kullanımı tercih edilebilir.



Şekil 2.10 Potasyum hidroksit

2.2.6.2. Potasyum Silikat

Sodyum silikatın kullanıldığı her alanda kullanılabilen potasyum silikat, potasyum hidroksitin ya da potasyum karbonatın silisyum dioksit ile reaksiyonundan üretilir. Sodyum silikatdan farklı ve üstün özelliklerinden dolayı diğer birçok farklı alanda da kullanılan potasyum silikatın, görünümü berrak, koyu kıvamlı ve sıvıdır. Su ile her ortamda karışır, cilde temas ettiğinde cildi tahriş eder. Aşırı miktarda solunması birçok tehlikenin ortaya çıkmasına neden olabilir. Bu nedenle potasyum silikatın kullanılacağı durumlarda solunum koruyucu maske kullanılmasında fayda vardır ve aynı zamanda bu madde ile temas etmekten kaçınılmalıdır.

Potasyum silikat (Ka_2SiO_3), potasyum hidroksit (KOH) ya da potasyum karbonatın (K_2CO_3) silikon dioksit ile reaksiyonundan üretilmektedir. Şeffaf renkte, yoğun kıvamı ve likit formdaki potasyum silikat, suyla temasında hızlı çözünmektedir. Sıcak, soğuk ve çevre stresini, su ve toprak toksisitesini azaltma gibi yararları bulunan potasyum silikat, topraktaki bulunan faydalı bakterilere de katkıda bulunarak kök gelişimine etki edebilmektedir. Ka_2SiO_3 uçucu organik bileşikler içermeyerek tehlikeli ve çevreci bakış açısıyla zararlı yan ürünlerin salınmasına yol açmamaktadır. Potasyum silikatın inşaat sektöründeki kullanım alanları araştırılmaya devam etmektedir. Mekanik koruma etkisi, beton sertleştirici ile yüzey kaplama ve sızdırmazlık özellikleri üzerinde durulmaktadır.



Şekil 2.11 Potasyum silikat

3

MALZEME VE DENEYSEL YÖNTEMLER

3.1. Deneme Karışımları

KH molariteleri (6M, 8M, 10M ve 12M), çeşitli kürleme sıcaklıkları (60, 80 ve 100 °C) ve GYFC'nin farklı oranlarda (%25, %50, %75) kısmen ST ile değiştirilmesi ile farklı ön deneyler yapıldı. Ayrıca %100 GDA ön deneme karışımlarında kullanılmıştır. Deneme karışımlarının basınç dayanım(BD) sonuçları Tablo 3.1'de gösterilmektedir . En yüksek ST dozajının kullanıldığı en iyi mukavemet sonucu, %25 GYFC ve %75 ST içeren, kür sıcaklığı 80 °C ve KH molaritesi 8M olan karışım olarak bulunmuştur.

Tablo 3.1 7 günlük deneme karışımlarının BD sonuçları

KH Molaritesi		**Kür sıcaklığı**		
6 M		**60 °C**	**80 °C**	**100 °C**
Karışımlar	**100GYFC**	**17,33**	**20,21**	**18,58**
	75GYFC 25ST	**12,45**	**14,47**	**12,04**
	50GYFC 50ST	**9,67**	**11,21**	**9,71**
	25GYFC 75ST	**6,83**	**7,10**	**7,15**
	100ST	**5,57**	**6,05**	**5,21**

Tablo 3.2 7 günlük deneme karışımlarının BD sonuçları

KH Molaritesi		**Kür sıcaklığı**		
8 M		**60 °C**	**80 °C**	**100 °C**
Karışımlar	**100GYFC**	**31,13**	**25,72**	**26,13**
	75GYFC 25ST	**22,31**	**22,94**	**25,43**
	50GYFC 50ST	**11,17**	**15,32**	**21,58**
	25GYFC 75ST	**11,06**	**12,58**	**21,45**
	100ST	**7,36**	**8,03**	**7,42**

Tablo 3.3 7 günlük deneme karışımlarının BD sonuçları

KH Molaritesi		**Kür sıcaklığı**		
10 M		**60 °C**	**80 °C**	**100 °C**
Karışımlar	**100GYFC**	**21,20**	**21,88**	**22,03**
	75GYFC 25ST	**17,93**	**18,36**	**21,38**
	50GYFC 50ST	**11,92**	**13,64**	**16,52**
	25GYFC 75ST	**10,05**	**9,49**	**11,00**
	100ST	**8,95**	**8,95**	**9,35**

Tablo 3.4 7 günlük deneme karışımlarının BD sonuçları

KH Molaritesi		**Kür sıcaklığı**		
12 M		**60 °C**	**80 °C**	**100 °C**
Karışımlar	**100GYFC**	**16,47**	**19,61**	**18,51**
	75GYFC 25ST	**13,32**	**15,99**	**16,39**
	50GYFC 50ST	**11,36**	**11,73**	**13,82**
	25GYFC 75ST	**7,95**	**8,39**	**10,30**
	100ST	**6,22**	**5,68**	**6,97**



Şekil 3.1 Yıldız Teknik Üniversitesi laboratuvar fırınları



Şekil 3.2 Geri dönüştürülmüş agrega aşamaları



Şekil 3.3 Los Angeles makinesi

3.2. Malzemeler

Bu çalışmada, ön denemelerden elde edilen kayda değer sonuçlara dayanarak %75 ST ve %25 GYFC ağırlık oranıyla birincil bağlama malzemeleri olarak ST ve GYFC kullanıldı. ST ve GYFC için özgül ağırlık değerleri sırasıyla 2,62 ve 2,93 olarak kaydedilmiştir. Atık betondan geri dönüştürülmüş agrega elde etmek için, küp şeklindeki atık betonlar Yıldız Teknik Üniversitesi laboratuvarında pres makinesi yardımıyla kırılıp, Los Angeles makinesinde çakıl kum karışımı haline getirilmiştir. Sonrasında, 2 mm çapındaki elekten geçirilerek, kısmen MT veya CT ile değişen oranlarda (%25, %50 ve %75) değiştirilerek dahil edilmiştir.

Tablo 3.5, temel malzemeler olarak ST ve GYFC'nin ve dolgu malzemeleri olarak MT ve CT'nin kimyasal bileşimini göstermektedir. Alkali aktivatörler için 8M-KOH ve KS kullanılmıştır. Literatür bulguları ve ön denemelerle uyumlu hale getirmek için [17, 30, 31], KS/KOH oranı 2 olarak ayarlanmıştır. KOH ve KS'nin kimyasal bileşim ayrıntıları Tablo 3'te sunulmaktadır. GH'lerin formüle edilmesinde sağlam temellere dayanan veriler ve mevcut araştırmalar, malzemelerin ve oranlarının bu titiz seçiminde bize yardımcı olmaktadır.

Tablo 3.5 Bağlayıcıların ve dolgu maddelerinin kimyasal bileşimi

Ana Oksit (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	TiO_2	LOI
ST	65,44	15,45	7,11	4,65	1,28	0,80	2,15	0,06	-	3,06
GYFC	40,50	12,80	1,10	35,50	5,80	0,79	-	0,18	0,75	0,03
MT	49,87	12,24	11,56	18,76	7,57	-	-	-	-	-
CT	69,42	1,07	0,51	8,25	4,25	12,32		-	-	-

Tablo 3.6 KOH ve KS'nin kimyasal bileşimi

	K_2O (%)	H_2O (%)	SiO_2 (%)
K_2SiO_3	12,7	60,3	27
KOH	12,9	87,1	-

3.3. Karışım Tasarımı

GH'nin formülasyonu, çeşitli çalışmaları [7], [9], [12], [14], [18], [22] kapsayan ön denemelerin ve ilgili literatürün kapsamlı bir analizine dayanarak oluşturulmuştur. Tablo 3.7'de ayrıntıları verilen karışım tasarımı, 0,40'lık bir bağlayıcı-ince agrega oranına, 0,95'lik bir aktivatör-bağlayıcı oranına ve 2'lik bir KS/KOH oranına sahiptir. Karıştırma prosedürü, bağlayıcının ilk entegrasyonuna göre malzemeleri (GYFC ve ST) karıştırıcıya koyup, ardından alkali aktivatörleri (KS ve KOH) ekleyerek 1,5 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra MT veya CT içeren ince agrega ilave edilerek 1,5 dakika daha yeniden karıştırılmıştır. Elde edilen GH kalıplara dökülerek 50x50x50 mm küp ve 40x40x160 mm prizma numuneleri elde edilmiştir. 24 saat sonra kalıptan çıkarıldı ve 80 °C'de 24 saat ısıyla sertleştirmeye tabi tutulmuştur. Bu titiz karışım tasarım süreci, daha sonraki mekanik ve dayanıklılık değerlendirmesi için güvenilir sonuçlar vereceğini işaret etmektedir.

Tablo 3.7 GH'nin karışım oranları (g)

	Bağlayıcı (450 gr)		İnce Agrega (1125 gr)			Alkali Aktivatör	
Karışım Kodu	**GYFC %25**	**CT %75**	**GDA**	**MT**	**CT**	**K_2SiO_3**	**KOH**
Kontrol	**112,5**	**337,5**	**1125,00**	**-**	**-**	**285**	**142,5**
GDA75 MT25	**112,5**	**337,5**	**843,75**	**281,25**	**-**	**285**	**142,5**
GDA50 MT50	**112,5**	**337,5**	**562,50**	**562,50**	**-**	**285**	**142,5**
GDA25 MT75	**112,5**	**337,5**	**281,25**	**843,75**	**-**	**285**	**142,5**
GDA75 CT25	**112,5**	**337,5**	**843,75**	**-**	**281,25**	**285**	**142,5**
GDA50 CT50	**112,5**	**337,5**	**562,50**	**-**	**562,50**	**285**	**142,5**
GDA25 CT75	**112,5**	**337,5**	**281,25**	**-**	**843,75**	**285**	**142,5**

3.4. Deneysel Yöntemler

GH'nin fiziksel özellikleri birim ağırlık ve su emme testleri yöntemleriyle değerlendirilmiştir. ASTM C67-07 [32] tarafından gerçekleştirilen su absorpsiyonu, 105 °C'de bir fırında 24 saat kurutulduktan ve ardından 22 °C'de kuru ağırlık oda sıcaklığına soğutulduktan sonra numune ağırlıklarının kaydedilmesini içermektedir. Numune 22 °C'de 24 saat suya batırıldıktan sonra, deney sırasında doymuş ağırlıklar standarda uygun olarak kaydedilmiştir. Su emilimini ölçmek için aşağıdaki formül kullanıldı:

$$\text{Su Emme Yüzdesi (\%)} = 100\,\frac{\text{DA}-\text{KA}}{\text{KA}} \tag{3.1}$$

KA: Numunenin kuru ağırlığı.

DA: Numunenin suya daldırıldıktan sonraki doymuş ağırlığı.

ASTM C1585'e [33] göre 28 günde belirlenen su emme miktarı, numunelerin 105 °C'de bir fırında sabit ağırlığa kadar kurutulmasını, yan yüzeylerin parafin kaplamayla kapatılmasını ve suya batırılmasını içermektedir. Su emilimi aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$I = \frac{m_t}{a * d} \quad (3.2)$$

Burada I = emilim (mm); mt = $_t$ zamanında numune kütlesindeki değişiklik (g); a = numunenin alanı (mm2 $^{)}$; ve d = suyun yoğunluğu (g/mm3 $^{)}$. Doğrusal regresyon analizi kullanılarak WA , zamanın kare köküne (s ^{0,5}) karşı çizilen I'ye en iyi uyan çizginin eğimi olarak belirlendi .

GH'nin mekanik özellikleri 3, 7 ve 28. günlerde UPV, basınç ve eğilme testleri ile değerlendirilmiştir. ASTM C597'yi [34] takip eden UPV, geopolimer kalitesi ve harç boşlukları dahil olmak üzere çeşitli özellikleri değerlendirilmiştir. Sırasıyla ASTM C109 [35] ve ASTM C348 [36]'e göre basınç ve eğilme testleri küp ve prizma numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yüksek sıcaklık direnci, numunelerin ISO 834'e göre yüksek sıcaklıklara (200, 400, 600 ve 800 °C) maruz bırakılması ve ardından birim ağırlık, UPV, basınç(BD) ve eğilme dayanımı(ED) testleri ile belirlenmiştir. Donma-çözülme direnci, 110 donma (-20 °C) ve çözülme (20 °C) döngüsü ve ardından numuneler üzerinde ağırlık kaybı ve UPV, basınç ve eğilme testleri yoluyla değerlendirilmiştir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM), X-ışını difraktometrisi (XRD) ve FTIR analizleri, mikroyapısal ve kimyasal özelliklere ilişkin bilgiler elde edilmesini sağlamıştır.



Şekil 3.4 UPV ölçümü



Şekil 3.5 Eğilme dayanımı testleri

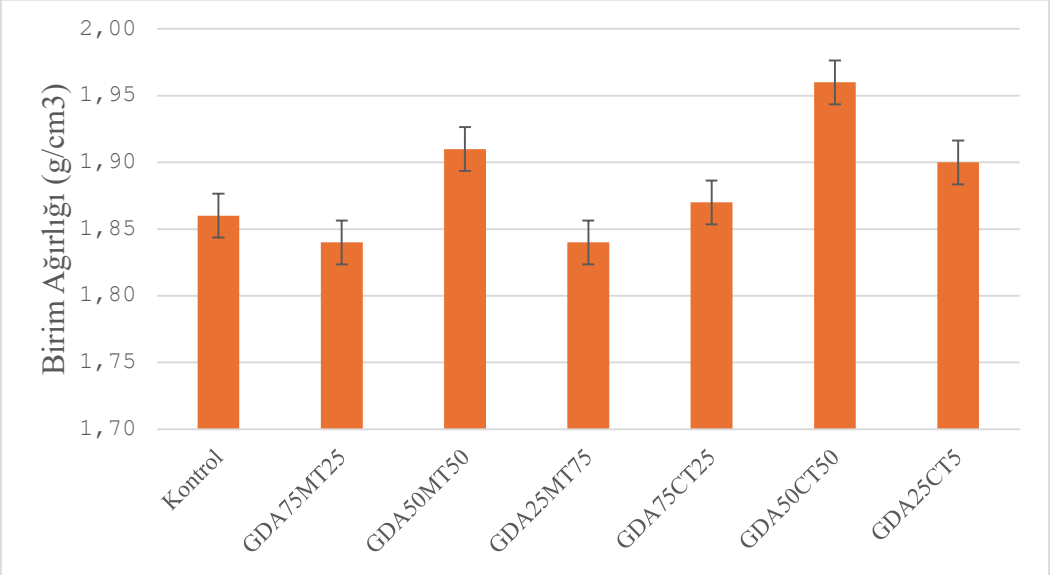


Şekil 3.6 Basınç dayanım testleri

4
TARTIŞMA

4.1 Fiziksel Özellikler

Bu tez çalışmasında GH'nin birim ağırlığı 1,84 ile 1,96 g/cm^3 arasında değişmektedir. Maksimum birim ağırlık %50GDA%CT50 numunesinde gözlenmiş ve minimum birim ağırlık %75GDA%25MT ve %25GDA%75MT numunelerinde gözlemlenmiştir. Karışımlara CT eklenmesi kontrole göre birim ağırlıkta artışa yol açmış ve birim ağırlıktaki bu artış GH'lerdeki boşluk oranının azalmasıyla ters orantılı olmuştur. GH'de MT ve CT'nin %50'ye kadar kullanılması birim ağırlığın artmasına yol açmaktadır. MT ve CT'lerin ince parçacıklı yapısı, geopolimer matris içindeki yoğunluğu arttırarak, boş alanları azaltacak ve daha yüksek birim ağırlığa yol açacaktır. Ek olarak, bu tozların standart kumdan daha yüksek olan özgül ağırlığı, karışıma daha büyük bir kütle kazandırarak birim ağırlığı daha da artırır. MT ve CT'lerin birleştirilmesi ayrıca puzolanik reaksiyonları başlatır, geopolimerik jelin ve ek katı fazların gelişimini sağlayarak GH'lerin genel yoğunluğuna katkıda bulunmaktadır. Bu faktörler göze alındığında %50'ye kadar MT ve CT'ler de dahil olmak üzere GH'de birim ağırlık artışı gözlemlenmektedir.



Şekil 4.1 GH'nin birim ağırlıkları

Tablo 4.1 GH'nin birim ağırlıkları

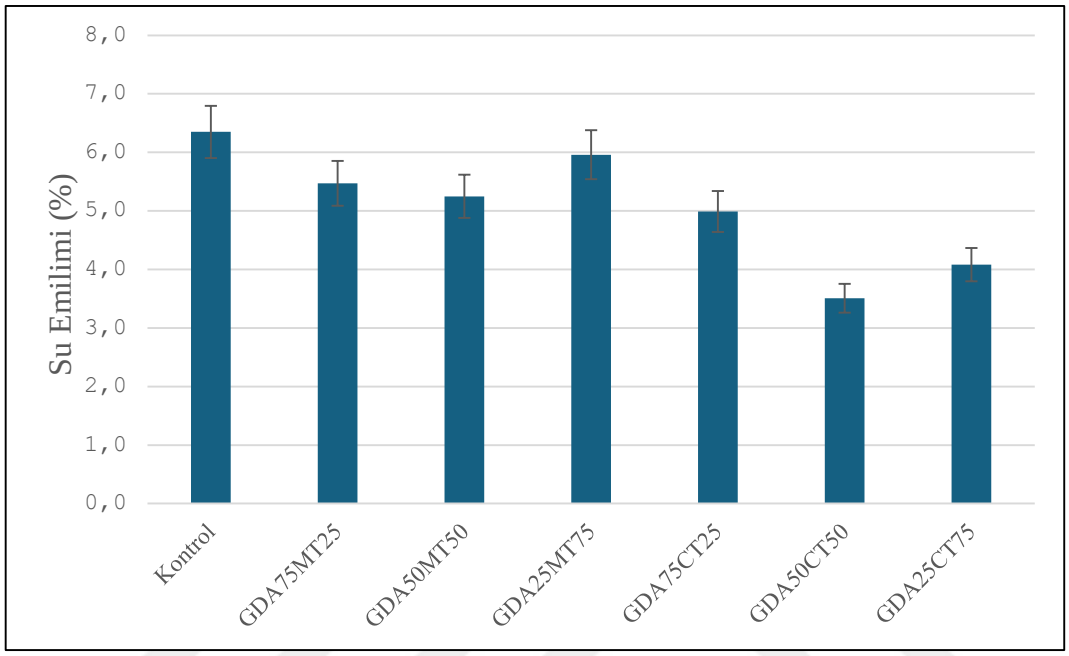
	Unit Weight (g/cm3)	Change in Unit Weight (%)
Kontrol	**1,86**	**-**
GDA75 MT25	**1,84**	**-1,1**
GDA50 MT50	**1,91**	**2,7**
GDA25 MT75	**1,84**	**-1,1**
GDA75 CT25	**1,87**	**1,6**
GDA50 CT50	**1,96**	**5,4**
GDA25 CT75	**1,90**	**2,2**

4.1.1 Su Emme

Şekil 4.2. incelendiğinde GDA'nın MT ve CT ile değiştirilmesinin su emilimini azaltarak GH'yi olumlu yönde etkilediği söylenebilir. MT veya CT ilavesi ile su emme oranının %4,8 ile %44,4 arasında azaldığı gözlenmiştir. Minimum su emme oranı GDA50CT50 numunelerinde gözlenmiştir. Kontrole göre %44,4 oranında azalma görülmüştür. GH'lerdeki su emme oranı, %75 CT ve MT'yi içeren, basit bir doğrusal eğilimden sapan incelikli bir davranış sergilemektedir. GH'lerde %50 toz malzemelerin ilk kullanımı su emiliminde bir azalma gösterirken, daha yüksek oranların kullanılması sonuçlara karmaşıklık katmaktadır. Parçacık boyutu ve yüzey alanının karmaşık yapısı, parçacık sayısı arttıkça su emilimi için artırılmış yüzey alanına katkıda bulunduğu yerde daha belirgin hale gelecektir. CT ve MT'lerin yüksek oranlarından etkilenen gelişen gözenek yapısı, GH içindeki su hareketini etkilediği için de önemli bir rol oynamaktadır. Bu tozların mineralojik yapılarına özgü kristalografik ve kimyasal etkileşimler, su emme özelliklerinde değişikliklere neden olabilir. Ayrıca, bu tozların başlattığı puzolanik reaksiyonlar mikro yapıda değişikliklere yol açarak su emilimini etkileyebilir. Daha yüksek oranlarda gözenek tıkanması ve sıkışma, gözlemlenen karmaşık duruma katkıda bulunur. Bu nedenle, özellikle %75 GP ve MP içerikli GH'lerdeki su emme davranışı sonuçları, bu malzemelerin karmaşık doğasını vurguluyarak bütünsel bir anlayış içinde kapsamlı laboratuvar deneyleri ve mikroyapısal analizler gerektiriyor.

En yüksek birim ağırlık ve en düşük su emme değerleri GDA50CT50 serisinde görülmüştür. CT'nin matristeki boşlukları doldurarak mikroyapıları iyileştirdiğini göstermektedir (Tablo 4.3). Uysal ve ark. kırmızı çamur-metakaolin bazlı GDA-

GH'yi çeşitli toz malzemelerle değiştirmiştir [37] . CT ikameli seride kontrole göre su emmenin azaldığını, %50 MT ikameli seride ise birim ağırlığın arttığını bildirmişlerdir.



Şekil 4.2 GH'nin su emme oranları

Tablo 4.2 GH'nin su emme sonuçları

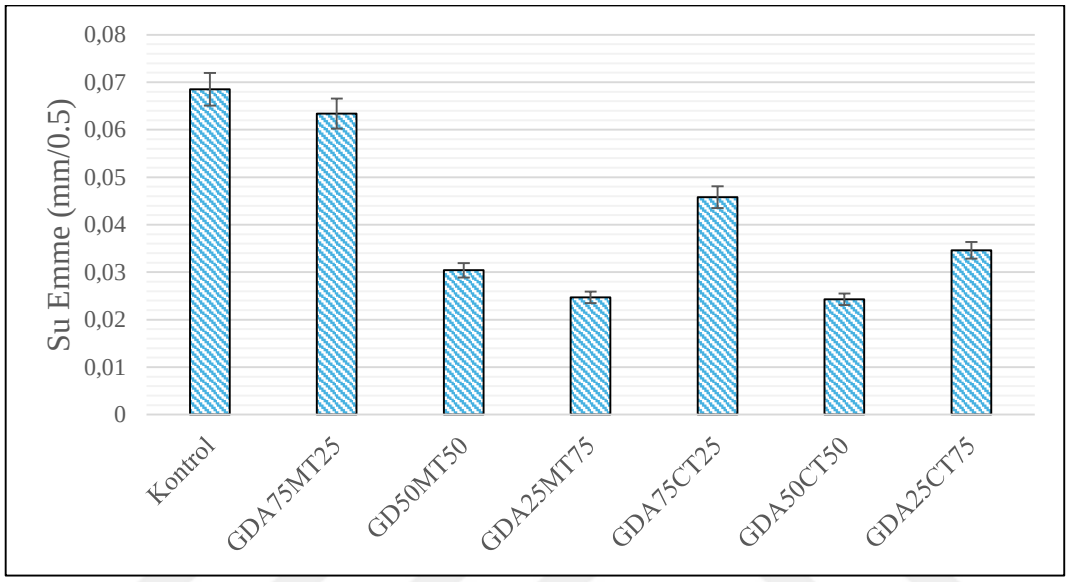
	Numune	Kuru Birim Hacim Ağırlık	24 Saat Su İçinde	Su Emilimi (%)
%100GDA	Kontrol	236,55	251,57	6,3
%75GDA+%25MT	GDA75MT25	230,575	243,185	5,5
%50GDA+%50MT	GDA50MT50	234,78	247,105	5,2
%25GDA+%75MT	GDA25MT75	233,66	247,585	6,0
%75GDA+%25CT	GDA75CT25	234,345	246,035	5,0
%50GDA+%50CT	GDA50CT50	236,22	244,51	3,5
%25GDA+%75CT	GDA25CT75	235,895	245,525	4,1

Tablo 4.3 GH'nin birim ağırlığı ve su emme değişimi

	Ağırlık birimi (g/cm^3)	Birim Değişimi Ağırlık (%)	Su soğurumu (%)	Su Emme Değişimi (%)
Kontrol	**1,86**	**-**	**6,3**	**-**
GDA75MT25	**1,84**	**-1,1**	**5,5**	**-12,7**
GDA50MT50	**1,91**	**2,7**	**5,2**	**-17,5**
GDA25MT75	**1,84**	**-1,1**	**6,0**	**-4,8**
GDA75CT25	**1,87**	**1,6**	**5,0**	**-16.7**
GDA50CT50	**1,96**	**5,4**	**3,5**	**-44,4**
GDA25CT75	**1,90**	**2,2**	**4,1**	**-34,9**

Şekil 4.3'te gösterilen su emilim sonuçları, GH'ler içindeki gözenekli yapı ve şekillendirilen karmaşık davranış hakkında fikir vermektedir. Su emilimini düzenleyen önemli bir parametre olan su emme katsayısı, gözeneklerin özelliklerine ve bunların GH matrisi içindeki ara bağlantılarına karmaşık bir şekilde bağlıdır. GDA'nın eklenmesi, GH'nin boşluk oranını gözle görülür şekilde etkileyen ve sonuç olarak bir artışa yol açan fark edilebilir bir etkidir. Boşluk oranındaki bu değişiklik, su emme katsayısını doğrudan etkileyerek malzemenin suyu emme ve taşıma yeteneğinin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağladığı için çok önemli bir rol üstlenmiştir. GDA içeriği, boşluk oranı ayarlamaları ve su emme katsayıları arasında gözlemlenen ilişki, bu faktörler arasındaki karmaşık etkileşimi vurgulayarak, GDA'ları içeren GH'lerdeki su emme davranışını açıklar. Bu değişkenler arasındaki karmaşık ilişki, GH'lerdeki su taşıma özelliklerini yöneten altta yatan mekanizmaların ortaya çıkarılması için ayrıntılı laboratuvar araştırmalarına ve mikroyapısal analizlere ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Sonuçlar incelendiğinde MT ve CT oranı arttıkça sorptivitenin genel olarak azaldığı görülmektedir. GDA'ları GH'lerdeki toz malzemelerle değiştirirken emicilikteki azalma, malzeme içindeki boşlukların azalmasına bağlanabilir; GDA50CT50 karışımı en düşük su emilimini gösterir. İlk olarak, daha fazla toz halindeki malzemenin eklenmesi, GH'ler içindeki genel gözenek yapısını değiştirerek daha ince ve daha birbirine bağlı bir gözenek ağına yol açar. Bu daha ince ağ, suyun hareketini engelleyerek malzemenin su emiciliğini azaltır. İkinci olarak, toz malzemelerin parçacık boyutu ve yüzey alanı gibi spesifik özellikleri çok önemli bir rol oynamaktadır. Bu malzemelerdeki daha ince parçacıklar, yoğunluğu artırarak suyun nüfuz etmesi için mevcut yolları daha da sınırlandırır. Ek olarak, toz halindeki

malzemeler ile geopolimer matris arasındaki kimyasal etkileşimler, malzemenin genel geçirgenliğini etkileyen bir yapıya dönüşmesine yol açabilir. Bu mekanizmaların karmaşıklıkları, değişen toz halindeki malzeme içeriğinin su emilimi üzerindeki etkilerinin titiz bir şekilde araştırılması ihtiyacını vurgulayarak, bu fenomenlerin kapsamlı bir şekilde anlaşılması için gereken bilimsel derinliği vurgulamaktadır [37, 38].



Şekil 4.3 GH'nin su emme değeri

4.2. Mekanik Özellikler

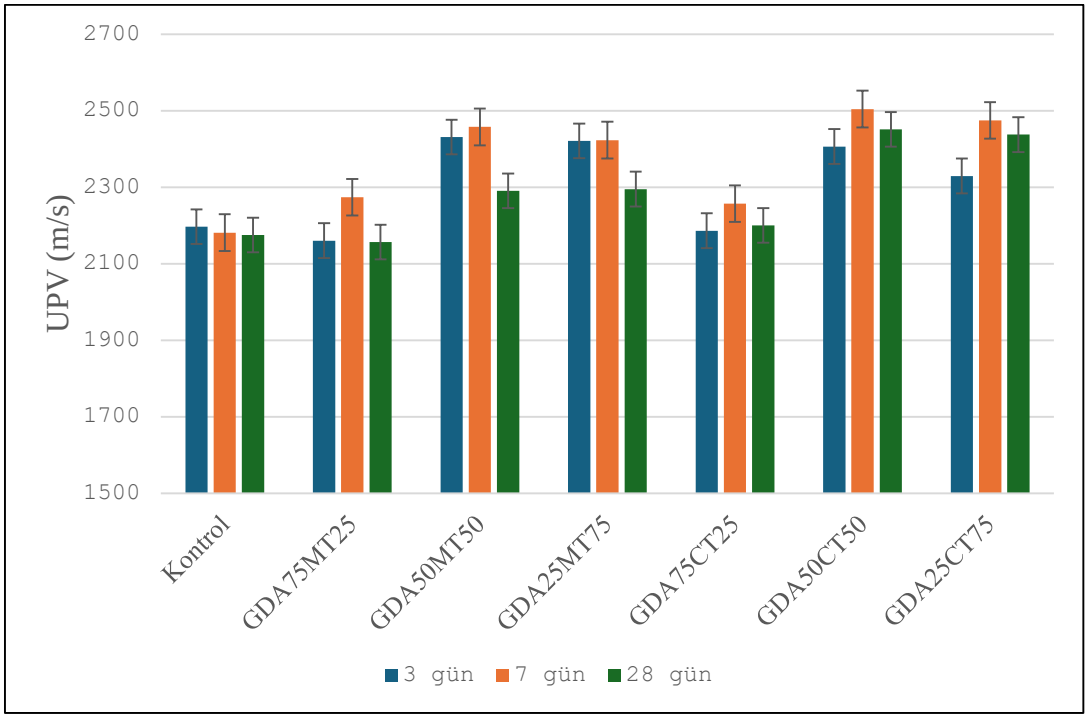
4.2.1 UPV

UPV, iç yapısal bütünlüğü incelemek ve GH'ler içindeki boşlukların veya çatlakların varlığını tespit etmek için metodik olarak kullanılmıştır. Ayrıntılı sonuçlar Tablo 4.4 ve Şekil 4.4'te özetlenmiştir. Kontrollerle karşılaştırıldığında tüm serilerde UPV'de tutarlı ve dikkate değer bir artış gözlenmiştir. Bu ilgi çekici fenomen, yüksek gözenekli GDA'ların ince toz haline getirilmiş malzemelerle kasıtlı olarak ikame edilmesine, geopolimer matris içindeki boşluk oranının azaltılmasına ve bu nedenle UPV'lerin arttırılmasına bağlanabilir. Malzeme bileşiminin incelik durumu, özellikle de GDA'nın toz halindeki malzemelerle standarta uygun olarak değiştirilmesi, UPV artışını etkileyen çok önemli bir faktördür. GDA ile ilişkili gözeneklilik, bu ikame yoluyla azaldıkça, malzeme, artan UPV'lerde kendini gösteren bir yoğunlaşma etkisine maruz kalacaktır. Bu incelikli anlayış, geopolimer formülasyonlarının doğasında bulunan karmaşık malzeme bilimi ilkelerinin önemini vurgulamaktadır.

Özellikle 28 günlük örneklerde GDA50CT50 serisi en yüksek UPV'yi sergileyerek %12,7'lik önemli bir artış sergilemiştir. Bu dikkate değer sonuç, GDA50CT50'nin yalnızca gözenekliliği azaltmakla kalmayıp aynı zamanda GH'lerin akustik özelliklerini de geliştirmedeki etkinliğini vurgulamaktadır. Temelde, UPV sonuçları, GH'lerin gelişen iç özelliklerine ilişkin içgörüler sağlayan ve optimum yapısal performans için özel malzeme formülasyonlarının önemini güçlendiren bir unsur olduğu görülmüştür.

Tablo 4.4 3, 7 ve 28. günlerdeki UPV'ler (m/s)

Karışım Kodu	3 gün	Değişim (%)	7 gün	Değişim (%)	28 gün	Değişim (%)
Kontrol	**2197**	**-**	**2181**	**-**	**2175**	**-**
GDA75MT25	**2160**	**-1,7**	**2274**	**4,3**	**2157**	**-0,9**
GDA50MT50	**2431**	**10,7**	**2458**	**12,7**	**2291**	**5,3**
GDA25MT75	**2423**	**10,3**	**2423**	**11,1**	**2295**	**5,5**
GDA75CT25	**2186**	**-0,5**	**2257**	**3,5**	**2200**	**1,1**
GDA50CT50	**2406**	**9,5**	**2504**	**14,8**	**2451**	**12,7**
GDA25CT75	**2329**	**6,0**	**2475**	**13,5**	**2438**	**12,1**



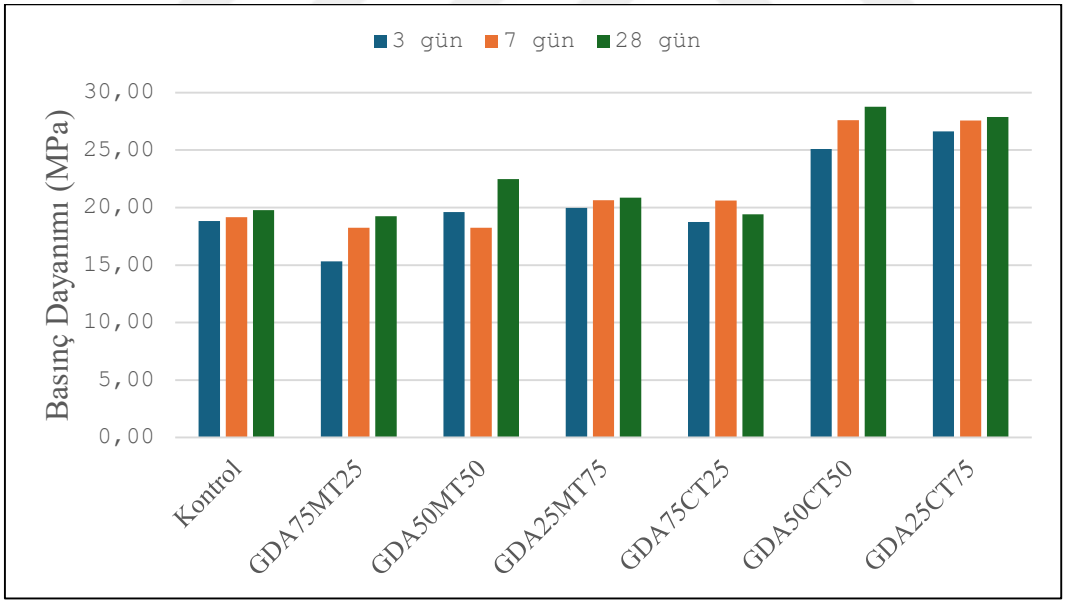
Şekil 4.4 GH'nin 3, 7 ve 28. günlerinde UPV'ler

4.2.2 Basınç Dayanımı

Şekil 4.5, MT ilavesinin GH'nin basınç dayanımını olumlu yönde etkilemediğini gösteren basınç ve eğilme dayanım testleri göstermektedir. GH'lerdeki GDA'ların yerine MT ve CT'nin eklenmesi, başlangıçta basınç dayanımında dikkate değer bir artışa yol açmaktadır. Dolgu görevi gören ve mekanik takviye sağlayan kimyasal etkileşimler, malzemenin gelişmiş özelliklerine katkıda bulunur. Ancak %25'i aşan ikame oranının ötesinde basınç dayanımında kademeli bir azalma gözlenmektedir. Bu azalmaya rağmen, bu malzemelerin GDA'larla ikame edilmesinin, geliştirilmiş basınç dayanımını gösteren olumlu bir alternatif olduğunu kanıtlamıştır. Mukavemetteki %25'lik ikame oranının ötesindeki düşüş, matris bileşimindeki değişiklikler ve arayüzey bağlantısı üzerindeki potansiyel olumsuz etkiler gibi faktörlere bağlanabilir. Bununla birlikte, GDA'ların MT ve CT ile değiştirilmesini kullanmak, GH'lerin genel performansını artırmak için teorik bilgileri bilimsel gözlemlerle birleştiren değerli bir strateji olarak ortaya çıkıyor. Çeşitli uygulamalarda optimum mekanik özellikler için ikame oranlarını optimize etmek için daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir [37, 38]. Kabirova ve ark. [29] atık MT de dahil olmak üzere çeşitli atık tozları içeren metakaolin bazlı GH'nin mekanik özelliklerini araştırmıştır. Çalışmalarında MT'nin GH'nin basınç dayanımını olumlu etkilemediğini, hatta MT oranı arttıkça basınç dayanımını azalttığını bildirmiştir. CT eklenen seri, MT eklenen seriye kıyasla GH'nin basınç dayanımını geliştirdi. GH'de GDA'nın %50 ve %75'inin CT ile değiştirilmesiyle basınç dayanımının iyileşme oranları sırasıyla %45,4 ve %40,9'dur. Ancak CT %25 oranında eklendiğinde basınç dayanımını iyileştirmedi. En iyi en iyi dayanımı veren seri GDA50CT50 de birim ağırlık ve su emme testlerinde benzer sonuçlar verdi. Nazir ve ark. [12] dolgu maddesi olarak GDA ve CT ile yapılan elyaf takviyeli GH üretti. Çalışmalarında GDA'yı çoklu oranlarda CT ile değiştirmişler ve en iyi mukavemeti veren oranın %50 olduğunu bildirmişlerdir. Basınç dayanım sonuçlarının literatürle uyumlu olduğu anlaşılmıştır.

Tablo 4.5 GH'nin 3, 7 ve 28. günlerinde basınç dayanımı

Karışım	Numune Adı	3.Gün	7.Gün	28. Gün	Değişim % (3.Gün)	Değişim % (7.Gün)	Değişim % (28.Gün)
%100GDA	Kontrol	18,82	19,16	19,79	-	-	-
%75GDA +%25MT	GDA75 MT25	15,32	18,24	19,24	-18,60	-4,78	-2,78
%50GDA +%50MT	GDA50 MT50	19,60	18,24	22,47	4,14	-4,78	13,53
%25GDA +%75MT	GDA25 MT75	19,98	20,66	20,86	6,18	7,82	5,41
%75GDA +%25CT	GDA75 CT25	18,74	20,61	19,41	-0,43	7,58	-1,92
%50GDA +%50CT	GDA50 CT50	25,11	27,61	28,78	33,42	44,13	45,41
%25GDA +%75CT	GDA25 CT75	26,62	27,574	27,88	41,43	43,93	40,87

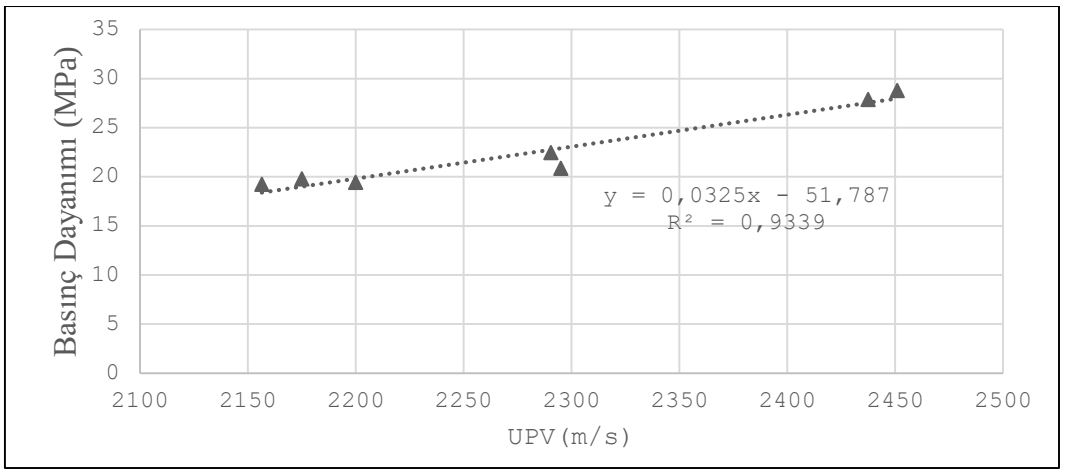


Şekil 4.5 GH'nin 3, 7 ve 28. günlerinde basınç dayanımları

4.2.3 UPV-Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki

UPV, matristeki boşluk miktarına bağlıdır. Boşluk sayısı arttıkça UPV azalır ve basınç dayanımı(BD) azalır. Kısaca geopolimerin UPV ve basınç dayanım(BD)

değerleri arasında bir ilişki vardır. Basınç dyanımı ve UPV arasındaki korelasyonu belirlemek için, kürlenen karışımlar Şekil 4.6'da 28 günlük deneysel verilere göre çizilmiştir. R^2 değeri 0 ile 1 arasında değişir ve 1 en doğru öngörüyü tanımlar ve R^2 değeri bunun üzerindedir. 0,80 kabul edilebilir [39] . UPV ve basınç dayanımının korelasyon faktörü (R^2) 0,9338 idi ve bu tatmin edicidir. GH'lerde BD-UPV arasında yaklaşık %93'lük R^2 sağlam bir ilişkiye işaret etmektedir. Bu, çeşitli teorik yönlere bağlanabilir. İlk olarak, BD-UPV arasındaki bağlantı genellikle malzemenin yoğunluğuna ve elastik özelliklerine bağlıdır; yüksek BD, yüksek yoğunluk ve elastik modül ile ilişkilidir. İkinci olarak korelasyon, malzemenin mikro yapısı, moleküler düzenlemesi ve mekanik özellikleri arasındaki etkileşimi yansıtır. Moleküler düzendeki bozulmalar veya mikro yapı değişiklikleri BD-UPV'yi etkileyebilir. Ek olarak elastik modül ile mekanik dayanıklılık arasındaki bağlantı, elastik modüldeki bir artışın BD-UPV'yi yükseltme eğiliminde olması nedeniyle bir rol oynar. Son olarak, homojen bir malzeme tipik olarak daha yüksek BD ve tutarlı UPV sergilediğinden, korelasyon malzeme homojenliğinin ve kalitesinin önemine işaret etmektedir. Bu teorik düşünceler, gözlemlenen korelasyona dair içgörüleri sağlamaktadır. Bununla birlikte altta yatan mekanizmaları kapsamlı bir şekilde kavramak için daha fazla deneysel çalışma ve analiz yapılması önemlidir.



Şekil 4.6 UPV ve BD arasındaki ilişki

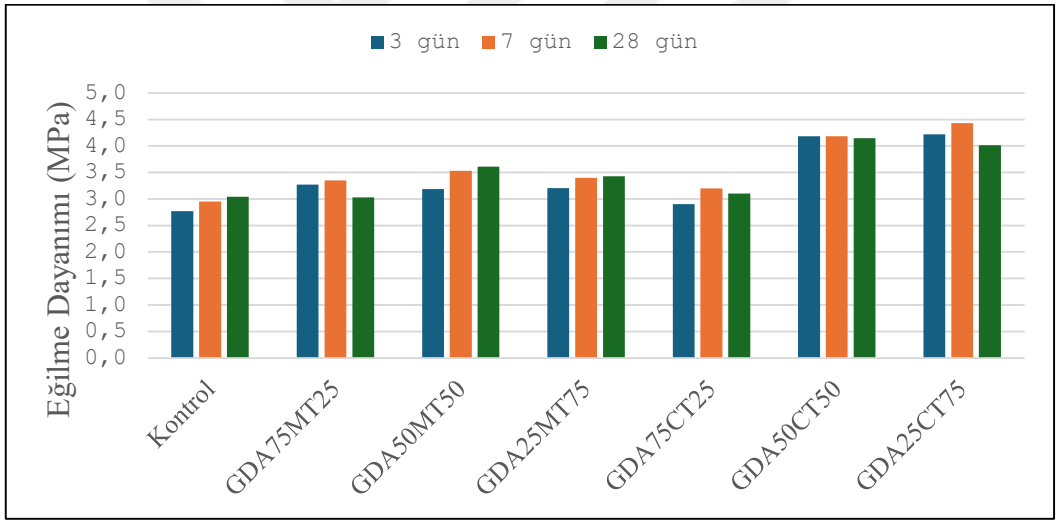
4.2.4 Eğilme Dayanımı

Eğilme dayanımı(ED) Şekil 3.7'de verilmiştir**.** Sonuçlar incelendiğinde BD ve ED'deki değişim arasında benzerlik görülmüştür. Literatürde CT bazlı GH'lerin ED kapsamındaki yanıtlarının genel olarak BD'ye benzer olduğu belirtilmektedir [40].

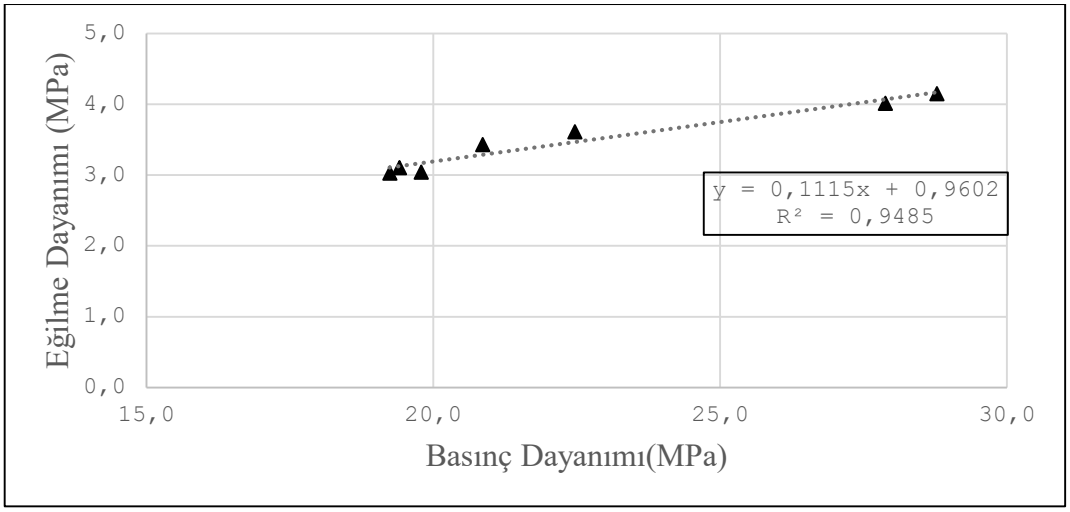
CT'nin ED'yi MT'den daha fazla iyileştirdiği görüldü. ED, GDA75MT25 dışındaki tüm serilerde artış göstermiştir ancak en yüksek artış 28 günde GDA50CT50'de gerçekleşmiştir. GDA, %25, %50 ve %75 oranında MT ile değiştirildiğinde iyileşme oranları 28 günde sırasıyla %-0,41, %18,66 ve %12,44 olmuştur. CT karışımlı (GDA75CT25, GDA50CT50 ve GDA25CT75) 28 günlük seride iyileşme oranı sırasıyla %2,04, %36,40 ve %31,97 olmuştur. Bulgulara göre CT'nin ED'yi MT'den daha fazla iyileştirdiği anlaşılmıştır. BD ve ED arasındaki ilişki araştırıldı ve ilişki grafiği Şekil 4.7'de gösterilmektedir**.** R^2 0,9485 idi ve bu yüksek bir doğrusal ilişkiyi göstermektedir. CT'nin MT'ye kıyasla GH'lerdeki üstün ED birkaç temel faktöre bağlanabilir. Olumlu mekanik özellikleri ve mikroyapısal özellikleriyle CT, daha homojen ve yapısal olarak sağlam bir matris sağlama konusunda genellikle MT'yi geride bırakır. CT'nin daha küçük parçacık boyutu, daha ince ve daha eşit dağılmış bir mikro yapı oluşturarak ED de dahil olmak üzere genel mekanik performansı artırabilir. Ek olarak, CT ile geopolimer matris arasındaki kimyasal etkileşimler daha etkilidir ve bükülme mukavemetini daha da artıran güçlü bağlanmayı destekler. Fiber takviyesinin, özellikle de cam fiberlerin potansiyel olarak dahil edilmesi, yapısal bir destek mekanizması olarak hareket edebilir ve GP içeren GM'lerde gözlemlenen üstün eğilme dayanımına(ED) önemli ölçüde katkıda bulunabilir. Buna karşılık, MT'nin kontrol serisinde önemli bir mukavemet artışı sergilemesindeki sınırlamaları, kimyasal inertliğinden ve spesifik geopolimerizasyon reaksiyonlarında daha az reaktif doğasından kaynaklanabilir. MT'nin parçacık boyutu dağılımı ve homojenliği de optimal mikroyapısal gelişimi engelleyebilir. MT, belirli koşullarda ED'yi arttırmada kısıtlamalar sergileyebilirken, CT'nin üstün özellikleri, GH formülasyonlarında daha fazla araştırma ve optimizasyon için yollar açarak değerli bir katkı maddesi olarak etkinliğini vurgulamaktadır. Farklı malzeme bileşimleri, parçacık boyutları ve sertleştirme koşulları dikkate alınarak, bu tozlar ile geopolimer matrisi arasındaki incelikli etkileşimleri kapsamlı bir şekilde açıklamak için ek araştırmalar gerekmektedir.

Tablo 4.6 GH'nin 3, 7 ve 28. günlerinde eğilme dayanımı

Karışım	Numune Adı	3.Gün	7.Gün	28.Gün	Değişim (%)
%100GDA	Kontrol	2,77	2,95	3,04	-
%75GDA+%25MT	GDA75MT25	3,27	3,35	3,03	-0,41
%50GDA+%50MT	GDA50MT50	3,19	3,53	3,61	18,66
%25GDA+%75MT	GDA25MT75	3,21	3,40	3,43	12,74
%75GDA+%25CT	GDA75CT25	2,90	3,20	3,10	2,04
%50GDA+%50CT	GDA50CT50	4,19	4,19	4,15	36,40
%25GDA+%75CT	GDA25CT75	4,22	4,43	4,02	31,97



Şekil 4.7 GH'nin 3. 7. ve 28. günlerinde eğilme dayanımı



Şekil 4.8 Basınç dayanımı ve eğilme dayanımı arasındaki ilişki

4.3 Dayanıklılık Özellikleri

4.3.1 Yüksek Sıcaklık Etkisi

Dayanıklılığı karakterize etmek için yüksek sıcaklık ve donma-çözülme direnci kullanılmıştır. Yüksek sıcaklığın GH'ler üzerindeki etkisini analiz etmek için UPV'ler, BD'ler ve ED'ler yapıldı. Numunelerin maruz kaldığı sıcaklık arttıkça tüm numunelerdeki ağırlık kaybı da artmıştır (Tablo 4.7). Literatürde ağırlık kaybının ana nedeni sıcaklık arttıkça matristeki serbest, adsorbe edilmiş ve kimyasal olarak bağlı suyun buharlaşmasıdır [41, 42]. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda agrega ile hamur arasındaki ısıl uyumsuzluk mikro çatlaklar oluşturmakta ve dolayısıyla ağırlık kaybı matristeki boşluğu arttırmaktadır. Sonuçlar incelendiğinde MT içeren karışımlarda ağırlık kaybının CT içeren karışımlara göre daha belirgin olduğu görülmüştür. Sonuçlar en yüksek ağırlık kaybını GDA50MT50'de, en düşük ise GDA25CT75'te göstermiştir.

Tablo 4.7 Yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra kalan ağırlıklar (%)

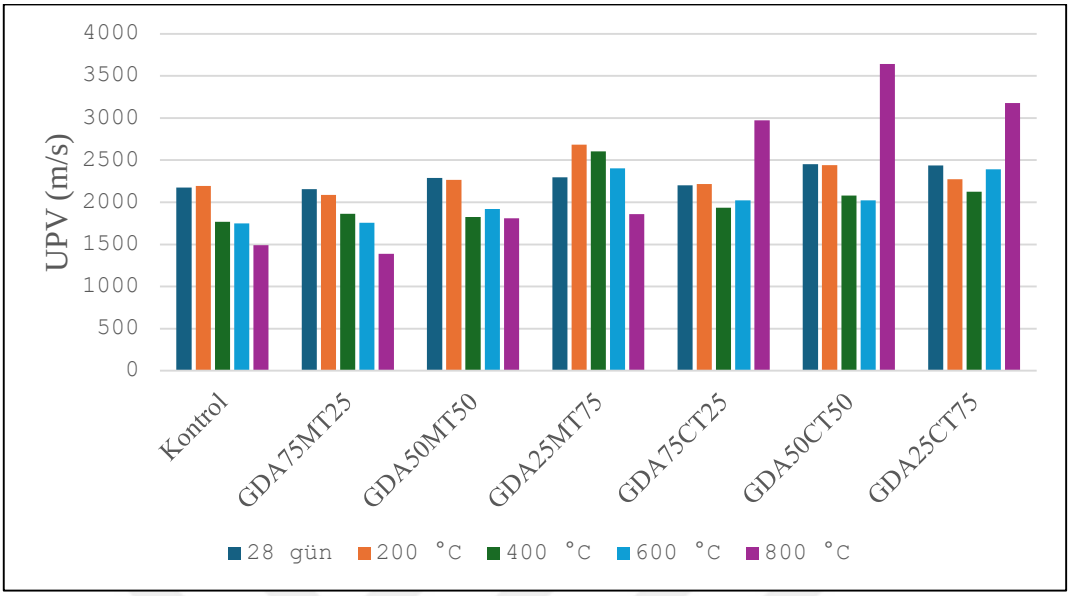
Karışım kodu	28 gün	200 °C	400 °C	600°C	800 °C
Kontrol	**100,0**	**95,3**	**91,1**	**89,2**	**81,4**
GDA75MT25	**100,0**	**93,6**	**91,6**	**91,0**	**77,9**
GDA50MT50	**100,0**	**95,1**	**91,0**	**88,5**	**77,5**
GDA25MT75	**100,0**	**93,7**	**91,7**	**91,2**	**69,9**
GDA75CT25	**100,0**	**95,6**	**90,4**	**88,7**	**84,0**
GDA50CT50	**100,0**	**95,1**	**91,0**	**89,9**	**83,3**
GDA25CT75	**100,0**	**99,7**	**90,6**	**90,6**	**85,9**

4.3.2 Artık UPV

Yüksek sıcaklıktan sonraki UPV'ler ve iyileştirme oranı değerleri Tablo 4.8 ve Şekil 4.9'da verilmiştir**.** Sıcaklık arttıkça, kontrollerde ve MT eklenen serilerde UPV'ler genel olarak azalmıştır. CT'li seride UPV'lerin genel olarak 600 °C'ye düştüğü görülmüştür. 800°C'de GDA75CT25, GDA50CT50 ve GDA25CT75 serilerinin UPV'leri 28 günlük değerlere kıyasla sırasıyla %32,6, %52,6 ve %30,4 arttığı gözlemlenmiştir. CT'nin MT' ye karşı üstünlüğü, özellikle UPV ve yüksek sıcaklık direncinde belirgin olarak, onun doğal özellikleriyle açıklanabilir. CT, yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında yüksek termal kararlılık ve yüksek sıcaklığa karşı dayanıklılık sergileyerek daha dayanıklı bir matris geliştirir. MT'nin termal hassasiyete ve bunun sonucunda ortaya çıkan kristal yapı değişikliklerine karşı duyarlılığıyla karşılaştırıldığında CT, yüksek sıcaklığa karşı güçlü bir direnç sergilemektedir Bu davranış, gelişmiş yüksek sıcaklık direncine ve artırılmış UPV'lere dönüşüp; camsı bileşim zorlu koşullarda bile yapısal sağlamlığa katkıda bulunmuştur. CT'nin yüksek sıcaklıklardaki kimyasal bileşimi ve reaksiyonlarının karmaşık yapısı, yalnızca dayanıklı olmakla kalmayıp aynı zamanda yüksek sıcaklık direncinde üstün olan geopolimerik bir malzemeyi besleyen çok önemli bir işlev haline geliyor. Bu faktörlerin birbirleriyle etkileşimi, CT'yi, MT ile kıyaslandığında GH formülasyonlarında yüksek UPV'lere ve yüksek yüksek sıcaklık direncine sahip olan seçkin bir katkı maddesi olduğu belirlenmiştir.

Tablo 4.8 Yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonraki UPV'ler (m/s)

Karışım Kodu	28 gün	200 °C	400 °C	600 °C	800 °C	Değişim (%)
Kontrol	**2175**	**2194**	**1768**	**1749**	**1490**	**-31,5**
GDA75MT25	**2157**	**2087**	**1864**	**1757**	**1389**	**-35,6**
GDA50MT50	**2291**	**2265**	**1827**	**1920**	**1811**	**-20,9**
GDA25MT75	**2295**	**2683**	**2605**	**2405**	**1861**	**-18,9**
GDA75CT25	**2200**	**2217**	**1937**	**2021**	**2973**	**35,1**
GDA50CT50	**2451**	**2439**	**2080**	**2021**	**3642**	**48,6**
GDA25CT75	**2438**	**2273**	**2125**	**2393**	**3178**	**30,4**



Şekil 4.9 GH'nin yüksek sıcaklığa maruz kalmasından sonraki UPV'ler

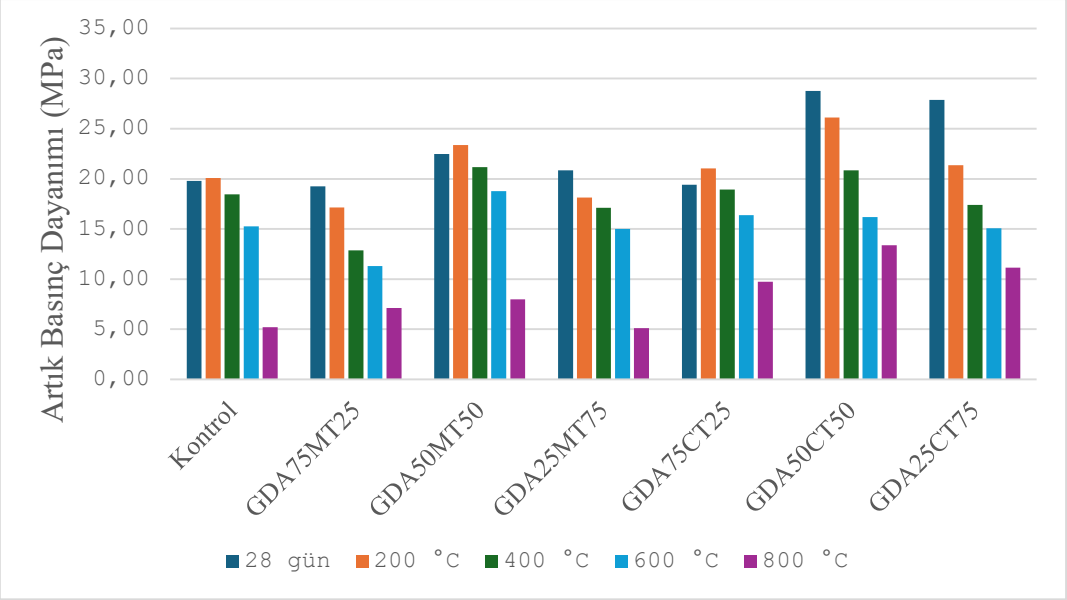
4.3.3 Artık Basınç ve Eğilme Dayanımı

Yüksek sıcaklıklara (200, 400, 600 ve 800 °C) maruz bırakıldıktan sonra elde edilen BD ve ED, sırasıyla Şekil 4.10. ve Şekil 4.11'de sunulmaktadır. Özellikle 800°C sıcaklıklarda sıcaklık arttıkça MT ikameli GH'de, BD'de önemli bir azalma gözlenmiştir. MT ikame serilerinin (GDA75MT25, GDA50MT50 ve GDA25MT75) BD düşüş oranları %63,0, %64,4 ve %75,4; kontrollerde azalma oranı %73,7 olmuştur. MT'nin yüksek sıcaklık direncini önemli ölçüde iyileştirmediği anlaşılmıştır. CT değişimi içeren serilerin (GDA75CT25, GDA50CT50 ve GDA25CT75) BD iyileştirme oranları, 28 günlük değerlerle karşılaştırıldığında 800°C'de sırasıyla %-49,8, %-53,5 ve %-60,0 idi. CT ikameli serilerin BD'si genel olarak sıcaklık 600°C'ye yükseldikçe azalmıştır. Ancak, GDA25CT75 ve GDA50CT50 serisinde 800°C'de artık BD artmıştır. Sonuçlar, GH'ye CT eklenmesinin, yüksek sıcaklıklarda kalan BD'yi iyileştirdiğini göstermektedir. ED'ler incelendiğinde ED'deki değişimin BD ile uyumlu olduğu görülmektedir. BD'lere benzer şekilde, karışımların ED'si genel olarak sıcaklık arttıkça azaldı. Sıcaklık 800°C'ye yükseldiğinde kontrol karışımının BD'si %86,4 azalırken, MT (GDA75MT25, GDA50MT50 ve GDA25MT75) içeren karışımlarda bu oran sırasıyla %58,7, %66,5 ve %70,6 oldu. Başka bir deyişle MT, yüksek sıcaklıklara

maruz kalan karışımın artık BD'sini arttırdı. CT içeren karışımların BD'si 600°C'ye kadar düşmüştür. Ancak 800°C'de CT içeren serilerin nihai BD'sindeki azalma MT içeren serilere göre daha az olmuştur. Matris içindeki cam, 700°C' de katıdan sıvıya dönüşüm davranışı gösterir. CT'nin yüksek sıcaklıklarda eritilmesi, matristeki boşlukları ve mikro çatlakları doldurarak daha düzgün bir mikro yapı sağlar. Bahsedilen nedenlerden dolayı CT'nin 800°C' de artık mukavemetinde artış gösterdiği düşünülmüştür. Jiang ve diğerleri. [43] benzer şekilde cam eklemenin CT'nin yüksek sıcaklık performansını arttırdığını bildirmiştir. Çok yönlü araştırma sonucunda CT, GH'lere sorunsuz bir şekilde entegre edildiğinde, güç artırmanın bir örneği olarak ortaya çıkmıştır. Mikroyapısal olarak, camın küçültülmüş parçacık boyutları ve amorf yapısı, yoğunluk ve tekdüzelik ile karakterize edilen bir matrisin oluşturulmasına neden olacaktır. Böylece her iki BD-ED'ye benzersiz bir ivme kazandırır. Literatür, CT ile geopolimer matrisi arasındaki kimyasal yakınlıkları açıklayarak, yapısal uyumu güçlendiren ve BD'yi tartışmasız bir şekilde yükselten sağlam bağları ortaya çıkartıyor. ED'de, CT'nin sağladığı esneklik, malzemeye eğilme gerilimlerine karşı doğal bir esneklik kazandırarak çok önemli bir rol oynamaktadır. Akademik literatürün kapsamlı bir şekilde araştırılmasıyla anlaşılan bu karmaşık yapısı, CT'nin geleneksel GH'lerin alanlarını aşan ve onları üstün mekanik performansı ile üst düzey bir katkı maddesi olarak doğrulamakla kalmıyor, aynı zamanda [44] mekanik performansı ile değerli bir katkı maddesi kılmaktadır. [43]

Tablo 4.9 Yüksek sıcaklıktan sonra GH'nin BD'leri

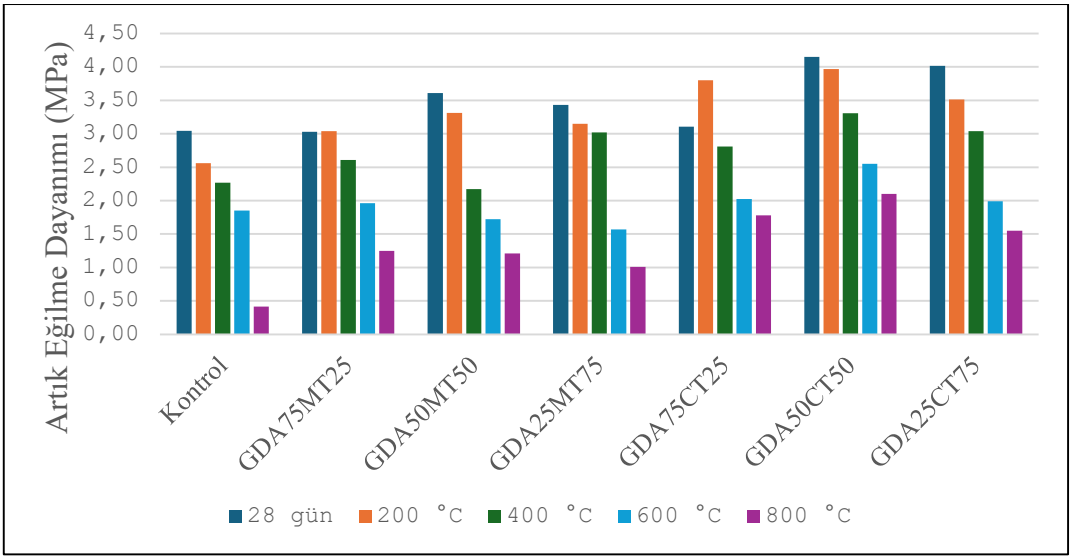
Karışım	Numune Adı	28 gün	200 °C	400 °C	600 °C	800 °C
%100GDA	Kontrol	19,79	20,09	18,46	15,26	5,20
%75GDA+%25MT	GDA75 MT25	19,24	17,16	12,86	11,30	7,12
%50GDA+%50MT	GDA50 MT50	22,47	23,38	21,16	18,76	7,99
%25GDA+%75MT	GDA25 MT75	20,86	18,13	17,12	15,00	5,13
%75GDA+%25CT	GDA75 CT25	19,41	21,05	18,92	16,39	9,74
%50GDA+%50CT	GDA50 CT50	28,78	26,12	20,84	16,20	13,39
%25GDA+%75CT	GDA25 CT75	27,88	21,35	17,41	15,07	11,14



Şekil 4.10 Yüksek sıcaklıktan sonra GH'nin BD'leri

Tablo 4.10 Yüksek sıcaklıktan sonra GH'nin ED'leri

Numune Adı	28 gün	200 °C	400 °C	600 °C	800 °C	Değişim %
Kontrol	**3,04**	**2,56**	**2,27**	**1,85**	**0,41**	**-86,4**
GDA75MT25	**3,03**	**3,04**	**2,61**	**1,96**	**1,25**	**-58,7**
GDA50MT50	**3,61**	**3,31**	**2,17**	**1,72**	**1,21**	**-66,5**
GDA25MT75	**3,43**	**3,15**	**3,02**	**1,57**	**1,01**	**-70,6**
GDA75CT25	**3,10**	**3,80**	**2,81**	**2,02**	**1,78**	**-42,6**
GDA50CT50	**4,15**	**3,97**	**3,31**	**2,55**	**2,10**	**-49,4**
GDA25CT75	**4,02**	**3,51**	**3,04**	**1,99**	**1,55**	**-61,4**



Şekil 4.11 Yüksek sıcaklıktan sonra GH'nin ED'leri

4.3.4 Donma-Çözülme Direnci

Donma-çözülmeye maruz bırakıldıktan sonra numunelere ağırlık kaybı, UPV'ler, BD'ler ve ED'ler uygulanmıştır. UPV, BD ve ED kayıpları genellikle kontrollere göre daha anlamlı elde edilmiştir (Tablo 4.11-4.14). Donma-çözülme döngüleri sırasında, tekrarlanan buzlanma basıncı GH'de iç gerilimlere neden olur ve bu da mukavemet kaybına neden olur. Gözeneklerin ve mikro çatlakların kontrol edilmesi, serbest su için daha fazla alan sağlamıştır. Dolayısıyla kontroller tüm serilerle karşılaştırıldığında iyi donma-çözülme direnci göstermiştir. Özellikle CT ve MT içeren GH'lerde kontrol serilerine kıyasla vurgulanan, donma-çözülme döngülerini takiben mukavemetteki göze çarpan azalma, faktörlerin bir araya gelmesine bağlanabilir. Amorf yapısıyla tanınan GP, donma-çözülme döngülerine karşı yüksek hassasiyet sergileyebilir, bu da mikroyapısal değişikliklere ve malzeme içindeki hava boşluklarının potansiyel olarak genişlemesine yol açabilir. Bu olay, mikro çatlakların oluşumunu hızlandırarak, geopolimer matrisinin genel mukavemetini azaltacaktır. Öte yandan MT, kristal yapısı ve doğal mineral bileşimi nedeniyle, donma sırasında suyun genleşmesinin neden olduğu zararlı etkilere daha yatkın olabilir. Kristal yapı ve mineral özellikleri, MT'yi donma-çözülme döngüleri sırasında ortaya çıkan mekanik gerilimlere karşı daha az dirençli hale getirebilir. Bu faktörlerin birleşmesi, CT ve MT ile aşılanmış serilerin donma-çözülme döngülerinin zararlı etkilerine karşı artan hassasiyetinin altını çizerek, bunların

kontrollere karşı, karşılaştırmalı zayıflıklarını etkileyen karmaşıklıkları açıklamaktadır [45, 46].

Tablo 4.11 Donma-çözülmeye maruz kaldıktan sonra GH'nin birim ağırlıkları (g/cm^3)

Karışım Kodu	28 gün	Donma-çözülme sonrası maruziyet	Değişim (%)
Kontrol	**1,86**	**1,85**	**-0,3**
GDA75MT25	**1,84**	**1,83**	**-0,5**
GDA50MT50	**1,91**	**1,81**	**-5,4**
GDA25MT75	**1,84**	**1,71**	**-7,0**
GDA75CT25	**1,87**	**1,90**	**1,4**
GDA50CT50	**1,96**	**1,88**	**-4,1**
GDA25CT75	**1,90**	**1,87**	**-1,6**

Tablo 4.12 Donma-çözülmeye maruz kaldıktan sonra GH'nin UPV'leri (m/s)

Karışım Kodu	28 gün	Donma-çözülme sonrası maruziyet	Değişim (%)
Kontrol	**2175**	**2152**	**-1,0**
GDA75MT25	**2160**	**2104**	**-2,6**
GDA50MT50	**2291**	**2193**	**-4,2**
GDA25MT75	**2435**	**2239**	**-8,1**
GDA75CT25	**2200**	**2152**	**-2,2**
GDA50CT50	**2405**	**2274**	**-5,5**
GDA25CT75	**2413**	**2366**	**-2,0**

Tablo 4.13 GH donma-çözülmeye maruz kalmanın BD'leri (MPa)

Karışım Kodu	28 gün	Donma-çözülme sonrası maruziyet	Değişim (%)
Kontrol	**19,79**	**19,20**	**-3,0**
GDA75MT25	**19,24**	**18,94**	**-1,5**
GDA50MT50	**22,47**	**21,14**	**-5,9**
GDA25MT75	**20,86**	**19,34**	**-7,3**
GDA75CT25	**19,41**	**18,78**	**-3,2**
GDA50CT50	**28.78**	**27.10**	**-5.8**
GDA25CT75	**27.88**	**27.16**	**-2.6**

Tablo 4.14 Donma-çözülmeye maruz kaldıktan sonra GH'nin ED'leri (MPa)

Karışım Kodu	28 gün	Donma-çözülme sonrası maruziyet	Değişim (%)
Kontrol	**3,04**	**3,02**	**-0,6**
GDA75MT25	**3,03**	**2,96**	**-2,2**
GDA50MT50	**3,61**	**3,42**	**-5,3**
GDA25MT75	**3,43**	**3,17**	**-7,6**
GDA75CT25	**3,10**	**2,95**	**-4,9**
GDA50CT50	**4,15**	**3,91**	**-5,7**
GDA25CT75	**4,02**	**3,90**	**-2,8**

4.3.5 Mikroyapısal Analiz

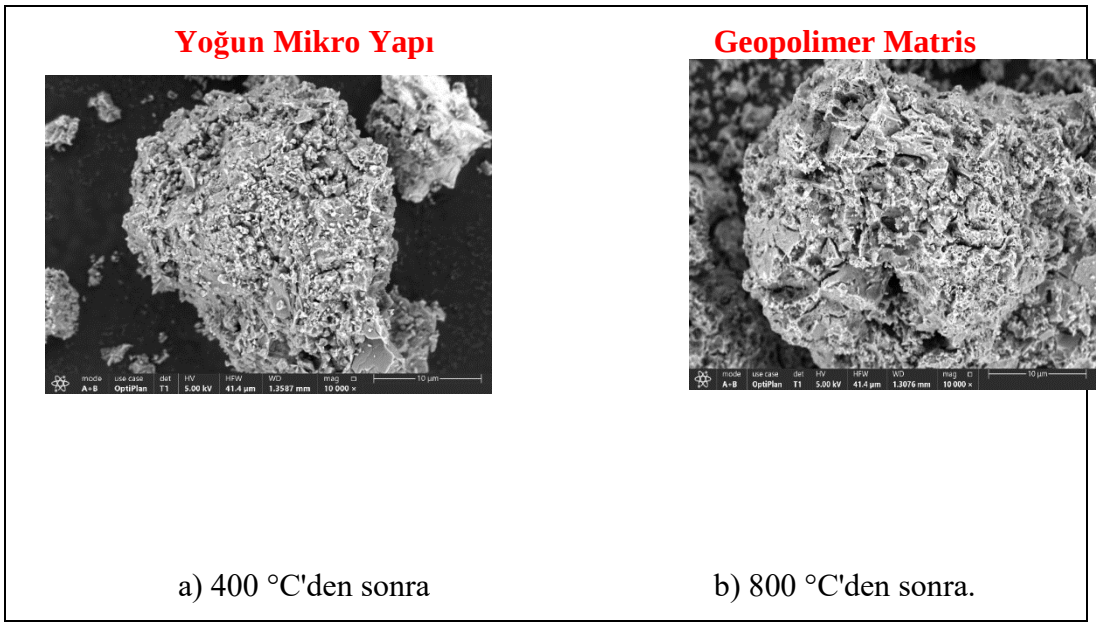
GH'nin mikro yapılarını anlamak için SEM, XRD analizi ve FTIR spektrum analizleri gerçekleştirilmiştir.

4.3.5.1 SEM Analizi

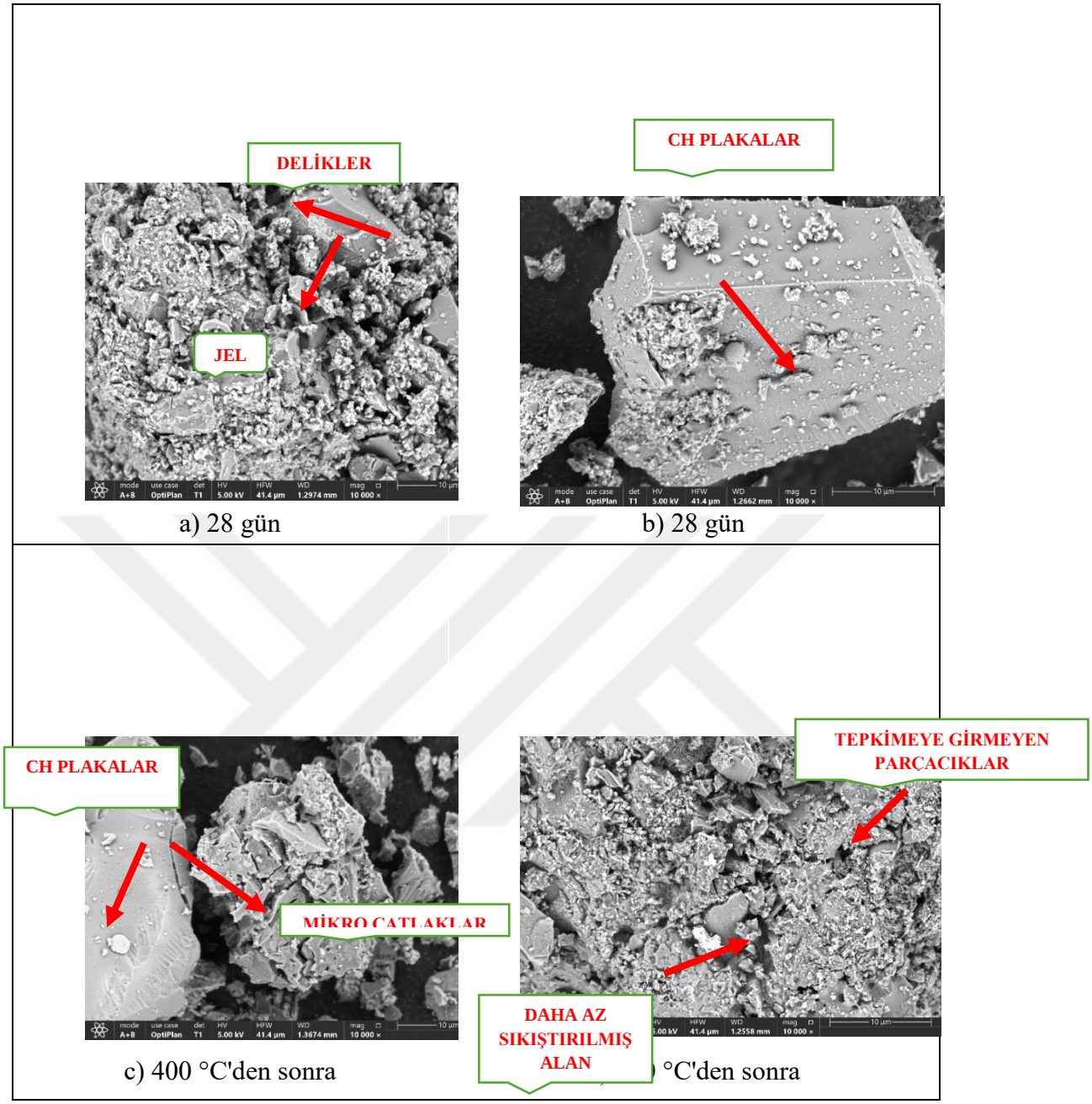
Şekil 4.12 ve Şekil 4.13, taramalı elektron mikroskobu (SEM) yoluyla gerçekleştirilen ayrıntılı bir mikro yapı analizinin sonuçlarını görsel olarak sunmaktadır. GH'leri GYFC ve CT kombinasyonuyla sentezlerken, CT bileşenlerinin etkisine ilişkin önemli bir sonuç ortaya çıkmıştır. Düşük CaO ve yüksek Al_2O_3 içeriğine sahip olanlar NASH fazının oluşturulmasında etkili olurken, yüksek CaO ve düşük Al_2O_3 içeriğine sahip GYFC bileşenleri C-(A)-SH fazının geliştirilmesiyle bağlantılıdır. Mevcut literatüre göre, artan CT içeriğinin jel formülasyonunu olumsuz yönde etkileyerek, kısmen bağlı jeller ve inert dolgu maddeleri olarak işlev gören kuvars gibi reaktif olmayan parçacıklar oluşturduğu [47] düşünülmüştür. [48] Buna karşılık, karışımların yüksek Si, Na/K ve Al seviyeleri, geopolimerizasyonda birincil reaksiyon yan ürünü olarak N/KASH jellerinin baskın oluşumunu göstermiştir [49] . CaO bakımından zengin mermerin geopolimerizasyon sürecine dahil edilmesi, alkali ortamda kısmi çözünme ile birleştiğinde CSH jelinin üretilmesiyle sonuçlanmıştır. Geri dönüşüm agregası ve MT'nin agrega olarak birleştirilmesi, altıgen şekilli $Ca(OH)_2$-CH plakalarını ortaya çıkardı. Farklı formülasyonlarda bu çeşitli fazların eşzamanlı varlığı, matris içindeki tüm farklı parçacıkları toplayabilen sağlam bir bağlayıcının oluşumunu kolaylaştırdı. Sonuç olarak, ortaya çıkan malzemeyi gösteren mikrograflar, yüksek homojenlik, yoğunluk ve kompaktlık seviyelerini sergilemiştir. Ayrıca, CT'deki artan amorf SiO_2

oranı, geopolimerizasyonda , bağlanma özelliklerinin güçlendirilmesinde ve ek C-N-A-S-H jellerinin oluşturulmasında, daha yoğun ve daha homojen bir yapı sağlanmasında çok önemli bir rol oynamıştır [50] .

Numune 400°C'ye maruz bırakıldığında çatlak genişliğinde bir genişleme belirginleşti, ancak matriste reaksiyona girmemiş GYFC ve CT parçacıkları kalmamıştır. Bunun yerine parçacık reaksiyonlarından kaynaklanan delikler öne çıkmaktadır. Bu olay, geopolimer matrisi ile agrega arasındaki termal gerilimler nedeniyle gerçekleşmiştir. Bu gerilimler arayüzeyde gerilime neden olmuştur; bu, mikro çatlakların oluşumunda ve yüksek sıcaklıklar altında harç mukavemetinde müteakip düşüşte tanımlanan önemli bir faktördür. 800°C'de, reaksiyona girmemiş parçacıkların olmamasına rağmen, mikro çatlakların ve gözeneklerin hem miktarında hem de genişliğinde önemli bir artış gözlemlendi ve bu da yapısal bozulmaya yol açmıştır. Bu sıcaklıkta matriks içerisinde taze reaksiyon ürünü oluşmamasına rağmen geopolimer matriks ayrışması meydana gelmiştir. Kısmen reaksiyona girmiş CT parçacıklarının mevcudiyetinin azalması ve mikro yapıdaki görünür çatlaklar belirgin hale gelmiştir. Gözlenen bu etkiler, GH'lerin matrisleri içerisine yüksek sıcaklık ve sıkıştırma uygulanmasından kaynaklanmaktadır. Bu olgunun temel nedeni, önceki çalışmalarda vurgulandığı gibi, jeopolimerizasyon süreci üzerindeki zararlı etkileriyle bilinen yüksek Na/K/Si ve Na/K/Al oranlarına kadar izlenebilmektedir.



Şekil 4.12 GDA50MT50'nin SEM görüntüleri



Şekil 4.13 GDA50CT50'nin SEM görüntüleri

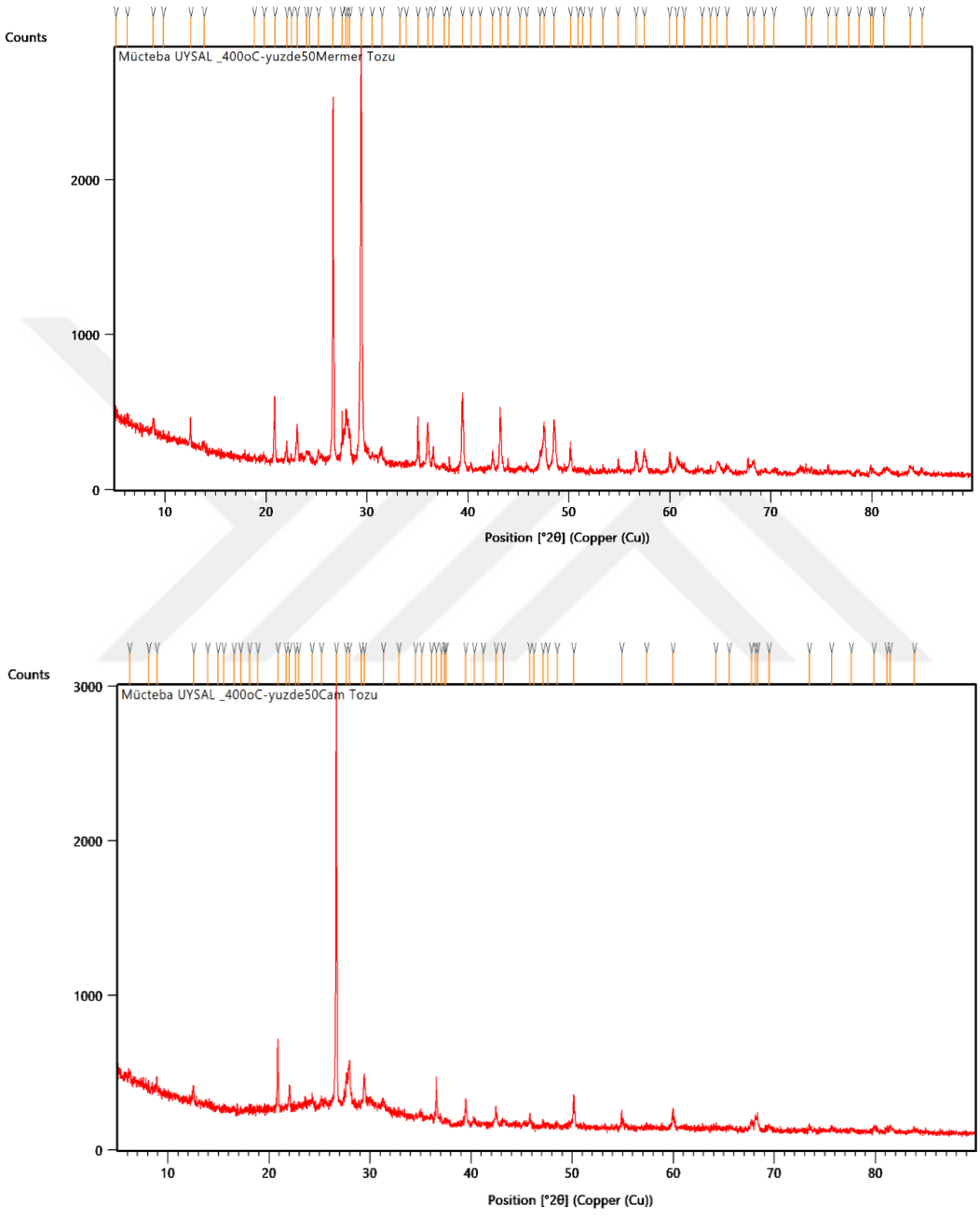
4.3.5.2 XRD Analizi

Yüksek sıcaklıklardan sonra harçtaki değişiklikleri anlamak için kullanılabilir. GDA50MT50 ve GDA50CT50 serisinin 400°C ve 800°C'ye maruz kaldıktan sonraki XRD desenleri Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'te verilmektedir. Atık seramikler ve diğer dolgu malzemelerinden kaynaklanan yüksek kristalli silika nedeniyle tüm serilerde kuvars pikleri tespit edilmiştir[37]. GDA'dan kaynaklanan kalsit pikleri de tespit edilmiştir. GH'lerde kumun yerine GDA'lar sunulduğunda, XRD modellerinde

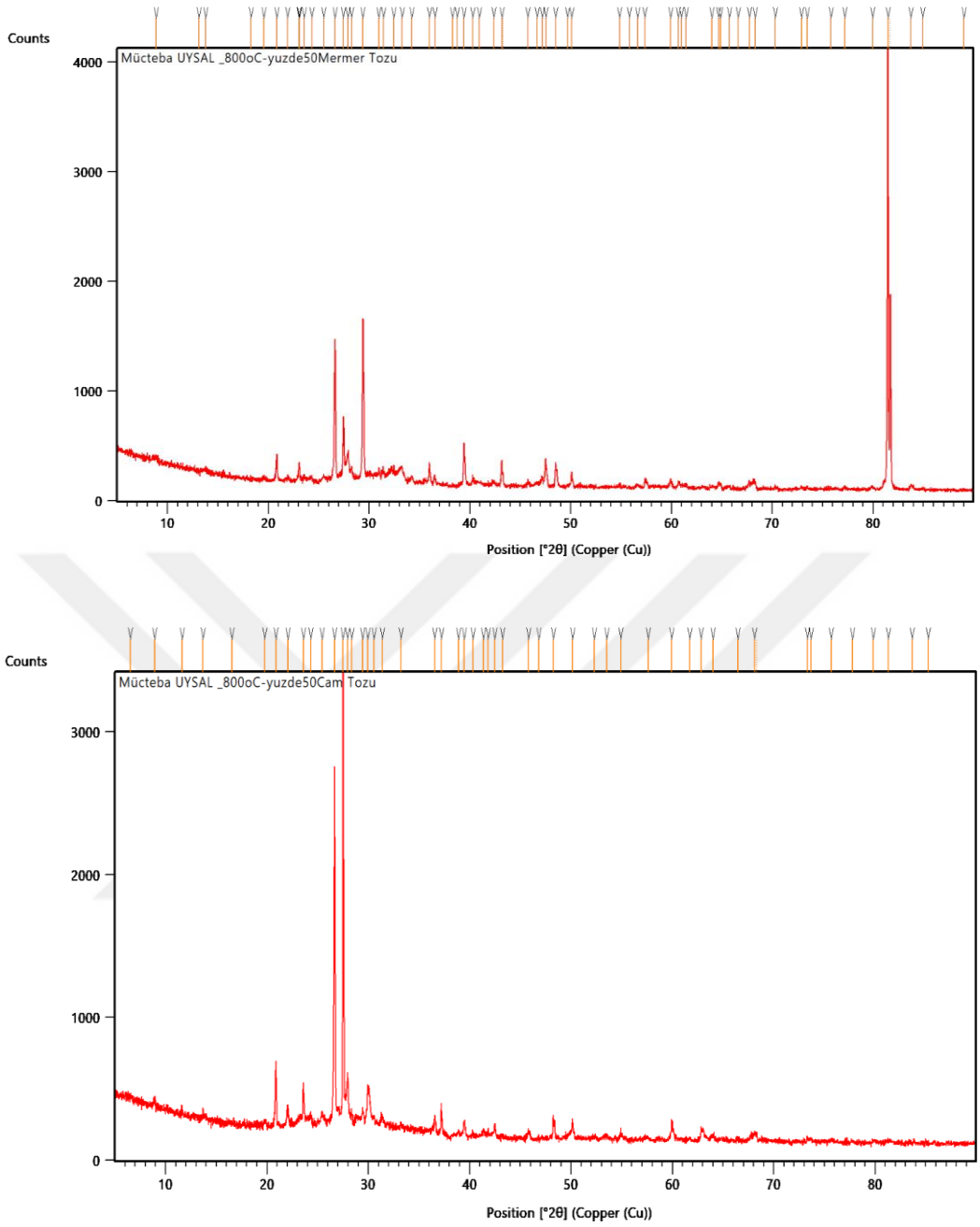
kalsit piklerinin ortaya çıkışı incelikli ve kapsamlı bir analiz gerektirir. Çoğunlukla beton kalıntılarından elde edilen GDA'ların dahil edilmesi, agrega matrisi içerisinde kalsiyum içeren minerallerin potansiyel varlığını ortaya çıkarır. Bu olgu, kalsit minerallerinin kalıcılığına yol açan kalkerli beton kalıntıları içerebilen GDA'nın kendine özgü doğasına atfedilebilir. Ayrıca, GDA'lardaki kalsiyum taşıyan mineraller ile GH'lerde kullanılan alkali çözelti arasındaki etkileşim, karmaşık kimyasal reaksiyonları başlatabilir. Bu reaksiyonlar, GH'ler içinde kalsit fazları oluşturarak GDA'lardan kalsiyum bileşenlerinin çözünmesini içerebilir. Çözeltinin alkalinitesi ve geri dönüştürülmüş agreganın bileşimi gibi bu reaksiyonların meydana geldiği kesin koşullar, kalsit pik oluşumlarının kapsamını ve yoğunluğunu önemli ölçüde etkiler. Bu karmaşık etkileşim, GDA'ları standart bir kum ikamesi olarak içeren GH'lerde gözlenen kalsit zirvelerine katkıda bulunan mekanizmaları ve faktörleri ortaya çıkarmak için ayrıntılı mineralojik analizler ve daha ileri laboratuvar araştırmaları dahil olmak üzere titiz bir deneysel tasarımın gerekliliğinin altını çizmek gerekiyor.

400 °C'den sonra 20°–30° aralığında 2θ aralığında kuvars pikleri oluşmuştur. 800 °C'den sonra en yüksek kuvars zirvesi GDA50MT50 serisinde 80° C 2θ'da gerçekleşmiştir. GDA50CT50 serisinde, 800 °C'ye maruz kaldıktan sonra, yüksek sıcaklıklara karşı inert olduğunu gösteren 27°'deki daha önce var olan pik korunmuş ve 28°'de yeni bir pik oluşmuştur [43] . Daha yüksek sıcaklıklarda, yeni kuvars piklerinin ortaya çıkışı, özellikle 400°C'de ısıl işlemlerden sonra CT içeren GH'lerin XRD modellerinde fark edilir. Düşük sıcaklıklarda başlangıçta farklı kuvars tepe noktalarının yokluğu, potansiyel olarak yeni kristal yapıların çözünmesi veya oluşması nedeniyle amorf fazların varlığını veya kuvarsın başka bir faza dönüştüğünü gösterebilir. Sıcaklık arttıkça, amorf fazların kristalleşmesi veya kuvarsın faz geçişi daha belirgin hale gelir ve bu da XRD spektrumunda yeni ve fark edilebilir kuvars tepe noktalarının ortaya çıkmasına yol açar. Çeşitli oksitlerin ve potansiyel olarak amorf fazların karmaşık bir karışımı olan GP, yüksek sıcaklıklarda kristalleşme süreçlerine veya faz geçişlerine maruz kalabilir ve bu da gözlemlenen olguya katkıda bulunacaktır. Bu dönüşümlerin kesin doğası, ister amorf içeriğin yeniden kristalleşmesini isterse yeni kristal fazların evrimini içersin, kapsamlı bir anlayış için daha ayrıntılı analiz ve deneyleri gerektirir. Sıcaklığa bağlı dönüşümlerin küçük farklar altındaki etkileşimi, GH'lerdeki XRD desenlerinin

karmaşık halini açıklamaktadır ve özellikle CT eklenmiş matrislerde gözlemlenen ayırt edici davranışı vurguluyor. Karışım tasarımı, alüminosilikat kaynak tipi, dolgu tipi, alkali aktivatör tipi, reaksiyona girmemiş alümina veya silika ve diğer reaksiyona girmemiş safsızlıklar, farklı pik türlerinden etkilenmiştir [35,51].



Şekil 4.14 GDA50MT50 (a) ve GDA50CT50 (b)'nin 400 °C'den sonraki XRD desenleri

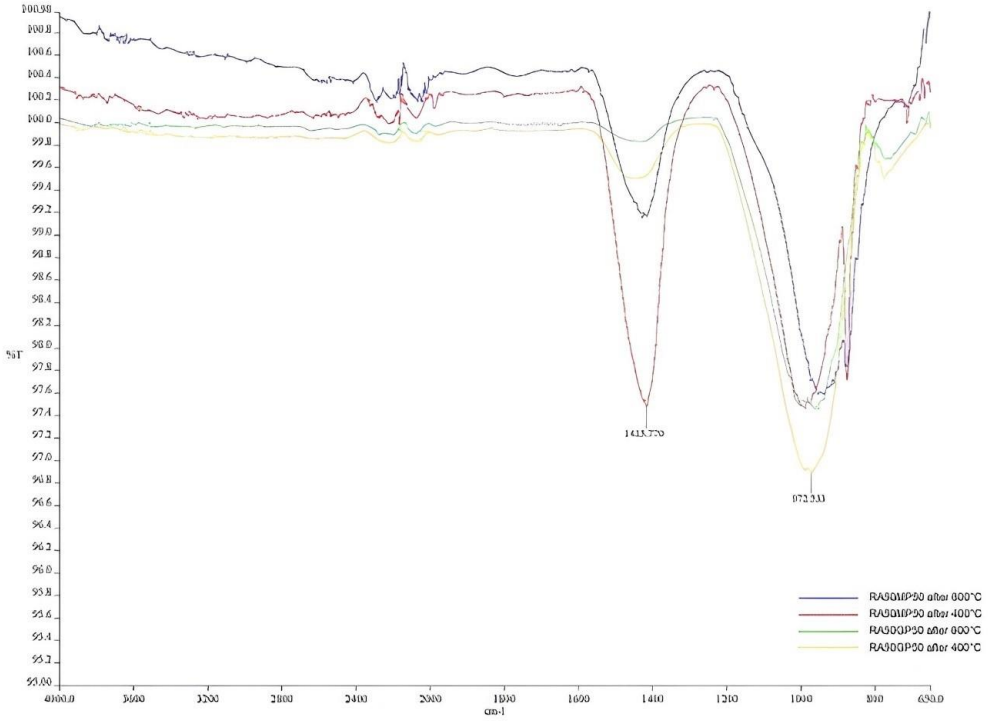


Şekil 4.15 GDA50MT50 (a) ve GDA50CT50 (b)'nin 800 °C'den sonraki XRD desenleri

4.3.5.3 FT-IR Analizi

Şekil 4.16'da GH'lerin FT-IR spektrumları, moleküler titreşimleri ve kimyasal yapılarının incelemesini sağlar. Yaklaşık 650 cm^{-1} seviyesindeki belirgin titreşim, 4-koordineli bir AIO_2'nin varlığını belirtmektedir ve alüminyum atomları açısından zengin bir geopolimerik jel iskeletinin gelişimini göstermiştir. Si-O'nun 700 cm^{-1}

'deki simetrik gerilme titreşimleri ve AIO_2 grubunun 800 cm^{-1} 'deki gerilme/eğilme titreşim modları karmaşık moleküler profile katkıda bulunur. 900 ila 972 cm^{-1} aralığı içindeki dikkate değer bir bant, alüminosilikat jellerin imzası olarak öne çıkan Si-OT'nin eğilme titreşimini karakterize eder. Bu bandın yoğunluğu, malzemenin amorf doğasını ve Si ve AI dörtyüzlünün kısa menzilli düzenini yansıtır; reaksiyon ürünlerindeki alüminyum içeriğinin artmasıyla bağlantılı olarak 972 cm^{-1} 'den 900 cm^{-1} 'e bir düşüş olur. Ayrıca, öncü malzemelerdeki (kuvars ve mullit) bağlara bağlı olan 650 cm^{-1} ile 800 cm^{-1} arasındaki ince bantlar spektrumu [52] zenginleştirir. [53] Karbonat gruplarındaki O–C–O bağının simetrik gerilme modunu yansıtan 1200-1600 cm^{-1} aralığındaki bant, CO_2'nin geopolimerizasyon sürecine olası katılımına işaret etmektedir. Ek olarak, yaklaşık 1700 cm^{-1} ve 3650 cm^{-1} 'deki bantlar sırasıyla H–O–H ve O–H'nin eğilme ve esneme titreşimlerine karşılık gelir. Bu bantlar malzemedeki ve N/KASH jelindeki su moleküllerini belirtir ve geopolimer hidrasyon bağlarının ayırt edici karakterine katkıda bulunacaktır. Ayrıca, yüksek sıcaklık koşulları altında GH'lerin FT-IR analizi, termal reaksiyonlara, bağ dönüşümlerine, kristalleşmeye, faz geçişlerine, bozunmaya, dehidrasyona ve moleküler grupların metamorfozuna bağlı dinamik değişimleri ortaya çıkararak bu karmaşık malzemelere dair anlayışımıza derinlik katmaktadır.



Şekil 4.16 GH'lerin FTIR spektrumlar

5
SONUÇ

Bu çalışma, bağlayıcı olarak CT ve GYFC'nin yanı sıra geri dönüştürülmüş agrega yerine MT ve CT kullanan GH'leri keşfetmenin fiziksel, mekanik ve mikroyapısal yönlerini araştırdı. Deneysel sonuçların analizinden aşağıdaki önemli sonuçlar ortaya çıkmıştır:

- ✓ **Boşluk Doldurma İyileştirmesi:** Geri dönüştürülmüş agrega yerine mermer tozu ve cam tozunun kullanılması, geopolimer harçların boşluk doldurma özelliklerini etkili bir şekilde iyileştirdi. Bu, su emiliminde %4,8 ila %44,4 arasında değişen önemli bir azalmayla kanıtlanmaktadır.
- ✓ **Dayanım Performansı:** Geopolimer harçlarda cam tozu mermer tozuna göre üstün bulunmuştur.
- ✓ **Optimum Mekanik Performans:** Basınç dayanımında %45,4'e ulaşan en dikkate değer gelişme, %50 geri dönüştürülmüş agreganın optimum mekanik performans sergileyen cam tozuyla değiştirilmesiyle elde edilmiştir.
- ✓ **Yüksek Sıcaklık Etkisi:** Cam tozunun eklenmesi, geopolimer harçların yüksek sıcaklık performansını arttırmıştır.
- ✓ **Aktivatör-Bağlayıcı Etkisi:** Deneysel sonuçlar, seramik tozu bazlı geopolimer harçların potasyum hidroksit ve potasyum silikat ile aktive edilmesinin, mekanik özellikleri ve dayanıklılığı önemli ölçüde arttıran etkinliğini vurgulamaktadır.

Bu bulgular toplu olarak, mermer ve cam tozlarının geopolimer harç formülasyonlarında alternatif malzemeler olarak önemli potansiyelini ortaya koymaktadır; cam tozu özellikle çeşitli yönlerden üstün performansıyla öne çıkmaktadır.

KAYNAKÇA

[1] The Freedonia Group, Inc., 2009, http://www.worldcement.com/europe-cis/27082015/Globaldemand-cement-billion-tons-449/

[2] Vieira, J.P.B. and Correia, J.R. and Brito, J. de Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled concrete coarse aggregates, Cem. Concr. Res. 41 (2011) 533–541, Doi:10.1016/J.CEMCONRES.2011.02.002

[3] Meng, E. and Yu, Y. and Yuan, J. Qiao, K. and Su, Y. Triaxial compressive strength experiment study of recycled aggregate concrete after high temperatures, Constr. Build. Mater. 155 (2017) 542–549, Doi:10.1016/j.conbuildmat. 2017.08.101.

[4] F. Şahin, "Farkli Tür Agregalarda Üretilen Metakaolin Tabanlı Geopolimer Harçların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi" Doktora Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi, 2020.

[5] M. S. Imbabi, C. Carrigan ve S. McKenna, «Trends and developments in green cement and concrete technology,» International Journal of Sustainable Built Environment, cilt 1, no. 2, pp. 194-216.

[6] G. F. Huseien, K. W. Shah ve A. R. M. Sam, «Sustainability of nanomaterials based self-healing concrete: An all-inclusive insight,» Journal of Building Engineering, cilt 23, pp. 155-171, 2019.

[7] G. F. Huseien, A. R. M. Sam, K. W. Shah, M. A. Asaad, M. M. Tahir ve J. Mirza, «Properties of ceramic tile waste based alkali-activated mortars incorporating GBFS and fly ash,» Construction and Building Materials, cilt 214, pp. 355-368, 2019.

[8] Z. Bayer Öztürk ve İ. İ. Atabey, «Mechanical and microstructural characteristics of geopolymer mortars at high temperatures produced with ceramic sanitaryware waste,» Ceramics International, cilt 48, no. 9, pp. 12932-12944, 2022.

[9] A. M. Rashad ve G. M. Essa, «Effect of ceramic waste powder on alkali-activated slag pastes cured in hot weather after exposure to elevated temperature,» Cement and Concrete Composites, cilt 111, p. 103617, 2020.

[10] R. Zhao ve J. G. Sanjayan, «Geopolymer and Portland cement concretes in simulated fire,» Magazine of Concrete Research, cilt 63, no. 3, pp. 163-173, 2011.

[11] T. Luukkonen, Z. Abdollahnejad, J. Yliniemi, P. Kinnunen ve M. Illikainen, «One-part alkali-activated materials: A review,» Cement and Concrete Research, cilt 103, pp. 21-34, 2018.

[12] K. Nazir, O. Canpolat ve M. Uysal, «Durability properties of steel, polyamide, and polyethylene fiber-reinforced geopolymer mortar made with recycled concrete aggregate and glass powder as fillers,» Journal of Building Engineering, cilt 76, p. 107313, 2023.

[13] K. Nazir, O. Canpolat, M. Uysal, A. Niş ve Ö. F. Kuranlı, «Engineering properties of different fiber-reinforced metakaolin-red mud based geopolymer mortars,» Construction and Building Materials, cilt 385, p. 131496, 2023.

[14] Kazmi, D., Williams, D. J., ve Serati, M. (2020). Waste glass in civil engineering applications—A review. International Journal of Applied Ceramic Technology, 17(2), 529-554.

[15] F. Erol, "Farkli Molariteli Ve Atik Seramik Tozlu Alkali İle Aktive Edilmiş Harçlarin Mekanik ve Durabilite Özellikleri" Doktora Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi, 2023.

[16] A. Hosan, S. Haque ve F. Shaikh, «Compressive behaviour of sodium and potassium activators synthetized fly ash geopolymer at elevated temperatures: A comparative study,» Journal of Building Engineering, cilt 8, pp. 123-130, 2016.

[17] K. Bakthavatchalam ve M. Rajendran, «An experimental investigation on potassium activator based geopolymer concrete incorporated with hybrid fibers,» Materials Today: Proceedings, cilt 46, pp. 8494-8501, 2021.

[18] T. d. S. Rocha, D. P. Dias, F. C. C. França, R. Rangel, S. Guerra ve L. R. d. C. d. O. Marques, «Metakaolin-based geopolymer mortars with different alkaline activators (Na+ and K+),» Construction and Building Materials, cilt 178, pp. 453- 461, 2018.

[19] Aygörmez, Y., "Kolemanit Atığı ve Silis Dumanı Katkılı Metakaolin Tabanlı Geopolimer Harcın Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi", Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2018).

[20] Y. Kim, A. Hanif, M. Usman ve W. Park, «Influence of bonded mortar of recycled concrete aggregates on interfacial characteristics – Porosity assessment based on pore segmentation from backscattered electron image analysis,» Construction and Building Materials, cilt 212, pp. 149-163, 2019.

[21] Ö. F. Kuranlı, M. Uysal ve O. Canpolat, «Mechanical and durability properties of slag/fly ash based alkali-activated concrete reinforced with steel, polypropylene and polyamide fibers,» European Journal of Environmental and Civil Engineering, cilt 26, no. 16, pp. 8390-8413, 2022.

[22] P. Shoaei, H. R. Musaeei, F. Mirlohi, S. Narimani zamanabadi, F. Ameri ve N. Bahrami, «Waste ceramic powder-based geopolymer mortars: Effect of curing temperature and alkaline solution-to-binder ratio,» Construction and Building Materials, cilt 227, p. 116686, 2019.

[23] F. Erol, "Farkli Molariteli Ve Atik Seramik Tozlu Alkali İle Aktive Edilmiş Harçlarin Mekanik ve Durabilite Özellikleri" Doktora Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi, 2023

[24] Kavas, T., Çelik, M. Y., ve Evcin, A. (2004). "Cam atıklarının çimento üretiminde katkı maddesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması", 5. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 13-14.

[25] Si, R., Dai, Q., Guo, S., ve Wang, J. (2020). Mechanical property, nanopore structure and drying shrinkage of metakaolin-based geopolymer with waste glass powder. Journal of Cleaner Production, 242, 118502.

[26] Al-Obeidy, N. F., ve Khalil, W. I. (2016). Properties Of High Strength Eco-Friendly Concrete With Glass Waste Powder. Doi:10.5281/ZENODO.161679

[27] Kazmi, D., Williams, D. J., ve Serati, M. (2020). Waste glass in civil engineering applications—A review. International Journal of Applied Ceramic Technology, 17(2), 529-554.

[28] Abdallah, S., ve Fan, M. (2014). Characteristics of concrete with waste glass as fine aggregate replacement. International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR), 2(6), 11-17.

[29] A. Kabirova, M. Uysal, M. Hüsem, Y. Aygörmez, H. Dehghanpour, S. Pul ve O. Canpolat, «Physical and mechanical properties of metakaolin-based geopolymer mortars containing various waste powders,» European Journal of Environmental and Civil Engineering, cilt 27, no. 1, pp. 437-456, 2022.

[30] A. Hosan, S. Haque ve F. Shaikh, «Compressive behaviour of sodium and potassium activators synthetized fly ash geopolymer at elevated temperatures: A comparative study,» Journal of Building Engineering, cilt 8, pp. 123-130, 2016.

[31] P. Azarsa ve R. Gupta, «Durability and leach-ability evaluation of K-based geopolymer concrete in real environmental conditions,» Case Studies in Construction Materials, cilt 13, p. e00366, 2020.

[32] ASTM C67-07, «Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile,» ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2007.

[33] American Society for Testing and Materials, «ASTM C1585-13 Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes, American Society for Testing and Materials,» 2013.

[34] ASTM Int., «Standard test method for pulse velocity through concrete,» ASTM C597-16, 2016.

[35] ASTM International, «ASTM C109/C109M Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. Or [50-mm] Cube Specimens),» West Conshohocken, PA, 2002.

[36] ASTM International, «ASTM C 348. Standard test method for flexural strength of hydraulic-cement mortars,» West Conshohocken, PA, 2008.

[37] M. Uysal, Y.Aygörmez, O. Canpolat, T. Cosgun ve Ö. F. Kuranlı, «Investigation of using waste marble powder, brick powder, ceramic powder, glass powder, and rice husk ash as eco-friendly aggregate in sustainable red mud-metakaolin based geopolymer composites,» Construction and Building Materials, cilt 361, p. 129718, 2022.

[38] M. Aamer Rafique Bhutta, N. Hasanah, N. Farhayu, M. Warid Hussin, M. bin Md Tahir ve J. Mirza, «Properties of porous concrete from waste crushed concrete (recycled aggregate),» Construction and Building Materials, cilt 47, pp. 1243-1248, 2013.

[39] M. Uysal, M. M. Al-mashhadani, Y. Aygörmez ve O. Canpolat, «Effect of using colemanite waste and silica fume as partial replacement on the performance of metakaolin-based geopolymer mortars,» Construction and Building Materials, cilt 176, pp. 271-282, 2018.

[40] P. Manikandan ve V. Vasugi, «A Critical Review of Waste Glass Powder as an Aluminosilicate Source Material for Sustainable Geopolymer Concrete Production,» Silicon, cilt 13, p. 3649–3663, 2021.

[41] P. Arjun Raj, D. Sarath, P. Nagarajan ve A. Shashikala, «Behaviour of geopolymer concrete at elevated temperature- a comprehensive review,» Materials Today: Proceedings, 2023.

[42] Y. Aygörmez, O. Canpolat, M. M. Al-mashhadani ve M. Uysal, «Elevated temperature, freezing-thawing and wetting-drying effects on polypropylene fiber reinforced metakaolin based geopolymer composites,» Construction and Building Materials, cilt 235, p. 117502, 2020.

[43] X. Jiang, R. Xiao, Y. Ma, M. Zhang, Y. Bai ve B. Huang, «Influence of waste glass powder on the physico-mechanical properties and microstructures of fly ash-based geopolymer paste after exposure to high temperatures,» Construction and Building Materials, cilt 262, p. 120579, 2020.

[44] J.-X. Lu ve C. S. Poon, «Use of waste glass in alkali activated cement mortar,» Construction and Building Materials, cilt 160, pp. 399-407, 2018.

[45] G. Liang, W. Yao ve Y. Wei, «A green ultra-high performance geopolymer concrete containing recycled fine aggregate: Mechanical properties, freeze-thaw resistance and microstructure,» *Science of The Total Environment*, cilt 895, p. 165090, 2023.

[46] H. Liu, M. Hua, P. Zhu, C. Chen, X. Wang, Z. Qian ve Y. Dong, «Effect of Freeze–Thaw Cycles on Carbonation Behavior of Three Generations of Repeatedly Recycled Aggregate Concrete,» Applied Sciences, cilt 11, no. 6, p. 2643, 2021.

[47] G. F. Huseien, A. R. M. Sam, K. W. Shah ve J. Mirza, «Effects of ceramic tile powder waste on properties of self-compacted alkali-activated concrete,» Construction and Building Materials, cilt 236, p. 117574, 2020.

[48] G. F. Huseien, M. Ismail, M. Tahir, J. Mirza, A. a. K. Hussein, H. Nur ve N. N. Sarbini, «Effect of Binder to Fine Aggregate Content on Performance of Sustainable Alkali Activated Mortars Incorporating Solid Waste Materials,» cilt 63, pp. 667-672, 2018.

[49] O. Mahmoodi, H. Siad, M. Lachemi, S. Dadsetan ve M. Sahmaran, «Development of ceramic tile waste geopolymer binders based on pre-targeted chemical ratios and ambient curing,» Construction and Building Materials, cilt 258, p. 120297, 2020.

[50] A. Siddika, A. Hajimohammadi, M. A. A. Mamun, R. Alyousef ve W. Ferdous, «Waste Glass in Cement and Geopolymer Concretes: A Review on Durability and Challenges,» Polymers, cilt 13, no. 13, p. 2071, 2021.

[51] F. Sahin, M. Uysal, O. Canpolat, T. Cosgun ve H. Dehghanpour, «The effect of polyvinyl fibers on metakaolin-based geopolymer mortars with different aggregate filling,» Construction and Building Materials, cilt 300, p. 124257, 2021.

[52] A. Fernández-Jiménez ve A. Palomo, «Mid-infrared spectroscopic studies of alkali-activated fly ash structure,» Microporous and Mesoporous Materials, cilt 86, no. 1, pp. 207-214, 2005.

[53] A. Fernández-Jiménez, A. Palomo, J. Y. Pastor ve A. Martín, «New Cementitious Materials Based on Alkali-Activated Fly Ash: Performance at High Temperatures,» Journal of the American Ceramic Society, cilt 91, no. 10, pp. 3308-3314, 2008.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Makaleler

1. İ. Kotancı, M. Uysal, M. Balaban, F. Bendjilali, B. F. Aygun "Innovating with potassium-modified ceramic powder geopolymer mortar and the integration of recycled aggregates"Journal of Building Engineering Volume 92, 1 September 2024, 109751

Bildiri

1. İ. Kotancı, M. Uysal, T. Bilir, T. Çoşgun, B. F. Aygun "Low Molarity Geopolymer Composites: Can Alternative Electrical Curring Influence and Enhance Key Hardening Properties?" International PhD Symposium in Civil Engineering, Budapest, Hungary,28-30 August 2024 pp. 1-8