T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

FARKLI TÜR ATIK MALZEMELER KULLANILARAK ÜRETİLEN GEOPOLİMER HARÇLARIN MEKANİK ve KALICILIK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Tansel TONYALI

DANIŞMAN
Doç. Dr. Turgay ÇOŞGUN

II. DANIŞMAN
Doç. Dr. Orhan CANPOLAT

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

İSTANBUL-2021

Bu çalışma, 9.07.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İnşaat Mühendisliği Programında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Doç. Dr. Turgay ÇOŞGUN(Danışman)
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. Mücteba UYSAL
Yıldız Teknik Üniversitesi
İnşaat Fakültesi

Prof. Dr. Mehmet Fatih ALTAN
İstanbul Aydın Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Doç. Dr. Savaş ERDEM
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Doç. Dr. Barış SAYIN
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa'nın abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

ÖNSÖZ

Doktora sürecim boyunca desteğini esirgemeyen ve sorunlarımı kendi sorunu gibi benimseyerek çözüm arayan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Turgay ÇOŞGUN'a sonsuz teşekkürlerimi bildiririm. Tezimin deney aşamalarında bana rehberlik eden, teknik ve psikolojik desteğiyle çalışmalarımın ürüne dönüşmesini mümkün kılan Prof. Dr. Mücteba UYSAL'a teşekkürü borç bilirim. Yardımına ihtiyaç duyduğum her an, tüm açık yürekliliğiyle bilgi ve birikimini benimle paylaşan Sayın Prof. Dr. M. Fatih ALTAN'a şükranlarımı sunarım.

Sevgili eşim Müzeyyen TONYALI'ya ve çocuklarıma bu süreçte gösterdiği sonsuz sabrı, sevgisi ve bana kattığı tüm değerler için sevgilerimi sunarım.

Temmuz 2021 Tansel TONYALI

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ ..... **iv**
İÇİNDEKİLER ..... **v**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **viii**
TABLO LİSTESİ ..... **x**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xi**
ÖZET ..... **xii**
SUMMARY ..... **xiii**
1. GİRİŞ **1**
2. GENEL KISIMLAR **3**
2.1 GEOPOLİMER BETONUN YAPISI 3
2.1.1 Bağlayıcı Malzemeler 4
2.1.1.1 Metakaolin *4*
2.1.1.2 Yüksek Fırın Cürufu *7*
2.1.2 Endüstriyel Atıklar 8
2.1.2.1 Tuğla Tozu *8*
2.1.2.2 Mermer Tozu *11*
2.1.2.3 Seramik Tozu *13*
2.1.2.4 Cam Tozu *14*
2.1.2.5 Odun Külü *16*
2.1.3 Alkali Aktivatörler 17
Sodyum Hidroksit *18*
2.1.3.1 Sodyum Silikat *19*
2.2 GEOPOLİMER BETONUN ÖZELLİKLERİ 20
2.3 GEOPOLİMER BETONUN UYGULAMA ALANLARI 23
2.4 GELENEKSEL BETONUN YAPISI VE ÖZELLİKLERİ 24
2.5 GEOPOLİMER BETON VE GELENEKSEL BETONUN KARŞILAŞTIRILMASI 24
3 MALZEME VE YÖNTEM **27**
3.1 GİRİŞ 27
3.2 MALZEMELER 27

İÇİNDEKİLER

3.2.1 Metakaolin (MK) 27
3.2.2 Seramik Tozu (ST) 28
3.2.3 Cam Tozu (CT) 29
3.2.4 Tuğla Tozu (TT) 30
3.2.5 Odun Külü (OK) 30
3.2.6 Mermer Tozu (MT) 31
3.2.7 Zeolit Tozu (ZT) 32
3.2.8. Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu 33
3.2.9 Kimyasal Aktivatörler 34
3.2.10 Lifler 35
3.2.10.1 Polipropilen Lif (PP) *35*
3.2.10.2 Polivinil Alkol Lif (PVA) *36*
3.2.10.3 Bazalt Lif *36*
3.2.10.4 Cam Lif *37*
3.3 DENEYSEL ÇALIŞMALAR 37
3.3.1 Basınç Dayanımı Testi 37
3.3.2 Eğilme Dayanımı Testi 39
3.3.3 Ultrases Geçiş Hızı Testi 41
3.3.4 Birim Hacim Ağırlık, Boşluk Oranı ve Su Emme Deneyleri 42
3.3.5 Aşınma Dayanımı Testi 45
3.3.6 Yüksek Sıcaklık Dayanımı Testi 45
3.3.7 Donma Çözülme Dayanımı Testi 46
3.3.8 Sülfat Etkisi Deneyi 49
4 BULGULAR 51
4.1 BİRİM HACİM AĞIRLIK SONUÇLARI 51
4.1 BASINÇ VE EĞİLME DAYANIMI SONUÇLARI 51
4.1.1 Basınç Dayanımı Sonuçları 51
4.2.2.Eğilme Dayanımı Sonuçları 52
4.2 ULTRASES GEÇİŞ HIZI SONUÇLARI 53
4.3 LİFLİ SERİLERE AİT SONUÇLAR 55
4.3.1 Basınç Dayanımı Sonuçları 55
4.3.2 Eğilme Dayanımı Sonuçları 56
4.3.3 Ultrases Geçiş Hızı Sonuçları 57
4.4 YARMADA ÇEKME DAYANIMI SONUÇLARI 58

4.5 YÜKSEK SICAKLIK DENEYİ SONUÇLARI 59

İÇİNDEKİLER

4.5.1 Basınç Dayanımı Sonuçları 59
4.5.2 Eğilme Dayanımı Sonuçları 61
4.5.3 Ultrases Geçiş Hızı Sonuçları 62
4.5.4 Ağırlık Kaybı Sonuçları 62
4.6 AŞINMA DAYANIMI SONUÇLARI 63
4.7 DONMA ÇÖZÜLME DENEYİ SONUÇLARI 64
4.8.2 Eğilme Dayanımı Sonuçları 64
4.8.3 Ultrases Geçiş Hızı Sonuçları 65
4.8 MAGNEZYUM SÜLFAT ETKİSİ DENEYİ 66
4.8.1 Eğilme Dayanımı Sonuçları 66
4.8.2 Ultrases Geçiş Hızı Sonuçları 66
5 TARTIŞMA VE SONUÇ 68
KAYNAKLAR 70
ÖZGEÇMİŞ 75

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1: Metakaolinin fiziksel görünümü. 4

Şekil 2 :Bir kaolinit tabakasının yapısı....5

Şekil 3:Metakaolinin SEM içyapı görüntüleri: a) 1000 kez ve b) 5000 kez büyütülmüş....27

Şekil 4: Metakaolinin SEM içyapı görüntüleri: a) 7000 kez ve b) 10000 kez büyütülmüş 28

Şekil 5: Sentezlenmiş seramik tozunun SEM görüntüleri 29

Şekil 6: Atık cam tozuna ait SEM görüntüsü. 30

Şekil 7:Elektron mikroskobu altında odun külü lifleri 31

Şekil 8: Elektron mikroskobu altında mermer tozunun SEM görüntüsü.....32

Şekil 9: Doğal zeolit tozuna ait SEM görüntüsü. 33

Şekil 10: Cürufun SEM içyapı görüntüleri: a) 1000 kez ve b) 5000 kez büyütülmüş.....34

Şekil 11: Cürufun SEM içyapı görüntüleri: a) 7000 kez ve b) 10000 kez büyütülmüş.....34

Şekil 12: Polipropilen lif.....36

Şekil 13: Bazalt lif örneği....37

Şekil 14: 50mmx50mmx50 mm küp numunelerde basınç dayanımı testi.....38

Şekil 15: 40mmx40mm numunelerde basınç dayanımı testi....39

Şekil 16: Basınç test cihazı ekranı....39

Şekil 17: Eğilme dayanımı testi....41

Şekil 18: Ultrases geçiş hızı test cihazı 42

Şekil 19: Ultrases geçiş hızı test cihazı seti....42

Şekil 20:Numunelerin su içinde bekletilmesi....44

Şekil 21: Arşimed deney seti....44

Şekil 22: Aşınma testi makinesi 45

Şekil 23: Yüksek sıcaklık fırını 46
Şekil 24: Yüksek sıcaklık fırınına konulan numuneler.....46
Şekil 25:Donma çözülme kabini.....47
Şekil 26: Havada donma çözülme 48
Şekil 27: Donma çözülme kabini çalışma ekranı.....48
Şekil 28: Sodyum sülfat çözeltisi 49
Şekil 29: Magnezyum sülfat çözeltisi.....50
Şekil 30: Sodyum ve magnezyum sülfat etkisi deneyi 50
Şekil 31: Birim ağırlık sonuçları 51
Şekil 32: 7 ve 28 günlük basınç dayanımı sonuçları 52
Şekil 33: 7 ve 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları.....53
Şekil 34: 7 ve 28 günlük ultrases geçiş hızı sonuçları 54
Şekil 35: Ultrases geçiş hızı ve 28 günlük basınç dayanımı korelasyonu. 54
Şekil 36: Lif takviyeli TT25 serisinin çeşitli liflere göre 7 ve 28 günlük basınç dayanımı sonuçları 56
Şekil 37: Lif takviyeli TT25 serisinin 7 ve 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları 57
Şekil 38: Lif takviyeli TT25 serisinin 7 ve 28 günlük ultrases geçiş hızı sonuçları.....58
Şekil 39: Yarmada çekme dayanmını sonuçları 59
Şekil 40: Yüksek sıcaklık testi sonrası basınç dayanımı değerleri 60
Şekil 41: Yüksek sıcaklık testi sonrası eğilme dayanımı sonuçları 61
Şekil 42: Yüksek sıcaklık sonrası ultrases geçiş hızı sonuçları 62
Şekil 43: Yüksek sıcaklık testi sonrası ağırlık kaybı sonuçları 63
Şekil 44: Aşınma dayanımı sonucu oluşan ağırlık kaybı sonuçları (%). 64
Şekil 45: Donma çözünme testi sonrası eğilme dayanımı sonuçları 64
Şekil 46: Donma çözünme testi sonrası numunelerin ultrases geçiş hızı sonuçları.....65
Şekil 47: Magnezyum sülfat testi sonrası eğilme dayanımı sonuçları.....66
Şekil 48: Mg-sülfat etkisi testi sonrası ultrases değerleri 67

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 1: Metakaolinin kimyasal özellikleri 27
Tablo 2: Seramik tozunun kimyasal özellikleri 28
Tablo 3: Cam tozunun kimyasal özellikleri 29
Tablo 4: Tuğla tozunun kimyasal özellikleri 30
Tablo 5: Odun külünün kimyasal özellikleri 31
Tablo 6: Mermer tozunun kimyasal özellikleri. ??? 32
Tablo 7: Zeolit tozunun kimyasal özellikleri 33
Tablo 8: Cürufun kimyasal özellikleri 34
Tablo 9: Sodyum hidroksitin kimyasal özellikleri 35
Tablo 10: Sodyum silikatın kimyasal özellikleri 35
Tablo 11: Polipropilen lifin özellikleri 35
Tablo 12: Yüksek sıcaklık etkisi nedeniyle oluşan basınç dayanımı kayıpları (%). 60
Tablo 13: Yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanımlarında oluşan kayıplar (%). 61

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Kısaltmalar	Açıklama
PP	: Polipropilen
PVA	: Polivinil Alkol
CT	: Cam tozu
MT	: Mermer Tozu
ST	: Seramik Tozu
ZT	: Zeolit Tozu
OT	: Odun Tozu
PÇ	: Portland Çimentosu
GB	:Geleneksel Beton
MTGK	:Metakaolin Tabanlı Geopolimer Kompozitler
CF	:Cam Fiber
ÖB	:Özel Betonlar
LK	:Lifli Kompozitler
AI_2O_3	:Alüminyum Oksit
C_2S	: Di kalsiyum silikat
C_3S	:Tri kalsiyum Silikat
C_3A	:Tri kalsiyum Alüminat
C_4AF	:Tetra Kalisyum Alümino Ferrit
CaO	: Kalsiyum Oksit
$Ca(OH)_2$	:Kalsiyum Hidroksit
$CaCO_3$	: Kalsiyum Karbonat
$CaSO_4$	:Kalsiyum Sülfat
CSH	: Kalsiyum Silikat Hidrat
CO_2	:Karbondioksit
SiO_2	: Silisyum Dioksit
$MgSO_4$	:Magnezyum Sülfat
$NaSO_4$	:Sodyum Sülfat

ÖZET

DOKTORA TEZİ

FARKLI TÜR ATIK MALZEMELER KULLANILARAK ÜRETİLEN GEOPOLİMER HARÇLARIN MEKANİK ve KALICILIK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Tansel TONYALI

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Turgay ÇOŞGUN

II. Danışman : Doç. Dr. Orhan CANPOLAT

Çimento üretiminden kaynaklı olarak açığa çıkan karbondioksit salınımından kaynaklı olarak iklim değişikliği, modern dünyanın gündeminin başında gelen konulardan birisidir. Çimento kullanmadan beton üretimine yönelik çalışmalar bu eksende değerlendirilip geleneksel çimento bağlayıcılı betonlara kıyasla hiç çimento kullanmadan üretilen geopolimer harçların/betonların kullanımı her geçen gün artmaktadır. Bu çalışmada endüstriyel atık malzemeler olarak tuğla tozu, seramik tozu, mermer tozu, cam tozu, odun külü ve zeolit agregayla ikame edilerek geopolimer harçlar üretilmiş ve bu harçların mekanik ve durabilite özellikleri incelenmiştir. Bu kapsamda, endüstriyel atık ikameli metakaolin tabanlı geopolimer harçlarda mekanik deneyler kapsamında basınç, eğilme, Ultrases Geçiş Hızı, Birim ağırlık deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu karışımlar içerisinde en yüksek basınç dayanımı veren seri için farklı liflerin etkisi basınç ve eğilme deneyleri ile belirlenmiştir. Daha sonra her endüstriyel atığın agrega ile yerdeğiştirmesiyle üretilen ve en yüksek basınç dayanımı veren serilerde durabilite deneyleri kapsamında 200 ºC, 400 ºC, 600 ºC ve 800 ºC'de yüksek sıcaklık deneyleri, donma-çözülme deneyi, aşınma deneyi ve sülfat etkisi deneyleri ile endüstriyel atık içeren metakaolin tabanlı geopolimer kompozitlerin performans özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır.

Temmuz 2021, 89 sayfa.

Anahtar kelimeler: Geopolimer harç, metakaolin, endüstriyel atık, basınç dayanımı, lif.

SUMMARY

Ph.D. THESIS

INVESTIGATION of THE MECHANICAL and DURABILITY PROPERTIES of GEOPOLYMER MORTARS PRODUCED USING DIFFERENT WASTE MATERIALS

Tansel TONYALI

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Turgay ÇOŞGUN

Co-Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Orhan CANPOLAT

Climate change is one of the most important issues on the agenda of the modern world, due to the carbon dioxide emissions resulting from cement production. Studies on the production of concrete without using cement are evaluated on this issue and the use of geopolymer mortars/concrete produced without using any cement is increasing day by day compared to conventional cement-binding concretes. In this study, geopolymer mortars were produced by replacing brick dust, ceramic dust, marble dust, glass dust, wood ash and zeolite aggregate as industrial waste materials, and the mechanical and durability properties of these mortars were investigated. In this context, compressive stength, flexural stength, UPV, unit weight tests were carried out within the scope of mechanical tests on industrial waste substituted metakaolin-based geopolymer mortars. The effect of different fibers for the series that gives the highest compressive strength among these mixtures was determined by compressive stength, flexural stength tests. Then, within the scope of durability tests, high temperature tests at 200 oC, 400 oC, 600 oC and 800 oC, freeze-thaw test, abrasion test and sulfate effect tests and industrial waste tests were carried out within the scope of durability tests in the series produced by replacing each industrial waste with aggregate and giving the highest compressive strength.

July 2021, 89 pages.

Keywords: Geopolymer mortar, metakaolin, industrial waste, compressive strength, fiber.

1. GİRİŞ

Geopolimer, 1978 yılında Fransız Profesör Joseph Davidovits tarafından, inorganik molekül ağları ile karakterize edilen geniş bir malzeme yelpazesini temsil etmek amacıyla tanımlanmıştır. Geopolimer beton yenilikçi bir malzemedir ve ulaşım sektöründe, askeri alanda, çeşitli endüstri sektörleri gibi birçok alanda kullanılır [1]. İnşaat sektöründe atık oluşumunu önlemek, minimize etmek veya geri dönüşümlü malzeme kullanmak var olan karbon salınım oranını düşürmekle birlikte daha sürdürülebilir bir geleceğe olanak sağlayacaktır. Bu yenilikçi malzeme inşaat sektöründe oluşan çevre sorunlarını engellemek aynı zamanda sürdürebilirlik ve atık yönetimi sağlamak amacıyla kullanılır [2]. Geopolimer beton geleneksel betondaki çimentonun yerine bağlayıcı maddelerin alkali aktivatörlerle tepkimesi sonucunda oluşur. Böylelikle yapısında kullanılan minimum düzeyde işlenmiş doğal malzemeler veya endüstriyel yan ürünler karbon ayak izini önemli ölçüde azaltmaktadır. Kullanılan bu malzemeler doğaya zarar veren ve depolama alanı kısıtlı olan endüstriyel atıklar olması sebebiyle de çevreci beton olarak bilinmektedir. Endüstriyel atıkların çimento yerine kullanılması çimento tüketimini azaltmakla birlikte betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine karşı dirençli bir yapı kazanmasını sağlamaktadır [3].

İnşaat sektörü, dünya çapında hızla büyüyen alanlardan biridir. İstatistiklere göre, her yıl inşaat sektöründe yaklaşık 2,6 milyar ton çimento gerekmektedir. Bu miktar, 10 yıl sonra %25 oranında artacağı öngörülmektedir [4]. Geleneksel Portland çimentosu için ana kaynak malzemesi kireç taşıdır ve 25 ila 50 yıl sonra kireçtaşında bir hammadde olarak kaynakların bitmesi sorunu ortaya çıkabilecektir. Dahası, bir ton çimento üretirken, çevre için büyük bir tehdit olan yaklaşık bir ton karbondioksit atmosfere salınacaktır. Bu nedenle, alternatif bir bağlayıcı bulmak çok önemlidir. Geopolimer betonda çimento kullanılmadığı için çimento üretimi azalacak ve böylelikle karbondioksit emisyonu ile atmosferin kirlenmesi de en aza indirilecektir.

Beton endüstrisi, sınırlı kireçtaşı rezervleri, yavaş üretim büyümesi ve artan karbon emülsiyonları nedeniyle Portland çimentosunun artan talebini karşılamakta zorluklar çekmektedir. Örneğin Hindistan'da çimento ihtiyacının 230 milyon ton (%58) eksiklik ile 2020 yılına kadar 550 milyon tona ulaşması muhtemel olduğu ve ülkenin yapısal altyapı faaliyetlerinin artması nedeniyle çimento talebinin sürekli arttığı bildirilmektedir. Bu eksiklikle

mücadeleye yönelik adımlar, inşaatın çevresel etkisini azaltmayı, daha fazla oranda puzolan kullanımını ve ayrıca beton performansını iyileştirmeyi amaçlayan Portland çimentosuna alternatif bağlayıcıların geliştirilmesidir [4]. Portland çimentosunun üretiminin hatırı sayılır enerji tükettiği ve aynı zamanda atmosfere büyük miktarda CO_2 katkısı sağladığı yaygın olarak bilinmektedir. 1 ton normal Portland Çimentosu (PC) üretmek için $CaCO_3$'ün kalsinasyonu atmosfere 0,53 ton CO_2 salmaktadır ve PC üretiminde kullanılan enerji kaynağı karbon yakıtı ise 0,45 ton CO_2 daha üretilir. Olası bir alternatif olan geopolimer beton, silikat malzemeler içeren endüstriyel yan ürünler kullanılarak alkali ile aktive edilen bağlayıcıların kullanılmasıdır[5]. Geleneksel betona alternatif olan bu yenilikçi malzeme yüksek erken dayanımı, düşük geçirimlilik, yüksek kimyasal ve yangın direnci gibi üstün özelliklere sahip olduğu yapılan deneysel çalışmalar ile kanıtlanmıştır. Bunlarla birlikte enerji kaynağı kullanımının az olmasından kaynaklı karbondioksit emisyonuna fayda sağlamasıdır. Bunun yanı sıra çeşitli fonksiyonlardaki dirençli yapısıyla dikkat çekmeye devam etmektedir. Geopolimer betonun ilerleyen teknoloji sayesinde daha dikkat çekici bir yapı malzemesi olması beklenen bir durumdur.

2. GENEL KISIMLAR

2.1 GEOPOLİMER BETONUN YAPISI

Geopolimer betonun yapısı, endüstriyel yan ürün olan alüminosilikat bağlayıcı maddeler ile alkali aktivatörler arasındaki kimyasal reaksiyon sonucu oluşur. Oluşan bu malzeme alüminosilikat sınıfına giren bir malzemedir. Alüminosilikatlar, ana oksitleri alüminyum oksit (Al_2O_3) ve silisyum oksit (SiO_2) olan, doğal ya da sonradan ısıl işlem görmüş amorf yapıya sahip malzemelerdir. Doğada atık olarak bulunan birçok malzeme alüminosilikat malzeme sınıfındadır ve uçucu kül, yüksek fırın cürufu, metakaolin, alüminyum çamuru, tuğla tozu, cam tozu gibi malzemeler geopolimer beton yapısında kullanılabilir. Bu bağlayıcı maddeler, değişik kimyasal kompozisyonlara sahip oldukları için kullanılan farklı maddeler sonucunda ortaya çıkan geopolimer bağlayıcının da özellikleri değişiklik göstermektedir [6].

İnşaat mühendisliği alanında geopolimer beton, pratik olarak bağlayıcı madde ve dolgu maddesi olarak kaba veya ince agrega içeren bir beton karışımı olarak tanımlanır. Genel olarak geopolimer beton üretimi, puzolan malzemesi ve alkali aktivatör çözeltisini belirli bir kimyasal molarite oranı ile birleşimiyle elde edilir. Birleştirme ıslak veya kuru karıştırma yöntemi olarak iki farklı yöntemle gerçekleşebilmektedir. Islak karıştırma yöntemi en yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Bu karıştırma yönteminde kullanılan alkali aktivatör yalnızca çözelti formunda sunulur. Alkali aktivatör olarak kullanılan Sodyum Hidroksit (NaOH) istenen molar konsantrasyona göre çözülür ve Sodyum Silikat (Na_2SiO_3) sıvı formda veya cam suyu olarak sunulur. Kuru karıştırma yöntemi ise alkali aktivatörün puzolan malzemeler ile birlikte öğütüldüğü yöntemdir. Bu öğütülme sonucunda çimentoya benzer ince tanecikli, geopolimer çimentosu elde edilir. Son olarak uygulama esnasında su ilave edilerek geopolimer beton olarak kullanılmaktadır [7].

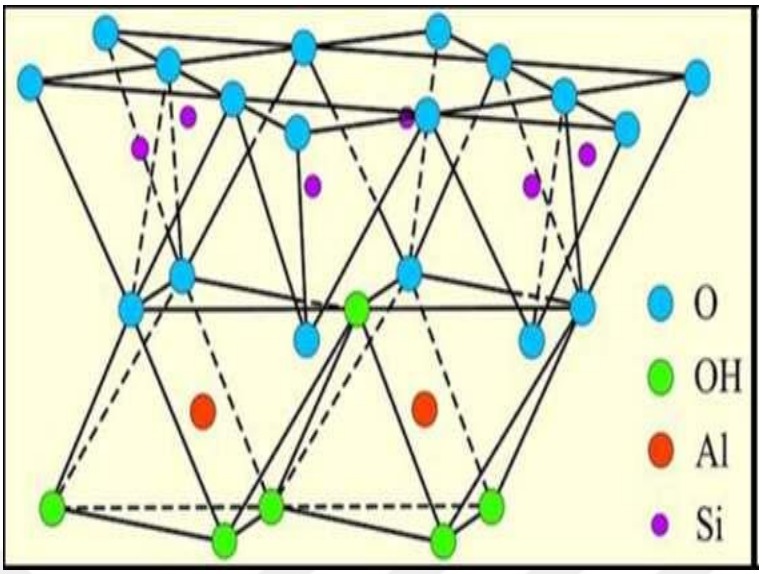
2.1.1 Bağlayıcı Malzemeler

2.1.1.1 Metakaolin



Şekil 1: Metakaolinin fiziksel görünümü.

Kaolinit kimyasal bileşimi $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ olan bir 1:1 kil mineralidir (Şekil 2), bu da her parçacığın bir tetrahedral silika tabakası ve bir oktahedral alümina tabakası olduğu anlamına gelir. Kaolinit formunun tekil parçacıkları, hidrojen bağları ve Van der Waals kuvvetleri ile ardışık parçacıkları bir araya getirmektedir. Bu bağların gücü suyun ara katmanlara girmesini ve şişmeye neden olmasını önler Kaolinit için katyon değişim kapasitesi değerleri tipik olarak 3 ile 15 meq/100 g arasında değişmektedir [8]. Kaolinit ayrıca düşük büzülme-şişme kapasitesine sahiptir ve feldispat gibi alüminyum silikat minerallerinin kimyasal ayrışmasıyla üretilen yumuşak, dünyevi, genellikle beyaz bir mineraldir. Kaolinit açısından zengin olan kayalar Çin kili, beyaz kil veya kaolin olarak bilinir. Kaolin, porselen üretiminde geleneksel olarak kullanılan ince beyaz bir kil mineralidir. Kaolin teriminin Çin Kaolinginden türediği düşünülmektedir.



Şekil 2 :Bir kaolinit tabakasının yapısı.

Puzolanik bir materyal olan metakaolin, kil minerali olan kaolinitin 500 ile 750 °C aralığında değişen kararsız sıcaklıklarda kalsinosyonundan oluşan bir malzemedir. Hammaddesi $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ formülündeki kaolinidir, Geopolimer malzemelerin üretiminde kullanılıp yüksek dayanımlı harç yapımında faydalanılmaktadır [9]. Metakaolin, günümüzde, hızlı mukavemet kazanımı ve alkali çözeltilerle iyi birleşme mekanizması nedeniyle geopolimer matrisin ardışık ana bileşenlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Portland çimentosundan daha verimli harçlar üretilmesi için faydalanılan metakaolinin birçok kullanım şekli bulunmaktadır. Elastisite modülü, sertlik, basınç ve eğilme dayanımı, eğilme modülü ve mikroyapısal analizini belirlemek için deneyler yapılmıştır. Sonuçlar, geopolimer harçların, mukavemet özellikleri ve elastisite modülü bakımından Portland çimentosu harçlarından daha iyi sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur.

Metakaolinin puzolanik reaksiyonu mikrodalga sıcaklığı ile de arttırılabilmektedir. Sıcaklık mikrodalgada hızla üretilebildiği için çimentolu malzemenin reaksiyonunda kazandığı ısıl ivme daha verimli bir hale getirilerek daha az miktarda metakaolin kullanımını sağlayabilmektedir. (Normal koşullarda % 30-40 yerine % 15) ve su: çimento oranı (0,5 yerine 0,4) [10]. Bu sonuca göre mikrodalga benzeri dış etkiler ile ısıtılmış çimento kompozitlerinin üretimi ısıtma ve kürlenme sürelerinin kısalmasına ve daha verimli şekilde işlenebilir hale gelmesine katkı sağlayabilir.

Metakaolin son derece puzolanik ve reaktif bir malzemedir. Metakaolin alkali aktivasyonu yüksek mukavemetli çimentolu malzemeler üretilmesinde katkı sağlamaktadır. Metakaolinin alkali aktivasyonu ile konsantre NAOH çözeltilerinin birleşiminde oluşan amorf yapıdaki zeolitikler mekanik olarak güçlü çimentoların üretilmesini sağlar. Diğer puzolanlara kıyasla neredeyse iki katı oranında reaktivite gösteren metakaolin beton üretiminde değerli bir konumda yer almaktadır.

- Basınç Dayanımı

Metakaolinin içinde bulunma miktarına göre 28 günlük ve 14 aylık basınç dayanım testlerine bakıldığı zaman hiç metakaolin kullanılmayan konsantre karışımlara kıyasla metakolinin %5,%10 ve %15 oranında kullanıldığı karışımlarda %10'luk kullanımın optimum basınç dayanımı sağladığı çeşitli laboratuvar testlerinin 28 günlük ve 14 aylık sonuçlarına bakarak gözlemlenmiştir[10]. Bunun sebeplerinden biri ise kullanılan metakaolin miktarı değiştikçe betonun su absorbe etme oranları da değişkenlik göstermiştir. Bu iki durumun en uygun birleşimi neticesinde %10'luk bir metakaolin konsantrasyonu kullanılarak elde edilen betonun basınç dayanımı hiç kullanılmamasına kıyasla neredeyse %20 oranında artış göstermiştir.

- Metakaolinin kullanıldığı bazı alanlar:

1-Mukavemeti yüksek ve aynı zamanda hafif beton üretiminde kullanılır.

2-Lifli çimentolar ve ferrokalite ürünlerinde faydalanılır.

3-Güçlendirme ve tamir harçlarında kullanılır.

4-Dolgu malzemesi olarak faydalanılır.

5- Sivil, endüstriyel ve mimari alanlarda prekast beton üretiminde kullanılır.

6-Cam elyaf takviyeli beton üretiminde kullanılır.

- Metakaolinin güçlü yönleri şunlardır:

1- Basınç ve eğilme mukavemetlerinde artış sağlar.

2- Daha az geçirgen bir yapıda olduğu için daha yüksek dayanım verir.

3- Kimyasal yönden zararlı tepkimelere karşı daha dirençli bir harç yapısı sağlaması.

4-Daha dayanıklı beton üretimini sağlaması.

5- Betonlardaki harita şeklinde çatlaklara sebebiyet veren, orta ve uzun vadede beton dayanımını oldukça olumsuz etkileyen alkali silika reaksiyonun etkilerinin azalmasını sağlaması.

6- Boşluk oranının azalması nedeniyle betonda daha yoğun ve büzülmeye karşı daha dayanıklı bir beton üretiminin gerçekleştirilmesi.

7- Daha kaliteli bir yüzey görünümü sağlaması.

8- Metakaolinin piyasadaki diğer alternatiflerine göre daha yüksek yapıştırıcı özelliğe sahip olması.

2.1.1.2 Yüksek Fırın Cürufu

Yüzyıllar boyunca cüruflar insanlığın faydalanacağı metallerin rafine edilmesi maksadıyla ortaya çıkmıştır. Ne yazık ki bu işlemler sonucunda ortaya çıkan cüruf tarih boyunca çevreye zararlı bir atık olarak varlık göstermiştir. Demir-çelik sektöründe yüksek tonajlarda üretilen cürufun atılacağı alanları bulmak büyük bir soruna halini aldığından bundan faydalanılabilmesi üzerine çalışılmıştır. Cüruf, metal cevherlerinin eritilmesi sonrası ortaya çıkan cam kristali benzeri bir yan üründür. Cüruf metal işleme tesislerinde bol miktarda üretilmekle birlikte demirin yan ürünü olarak üretilen cürufun dışında kalanları genellikle zararlı atık madde olarak nitelendirilmektedir.

Cüruflar, esas olarak kalsiyum-magnezyum alümino-silikat camdan oluşan pik demir üretim işleminden çıkan bir atık üründür. Yapı, özellik ve kimyasal bileşim, hammaddelere ve endüstriyel sürece bağlı olarak değişir. En çok kullanılan cüruflar yüksek fırın cürufudur. Demir-çelik cüruflarının çoğu CaO, SiO_2, FeO ve MgO'dan oluşmaktadır [11]. Ancak bunların oranları stabil değildir. Üretim esnasında miktarları değişkenlik gösterebilmektedir. Kullanılan metale, çeliğin türüne göre de farklı oranlardan meydana gelen cüruflar görülmektedir.

Granüle cüruf genellikle betonda Portland çimentosu ile birlikte öğütülmüş halde kullanılır. Bünyesinde öğütülmüş halde cüruf barındıran betonlar daha uzun süreli dayanım

göstermektedir. Aynı zamanda betonun geçirgenliğini azaltır. Öğütülmüş haldeki granüle cüruf sayesinde geçirgenliğinin azalmasından dolayı betonun birim hacmi azaldığından, betonun dayanımına olumsuz etkisi olan alkali silika reaksiyonuna ve sülfatın olumsuz etkilerine karşı daha dayanıklı bir yapıya kavuştuğu gözlemlenmiştir.

Cürufun kimyasal ve fiziksel etkileri sayesinde daha az geçirgen olan ve sülfatın olumsuz etkilerine karşı daha dayanıklı betonlar özellikle köprü ayaklarında kıyı şeritlerinde yine bir diğer olumsuz kimyasal reaksiyon olan korozyona karşı alternatif bir önlem olarak ön plana çıkmış ve çeşitli kullanımları gözlemlenmiştir [12].

Yüksek performanslı betonların üretimine katılan cüruf aynı zamanda cüruf yünü olarak da bilinen yalıtım malzemesinin üretilmesinde de kullanılabilir. Çelik cürufunun üretimi doğrudan çelik üretimiyle orantılıdır. Son yıllarda giderek artan çelik üretimi, cüruf üretiminin de dolaylı olarak artmasını sağlamıştır. Bu sebeple cüruftan faydalanmak için yeni arayışlar da bu doğrultuda artmıştır. Çelik cürufu yeterli testlerle denetlendiği takdirde asfalt agregaları ile birlikte güvenli bir şekilde kullanılıp iyi bir performans göstermektedir. Çeşitli araştırmalar sonrası cürufun asfalt betonu üretiminde oldukça yüksek kalitede bir agrega alternatifi olduğu ortaya konulmuştur. Özellikle sıcak iklimlerde asfalt içerisindeki bitüm nedeniyle daha akışkan ve yapısal bozulmaya müsait bir hale gelmektedir. Yüksek fırın cürufunun asfalt betonu bileşiminde kullanıldığı durumlarda kireçtaşına kıyasla Marshall stabilite deneylerinde daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür [13]. Kalıcı yapısal deformasyonlara daha dirençli yapıda bir beton ortaya çıkması sayesinde asfalt üretiminde de özellikle tropikal bölgelerde güzel bir alternatif olmuştur.

2.1.2 Endüstriyel Atıklar

2.1.2.1 Tuğla Tozu

İnşaat ve yıkım faaliyetlerinden meydana gelen atık miktarı her yıl dünyamıza milyonlarca ton atık olarak geri dönmektedir. Bu atıkların öne çıkanlarından birisi de tuğla tozudur. Son yıllarda çevreye daha duyarlı olunması açısından araştırılmaların artması tuğla atıklarının da kullanım alanlarının ortaya çıkmasına vesile olmuştur. Tuğla dünyada betondan sonra en çok kullanılan inşaat malzemesi olarak kabul görür. İnşaat sırasında bir kırılma olursa bu tuğlalar atık olarak kabul edilir. Çin'de son yıllarda yapılan kentsel dönüşümler neticesinde her yıl 400 milyon ton tuğla atığı ortaya çıkmaya başlamıştır. Hindistan dünyanın en büyük ikinci tuğla üreticisidir ve

tuğla atığı yıllık üretilen inşaat atıklarının neredeyse %31 ine karşılık gelmekteydi. Tayvan'da 0,24 milyon ton tuğla atıkların yıllık olarak üretildiği rapor edilmiştir [14].

İngiltere Eyalet ve Çevre Koruma Ajansı verilerine göre 2012-2014 yılları arasında 44 milyon ton tuğla atığı inşaat ve yıkım faaliyetleri sırasında elde edilmiştir. Tuğla atıklarının depolanması için çok büyük alanlar gerekmekte ve her yıl artan tuğla atıklarından kaynaklı olarak tuğla tozunun geri dönüşümde kullanılması elzem bir vaziyet almıştır [15].

Diğer bir yandan beton üretimi çevre dostu bir süreç değildir. Çünkü beton üretimindeki temel malzemeler çevreye zararlı etkiler barındırmaktadır. 1 ton çimento üretimi çevreye yaklaşık 1 ton karbondioksit salınımına sebebiyet vermektedir [16]. Hatta öyle ki 2009 yılında çimento üretimi dünyadaki karbondioksit emisyonunun %5 ine denk gelen kısmına tek başına sebep olmuştur. Son yıllarda ise çimento tüketiminde artan nüfusun da etkisiyle sürekli bir artış görülmektedir. Bunun doğal bir sonucu olarak karbondioksit emisyonuna etkisi daha da artmıştır.

Bu durum iklim sınırlarının üzerinde karbondioksit salınımına yol açtığı için dramatik seviyelerde iklim değişikliklerine sebebiyet vermektedir. Beton üretimi doğal kaynaklara devamlı olarak bağımlı olmamızı ve çevremizi hızlı şekilde yok etmemizi tetiklemektedir. Dolayısıyla tuğla tozunu geri dönüştürme ve yeniden kullanma potansiyeli, beton yapımındaki atık çevre dostu bir alternatif olarak kabul edilir, aynı zamanda kullanımından kaynaklı olarak depolama ve ortadan kaldırma sorununu hafifletebilmektedir. Tüm bunlara ek olarak ise beton üretimindeki hammadde ihtiyacının azalmasını sağlayarak birden fazla olumlu etkiye sebep olur. Aynı zamanda tuğla tozu üretimini dikkate aldığımızda bu süreç kimyasal katkıların kullanımına da sebep olmaktadır. Yaygın olarak da kullanıldığı için çevre ve insan sağlığına dolaylı olarak olumsuz etkisi olduğu göz ardı edilmemelidir. Son yıllarda geri dönüştürülmüş tuğla tozunu kullanmak için bir dizi araştırma yapılmıştır. Betondaki hammaddelerin yerini alabilmesi açısından incelendiğinde kısmi olarak iri ve ince agregalar arasında kullanılabildiği ve ayrıca çimento imalatına da yine kısmi şekilde katılabildiğine dair gözlemlerde bulunduğu görülmüştür. Araştırmalar sonucunda ise betonun dayanımını iyileştirebileceği üzerine bir kanı oluşmuştur. Bunun için çimentonun kısmen ezilerek tuğla tozu ile değiştirilmesi ve bu tuğla parçacıklarının öğütülmesinden faydalanılmış olup, tuğla tozunun inceliğinden yararlanılarak potansiyel bir puzolanik aktiviteye sahip olduğu ve aynı zamanda dolgu malzemesi olarak kullanılabildiği görülmüştür.

Kısmi çimento ikamesi olarak kullanılacak malzemelerden istenen başlıca şeylerden birisi de puzolanik reaktivitenin varlığıdır. Bir puzolanın, puzolan özelliği, aktif silika ve alüminası tarafından belirlenir. Tuğlalar kilin yakılmasıyla üretilir ve düşük CaO içeriği ile birlikte, yüksek oranda SiO_2 ve Al_2O_3 içerirler. Öğütülmüş kil tuğlası genel olarak puzolanik malzeme kabul edilir. Minimum SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 yüzdesi% 70'den fazladır [14]. Danimarka, Litvanya, İngiltere ve Polonya gibi, puzolanik reaktiviteyi doğrulayan öğütülmüş tuğla tozu deneyleri yapan 8 farklı ülke vardır. Walker ve Pavia (2011) uçucu kül ve tuğla tozunun puzolanitesini karşılaştırmıştır. Sonuçlar, kırmızı tuğla tozundaki kristal minerallerin daha yüksek içeriğine bağlı olarak kırmızı tuğla tozunun daha yavaş reaksiyon kinetiğini gösterdiğini ortaya koymuştur. Daha düşük tuğla tozu boyutu yüzey alanını arttırarak daha yüksek puzolanik aktivite sağlayabilmiştir. Kısmi Çimento İkamesi Olarak Tuğla Tozunun Etkisi bu alanda araştırma yapan bilim insanları genel olarak tuğla tozunun % 10 - 20'ye kadar dahil edildiğini buldular[16].Bu oranlarda kullanıldığında bu çimentodan üretilen harç ve betonların benzer özellikler gösterdiği tespit edilmiştir. Optimum tuğla tozu içeriği bulunan betonlar, yapılan araştırmalar ve kontroller sonucu genellikle uzun süreler boyunca daha yüksek mukavemet kazanımı sergilemiştir. Ancak optimum olarak belirlenen bu oranlardan fazla tuğla tozu kullanıldığında ise olumlu etkisinin tersi yönünde kuvvet dayanımında azalmalar gözlenmiştir. Çimento esaslı betonun mukavemetinin azaltılmasının olası açıklamalarından biri ise tuğla tozu içeren harç ve tuğla tozunun yüksek gözenekliliğidir.

Olası gözenek iyileştirme etkisi ve puzolanik reaksiyon nedeniyle ince tuğla tozunun kısmi çimento malzemeleri olarak dahil edilmesi, daha önceki araştırma ve deneysel sonuçlardan elde edilen bulgularla birlikte betonun dayanıklılıkla ilgili bazı özelliklerinde gelişim ve iyileştirmeleri sağlamıştır. Bunlardan biri ise sülfatın zararlı etkisine karşı artan direnciydi. Çeşitli araştırmalarda gözlendiği üzere tuğla tozunun sodyum hidroksit ve sodyuma batırılmış betonun genleşmesinin azaltılmasına katkıda bulunduğu görülmüştür. Bu raporlar ve deneylerde ortaya çıkan sonuca göre %5 ile %30 oranları arasında değişen tuğla tozu kullanımı optimum etki vermiştir. Dolayısıyla bu seviyelerde kullanıldığında daha az geçirgen ve alkali silika jelinin oluşumunu ve ASR reaksiyonunu geciktiren bir yapıya kavuşmuş olacağı gözlenmiştir. Aynı zamanda %10 oranında tuğla tozu kullanılan deney karışımlarında magnezyum sülfat çözeltilerine maruz kalındığında daha az mukavemet kaybı görülmüştür[16].

Genel olarak bakıldığında atık tuğlayı kullanmanın potansiyel faydalarını irdelediğimizde beton ve harçta agrega ikamesi olarak kullanılması diğer kullanım şekillerine göre en uygun seçeneğin olduğu sonucuna varılabilir. Atık tuğlayı kısmi çimento ikamesi olarak ince toz halinde kullandığımızda, yani beton veya harcın %20'si oranında tuğla tozu dahil edildiğinde verim elde edilmiş olup bu oran daha da geliştirilebilir ve tuğlada uygun incelik ve amorf içeriği sağlayan çimento değiştirme seviyesi elde edilir. Ek olarak Alkali aktif beton için asıl materyal olarak tuğla tozunun kullanılması, daha detaylı araştırmalar yapılmasını hak eden bir sonuç vermiştir.

2.1.2.2 Mermer Tozu

Mermer, eski çağlardan beri kullanılan en yaygın yapı malzemelerinden biridir. Mermerin genel kullanım amacı inşaat malzemesi olarak ve aynı zamanda özel olarak dekoratif amaçlarladır. Mermerin dekoratif kullanımından ötürü %30 oranlarında atık oluşturduğu söylenebilir. Çünkü spesifik olarak kullanıldığı yapı içerisindeki bölgelerden dolayı, bol miktarda kesilip küçük parça ve tozlarını ortaya çıkartır. Aynı zamanda taş ocaklarında veya işleme tesislerinde işlenmesi sırasında mermerin %30'u şekil olarak düzensiz veya boyut olarak daha küçük olduğu için atık kategorisine ayrılabilir. Genel olarak iki tip işlenmeye tabii tutulur. Bunlar katı ve sıvı bulamaçtır. Mermer tozu ihtiva eden su ise mermer bulamacı olarak isimlendirilmiştir. Dikey ya da yatay kesicide bir ton işlenmiş mermer taş yaklaşık % 35 ile % 45 oranları arasında su içeriğine sahip neredeyse bir ton bulamaç üretir. Bu bulamaç genellikle mermer endüstrisinde kullanılmadan atılan atık olarak nitelenir. Ayrıca zamanla kuruduktan sonra kalan toz ise doğaya ve çevreye zararlıdır. Örnek vermek gerekirse, tarım arazilerinin kısırlaşmasına ve verimsiz, mahsul alınamaz hale gelmesine sebebiyet verir. Ek olarak yapılan çökeltme işlemleri sebebiyle de yeraltı sularına karışarak suların kirlenmesine ve canlılara zarar vermesine sebep olmaktadır[17].

İnşaat sektöründe nüfus ve dolaylı olarak inşaata yönelimin artması nedeniyle son yıllarda logaritmik olarak diğer atık malzemeler gibi, mermer tozunun da üretimi artmış ve ciddi tehditlere yol açmış bulunmaktadır. ABD, Fransa, Belçika, Hindistan, İspanya, İtalya, Mısır, Türkiye, Brezilya, Portekiz ve Yunanistan önemli mermer rezervine sahip ülkeler arasındadır [13]. Hindistan'da mermer rezervleri Rajasthan eyaletinde bulunan 4000'in üzerinde mermer madeni ve bunun bir getirisi olarak 1100'den fazla mermer işleme tesisleri Rajasthan'ın 16 ayrı bölgesinde yer almaktadır. Yine İtalya’nın Sardinya bölgesinde granit ve mermer çok büyük

miktarlarda işlenmektedir. İşleme tesisleri hem maden çıkarma bölgesi hem de sanayi bölgesi olarak belirlenmiş olan aynı bölgede yer almaktadır. Bu bölge, 15 taş ocağı ve 15 işleme tesisinin faaliyet gösterdiği 200 hektarlık bir alanı kaplamaktadır [17].

Son zamanlarda seramik ve inşaat sektöründen bazı araştırmacılar, mermer tozunun ikame şeklinde veya katkı maddesi olarak kullanımına büyük ilgi göstermişlerdir. Diğer geleneksel yöntemlerle birlikte mermer bulamacının kullanımı tuğlaların kalitesinin artması yönünde olumlu etkilere neden olmuştur. Mermer tozunun geri dönüştürülerek kullanılması sadece mermer kullanımının çevresel olumsuz etkilerini azaltmakla kalmayacak, aynı zamanda sürdürülebilir kalkınmaya yol açan diğer doğal kaynakların kullanımındaki azalmayı tetikleyerek birden çok alanda iyileşmeyi sağlayacaktır. Yapısı, çimento, agrega ve su karışımından meydana gelen beton dünya çapında en yaygın kullanılan inşaat malzemelerinden biri haline gelmiş ve küresel beton üretimi yaklaşık 12 milyar ton seviyesine yani yılda kişi başına neredeyse 1 m^{3}'e karşılık gelen kullanıma ulaşmıştır. Üstelik sürekli artan dünya nüfusu nedeniyle de bu ihtiyacın azalmak yerine sürekli artacağı gözle görülen bir gerçektir. Araştırmalar göstermektedir ki 2050 yılına geldiğimizde yıllık 18 milyar m^3 beton üretimi gerekecektir. Bu şekilde doğal agregaların tüketimi ve geri dönüşümsüz şekilde harcanması karbon ayak izini ciddi şekilde yükseltip çok büyük felaketlere yol açabilecektir [13].

Birkaç yazar, mermer tozunun kumun kısmi ikamesi olarak kullanımını inceledi ve çimentonun mermer tozu ile modifikasyonundan oluşan harcın kumla %10 oranında ikame edilebileceği sonucuna ulaştı. Yapılan 28 günlük basınç dayanım deneyleri sonrasında ise referans değer olan normal çimento karışımına kıyasla %15 daha yüksek basınç dayanımı verdiği sonucuna ulaşılmıştır. Arshad vd., [22] tarafından çimento yerine çimentoya ağırlıkça %20 oranında mermer tozu eklenmiştir. Bu miktarda kullanımında ise basınç dayanımında %7,5 ortalamasında bir düşüş gözlemlenmiştir. Çimento ile mermerin mukavemeti artırması, %15 ikame ile sıkıştırmayı azaltır ve 0.40 (su/çimento) oranına sahip beton için; basınç dayanımında hafif artışın çimento tozunun, kontrol karışımına göre %10 oranında mermer tozu ile değiştirildiğinde bu sonucu verdiği gözlemlenmiştir. Aynı zamanda mermer tozunun betondaki boşluk miktarını azaltması sayesinde betonun daha sıkı olması sağlanmıştır.

Genel olarak yapılan çalışmalar için bir özet oluşturulduğunda aşağıdaki gibi sıralanabilir:

1) Betonda %10-15 aralığında mermer tozu kullanılması betonun yoğunluğunu artırmaktadır. Aynı zamanda betonun mukavemet ve ayrılma mukavemet değerlerini %15-20 oranlarında arttırır[13].
2) Akışkanlaştırıcıların kullanımından ötürü su/çimento oranının azalması betonun dayanımını arttırır.
3) Mermer tozu ile % 35-50 oranında kum ikamesi olumlu sonuçlar vermiş, basınç ve gerilme mukavemetlerinde artışa sebebiyet verdiği gözlenmiştir.
4) Gözeneklilik, aşınma direnci, karbonatlaşma ve sülfat gibi dayanıklılık özellikleri direnç ve su penetrasyonu azalmış, mermer tozunun dolgu etkisinden dolayı karışımların sıkıştırılması.
5) Genel olarak tüm dayanıklılık parametrelerinde artışların görülmesi.
6) Mermer tozu ile % 15 çimento ikamesi, maliyette % 9,08 tasarruf sağlar ve mermer kullanımı doğal agrega kullanımının olumsuz etkilerini azaltır.
7) Bir ton betonun karbon ayak izi 350 kg / $m^{3'}$e (% 15) ,çimentonun mermer tozu ikamesi 410 kg / m^3'e düşerek doğaya zararı azalmıştır.
8) Betonun içindeki hammaddelerin daha az tüketilmesi, ozon tabakasının incelmesini ve tarımsal arazi kullanımını olumlu şekilde etkilemektedir [17].

2.1.2.3 Seramik Tozu

Ülkelerin devamlı şekilde büyümesi ve teknolojik gelişmeler sebebiyle, doğal ve yenilenemeyen kaynakların tüketiciler tarafından kullanımı ve taleplerini karşılaması artmıştır. Bu durum doğal olarak endüstriyel katı atık malzemelerin sürekli artmasına neden olmuştur. Endüstriyel katı atık maddeler günümüzde düzenli depolama bölgelerinde günlük olarak depolanmaktadır. Atık yönetimi üzerine yapılan araştırmalar ve ortaya çıkarılan teknikler, ham kaynak ve enerji tüketimini azaltmayı ve dünyamızın bu geri dönüşümsüz tüketim anlayışın değişmesine yardımcı olmayı amaçlamaktadır. Her geçen gün atık depolanan alanlarımız artmaktadır. Beton, dünyanın en çok tüketilen insan yapımı ürünüdür. Çimento endüstrisinin yaklaşık % 5 ile % 8 arasında CO_2 emisyonuna olumsuz yönde katkı sağladığı tahmin edilmektedir [14]. Yıllık küresel sera gazı emisyonlarının önemli bir parçası artık bu geri dönüştürülmeyen atıkların salınımıdır. Seramik karoların üretimi sırasında seramik atık tozu (CWP) oluşmaktadır. Seramik tozu, geri dönüşüm yoluyla tekrar yararlı şekilde kullanılması gereken ve çevreye olumsuz etkisinden dönülmesi gereken güncel ve büyük bir zorluktur. Bu

konu üzerine çalışan bazı araştırmacılar, seramik atıkların (kiremit, blok, tuğla vb.) kullanımının etkilerini incelemişlerdir. Aynı zamanda beton ve harç karışımlarında agrega olarak veya çimentoya ikame olarak seramik tozunun ne gibi etkileri olabileceği üzerine deneyler yaptılar [18].

Çalışmalar genel olarak şu sonuca varmıştır:

1) Seramik atık, betonun dayanım performansına olumlu yönde katkıda bulunduğu bilinen puzolanik aktiviteye sahiptir.
2) Seramik tozunun partikül yapısı fiziksel olarak çimentonunkilere benzer olmakla birlikte % 85 SiO_2 ve Al_2O_3 ihtiva etmiştir. 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.
3) 25 MPa ve 50 MPa dayanım veren ve seramik tozu barındıran beton karışımlarına seramik tozunun dahil edilmiş olması işlenebilirliğe olumlu yönde katkılar sağlamıştır.
4) Seramik tozu 7, 14 ve 28 günlük dayanım deneylerinde basınç dayanımı gelişimini yavaşlatmıştır. Ancak 90 günlük numunelere geçildiğinde basınç dayanımının seramik tozu ihtiva etmeyen normal karışımlara kıyasla daha yüksek olduğu ortaya konmuştur [18].
5) Seramik tozunun beton karışımlarına dahil edilmesi ciddi anlamda klorür iyonlarının zararlı şekilde betona nüfuz etmesine karşı direnç sağlamış ve gelişmiş toplu elektrik üstün dayanıklılık performansını gösteren direnç değerleri ortaya koymuştur [19]. Verim seviyesi ise kullanılan seramik tozuyla doğru orantılı olarak artış göstermiş ve bu durumun sorun meydana getireceği ortam koşulları için bir alternatif çözüm seçeneği sunmuştur.

Bu gibi nedenlerle seramik tozunun diğer tamamlayıcı çimento katkı malzemeleriyle birleştirilmesi ve beton karışımlarının oluşturulmasında üçlü veya dörtlü karışımlar üretmek için sürdürülebilir beton yapımı üzerine araştırmalar sıklaştırılmalıdır.

2.1.2.4 Cam Tozu

Temel yapı inşaat malzemesi olan beton, dünyanın en çok tüketilen insan yapımı malzemelerinden birisidir. Amerika Birleşik Devletleri'nde 2007 yılında yaklaşık 800 milyon

ton, dünyada ise 11 milyar ton beton tüketilmektedir [20]. Başka bir şekilde ifade edecek olursak yaklaşık olarak yaşayan her bir insan için 1,7 ton beton tüketilmiştir. Çimento üretimi (betondaki temel bağlayıcı) yoğun enerji harcanmasına ve atmosferi son derece kirletici etkisi olan küresel CO_2 emisyonlarına yaklaşık % 5-8 aralığında olumsuz yönde katkıda bulunan bir süreçtir.

Bu yüksek ve zararlı CO_2 emisyonu katkısı, üretilen her bir ton çimentodan kaynaklanmaktadır. Bir ton çimento yaklaşık olarak bir ton karbondioksit (CO_2) yaymakta ve bu durum hem çimento üretiminde enerji üretmek için kullanılan yakıt hem de çimento hammaddesinin yanmasından kaynaklanmaktadır. Katı atık malzemelerin veya endüstriyel yan ürünlerin kısmi olarak kullanılması veya betondaki çimentonun bu atık malzemelerle belirli oranlarda değiştirilmesi, CO_2 emisyonunun azaltılması ve doğanın geri dönülemez şekilde tahribatının önlenmesi için uygun bir stratejidir. Portland çimentosunun kullanımını azaltarak çevreye ve beton üretiminin olumsuz etkilerine karşı konulabilir. Mısır'da yıllık olarak yaklaşık 3,45 milyon ton atık cam üretildi ve bu üretilen camların % 84'ü çöp sahalarında yükselmeye devam etmektedir [20]. Ezilmiş cam materyallerden, inşaatlardaki yıkım faaliyetlerinden kaynaklanan katı cam atıkları buna birer etmendir. Federico ve Chidiac'a göre, karışık renkli atık camlar beton için istenen kimyasalları içinde barındırarak tamamlayıcı bir çimento esaslı karışım olarak kullanım için bileşim ve reaktiviteye, ayrıca kimyasal stabiliteye fayda sağlayabilecek bir beton oluşumunu sağlayabilir. Camdaki bu kimyasal potansiyeli gerçekleştirmek için, atık camın mikro ölçekli parçacık boyutuna getirilmesi için öğütülmesi gerekir. Betona katılan camdan gelen faydalı kimyasal reaksiyonları hızlandırarak olumlu bir etki sağlayabilir [20].

Cam tozuyla ilgili yapılan bu araştırmalar ile çimento ikamesi ve beton üretiminde kullanılmasıyla ilgili aşağıdaki bilgiler söylenebilir:

Çimentonun fiziksel ve mekanik özelliklerine göre cam tozu malzeme Sınıf F ve Sınıf C sınırlarını karşılamaktadır. ASTM C 618'e göre puzolanik malzemelerin fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklere dayalı malzemeler olduğu bilinmektedir. Bu davranış, TGA test sonuçlarıyla doğrulanır. Cam tozu katkısı yapılan Portland çimentosunun priz süresi ve sağlamlığı içinde cam tozu karıştırılmamış Portland çimentosuna benzer özellikler göstermektedir. % 10 seviyelerine varan cam tozu kullanımı, harcın sıkıştırılmasını arttırıcı özellik göstermiştir. Bu artış ise deneysel olarak yaklaşık % 9 oranlarında gözlemlenmiştir. Çimento ikamesi olarak cam tozu kullanımının % 25'e varan oranlarda olabildiği

gözlemlenmiştir. Cam tozu kullanıldığında, çimento hamurunun gözenek yapısını rafine ederek bu yapısıyla harç ve betona, özelliklerini doğrudan yansıtmaktadır. Cam tozu ile çimentonun ikame oranlarının arttırılması betondaki çökmeyi arttırır [20].

33 MPa'lık beton karışımı için, her %5 oranında cam tozu kullanılması beton çökmesini yaklaşık 10 mm boyutlarında artırmaktadır. %10.0 cam tozu çimento değişimi yapıldığı takdirde beton basınç ve çekme dayanımı, emme oranı ile birlikte cam tozu kullanımının bir diğer sonucu olarak boşluk oranı ve yoğunluğuna da olumlu yönde etki eder. Çimento yerine %15'den fazla cam tozu kullanımı ise 28 günlük beton basınç dayanımını azaltır. Bu 28 günlük basınç dayanımdaki gibi olumsuz bir etkiyi düzeltmek için su/çimento oranında azalma gereklidir. Beton basınç dayanımının 45 MPa beton karışımı için su/çimento oranını yaklaşık 0,03 seviyelerinde olması gerektiği gözlemlenmiştir. % 15,0'e kadar çimentoya ilave olarak cam tozu kullanımı beton basınç dayanımını, çekme dayanımını ve 33 MPa beton kalitesi için boşluk oranını olumlu yönde etkilemektedir. Bu artışın % 4,7 ve % 5 ile modifiye edilmiş beton için % 14.6 ve % 16.8 oranlarında olduğu deneysel olarak tespit edilmiştir [16].

2.1.2.5 Odun Külü

Odun külü, odunun yanması sonucu oluşturduğu kalıntıdır. Genel olarak ahşap ve ahşap ürünlerdir(talaş, testere tozu, ağaç kabuğu vb.). İnorganik kalıntılar ve ahşabın yanmasından sonra kalan organik kalıntılar veya ağartılmamış odun lifi örnek olarak gösterilebilir. Sert ağaçların genellikle daha fazla kül ürettiği gözlenirken, yumuşak ağaçlardan ve ağaç kabuğu ile yapraklardan daha az kül üretildiği gözlemlenmiştir. Genellikle külün yoğun olarak çıktığı kısım ağacın iç odunsu kısımlarıdır. Ortalama olarak bir ağaçtan üretilmiş olan ahşabın yakılması yaklaşık %6-10 aralığında kül üretimiyle sonuçlanmaktadır [21]. Odun külünün bileşimi ise iklim koşulları, suya erişim ve bulunduğu toprağın kimyasal ve fiziksel özellikleriyle birlikte coğrafi konuma bağlı olarak oldukça değişken olabilir.

Üretilen odun külünün yaklaşık % 70'i gömülmektedir; kalan miktarın % 20’si toprak takviyesi olarak tarım arazilerine uygulanır ve sona kalan % 10’luk kısmı ise çeşitli uygulamalar için kullanılmıştır. Odun külünün inşaat malzemesi olarak kullanılmasına yönelik çok fazla çalışma bulunmamaktadır. İnşaat malzemesi olarak odun külünün kullanımında, özellikle çimento esaslı malzemeler göz önüne alınmıştır. Odun külünün barındırdığı yüksek karbon içeriği nedeniyle inşaat alanında kullanımı sınırlıdır. Ancak düşük ve orta mukavemetli beton

malzemelerin üretiminde faydalanılmasında bir sakınca görülmemiştir. Avrupa'da odun külü ayrıca Portland çimentosu üretiminde hammadde olarak kullanılmıştır. Çimento odun külünün bir puzolanik mineral katkı maddesi olarak kullanımı için önemli potansiyel barındırmakta ve çimento esaslı malzemelerde bir aktivatör olarak yer almaktadır. Ayrıca şunu da belirtmek gerekir ki: odun külü, diğer birçok düşük mukavemetli malzemede kullanım için önemli bir potansiyele sahiptir. Kontrollü olarak düşük mukavemetli malzemeler dahil, düşük ve orta mukavemetli beton, duvar ürünleri, silindirle sıkıştırılmış beton kaldırımlar, yol tabanı için malzemeler ve harmanlanmış çimentolarda bulunma potansiyeli göstermektedir [21].

Odun külünün fiziksel ve kimyasal özellikleri, faydalı şekilde kullanımlarını belirlemek için, kullanılacağı alanlara ve sektörlere bağlı olarak üzerinde durulan kriterler önemli ölçüde değişebilmektedir. Bu özellikler ağaç türlerinden etkilenir, ağaç yetiştirme bölgeleri ve koşulları, yanma yöntemi ve sıcaklığın etkileme şekli, odun yakıtı ile kullanılan diğer yakıtlar ve odun külü toplama yöntemi bu konuda belirleyici ve geniş kapsamlıdır.

Sonuç olarak, üzerinde çok detaylı araştırmalar yapılmadığı ve belirli bir kapsamlı literatürü bulunmadığından kullanımı için ayrı bir uygulama kodu yoktur. Odun külü, ancak özellikleri ASTM C 618'de belirtilmiş olan, "Standart uçucu kömür külü ve ham veya kalsine edilmiş doğal puzolan için şartname, betonda mineral katkı olarak kullanım için" şartnamesine göre kullanımı uygun olabilen odun külü durumundadır [17]. Odun külünün çimento karışımına dahil edilmesi, kısmen çimentonun olumsuz yönde etkilenmesine ve slump değerlerindeki değişim nedeniyle betonun çökmesini olumsuz şekilde etkiler.

Betonun su emme kapasitesi ise içerdiği odun külü miktarı arttıkça artar. Beton karışımlarının mukavemet özellikleri odun külü içerdiklerinde gözle görülür şekilde azalırken, odun külü içeriğinde bulunan puzolanik etkiler sayesinde ilerleyen zamanlarda ters yönde dayanımı arttırma açısından olumlu bir ivme kazandırabilir. Odun külü, prekast ürünler ve yapısal ürünler yapmak için kullanılabilir [21].

2.1.3 Alkali Aktivatörler

Geopolimerlere olan ilginin artmasıyla birlikte yapılan deneysel araştırmaların sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Çevre dostu ve yenilikçi teknolojisi sayesinde Portland çimentosuna alternatif bir bağlayıcı malzeme olarak inşaat sektöründe gelişmelerine devam edilmektedir. Yapılan araştırmalar sonucunda kullanılan kimyasal aktivatörlerin yapı malzemesi

performansına olumlu katkıları olduğu belirlenmiştir. Geopolimer beton üretiminde en çok kullanılan alkali aktivatörler; Sodyum Silikat, Sodyum Hidroksit, Kalsiyum Hidroksit ve Potasyum Hidroksit'tir.

Sodyum Hidroksit

Sodyum hidroksit, NaOH formülüne sahip bir inorganik bileşiktir. Yapısında sodyum katyonları (Na^+) ve hidroksit anyonları (OH^-) içeren bu bileşik kostik ve kostik soda olarak da bilinir. Suda kolayca çözünür yumuşak, kaygan ve sabun hissi veren bir çözelti oluşturur. Yapay ipek, sabun, kâğıt, boya, petrol rafinerileri gibi birçok kimyasal maddenin yapımında kullanılır [23].

Sodyum hidroksit oda sıcaklığında, havadaki nemi emen beyaz kristalin kokusuz bir katı olarak üretilmiş bir maddedir. Suda çözündüğünde veya asitle nötralize edildiğinde, yanıcı malzemeleri tutuşturmak için yeterli olabilecek önemli miktarda ısı açığa çıkarır. Sodyum hidroksit çok aşındırıcıdır. Genellikle katı veya %50 çözelti olarak kullanılır. Diğer yaygın isimler arasında kostik soda ve sodalı su bulunmaktadır. Sodyum hidroksit sabunlar, suni ipek, kâğıt, patlayıcılar, boyalar ve petrol ürünleri üretmek için kullanılır. Ayrıca pamuklu kumaşın işlenmesinde, çamaşır yıkamada ve ağartmada, metal temizleme ve işlemede, oksit kaplama, elektro kaplama ve elektrolitik ekstraksiyonda kullanılır. Genellikle ticari kanal ve fırın temizleyicilerinde bulunur. FDA'ya göre, sodyum hidroksit, güvenli olarak tanınan doğrudan bir gıda olarak kabul edilir, burada bir pH kontrol ajanı olarak hizmet eder ve iyi üretim kurallarını izlemektedir [24].

Sodyum hidroksit oda sıcaklığında beyaz, kokusuz bir katıdır. Sıvı sodyum hidroksit renksizdir ve kokusu yoktur. Güçlü asitlerle ve suyla şiddetli reaksiyona girebilir. Sodyum hidroksit aşındırıcıdır. NaOH, havadaki nem ile reaksiyona girebilir ve çözündükçe ısı oluşturabilir. Bu ısı, yanıcı malzemelere yakınsa yangına neden olabilir. Sodyum hidroksit, yağları değiştirme kabiliyeti açısından faydalıdır. Sabun yapımında ve sıvı drenaj temizleyicileri gibi ev ürünlerinde ana bileşen olarak kullanılır. Sodyum hidroksit genellikle saf halde beyaz topaklar halinde veya suda çözelti olarak satılır. Üretilen sodyum hidroksitin yaklaşık %56'sı endüstri tarafından kullanılmaktadır ve NaOH'nin %25'i kâğıt endüstrisinde kullanılmaktadır. Diğer bazı kullanım alanları arasında yakıt hücresi üretimi, yiyecekleri iyileştirmek, konserve için sebzelerden cildi çıkarmak, ağartıcı, süzgeç temizleyici, fırın temizleyici, sabunlar, deterjan,

kâğıt yapımı, kağıt geri dönüşümü, alüminyum cevheri işleme, oksit kaplama, pamuklu kumaş işleme, asitleme sayılabilir [25].

2.1.3.1 Sodyum Silikat

Sodyum silikat, genel formülü $Na_2(SiO_2)_nO$ ile gösterilen kimyasal bileşiklerin ortak adıdır. Bu kimyasal bileşik, su camı veya sıvı cam olarak da bilinir. Sulu çözelti içinde veya bir katı içinde kullanılabilir. Sodyum silikat çimentolarda, pasif yangın korumada, tekstil sektöründe, kereste işlemede, otomobillerde ve çeşitli alanlarda kullanılır [26].

Sodyum silikat, sodyum hidroksit içinde etkili bir silika çözeltidir. Sodyum hidroksit, asidik bir materyal ile nötralize edilirse, silis çökelecektir. Çöken silisin formu, nötrleştirici materyalin doğasından etkilenmektedir. Silika ayrıca güçlü elektrolitlerin eklenmesiyle de çökeltilebilmektedir. 1925'te geliştirilen ilk kimyasal enjeksiyon işlemi olan Joosten işlemi, sodyum silikat ve kalsiyum klorürün ayrı ayrı enjeksiyonunu içermekte ve toprağa karışarak jelleşmiştir. Sonradan enjeksiyon işlemi uygulamak maliyetlidir ve çok fazla silikatı tabakasız bırakabilir. Modem harçları bu nedenle gecikmeli bir sete sahip olacak şekilde tasarlanmıştır, böylece yalnızca tek enjeksiyon noktalarına ihtiyaç duyulur. Örneğin, asit ve bir alkol salmak üzere su ile yavaşça hidrolize edilen adipik, glutarik ve sülfirik asitlerin etil ve metil esterleri, sodyum silikat içindeki sodyum hidroksiti yavaşça nötralize etmek ve böylece gecikmiş bir set vermek için uygun malzemelerdir. Gerekli ester miktarı, gerekli nötrleştirme derecesine göre belirlenir (tipik olarak dayanıklı bir harç için sodyum silikat içindeki sodyum hidroksitin en az % 60'ı nötrleştirilmelidir). Sertleşme hızı, uygun bir ester seçilerek kontrol edilir. Sodyum silikat / ester oranını değiştirerek sabitlenme oranının kontrol edilebileceği konusunda bazı güncel literatür tarafından pekiştirilen yaygın bir yanlış kanı vardır. Reaksiyon hızı, reaktanların konsantrasyonuna bir şekilde duyarlı olacaktır, ancak iyi kalitede sertleştirilmiş bir harç üretimi, reaktanların doğru oranlarda kullanılmasını gerektirir. Bu nedenle, silikat ve esterin nispi oranlarını değiştirerek bir silikat-ester şeridinin ayar oranını değiştirmek, alkalinin yetersiz nötralizasyonu nedeniyle zayıf dayanıklı bir ürün üretebilir veya esterin israfına neden olabilir. Sodyum silikat-ester harçları, yaklaşık 10 dakika ile 2 saat arasında sabit sürelerle birkaç yüz kPa'dan birkaç MPa'ya kadar kuvvet verebilir. İlk harç çözeltisi viskoziteleri 5 ila 40 cP arasında olabilir. Mukavemet ve viskozite, harçtaki silikat konsantrasyonuna çok duyarlı olacaktır. Sodyum silikatın belki % 30 ila 60 su ile seyreltilmesi normal bir uygulamadır [27].

2.2 GEOPOLİMER BETONUN ÖZELLİKLERİ

Standart Portland çimentosu uzun süredir beton üretiminde geleneksel ve yaygın olarak kullanılan bağlayıcı malzeme olmuştur. Bununla birlikte, klinker üretiminin çevresel etkileri nedeniyle, standart Portland çimentosu birincil yapı malzemesi olarak kullanımı son on yılda kapsamlı bir şekilde sorgulanmıştır. Aslında, dünya çapındaki çimento üretim tesislerinden Portland çimento klinkeri üretimi, yılda 1,5 milyar tona kadar CO_2 salmaktadır; bu, toplam insan yapımı CO_2 emisyonunun yaklaşık % 5'ini oluşturmaktadır ve istenmeyen eğilim devam ederse rakam artacaktır.

Gelişmekte olan birçok ülkede inşaat malzemeleri için doğal kaynak kıtlığı da uzun mesafeli nakliyeye yol açmış ve bu nedenle inşaat malzemelerinin üretim maliyetini önemli ölçüde artırmıştır. Yukarıda bahsedilen sorunların tümü, inşaat sektöründe sürdürülebilir kalkınma bağlamında değerlendirildiğinde aykırılıklar içermektedir. Bununla birlikte inşaat sektöründe sürdürülebilirliği sağlamak için acil çözüm önlemleri arayışı gün geçtikçe daha önemli hale gelmiştir. Bu durumla birlikte son yıllarda geopolimer beton anlamlı derecede önem kazanmıştır. Geopolimer beton sayesinde özellikle inşaat sektöründe hem atık malzemelerin kullanımıyla sürdürülebilirliğin sağlanması hem de küresel ısınmaya sebep olan karbondioksit emisyonuna önemli derecede katkısı olacaktır. Geopolimer betonun çevreye katkısının yanı sıra mekanik özelliklerinden dolayı da geleneksel betona alternatif olmuştur.

Geopolimer beton üretiminde malzeme olarak kireç taşı kullanılmadığından hem asit hem de tuz ortamlarında mükemmel özelliklere sahiptir. Özellikle zorlu çevre koşulları için uygundur. Geopolimer çimentonun harmanlanması için deniz suyu kullanılabilir. Bu özelliği sayesinde deniz ortamlarında ve tatlı su bulunmayan adalarda alternatif olarak kullanılabilir. Geopolimer malzemelerin kimyasal bileşimleri zeolit ile benzerdir, ancak amorf bir mikro yapı ortaya çıkarırlar. Yüksek alkali çözeltiler, geopolimer macunu çözündürmek ve oluşturmak için kaynak malzemelerdeki silikon ve alüminyum atomlarını indüklemek için kullanılır. Polimerizasyon işlemine, uygulanan ısı ve ardından kurutma ile yardımcı olunabilir. Kimyasal reaksiyon süresi hızlıdır ve gerekli kürleme süresi 24 ila 48 saat arasında olabilir. Davidovits, bu malzemenin mükemmel mekanik özelliklere sahip olduğunu, asidik çözeltilerde çözünmediğini ve yüksek alkalinite varlığında bile herhangi bir zararlı alkali-agrega reaksiyonu oluşturmadığını bildirmiştir.

Geopolimer betonda dayanım ve durabilite testleri ile birlikte kimyasal ve fiziksel özelliklerini araştırmak amacıyla birçok deneysel çalışmalar sürdürülmüştür. Davidovits geopolimer alanında yaptığı çalışmalar doğrultusunda geopolimer betonlar üzerinde kimyasal saldırılara karşı, aşınma ve çözünme, erken ve yüksek dayanım gibi deneyler sonucunda geleneksel betona alternatif olan geopolimer betonun birçok konuda daha iyi sonuç oluşturduğunu gözlemlemiştir. Çalışmasında geopolimer betonun 7 günlük basınç dayanımının 35-40 MPa'ya kadar ulaştığını göstermiştir. Bu durumda basınç dayanımının yaklaşık %85'inin olduğunu ve geopolimer betonda erken dayanımın geleneksel betondan daha hızlı ulaştığını belirlemiştir [28]

Geopolimer betonun basınç dayanımı ve işlenebilirliği, geopolimer macunu yapan kurucu malzemelerin oranlarından ve özelliklerinden etkilenir. Bu konuda yapılan deneysel sonuçlar aşağıda belirtilmiştir:

a. Daha yüksek konsantrasyonda (molar olarak) sodyum hidroksit çözeltisi, geopolimer betonun daha yüksek basınç dayanımı ile sonuçlanır.
b. Kütlece sodyum silikat çözeltisinin sodyum hidroksit çözeltisine oranı ne kadar yüksekse, geopolimer betonun basınç dayanımı o kadar yüksek olur.
c. Uçucu külün kütlece yaklaşık %4'üne kadar naftalin sülfonat esaslı süper akışkanlaştırıcı ilavesi, taze geopolimer betonun işlenebilirliğini artırır; bununla birlikte, süper akışkanlaştırıcı dozajı %2'den fazla olduğunda sertleşmiş betonun basınç dayanımında hafif bir bozulma olur.
d. Karışımın su içeriği arttığında taze geopolimer betonun çökme değeri artar.
e. H_2O-Na_2O molar oranı arttıkça geopolimer betonun basınç dayanımı azalır [29].

Geleneksel betonun yapısında bulunan kalsiyum hidroksit ile sodyum sülfat tepkimeye girerek kalsiyum sülfatı meydana getirmektedir. Beton içerinde bulunan kalsiyum sülfat sertleşmiş betonda, sülfat atakları sonucunda çatlak ve genleşmeler yaparak betonun yapısında bozulmalar oluşturmaktadır. Bu bozulmalar sonucunda betonun yapısında parçalanma ve yumuşumalar gözlemlenir. Geopolimer betonda ise ısı kürü ile sertleşmeye başlayan kalsiyum oranının az olması ve uçucu kül kullanılmasından dolayı sülfat atağına gösterdiği dayanım sonucunda bozulma ve çatlama görülme oranı geleneksek betona kıyasla daha azdır [30].

Geopolimer betonun yüksek sıcaklık etkisiyle birlikte basınç dayanımı göstermesi geleneksel betona alternatif olarak gösterilmesinde bir parametredir. Üretilen geopolimer betonlarda da farklı alkali aktivatör / bağlayıcı oranları, farklı kür şartları, farklı molariteye sahip sodyum hidroksit çözeltisi kullanımı, farklı alkali aktivatörlerin geopolimer betonda kullanımı mümkün olduğundan dolayı betonların basınç dayanımlarına bağlıdır. Geopolimer bağlayıcıların geopolimerizasyonu sonucunda C_3A ve $Ca(OH)_2$ gibi ürünler oluşmadığından, geopolimer bağlayıcılı betonların durabilite özelliklerinin de standart çimento ile üretilen betonlardan daha iyi olacağı beklenmektedir. Ayrıca geopolimer betonlar yüksek sıcaklıklara da dayanıklıdır [31] Kürleme sıcaklığının bakır madeni cevherleri (MT) bazlı geopolimer tuğlaların serbest basınç dayanımı (UCS) üzerindeki etkisi üzerine yapılan deneysel çalışma, en yüksek serbest basınç dayanımı geopolimer tuğlaları üreten optimum kür sıcaklığının 90 ° C olduğunu göstermiştir. Bundan daha yüksek herhangi bir sıcaklık, geopolimer tuğlaların serbest basınç dayanımında büyük bir düşüşe neden olacaktır.

Yapılan araştırmalarda, çok yüksek bir sıcaklığın hızlı polikondansasyon sürecine ve reaksiyona girmemiş silika ve alümina türlerinin çözünmesini engelleyecek aşırı erken geopolimerik jel oluşumuna neden olacağı sonucuna varmışlardır. Ayrıca, aşırı derecede yüksek kürleme sıcaklığı, gözenek çözeltilerinin hızlı buharlaşmasına neden olur ve eksik bir geopolimerizasyona neden olabilir. Optimum kürleme sıcaklığı, yaklaşık 15 MPa'lık serbest basınç dayanımlı geopolimer tuğlalar üretimine olanak sağlamıştır. Ridtirud vd., daha yüksek kürleme sıcaklığının, yani 60 ° C'nin, kürlenmenin erken yaşlarında, yani 7-28 gün boyunca hızlı bir mukavemet gelişimine yol açtığı sonucuna varmıştır. 28 günlük kürlemenin ardından, daha yüksek kürleme sıcaklığı için mukavemet gelişimi önemsiz kabul edilmiştir. Yüksek sıcaklıkta ilk kürleme, geopolimerizasyon reaksiyonunu hızlandırır ve böylece ortaya çıkan geopolimerin gücü iyileştirilir [32].

Genel olarak basınç dayanımı, daha yüksek geopolimerizasyon derecesinin daha yoğun geopolimer matrisi getirdiği ve dönüşlerde daha yüksek basınç dayanımı ve elastisite modülü ile sonuçlanan esneklik modülü ile ilişkilendirilebilir. Kimyasal aktivatör, geopolimer betonun basınç dayanımı gelişimi üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir. Bununla birlikte, ortaya çıkan geopolimer betonun elastisite modülü gibi diğer mekanik özellikler, tamamen kimyasal aktivatör dozajına bağlı değildir. Elastisite modülünün, geopolimer beton karışımlarında bulunan agrega miktarına göre belirlendiği bulunmuştur. Toplam agrega içeriğinde ve ayrıca

ince agreganın toplam agregaya oranının uygun şekilde ayarlanması, geleneksel betona kıyasla eşit veya daha yüksek esneklik modülüne sahip geopolimer beton ile sonuçlanabilir [33] Ayrı çalışmalarda, yüksek silikat içeriğinin geopolimer betonun elastikiyetini artırabileceği ve bunun sonucunda geleneksel betondan daha düşük bir elastisite modülü ile sonuçlandığı bildirilmiştir. Topark-Ngarm ve arkadaşları yüksek kalsiyum uçucu küllü geopolimer betonunun, daha yüksek Na_2O miktarına karşılık gelen daha düşük bir SS/SH oranı ile benzer veya daha yüksek elastisite modülü sergileyebileceğini bildirmişlerdir [34].

Beton yapıların güvenlik değerlendirmesi ve tasarımı ile ilgili olarak, betonun kırılma özelliklerinin yapısal tasarımda dikkate alınması gerektiği kabul edilmiştir. Örneğin, minimum eğilme ve kayma takviyesi üzerindeki sınırlar, beton kırılganlığı tarafından belirlenir. Bu nedenle, bu tür malzemelerle inşa edilen yapıların güvenliği sağlanacaksa, geopolimer betonların kırılma özelliklerinin değerlendirilmesi gerekmektedir. Ancak, geopolimer betonların kırılma özellikleri, mekanik özellikleri ve yapısal davranışları belirli bir dereceye kadar çalışılmış olmasına rağmen çok az ilgi görmüştür.

2.3 GEOPOLİMER BETONUN UYGULAMA ALANLARI

Geopolimer betonların dünyanın neredeyse her yerinde uygulama alanı bulduğunu söyleyebiliriz. Geopolimer bağlayıcıların uygulandığı alanlar zamanla epeyce genişlemiştir ve normal beton, hazır beton, betonarme, beton borular, harç, hafif beton gibi uygulamaları olan geopolimer bağlayıcıların kullanım alanları yapılan çalışmalarla genişlemeye de devam etmektedir. Davidovits'e göre geopolimerik malzemeler, otomobil ve havacılık, demir dışı dökümhaneler ve metalurji, inşaat mühendisliği ve plastik endüstrileri gibi endüstriler alanında geniş bir uygulama alanına sahiptir. Geopolimerik malzemelerin uygulama şekli, polisiyalattaki Si: Al atomik oranı açısından kimyasal yapıya göre belirlenir.

Alkali aktive edilmiş bağlayıcılar 60 yıldan daha uzun süredir bilinmektedir. Alkali aktive edilmiş bağlayıcılar kullanılarak yapılmış geniş ölçekli çalışmalardan biri de Ukrayna'da bulunan konut yapılarıdır. Bu evler demir-çelik atığının alkali aktivasyonu sonucu elde edilen Geopolimer bağlayıcı ile 1960 yılında 7,5 MPa tasarım mukavemetine göre inşa edilmişlerdir. Yaklaşık 52 sene sonra, yani 2012 yılında yapıdan alınan numuneler üzerinde yapılan basınç dayanımı deneyinde 14 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir [35].

2.4 GELENEKSEL BETONUN YAPISI VE ÖZELLİKLERİ

Beton, tüm dünyada yapılarda kullanılan önemli bir yapı malzemesidir. Yaygın olarak kullanılan düşük fiyatı, dayanıklılığı, bileşen malzemelerin içeriği ve herhangi bir şekil veya boyutta biçimlendirilebilmesi nedeniyle en yaygın kullanılan yapı malzemesi olarak kabul edilir. Beton üretiminde kullanılan bağlama teknikleri ve malzemeleri de inşaat teknolojisinde önemli kabul edilir. Örneğin çimento, yalın beton ve betonarme uygulamalarında en yaygın olarak kullanılan bağlayıcı malzemedir. Portland çimentosu (PC) üretimi dünya çapında yılda %9 artmaya devam ediyor. Bu artış oranı, çimento üretimi sırasında atmosfere büyük miktarda CO_2 salınması nedeniyle çevre için büyük bir tehlike oluşturmaktadır [36].

Dünya çapında beton tüketiminin yılda yaklaşık 11,5 milyar ton olduğu tahmin edilmektedir ve 2050 yılında; yılda 18 milyar ton beton talebi beklenmektedir. Portland çimentosunun üretimi, sera etkisine önemli bir katkı sağlayan karbondioksit (CO_2) salgılar. Bununla birlikte, geleneksel beton asitlere ve tuzlara karşı düşük kimyasal direnç, özellikle 500°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda düşük termal ve yangın direnci gibi bazı dezavantajlara sahiptir. Geleneksel betondaki önemli bir bileşen Portland çimentosudur. Bir ton çimento üretimi esnasında atmosfere yaklaşık olarak bir ton karbondioksit salınmaktadır. Dahası, çimento üretimi de önemli miktarda doğal kaynak tüketmektedir Portland çimentosu üretiminin ve atık malzemenin artmasının sebep olduğu çevre kirliliğini (karbondioksit) azaltmanın yollarından biri de alternatif bağlayıcılara yönelmektir. Bu sebeple, daha sürdürülebilir bir yaklaşım ve geleneksel betonun yerini almak için kullanılan mevcut katkı malzemelerin dikkatli bir şekilde gözden geçirilmesi son derece zorunlu hale gelmiştir [36].

2.5 GEOPOLİMER BETON VE GELENEKSEL BETONUN KARŞILAŞTIRILMASI

Günümüzde küresel ısınmanın olumsuz etkileri nedeniyle ortaya çıkan çevresel sorunlar gün geçtikçe artarak devam etmektedir. Bu artışın temel faktörlerinden biri olan enerji tüketimi beraberinde karbondioksit (CO_2) emisyonunda da artış sağlamaktadır. İnşaat sektörünün en önemli yapı malzemelerinden biri olan çimento, yüksek enerji tüketen bir üretim sistemi olması nedeniyle çevreye zararlı etkileri çok önemli bir sorun haline gelmiştir. Bu zararlı etkilerin azalması, çimento üretimiyle doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle son yıllarda yapılan araştırmalarla birlikte çimentoya alternatif malzemelere olan ilgi artmıştır. Çevre dostu bir alternatif olan geopolimer beton geleneksel betonun yerini alan yeniliklerden biridir.

Geleneksel betonda kullanılan çimento yerine geopolimer betonda kullanılan endüstriyel atıklar sayesinde hem sürdürülebilirlik hem de küresel ısınmaya olumlu katkılar sağlamıştır [37].

Sertleştirilmiş geopolimer betonun elastik özellikleri ve güçlendirilmiş geopolimer beton yapı elemanlarının davranışı ve mukavemeti, Portland çimento betonu durumunda gözlemlenenlere benzerdir. Ancak bazı özellikler yönünden geopolimer betonun geleneksel beton yerine alternatif olarak gösterilmektedir. Isıyla sertleşen, düşük kalsiyumlu uçucu kül esaslı geopolimer beton, aynı zamanda sülfat saldırısına karşı mükemmel direnç, iyi asit direnci gösterir, düşük sünmeye uğrar ve çok az kuruma büzülmesine sahiptir. Betonarme geopolimer beton kolonların ve kirişlerin davranış ve göçme modları, güçlendirilmiş Portland çimento beton kolonlar durumunda gözlemlenenlere benzer olduğu ortaya çıkmıştır. Test sonuçları, güçlendirilmiş Portland çimento beton kolonlar ve kirişler durumunda kullanılan hesaplama yöntemlerinin, güçlendirilmiş geopolimer beton kolonlar için geçerli olduğunu göstermiştir. Güçlendirilmiş geopolimer beton kirişlerin servis yükündeki orta açıklık sehimi, elastik eğilme teorisi ve Standartlarda verilen servis edilebilirlik tasarım hükümleri kullanılarak hesaplanmıştır. Servis yükünde test ve hesaplanan sapmalar arasında iyi korelasyon gözlendiği belirtilmiştir [38]

Yapılan deneysel çalışmalar doğrultusunda geopolimer betonun geleneksel betona alternatif olarak kullanılmasındaki avantajlar aşağıdaki gibi açıklanmıştır:

1) Çevre Dostu: Alkali çözeltisinde tepkimeye giren silikat veya alüminli silikat maddeleri yeryüzünde fazlasıyla bulunmaktadır ve bu durum geopolimer betonda hammaddenin istenilen miktarda olduğunu gösterir. Geopolimer beton makineleşmenin etkisiyle atıklardan değerlendirilerek kullanılır. Geopolimer betonun üretiminde geleneksel betona kıyasla daha az enerji harcanır. Böylelikle daha az karbondioksit salınımı gerçekleşir. Bunun yanı sıra bağlayıcı madde olarak metakaolin, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, cam tozu gibi endüstriyel atıklar kullanılır. Bu sayede hem sürdürülebilirlik hem de atık yönetimi gerçekleştirir.

2) Yüksek Sıcaklıklara Dirençli: Doğal minerallerin kimyasal kompozisyonlarının ve kristal yapılarının çeşitli yöntemlerle değiştirilmesi sonucu üretilir. Bekletilerek kür edilir. Çok kısa bir zaman diliminde hedeflenen dayanımda betonlar elde edilir. Bu işlem süreci Portland çimentolu betonların hazırlanmasına benzerdir.

3) Kimyasallara Karşı Dirençli: Geopolimer malzemeler üstün fiziksel ve mekanik özelliklerine ilave olarak kayda değer kimyasal dayanıklılığa da sahiptirler. Geopolimer hamur ve harçlar sülfat, deniz suyu, asidik ortamlar ve alkali silika reaksiyonu etkilerine karşı hedeflenen optimum dayanıklılığa sahiptirler fakat bu konu hakkında genel bir bilgi yoktur. Halen geopolimer betonlar üzerinde kimyasal etkilere karşı deneyler yapılmaktadır.
4) Performans özellikleri: Geopolimer betonun işlenebilirliği açısından avantajlar içermektedir. Bu betonların en faydalı ve en dikkat çekici özelliği olumsuz şartlar karşısında normal betona göre daha uzun yıllar dayanımını kaybetmeden yapı fonksiyonunu sürdürmesidir. Geopolimer betonlarda normal betonlara göre suyun buharlaşması daha az olduğu için, geopolimer betonlarda çatlaklara daha az rastlanmaktadır. Bu betonlara ısıl kür işlemi uygulandığında, bir nevi ısı kürü yapılarak beklenen basınç dayanımının % 70 seviyelerine ulaşmaktadır. Geopolimer betondan üretilmiş yapıların üretim süreci göz önüne alındığında kısa vadede zarar gibi gözükürken uzun vadede kâr elde edilir [39].

Geopolimer betonun sunduğu mekanik özellikler, yapısal uygulamalarda kullanımının gelişmiş bir dayanıklılık ve yangına dayanıklılık perspektifinden faydalı olduğunu göstermektedir. Yüksek kürleme sıcaklıklarında yüksek mukavemet kazancı, geopolimer betonu prekast yapısal uygulamalara kazandırır. [40]

3 MALZEME VE YÖNTEM

3.1 GİRİŞ

3.2 MALZEMELER

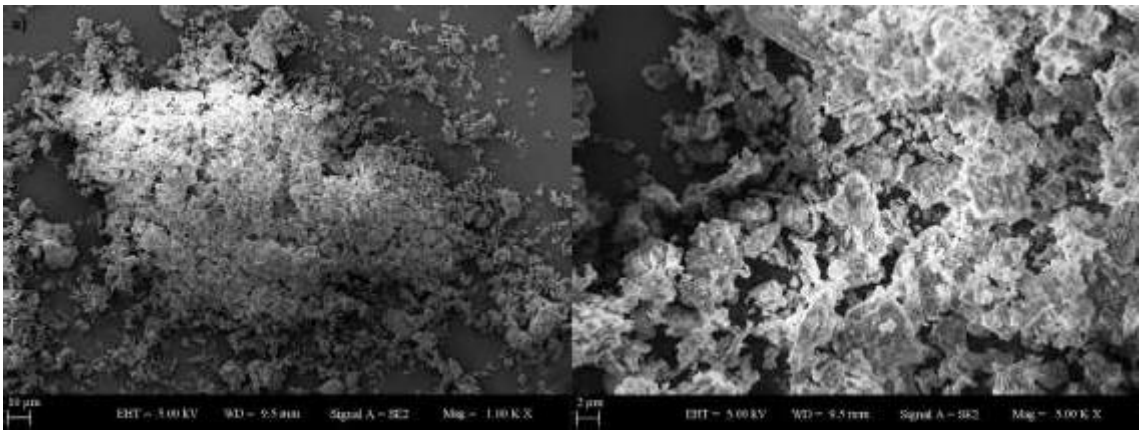
3.2.1 Metakaolin (MK)

Bu çalışmada ana malzeme olarak kullanılan metakaolin, Kaolin Endüstriyel Mineraller San. ve Tic. A.Ş. (İstanbul, Türkiye) firmasından temin edilmiştir. Özgül ağırlığı 2,60 g/cm^3'tür. Silis+alumin+demir oksit oranı %92,93 > %70 olup puzolanik aktivitesi yüksektir. Metakaolinin kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir.

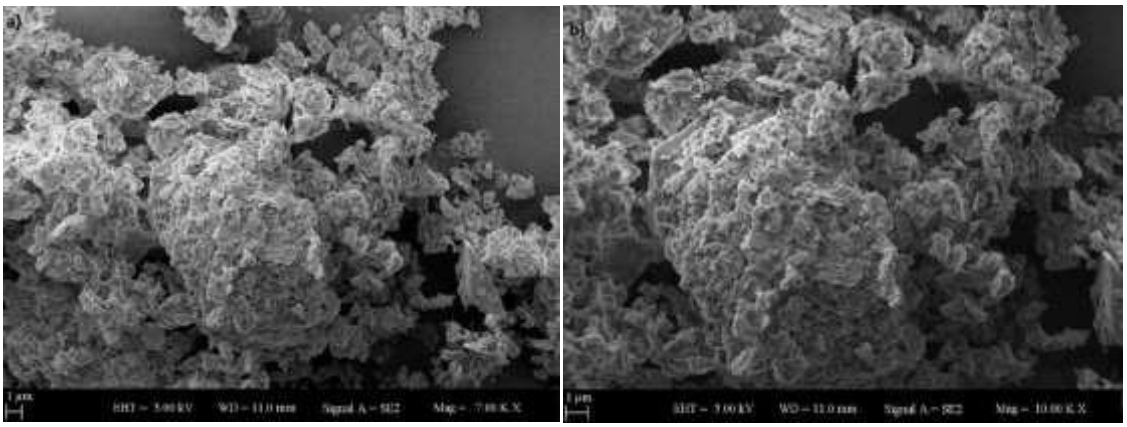
Tablo 1: Metakaolinin kimyasal özellikleri.

Kimyasal Analiz (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	SO_3	TiO_2	Na_2O	Kızdırma Kaybı
MK	51,52	40,18	1,23	2,00	0,12	0,53	0,0	2,27	0,08	2,01

Metakaolinin kütle yoğunluğu 0,3-0,4 (g/cm^3) aralığında olup fiziksel olarak ince taneli toz halindedir. Rengi kirli beyaz olmakla birlikte ince taneli olduğu için reaktif yapıdadır [41]. Metakaoline ait SEM görüntüleri Şekil 3 ve Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 3:Metakaolinin SEM içyapı görüntüleri: a) 1000 kez ve b) 5000 kez büyütülmüş



Şekil 4: Metakaolinin SEM içyapı görüntüleri: a) 7000 kez ve b) 10000 kez büyütülmüş

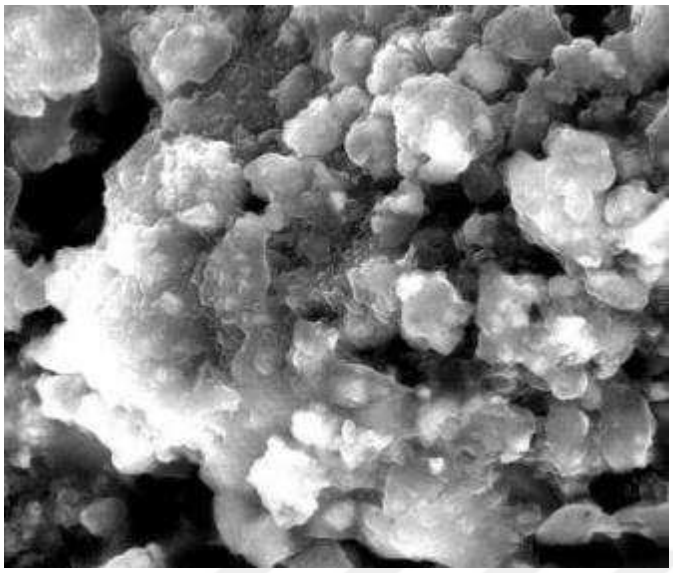
3.2.2 Seramik Tozu (ST)

Bu çalışmada kullanılan seramik tozu, Manisa'da üretim yapan Serel Seramik firmasından temin edilmiştir. Özgül ağırlığı 2,85 g/cm^3'tür. Silis+alumin+demir oksit oranı %85,90 > %70 olup puzolanik aktivitesi yüksektir. Seramik tozunun kimyasal bileşimi Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2: Seramik tozunun kimyasal özellikleri.

Kimyasal Analiz (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	SO_3	TiO_2	SrO_2	Kızdırma Kaybı
ST	63,29	18,29	4,32	4,46	0,72	2,18	0,10	0,61	0,02	1,61

Seramik tozunun özgül yüzey alanı 458 (m^2/kg) olup ortalama parçacık boyutu 3,5 μm.'dur. İnce taneli olduğu için reaktif yapıdadır. Seramik tozuna ait SEM görüntüleri Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5: Sentezlenmiş seramik tozunun SEM görüntüleri.

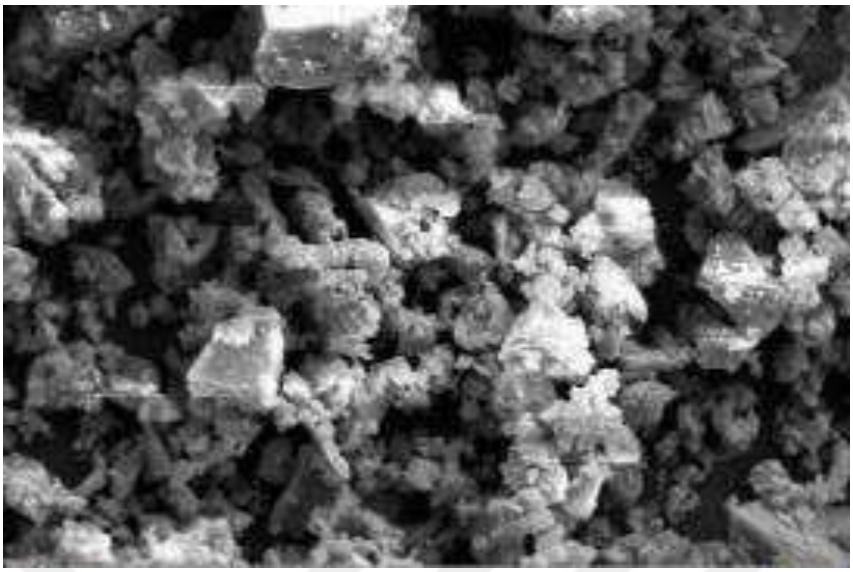
3.2.3 Cam Tozu (CT)

Çalışmada kullanılan cam tozu Şişecam A.Ş Yenişehir Fabrikasından temin edilmiştir. Özgül ağırlığı 2,45 g/cm^3'tür. Silis+alumin+demir oksit oranı % 74,31 > % 70 olup puzolanik aktivitesi yüksektir. Cam tozunun kimyasal bileşimi Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3: Cam tozunun kimyasal özellikleri.

Kimyasal Analiz (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	SO_3	Cl^-	Na_2O	Kızdırma Kaybı
CT	71,40	2,54	0,37	11,20	1,60	0,36	0,16	0,04	12,25	0,82

Cam tozunun özgül yüzey alanı 492 (m^2/kg) olup ince dane çaplı bir atık malzemedir. İnce taneli olduğu için reaktif yapıdadır. Cam tozuna ait SEM görüntüleri Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6: Atık cam tozuna ait SEM görüntüsü.

3.2.4 Tuğla Tozu (TT)

Çalışmada kullanılan tuğla tozu Yüksel Tuğla Sanayi tuğla fabrikasından temin edilmiştir. Özgül ağırlığı 2,64 g/cm^3'tür. Silis+alumin+demir oksit oranı % 77,63 > % 70 olup puzolanik aktivitesi yüksektir. Tuğla tozunun kimyasal bileşimi Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4: Tuğla tozunun kimyasal özellikleri.

Kimyasal Analiz (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	SO_3	TiO_2	Na_2O	Kızdırma Kaybı
TT	58,50	15,61	3,52	13,79	2,07	2,81	2,04	0,46	0,38	--

Çalışmada kullanılan tuğla tozu ortalama dane çapı 13-16 μm aralığında olan bir tuğla tozudur. Ortalama partikül boyutu küçük olduğu için daha çok yüzey alanına sahip olan tuğla tozunun puzolanik aktivitesinin fazla olduğu söylenebilir.

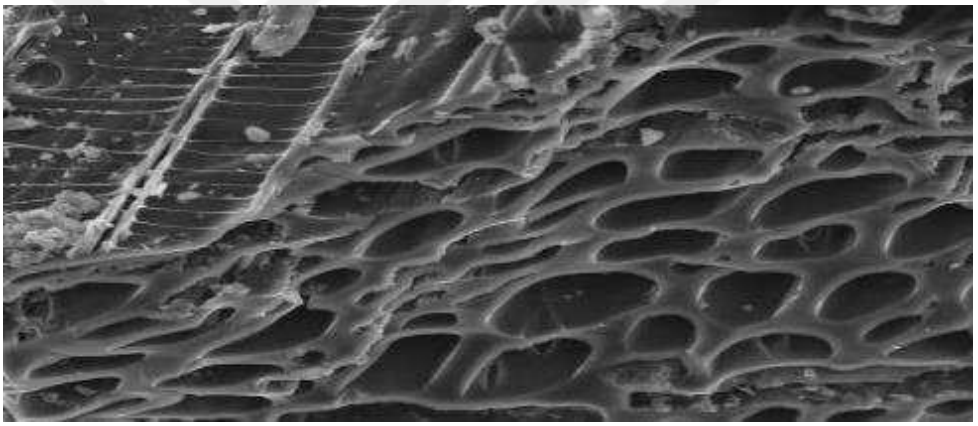
3.2.5 Odun Külü (OK)

Bu çalışmada kullanılan odun külü gürgen odunun yakılması ile elde edilmiştir. Özgül ağırlığı 1,5 g/cm^3'tür. Silis+alumin+demir oksit oranı % 62,14 < 70 olup puzolanik aktivite için gerekli olan seviyenin altındadır. Bu durum odun külünün puzolanitesini azaltmaktadır. Odun külünün kimyasal bileşimi Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5: Odun külünün kimyasal özellikleri.

Kimyasal Analiz (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	SO_3	TiO_2	Na_2O	Kızdırma Kaybı
OK	31,80	28,00	2,34	10,53	9,32	10,38	0,3	0,7	6,5	27

Yapılan kimyasal analize göre kızdırma kaybı %12'den büyük çıkmıştır, bu da odun külünün kayda değer miktarda yanmamış karbon içerdiği ve bunu yanarak kaybettiği anlamına gelmektedir. Yanmamış karbon da puzolanik olmadığı için tekrardan puzolanik aktivitesinin düşük olduğunu söylenebilir. Odun külü reaktif agreganın kullanılacağı inşaat işleri için uygun olmayacaktır. Odun külüne ait SEM görüntüleri Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7:Elektron mikroskobu altında odun külü lifleri.

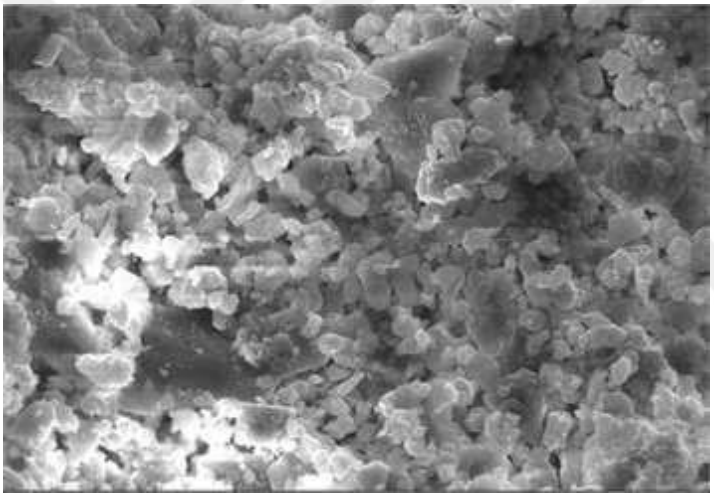
3.2.6 Mermer Tozu (MT)

Bu çalışmada kullanılan mermer tozu, Afyonkarahisar sanayi bölgesinden havuz çökeltisi şeklinde temin edilmiştir. Özgül ağırlığı 2,59 g/cm^3'tür. Silis+alumin+demir oksit oranı %28.82 < 70 olup puzolanik aktivite için gerekli olan seviyenin altındadır. Bu durum mermer tozunun puzolanitesini azaltır. Mermer tozunun kimyasal bileşimi Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6: Mermer tozunun kimyasal özellikleri.

Kimyasal Analiz (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Cl^-	SO_3	TiO_2	Na_2O	Kızdırma Kaybı
MT	19,45	5,34	4,03	62,62	2,05	0,008	2,69	0,001	0,002	--

Yapısı gereği kızdırma kaybına uğramamış olan mermer tozu kimyasal analizi sonucunda minimum değer olan %70 altında kalan silis, alumina ve demir bileşiminden dolayı puzolanik aktivitesi oldukça düşük çıkmıştır. Çalışmada kullanılan mermer tozunun Blaine yüzey alanı 4372 (cm^2/g) olup SEM görüntüleri Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8: Elektron mikroskobu altında mermer tozunun SEM görüntüsü.

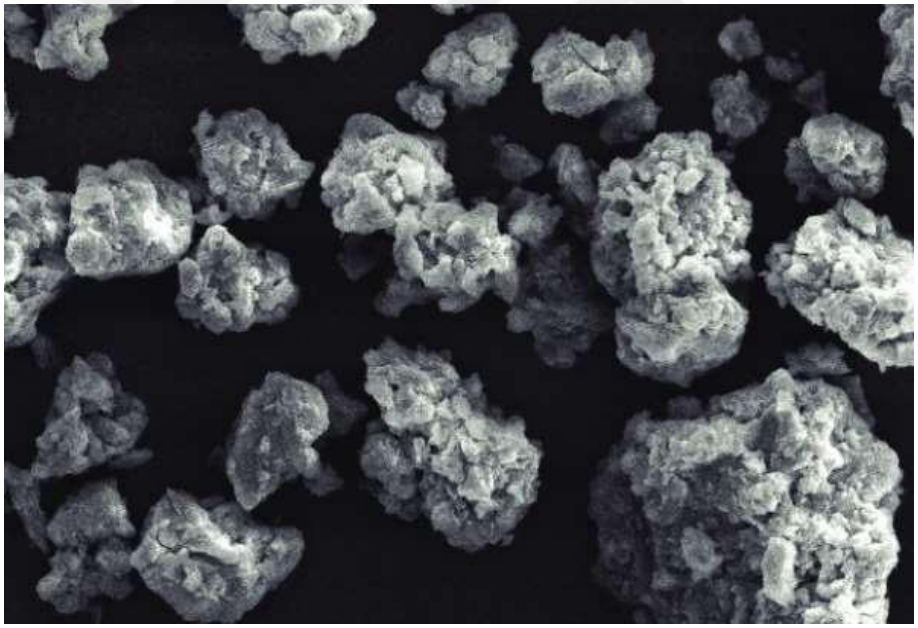
3.2.7 Zeolit Tozu (ZT)

Bu çalışmada kullanılan zeolit tozu, Gördes bölgesinde faaliyet gösteren Enli Madencilik San. ve Tic. A.Ş. firmasından temin edilmiştir. Klinoptiolit türdeki öğütülmüş doğal zeolitin özgül ağırlığı 2,17 (g/cm^3)'tür. Blaine özgül yüzey değeri ise 9660 (cm^2/g) dır. Silis+alumin+demir oksit oranı = % 76,41 > %70 olup puzolanik aktivitesi yüksektir. Zeolit tozunun kimyasal bileşimi Tablo 7'de verilmiştir

Tablo 7: Zeolit tozunun kimyasal özellikleri.

Kimyasal Analiz (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	SO_3	TiO_2	Na_2O	Kızdırma Kaybı
ZT	63,01	10,72	2,68	3,87	1,07	3,80	0,22	0,001	0,23	14

Doğal zeolit katkısı içeren betonlar üzerinde yapılan araştırmalar, sahip olduğu yüksek puzolanik aktiveden dolayı, zeolitin beton özelliklerini iyileştirdiğini ve yüksek performanslı beton üretiminde kullanılabileceğini ortaya koymaktadır. Doğal zeolitler, alkali-agrega reaksiyonu ve sülfat atağı sonucunda ortaya çıkacak zararlı hacim genleşmelerini önleyerek beton durabilitesine katkıda bulunmaktadır. Şekil 9'da zeolitin SEM görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil 9: Doğal zeolit tozuna ait SEM görüntüsü.

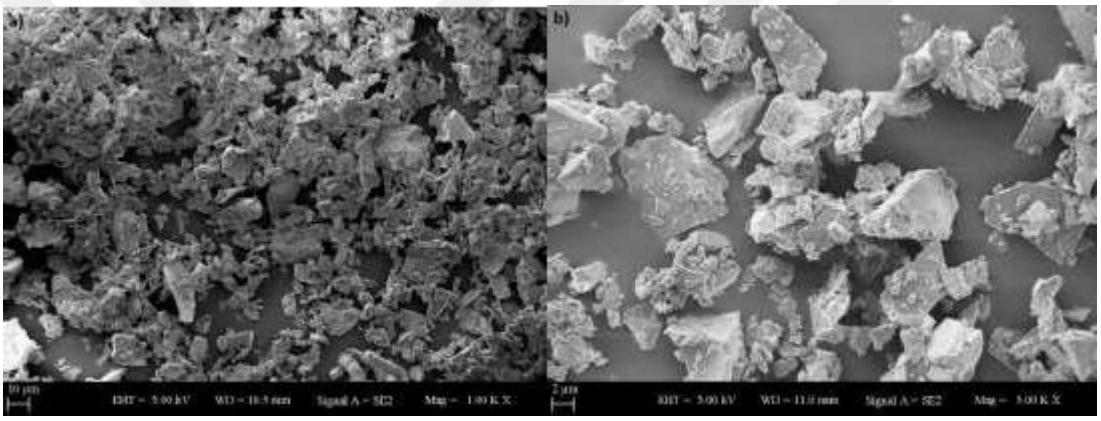
3.2.8. Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, Bolu Çimento Sanayii A.Ş. firmasından temin edilmiştir. Cürufun özgül ağırlığı 2.91 (g/cm^3) ve 45 mikronluk elek üzerinde kalan miktarı %1.4'tür. Silis+alümin+demir oksit oranı % 54,48 < %70 olup puzolanik aktivite için minimum yüzde şartının altında kalmaktadır. Cürufun kimyasal bileşimi Tablo 8'de verilmiştir.

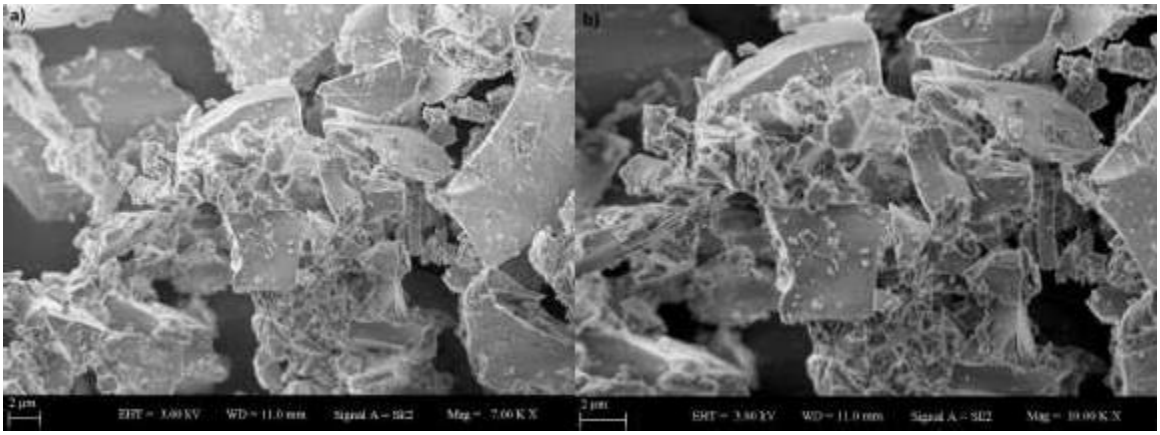
Tablo 8: Cürufun kimyasal özellikleri.

Kimyasal Analiz (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	SO_3	TiO_2	Na_2O	Kızdırma Kaybı
ÖGYFC	40,55	12,83	1,10	35,58	5,87	0,68	0,22	0,75	0,79	0,03

Dane çapı küçük olan cüruf ince taneli bir malzeme olduğu için reaksiyona girişte daha fazla yüzey alanına sahip olması bir avantaj olarak söylenebilir. Cüruf için SEM görüntüleri Şekil 10 ve Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 10: Cürufun SEM içyapı görüntüleri: a) 1000 kez ve b) 5000 kez büyütülmüş.



Şekil 11: Cürufun SEM içyapı görüntüleri: a) 7000 kez ve b) 10000 kez büyütülmüş.

3.2.9 Kimyasal Aktivatörler

Araştırmada alkali aktivatörler olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanılmıştır. Merck firmasından tedarik edilen sodyum silikat çözeltisi, 3.29'a eşit bir SiO_2/Na_2O molar oranına

sahiptir (SiO_2 = %27, Na_2O = %8.2). NaOH çözeltisi, saf su içinde NaOH parçacıklarının (% 99 saflık, Merck) çözülmesiyle 12M'lik bir konsantrasyonla hazırlanmıştır. Sodyum silikatın ve sodyum hidroksitin özellikleri Tablo 9 ve 10'da verilmiştir.

Tablo 9: Sodyum hidroksitin kimyasal özellikleri.

NaOH (%)	Na_2CO_3 (%)	Cl (%)	SO_4 (%)	Al (%)	Fe (%)
99.1	0.3	$\leq$ 0.01	$\leq$ 0.01	$\leq$ 0.002	$\leq$ 0.002

Tablo 10: Sodyum silikatın kimyasal özellikleri.

Na_2O (%)	SiO_2 (%)	Yoğunluk (gr/ml) (20^oC)	Fe (%)	Ağır metaller (Pb gibi) (%)
8.2	27.0	1.360	$\leq$ 0.005	$\leq$ 0.005

3.2.10 Lifler

3.2.10.1 Polipropilen Lif (PP)

Bu çalışmada geopolimer harçların eğilme dayanımı üzerinde araştırma yapmak için polipropilen lif kullanılmış ve bu lifin yüksek sıcaklık ve aşınma dayanımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Polipropilen lifin (Şekil 12) özellikleri Tablo 11'de verilmiştir.

Tablo 11: Polipropilen lifin özellikleri.

Lif Tipi	Uzunluk (mm)	Çap (mm)	Özgül Ağırlık	Çekme Dayanımı (MPa)	Narinlik
PP	12	0.0075	0.91	750	1600



Şekil 12: Polipropilen lif.

3.2.10.2 Polivinil Alkol Lif (PVA)

Bu çalışmada basınç ve eğilme dayanımına etkisini araştırmak üzere polivinil alkol lifler kullanılmıştır. Polivinil Alkol (PVA), yarı saydam, beyaz veya krem renkli granül özelliklere sahiptir. Yoğunluğu 1.21 gr/cm^3, erime noktaları 212-267 ^{o}C aralığındadır.

3.2.10.3 Bazalt Lif

Betonda çekme dayanımı ve kırılma enerjisi özelliklerine etkisini araştırmak üzere bazalt lifler kullanılmıştır. Bazalt liflerin yoğunluğu 2.8-2.9 gr/cm^3 arasında değişmektedir. Şekil 13'te bazalt lif örneği gösterilmektedir.



Şekil 13: Bazalt lif örneği.

3.2.10.4 Cam Lif

Çalışma kapsamında eğilme özelliklerini tespit etmek amacıyla diğer liflerle birlikte cam lifte kullanılmıştır.

3.3 DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Tez kapsamında 50mmx50mmx50mm küp ve 40mmx40mmx160mm prizma numuneler üretilmiştir. Numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek adına eğilme,basınç ve ultrases geçiş hızı deneyleri yapılmıştır. Ayrıca geopolimer harç serilerinin birim hacim ağırlık, deneyleri yapılmıştır. Numunelerin durabilitelerinin araştırılması adına yüksek sıcaklık, donma çözülme, aşınma testleri yapılmıştır. Ayrıca, sodyum sülfat, magnezyum sülfat, çözeltilerinde geopolimer harçların testleri yapılmıştır.

3.3.1 Basınç Dayanımı Testi

Geopolimer harç numuneleri, eğilme dayanımı testi için 40mmx40mmx160mm boyutlarında prizma ve basınç dayanımı testi için 50mmx50mmx50mm küp boyutlarında üretilmiştir. Basınç testi otomatik test cihazında küp numuneler üzerinde metal kırma başlığı ile ve TS EN 196-1, 2012'ye [42] uygun biçimde uygulanmıştır (Şekil 14-16). Numunenin kalıba dökümü sırasında üst yüze gelen taraf uygulanan basınç testine paralel olarak yerleştirilmiştir. Basınç dayanımı testleri 7. ve 28. günlerde uygulanmıştır. Her seri için 3 adet numune kullanılmıştır. Testte kullanılan üç numunenin basınç dayanımlarının ortalaması, deneyde kullanılan serinin basınç dayanımı olarak raporlanmıştır. Basınç dayanımı, numunenin nihai yük ile kesit alanı arasındaki oran kullanılarak (3.1) denklemine göre bulunmaktadır.

$$\square = \frac{\square}{\square} \qquad (3.1)$$

☐: Basınç dayanımı, (N/mm^2),

P: Prizmanın kırıldığı anda ortasına uygulanan kuvvet (N),

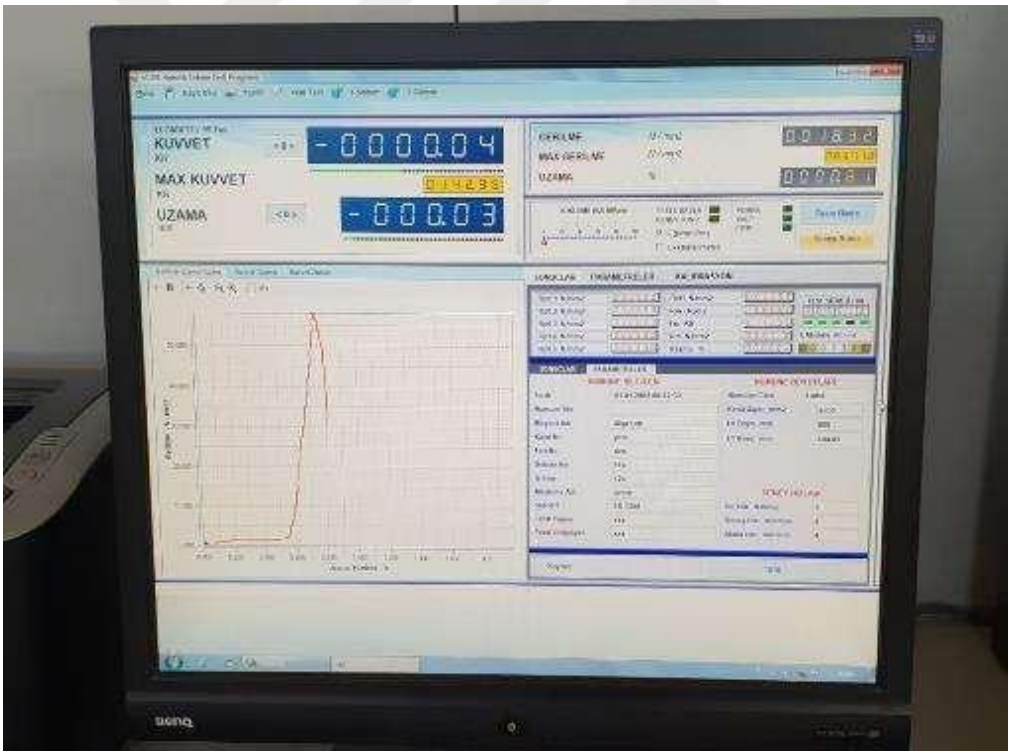
A: Kesit alanı



Şekil 14: 50mmx50mmx50 mm küp numunelerde basınç dayanımı testi.



Şekil 15: 40mmx40mm numunelerde basınç dayanımı testi.



Şekil 16: Basınç test cihazı ekranı.

3.3.2 Eğilme Dayanımı Testi

Geopolimer harç numunelerin eğilme dayanımı sonuçlarını tespiti amacıyla için 40mmx40mmx160 mm boyutlarında prizma numuneler kullanılmıştır. Test makinesinde

numunelere tek noktadan, TS EN 1015-11, 2000'e [43] uygun yükleme yapılmıştır. Numunenin kalıba dökümü sırasında üst yüze gelen taraf, uygulanan eğilme testine paralel olarak yerleştirilmiştir. Yükleme yapılırken cihazın yükleme başlığı numunenin tam ortasına denk getirilmiş ve mesnetler arası açıklık 10 cm olacak şekilde ayarlanmıştır (Şekil 17). Eğilme dayanımı testleri 7. ve 28. günlerde uygulanmıştır. Kullanılan üç numunenin eğilme dayanımı ortalaması, numunelerin eğilme dayanımı olarak raporlanmıştır.

Eğilme çekme dayanımı, (3.2) denklemine göre bulunmaktadır.

Eğilme çekme dayanımı $\square = \frac{3\square\square}{2\square\square^2}$ (3.2)

$\square$: Eğilme çekme dayanımı,

(N/mm^2) b: Prizma kesitinin eni

(mm),

d: Prizma kesitinin yüksekliği (mm),

P: Prizmanın kırıldığı anda ortasına uygulanan kuvvet (N),

L: Mesnet silindirleri arasındaki uzaklık (mm) dir.

Bu tez kapsamında bütün deneysel çalışma adımlarında numunelerinin eğilme dayanımı sonuçlarına bakılmıştır.



Şekil 17: Eğilme dayanımı testi.

3.3.3 Ultrases Geçiş Hızı Testi

Geopolimer harç numunelerinin ultrases geçiş hızlarının belirlenmesi amacıyla ultrases geçiş hızı testi yapılmıştır. Numunelerin pürüzlü olan yüzeylerine jel sürülerek, jel sürülen kısımlara transduserler numune boyunca tutulmuş ve ölçülmüştür (Şekil 18-19). Her numune için iki okuma gerçekleştirilmiştir ve ortalamaları alınmıştır. Ultrases geçiş hızı birimi m/sn'dir. Tez kapsamında kalan tüm adımlarda ultrases deneyi sonuçlarına bakılarak devam edilmiştir.



Şekil 18: Ultrases geçiş hızı test cihazı.



Şekil 19: Ultrases geçiş hızı test cihazı seti.

3.3.4 Birim Hacim Ağırlık, Boşluk Oranı ve Su Emme Deneyleri

Üretilen 50mmx50mmx50mm boyutlarındaki geopolimer numuneler 48 saat süresince etüvde tutularak etüv kurusu ağırlığa getirilmiş etüv kurusu ağırlığı (A) tespit edilmiştir. Daha sonra

48 saat boyunca oda sıcaklığında, su içinde bekletilip çıkarıldıktan sonra doygun kuru yüzey ağırlığı (B) bulunmuştur (Şekil 20). Arşimed prensibi kullanılarak su içindeki ağırlığı (C) tespit edilmiştir (Şekil 21). Birim Hacim Ağırlık, Boşluk Oranı ve Su Emme sonuçları verilen ilgili bağıntılar (3.3-3.5) aracılığıyla belirlenmiştir.

$$\text{Birim Ağırlık } (gr/cm^3) = A/(A-C) \quad (3.3)$$

$$\text{Boşluk Oranı } (\%) = [(B-A)/(B-C)] \times 100 \quad (3.4)$$

$$\text{Su emme Oranı } (\%) = [(B-A)/(A)] \times 100 \quad (3.5)$$

A= Kuru haldeki tespit edilen ağırlığı (gr)

B=Doygun kuru yüzey halde tespit edilen ağırlığı (gr)

C= Su içinde tespit edilen ağırlığı (gr)



Şekil 20:Numunelerin su içinde bekletilmesi.



Şekil 21: Arşimed deney seti.

3.3.5 Aşınma Dayanımı Testi

Geopolimer harç numunelerin aşınma sebebiyle ağırlık kaybına uğradığı tespit edilmiştir. Bu test için Abrasion Bohme aşınma makinesi (Şekil 22) kullanılmıştır. Numunelere, 294 N'luk bir yük ile 22 devir boyunca cihaza ilave edilen 20gr ağırlığındaki zımpara tozu vasıtasıyla aşındırma yapılmıştır. Bu deney için 71 ± 1,5 cm boyutlu küp numuneler üretilmiştir. Bu prosedür, her numune için 16 kez tekrarlanmış ve her bir aşınma süreleri tamamlandıktan sonra ağırlık kaybı ve boyut kaybı ölçülmüştür. İlk aşınmadan sonraki ve ortalama aşınma kaybı değerleri hesaplanmış ve sonuçlar yorumlanmıştır.



Şekil 22: Aşınma testi makinesi.

3.3.6 Yüksek Sıcaklık Dayanımı Testi

En yüksek basınç dayanımlı geopolimer harç numune serilerinin tespit edilmesinden sonra, bu geopolimer seriler 28 günden sonra yüksek sıcaklık fırınında (Şekil 23-24) 200, 400, 600 ve

800°C sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Deney öncesi numuneler etüvde 24 saat kurutulmuştur. Yüksek sıcaklık fırınında 5°C/dakika sıcaklık artış hızı ayarlanmıştır. Yüksek sıcaklığa tabi tutulan numunelerin daha sonra, termik şoka uğramaması için fırında oda sıcaklığına kadar soğumasına izin verilmiştir. Numuneler, ısıl işlem öncesi ve sonrası olarak analiz edilmiş ve fiziksel ve mekanik değişiklikler dikkate alınmıştır. Basınç dayanımı, eğilme dayanımı, ultrases geçiş hızı ve ağırlık kaybı incelemeleri yapılmıştır.



Şekil 23: Yüksek sıcaklık fırını



Şekil 24: Yüksek sıcaklık fırınına konulan numuneler.

3.3.7 Donma Çözülme Dayanımı Testi

En yüksek basınç dayanımlı geopolimer harç numune serilerinin tespit edilmesinden sonra, bu geopolimer seriler ve karşılaştırma amacıyla Portland çimentosu harçları 28 günden sonra

donma-çözülme döngüleri için test edilmiş, toplam 56 adet donma-çözülme döngüsüne tabi tutulmuşlardır. Her döngüde, donma periyodu 90 dakika, çözülme periyodu 30 dakika olarak belirlenmiş, ayrıca testin sıcaklık aralığı 4°C ile -18°C olarak ayarlanmıştır. Çevrimler bittikten sonra, numuneler, donma çözülme öncesi ve sonrası olarak analiz edilmiş ve fiziksel ve mekanik değişiklikler dikkate alınmıştır. Basınç dayanımı, eğilme dayanımı, ultrases geçiş hızı ve ağırlık kaybı incelemeleri yapılmıştır. Şekil 25 ve 26'da sırasıyla donma-çözülme makinesini ve test edilen numuneleri göstermektedir. Şekil 27'de donma çözülme kabini çalışma ekranı gösterilmiştir.



Şekil 25:Donma çözülme kabini.



Şekil 26: Havada donma çözülme.



Şekil 27: Donma çözülme kabini çalışma ekranı.

3.3.8 Sülfat Etkisi Deneyi

En yüksek basınç dayanımlı geopolimer harç numune serilerinin tespit edilmesinden sonra, bu geopolimer seriler ve karşılaştırma amacıyla Portland çimentosu harçları 28 gün sonunda oda sıcaklığında plastik saklama kutusunda %10 Sodyum Sülfat (Na_2SO_4) ve %10 Magnezyum Sülfat ($MgSO_4$) çözeltilerine 6 ay kadar maruz bırakılmıştır. Numuneler, sülfat çözeltilerinin daha iyi emilmesi ve daha etkili olmasını sağlamak için deney öncesi 24 saat süreyle etüve 105°C'de konulmuştur. Çözeltinin konsantrasyonu korumak için sülfat çözeltileri 1., 2., 3. ve 6. aylarda yenilenmiştir. Sülfat etkisi incelenecek numunelerin 1 birim hacmi için 4 birim hacim sülfat çözeltisi plastik saklama kutusuna konulmuştur. 90 ve 180 gün sonunda numuneler, sülfat etkisi öncesi ve sonrası olarak analiz edilmiş ve fiziksel ve mekanik değişiklikler dikkate alınmıştır. Basınç dayanımı, eğilme dayanımı, ultrases geçiş hızı ve ağırlık kaybı incelemeleri yapılmıştır. Ağırlık kaybının ölçüldüğü gün, numuneler sülfat çözeltisinden çıkarılmış ve ölçümden önce temizlenip kurutulmuştur. Şekil 28 ve 29'da sırasıyla sodyum sülfat ve magnezyum sülfat çözeltilerine maruz bırakılmış numuneleri göstermektedir (Şekil 30).



Şekil 28: Sodyum sülfat çözeltisi.



Şekil 29: Magnezyum sülfat çözeltisi.

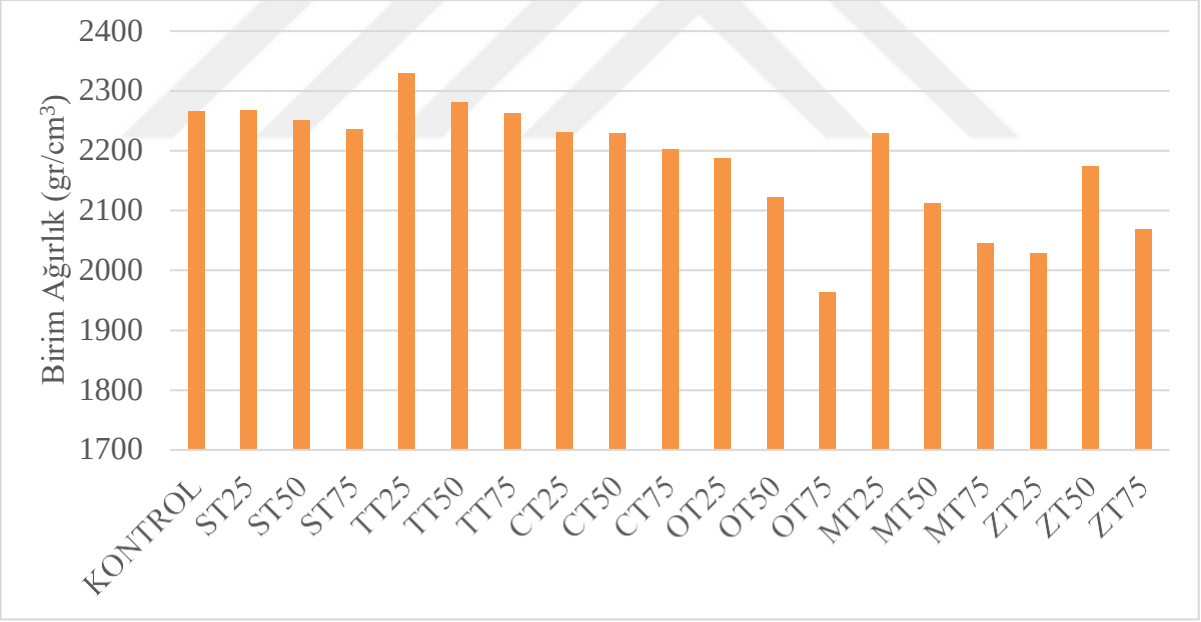


Şekil 30: Sodyum ve magnezyum sülfat etkisi deneyi.

4 BULGULAR

4.1 BİRİM HACİM AĞIRLIK SONUÇLARI

Geopolimer harçların ortalama birim ağrılık sonuçları Şekil 31'de gösterilmiş olup ortalama birim ağırlık değerinin 2.18 gr/cm^3 olduğu sonucu ortaya çıkmıştır. Tuğla tozu ikamesi referans seriye nazaran birim ağırlık değerlerini oldukça geliştirmiştir. Ancak tuğla tozu ikamesi ile birim ağırlık değerlerinin referans seri ile aynı seviyelere yaklaştığı görülmüştür. En düşük birim ağırlık değeri odun tozu ikameli serilerden elde edilmiştir. Odun tozu ikamesi ile birim ağırlığın daha da azaldığı görülmektedir. Odun tozunun diğer endüstriyel atıklara kıyasla oldukça düşük bir birim ağırlık değerine sahip olması beklendiği gibi ikame oranının artışıyla birim ağırlıkların düşüşüne sebebiyet vermiştir. En yüksek birim ağırlık değeri ise tuğla tozu ve seramik tozlu serilerden elde edilmiştir. Endüstriyel atıkların birim ağırlık değerleri düşünüldüğünde ikame oranları ile oldukça tutarlı değerlerin elde edildiği söylenebilir.



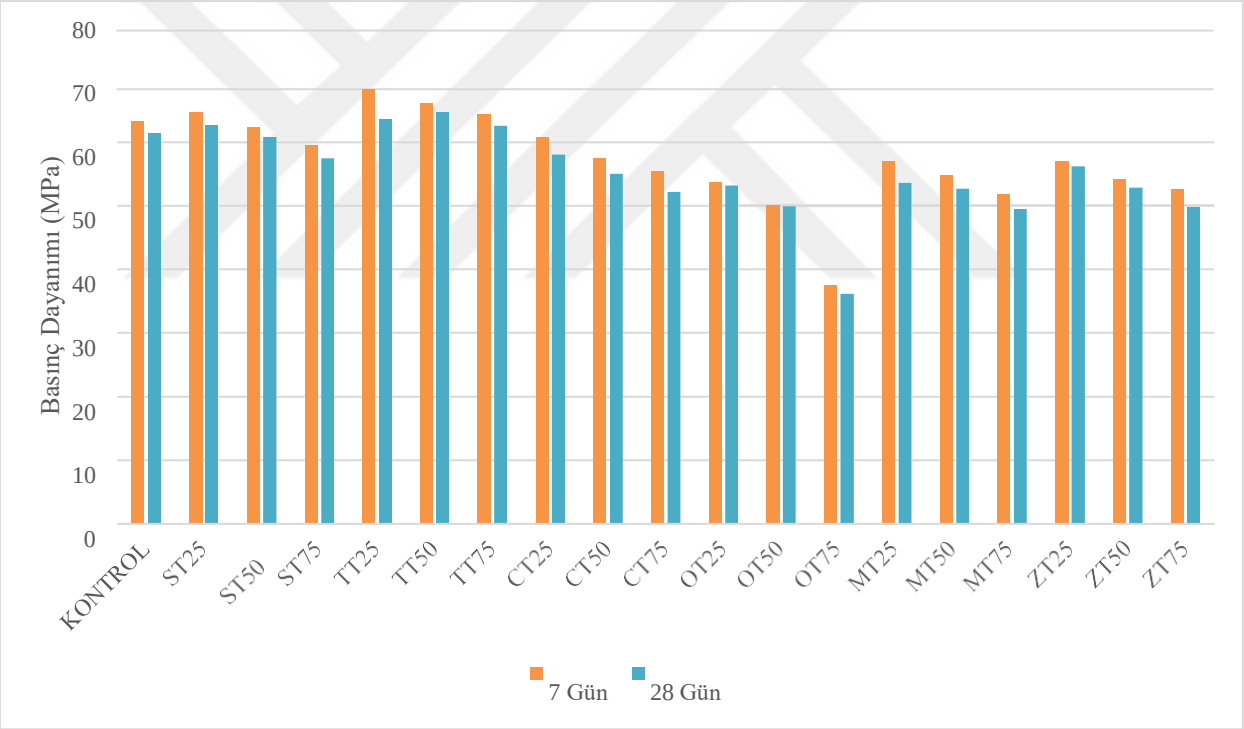
Şekil 31: Birim ağırlık sonuçları.

4.1 BASINÇ VE EĞİLME DAYANIMI SONUÇLARI

4.1.1 Basınç Dayanımı Sonuçları

7 ve 28 günlük basınç dayanımı sonuçları Şekil 32'de gösterilmektedir. 28 günlük en yüksek basınç dayanımı tuğla tozu ikameli serilerden elde edilmiştir. Tuğla tozu ikameli seriler

ortalama 63,5 Mpa'lık bir basınç dayanımı sonucu sergileyerek referans seriye nazaran tüm ikame değerlerinde artış gösteren seriler olmuşlardır. Tuğla tozu ikamesinin belirli bir değere kadar (%50) en yüksek artışı gösterdiği görülürken, diğer ikame oranlarında (%25 ve%75) bu dayanımdaki artış oranının düştüğü gözlemlenmiştir. Öte yandan tuğla tozu ikameli seriler hariç diğer tüm endüstriyel atıklı serilerde kontrol serisine nazaran basınç dayanımındaki artış oranının ikame oranının artışıyla daha da düştüğü ortaya çıkmıştır. Örneğin odun tozu ikameli serilerde %25 ikame oranında artış oranı -%13 iken ikame oranının %75'e çıkması ile artış oranı değeri %41'e kadar düşmüştür. Endüstriyel atık ikamelerinde basınç dayanımına katkı açısından en olumsuz sonucu ortalama %24'lük kayıp ile odun tozu atığı vermiştir. Odun tozunu,-%15 ile mermer tozu, -%13 ile zeolit tozu, -%10 ile cam tozu ve -%1,7 ile seramik tozu takip etmiştir.

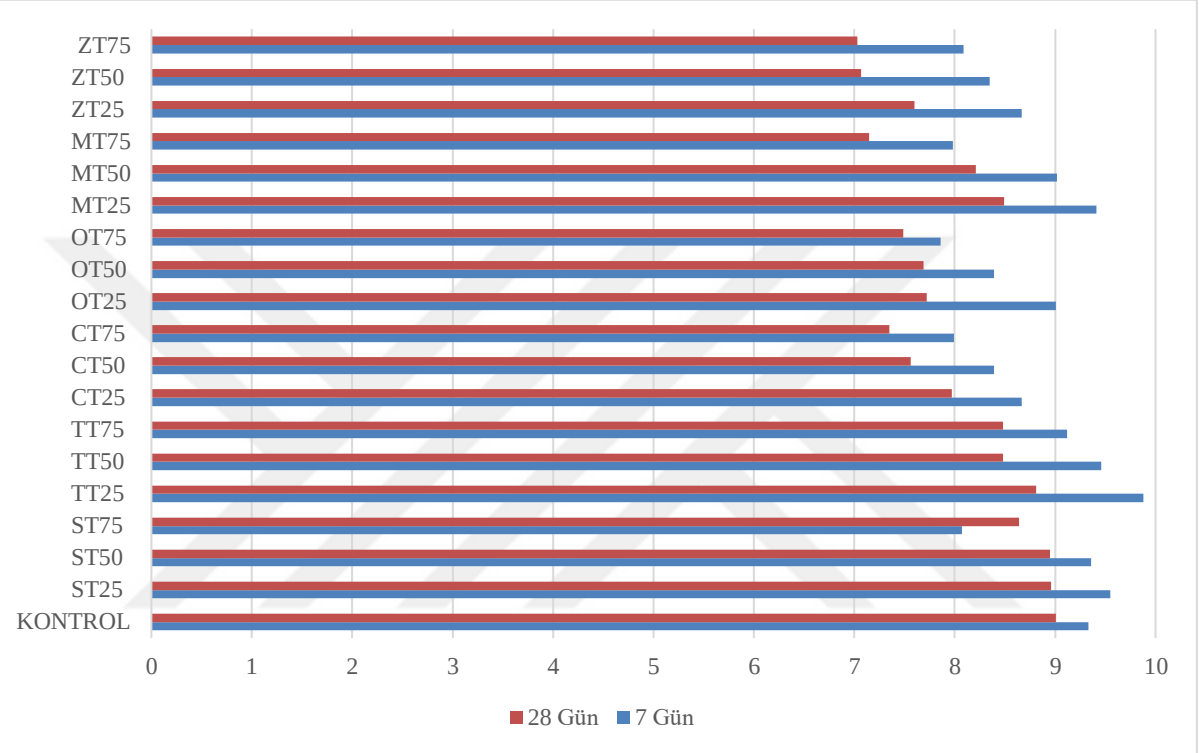


Şekil 32: 7 ve 28 günlük basınç dayanımı sonuçları.

4.2.2.Eğilme Dayanımı Sonuçları

7 ve 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları Şekil 33'te gösterilmektedir. 7 günlük dayanımların ekseriyetle 28 günlük dayanımlardan daha yüksek olduğu görülmektedir. Tüm geopolimer serilerin ortalama eğilme dayanımı değeri 8 MPa'dır. 28 günlük dayanımlar için kontrol serisine nazaran hiçbir endüstriyel atık ikamesinin eğilme dayanımı gelişimine olumlu katkısı olmadığı

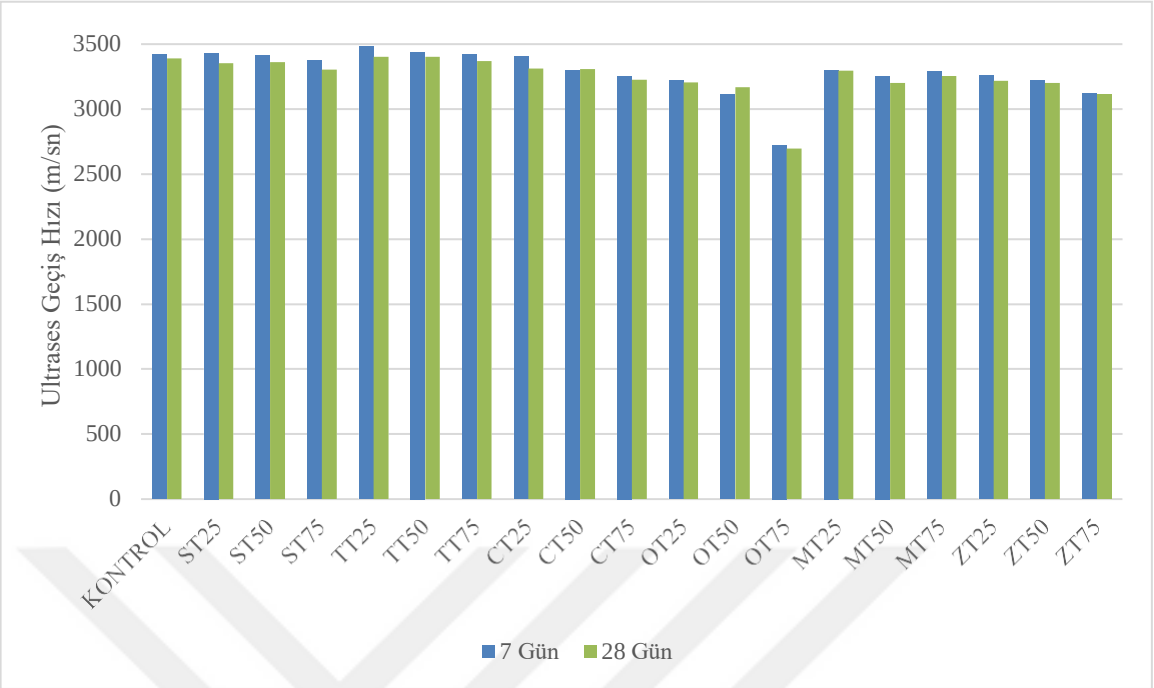
ortaya çıkmıştır. En düşük dayanım kaybı %1,7'lik değerle seramik tozlu serilerde olurken en yüksek eğilme dayanımı kaybının %19'luk değer ile zeolit ikameli serilerde olduğu görülmüştür. Genel olarak ikame oranının artışıyla dayanımdaki kaybın daha da büyümüştür. Çalışmada kullanılan endüstriyel atıkların eğilme dayanımını iyileştirme noktasında etkisiz kaldığı sonucuna varılmaktadır.



Şekil 33: 7 ve 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları.

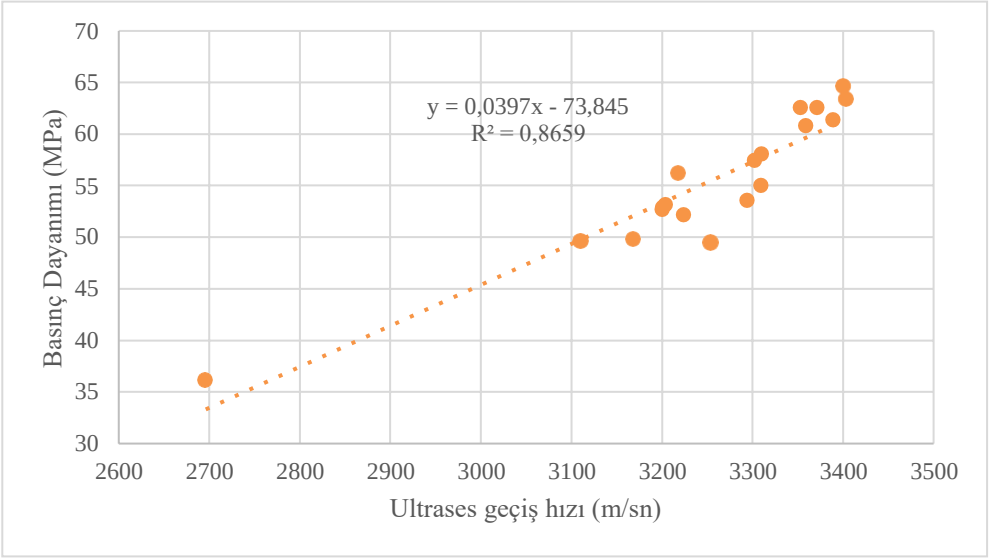
4.2 ULTRASES GEÇİŞ HIZI SONUÇLARI

7 ve 28 günlük ultrases geçiş hızı sonuçları Şekil 34'te gösterilmektedir. Ekseriyetle serilerin kontrol serisine nazaran ulstrases geçiş hızı değerlerinde azalmaların yaşandığı görülmektedir. En yüksek ultrases geçiş hızı %25 tuğla tozu ikameli seri olan TT25 serisinde elde edilmiştir. Odun tozu ikamesinin değerleri büyük oranlarda düşürmüştür. Tüm serilerde endüstriyel atık ikamesinin artışıyla ultrases geçiş hızı değerlerinin kontrol serisine nazaran daha da düştüğü ortaya çıkmıştır.



Şekil 34: 7 ve 28 günlük ultrases geçiş hızı sonuçları.

Şekil 35'te ultrases geçiş hızı değerleri ile 28 günlük basınç dayanımları arasındaki korelasyon gösterilmektedir. Yapılan regresyon analizine göre ultrases geçiş hızı sonuçlarının elde edilen basınç dayanımı değerlerini tahmin etmede oldukça başarılı olduğu söylenebilir.



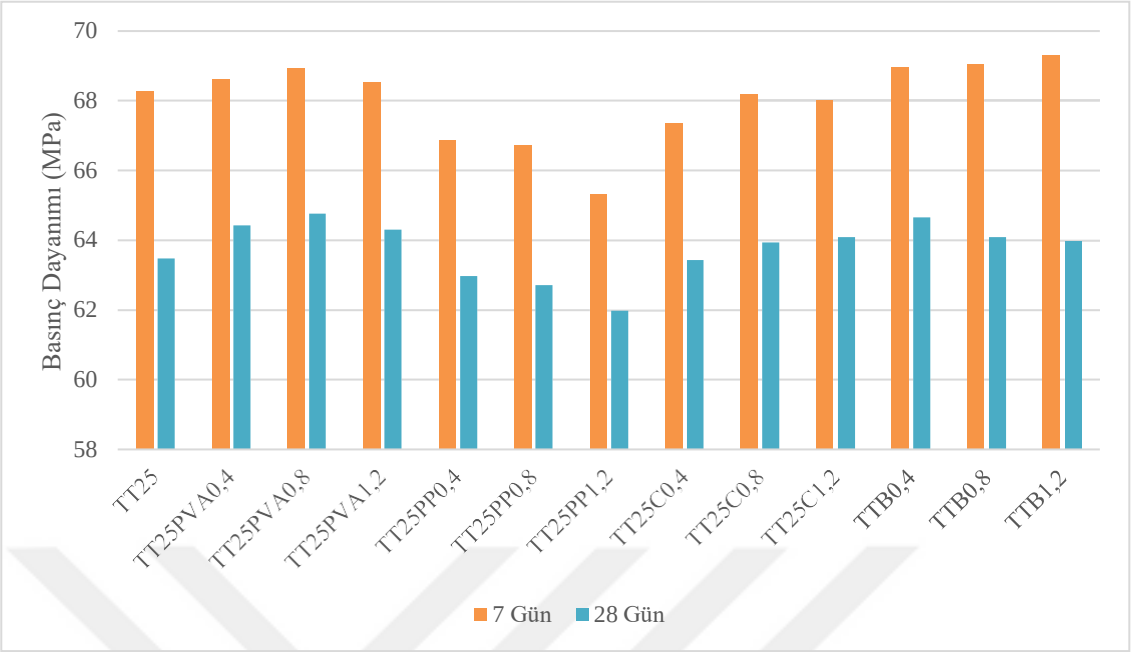
Şekil 35: Ultrases geçiş hızı ve 28 günlük basınç dayanımı korelasyonu.

4.3 LİFLİ SERİLERE AİT SONUÇLAR

Geopolimer serilere lif eklentisinin etkisini incelemek adına çeşitli lifler kullanılarak basınç ve eğilme gibi birtakım mekanik özellikler incelenmiştir. Bunun için en yüksek basınç dayanımı sonucu veren seri (TT25) seçilerek aynı seri üzerinde polivinil alkol, polipropilen, cam ve bazalt liflerinin etkisi gözlenmiştir.

4.3.1 Basınç Dayanımı Sonuçları

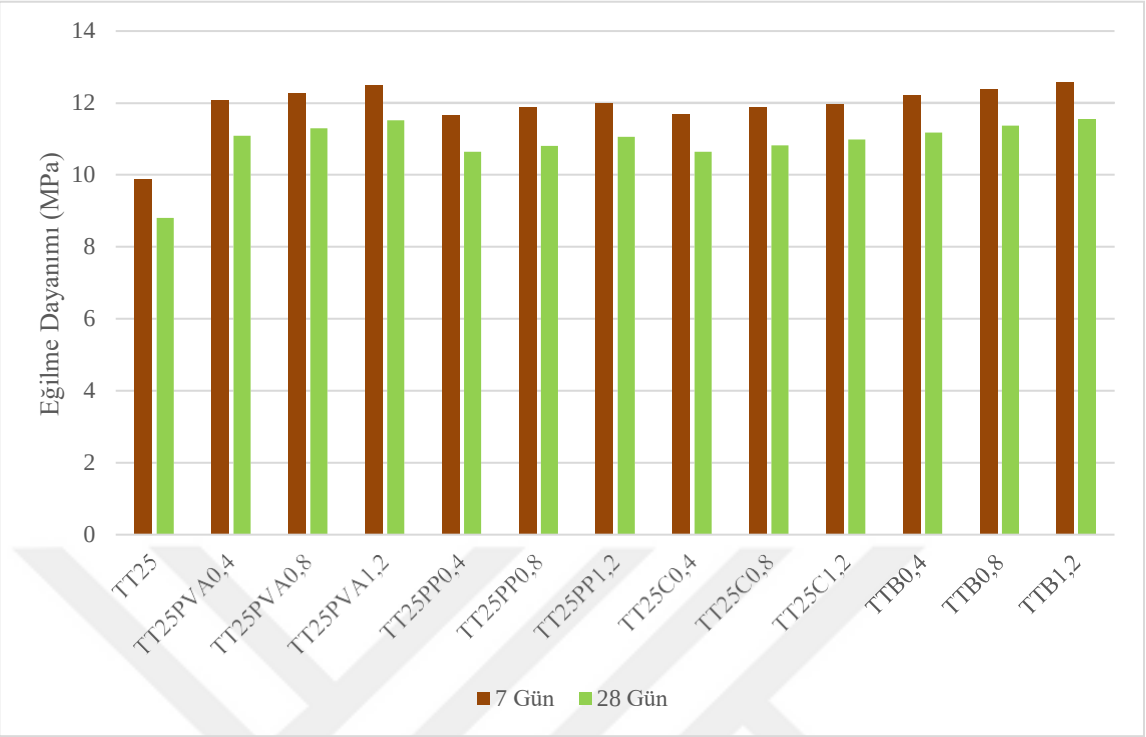
%25 tuğla tozu ikameli geopolimer serinin çeşitli lif ikameli 7 ve 28 günlük basınç dayanımı sonuçları Şekil 36'da gösterilmektedir. 28 günlük dayanımlarda en yüksek basınç dayanımını PVA lifli seriler vermiştir. En düşük basınç dayanımı sonucunun ise PP lifli serilerden geldiği görülmüştür. Cam lifi için hacimce lif kullanım oranı arttıkça kontrol serisine göre artışın daha da arttığı gözlenmektedir. PVA lif kullanımı için optimum lif kullanım oranının hacimce %0.8 olduğu söylenebilir. Lifli seriler içerisinde kontrol serisine kıyasla dayanımda tek azalma PP lifli serilerde elde edilirken diğer lifli serilerdeki artışlarında dikkate değer seviyede artışlar olmadığı sonucuna varılabilir.



Şekil 36: Lif takviyeli TT25 serisinin çeşitli liflere göre 7 ve 28 günlük basınç dayanımı sonuçları.

4.3.2 Eğilme Dayanımı Sonuçları

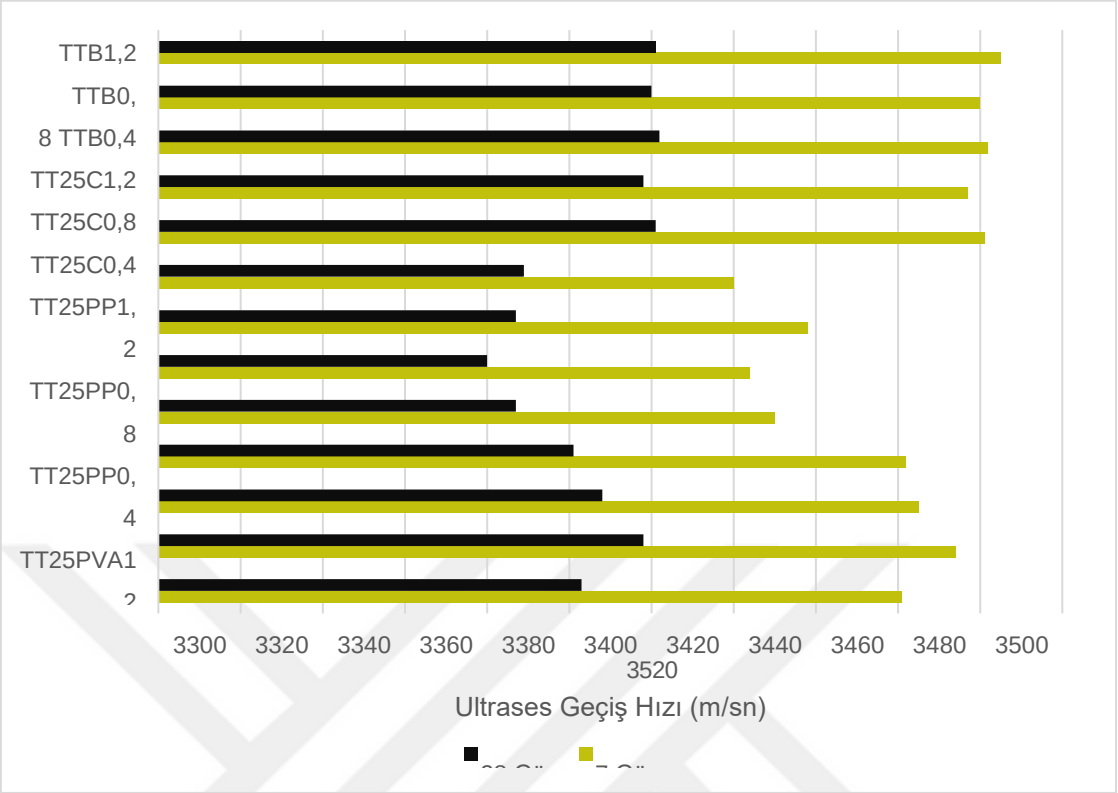
Lif takviyeli TT25 serisinin 7 ve 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları Şekil 37'de gösterilmektedir. Lif takviyesinin eğilme dayanımı değerlerini oldukça iyileştirdiği görülmektedir. Lif takviyesi ile eğilme dayanımı kontrol serisine nazaran tüm seriler için ortalama %25'lik dayanım artışına sebep olmuştur. En yüksek dayanım gelişimi ortalama %29'lık dayanım artışı ile bazalt lif takviyesinden elde edilirken, en düşük gelişim ise %22'lik dayanım artışı ile PP lif takviyeli serilerden elde edilmiştir. Tüm serilerde lif takviyesinin hacimce artması ile beraber dayanımdaki gelişiminde arttığı gözlenmektedir. Örneğin hacimce %0.4 PVA lif takviyesi %25'lik bir artış sağlarken hacimce %1.2 PVA lif takvisiyesinde bu değer %30'a çıkmıştır.



Şekil 37: Lif takviyeli TT25 serisinin 7 ve 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları.

4.3.3 Ultrases Geçiş Hızı Sonuçları

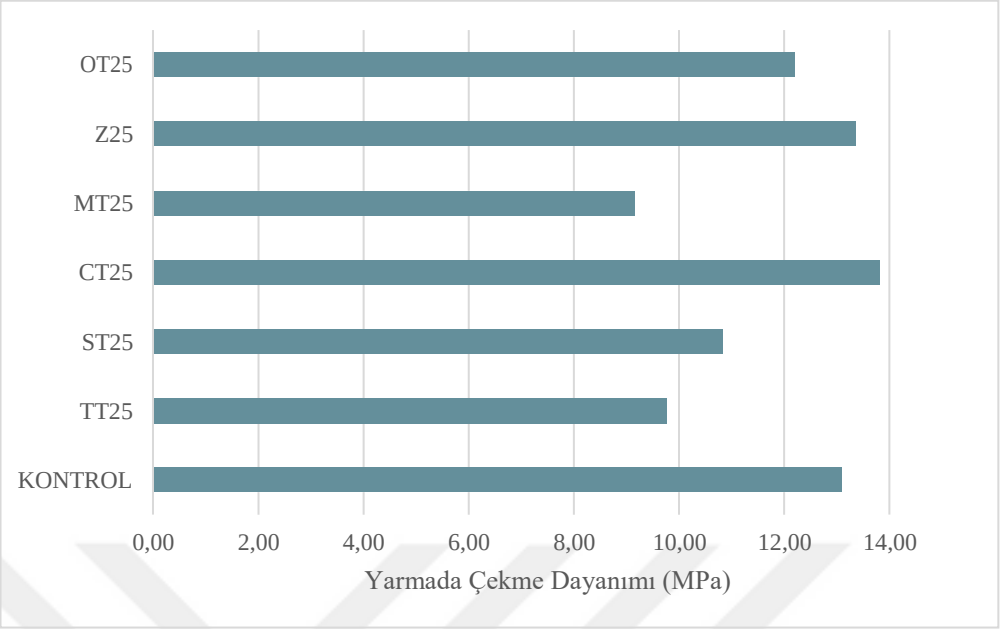
Lif takviyeli TT25 serisinin 7 ve 28 günlük ultrases geçiş hızı sonuçları Şekil 38'de gösterilmektedir. 7 günlük sonuçların lifsiz serilerde olduğu gibi 28 günlük değerlerden daha yüksek sonuçlar olduğu görülmektedir. 28 günlük ultrases sonuçlarına göre lif takviyesinin ultrases geçiş hızı değerlerini dikkate alınmayacak derecede olumlu etkilediği anlaşılmaktadır. Harçların geçiş hızı sonuçlarına bakılarak harç kalitesinin iyi bir seviyede olduğu söylenebilir.



Şekil 38: Lif takviyeli TT25 serisinin 7 ve 28 günlük ultrases geçiş hızı sonuçları.

4.4 YARMADA ÇEKME DAYANIMI SONUÇLARI

Yarmada çekme dayanımı testi çalışmanın başında kullanılan her endüstriyel atık ikameli serilerin en yüksek basınç dayanımı veren sonuçları için yapılmıştır. Yarmada çekme dayanımı sonuçları Şekil 39'da gösterilmektedir. Endüstriyel atık ikamesinin yarmada çekme dayanımlarını genel olarak iyileştirmediği görülmektedir. Sadece cam tozu ikameli seri olan CT25 serisinde kontrol serisine nazaran %5,5'lik bir artış gözlenmiştir. En büyük yarmada çekme dayanımı %30 ile kaybı mermer tozu ikameli seri olan MT25 serisinde görülürken zeolit tozu ikameli seride dikkate alınmayacak bir artış gözlenmiştir.



Şekil 39: Yarmada çekme dayanımı sonuçları.

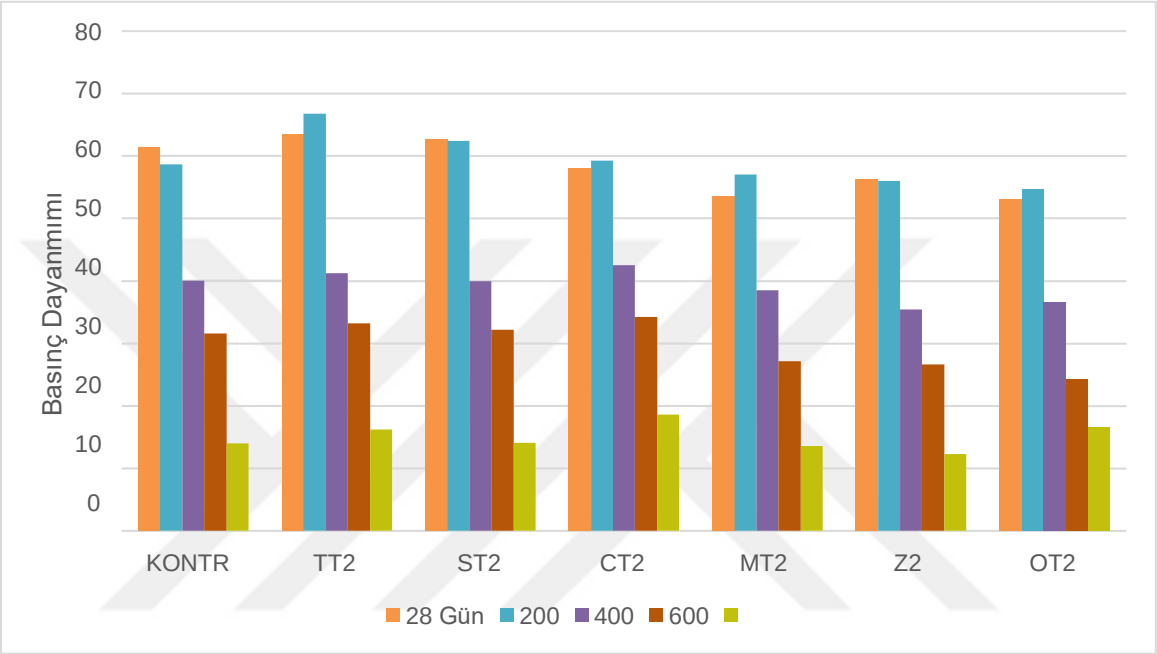
4.5 YÜKSEK SICAKLIK DENEYİ SONUÇLARI

Yüksek sıcaklık deneyleri çalışmanın başında kullanılan her endüstriyel atık ikameli serilerin en yüksek basınç dayanımı veren sonuçları için yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda anlatılmaktadır.

4.5.1 Basınç Dayanımı Sonuçları

Şekil 40'ta yüksek sıcaklık testi sonrası elde edilen basınç dayanımı değerleri ve Tablo 12'de yüksek sıcaklık etkisi sonrası oluşan basınç dayanımı kayıpları yüzdece gösterilmektedir. Geopolimer harçların 200 derece sıcaklıkta 28 günlük dayanımlarına kıyasla çok fazla olmasa da bir miktar basınç dayanımı anlamında gelişim gösterdiği görülmektedir. Örneğin MT25 serisi % 6,5'luk bir artış sergilerken TT25 serisi %5,23'lük bir dayanım gelişimi sergilemiştir. 400 derece sıcaklıkta ise numunelerin basınç dayanımında ciddi kayıpların söz konusu olduğu ortaya çıkmaktadır. Kontrol serisinde dayanım kaybı %34 iken cam tozu ve mermer tozu ikameli seriler dayanım kaybının kontrol serisine kıyasla daha az kayıplar vermiştir. 400 derece sıcaklıkta tüm serilerin ortalama basınç dayanımı 39 MPa iken bu değer, 600 derecede 29 ve 800 derecede 14 MPa değerlerine kadar düşmüştür. 600 derecede dayanım kayıpları ciddi seviyelere ulaşıp neredeyse numunelerin 28 günlük dayanımının yarısına kadar kayıplar söz

konusu olmuştur. 900 derece sıcaklıkta numunelerin tatmin edici basınç dayanımı değerleri vermediği ve dayanım kaybı değerlerinin %70'lerin üzerine çıktığı görülmüştür. Yüksek sıcaklık etkisiyle beraber numunelerin bünyesinde bulunan serbest suyun buharlaşması ve reaksiyon mekanizmasından kaynaklanan iç yapıdaki gözenekli yapıların büyümesi sebebiyle basınç dayanımlarında düşüşler gözlenmiştir [44].



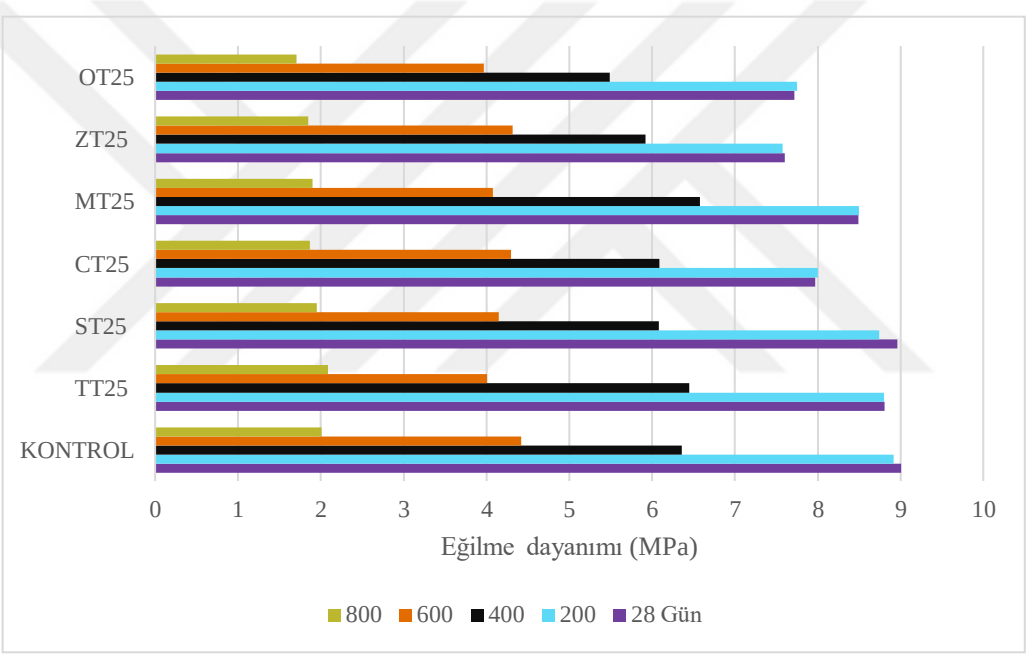
Şekil 40: Yüksek sıcaklık testi sonrası basınç dayanımı değerleri.

Tablo 12: Yüksek sıcaklık etkisi nedeniyle oluşan basınç dayanımı kayıpları (%).

Seri Kodu	28 Gün (Mpa)	200 °C	400 °C	600 °C	800 °C
Kontrol	61,38	-4,46	-34,75	-48,55	-77,17
TT25	63,48	5,23	-35,07	-47,70	-74,40
ST25	62,58	-0,27	-36,11	-48,63	-77,50
CT25	58,06	2,10	-26,78	-41,08	-67,90
MT25	53,56	6,57	-28,04	-49,27	-74,65
Z25	56,23	-0,44	-37,04	-52,61	-78,16
OT25	53,15	2,78	-31,25	-54,47	-68,88

4.5.2 Eğilme Dayanımı Sonuçları

Yüksek sıcaklık etkisi sonrası elde edilen eğilme dayanımı sonuçları Şekil 41'de gösterilmiştir. Ayrıca Tablo 13'te test sonrası eğilme dayanımındaki dayanım kayıpları yüzdece verilmiştir. 200 derece sıcaklıkta basınç dayanımında olduğu gibi eğilme dayanımında da 28 günlük dayanıma elde edilen eğilme dayanımları neredeyse aynıdır. 400, 600 ve 800 derecede eğilme dayanımı değerlerinde çok ciddi düşüşler gözlenmiştir. 200 derecede tüm seriler için ortalama eğilme dayanımı değeri 8,32 MPa iken bu değer 400, 600 ve 800 derece için sırasıyla 6.13, 4.17 ve 1,91 MPa değerlerine kadar düşmüştür. Her bir sıcaklık sınıfı değeri için kontrol serisine göre göze çarpan bir etki görülmediği söylenebilir.



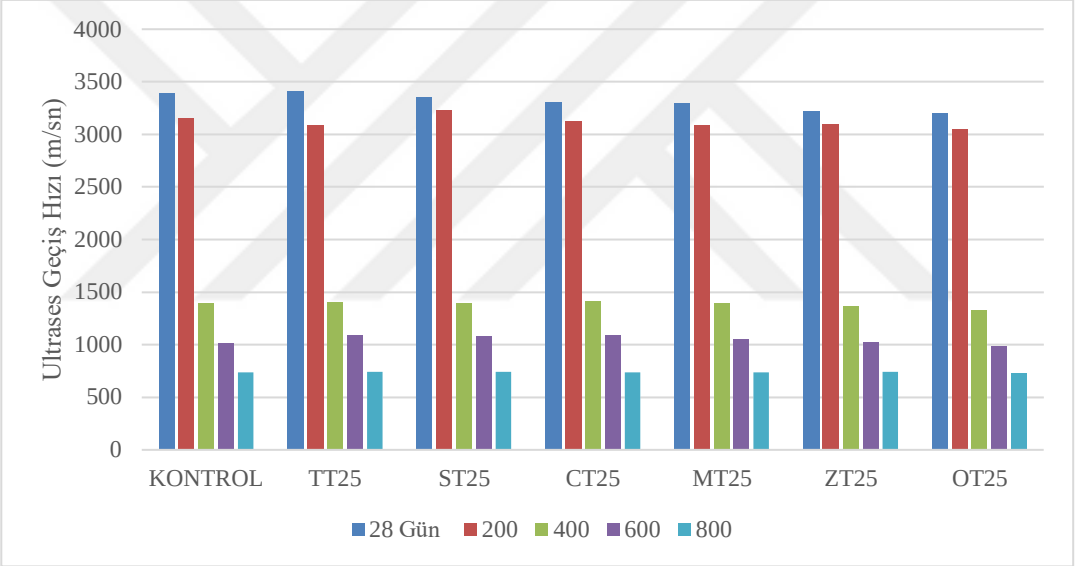
Şekil 41: Yüksek sıcaklık testi sonrası eğilme dayanımı sonuçları.

Tablo 13: Yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanımlarında oluşan kayıplar (%).

	200,00	400,00	600,00	800,00
KONTROL	-1,00	-29,41	-50,94	-77,69
TT25	-0,11	-26,79	-54,48	-76,28
ST25	-2,46	-32,14	-53,68	-78,24
CT25	0,38	-23,59	-46,05	-76,54
MT25	0,12	-22,50	-51,94	-77,62
ZT25	-0,26	-22,11	-43,16	-75,66
OT25	0,39	-28,89	-48,58	-77,85

4.5.3 Ultrases Geçiş Hızı Sonuçları

Ultrases geçiş hızı sonuçları Şekil 42'de gösterilmektedir. Ultrases geçiş hızları karşılaştırıldığında, 200 derece testi sonrası en büyük hız kaybı tuğla tozu kullanılan numunelerde, yani TT25 isimli seride gerçekleşmiştir. Gerçekleşen hız kaybı %9,34 olarak ölçülmüştür. 200 ve 400 C sıcaklık arasında yaşanan hız kayıpları %50 ve %60 arasında değişmektedir. Bu aralıkta numuneler arasında en çok hız kaybı yaşayan seri OT25 serisi en az hız kaybı yaşayan ise CT25 serisi olmuştur. 400 ve 600 C sıcaklık aralığında hız kayıpları % 20 ile 25 aralığında gerçekleşmiştir. 600 ve 800 C sıcaklık aralığında hız kayıpları %25 ile 35 aralığında gerçekleşmiştir. Bu sıcaklık aralığında en çok hız kaybı yaşayan seri ST25, en az hız kaybı yaşayan ise OT25 serisi olmuştur.

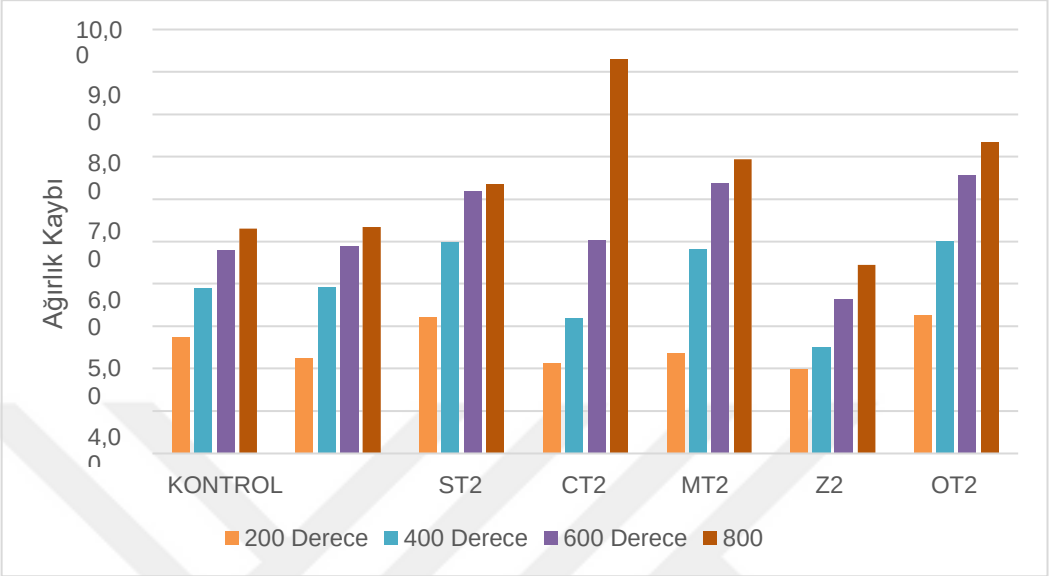


Şekil 42: Yüksek sıcaklık sonrası ultrases geçiş hızı sonuçları.

4.5.4 Ağırlık Kaybı Sonuçları

Yüksek sıcaklık testleri sonrası numunelerde oluşan ağırlık kaybı sonuçları Şekil 43'te gösterilmektedir. 400 derece sıcaklıkta ağırlık kaybı oranı %2,51 ile %5 arasında, 600 derecede % 3,64 ile % 6,37 arasında ve 800 derecede % 4,45 ile % 9,30 arasında değiştiği görülmüştür. Zeolit tozu ikameli serinin her bir yüksek sıcaklık testi girişiminde en az ağırlık kaybı sonucu verdiği ortaya çıkmıştır. Benzer mantıkla cam tozu ikameli serinin ise her bir yüksek sıcaklık sınıfı testi için en yüksek ağırlık kabı sonucunu verdiği görülmektedir. Geopolimer numunelere uygulanan sıcaklık artışı ile beraber numune içerisinde tersine hidratasyon gerçekleşmekte olup

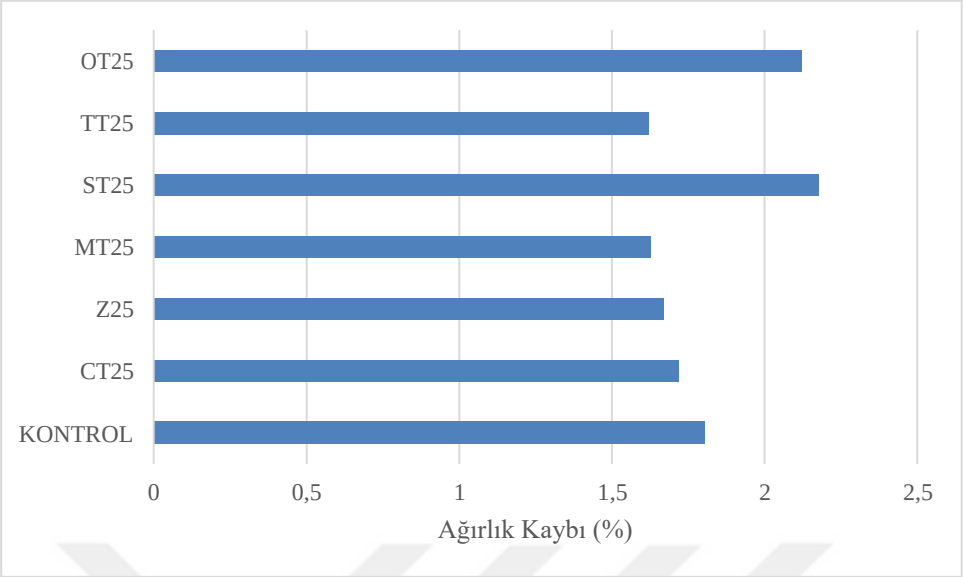
nem kaybı ile beraber iç hasar artmakta ve harçların ağırlık kaybı da sıcaklık artışı ile orantılı bir şekilde artmaktadır [45].



Şekil 43: Yüksek sıcaklık testi sonrası ağırlık kaybı sonuçları.

4.6 AŞINMA DAYANIMI SONUÇLARI

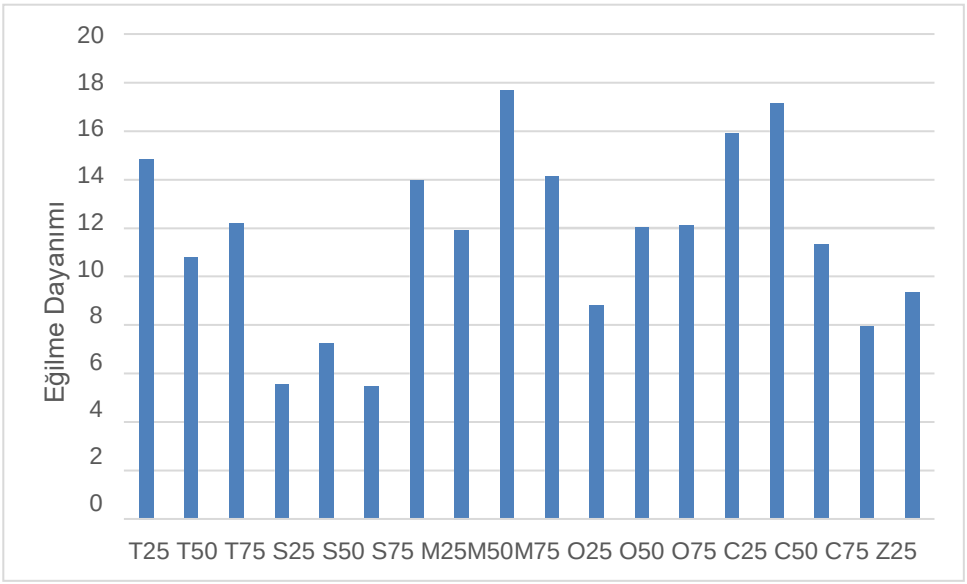
Aşınma testi sonrası oluşan ağırlık kaybı değerleri Şekil 44'te gösterilmektedir. İlk aşınma değerlerine bakıldığında seramik tozundaki aşınma kaybı iyi bir sonuç vermiş gibi gözükse de ortalama aşınma kayıplarını incelediğimizde en çok aşınan ikinci endüstriyel ikameli seri olduğu görülmüştür. Cam tozu ikameli serinin aşınma deneyinde en çok tahribata uğrayan harç olarak göze çarpmıştır. Aşınmaya karşı hem ilk dayanım hem de ortalama dayanımda zeolit tozu ve tuğla tozunun daha iyi sonuçlar verdiği görülmüş ve bu iki malzemenin ikame olarak kullanıldığı harçların aşınmaya karşı gerekli koşullarda daha faydalı sonuçlar vereceği sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 44: Aşınma dayanımı sonucu oluşan ağırlık kaybı sonuçları (%).

4.7 DONMA ÇÖZÜLME DENEYİ SONUÇLARI

4.8.2 Eğilme Dayanımı Sonuçları



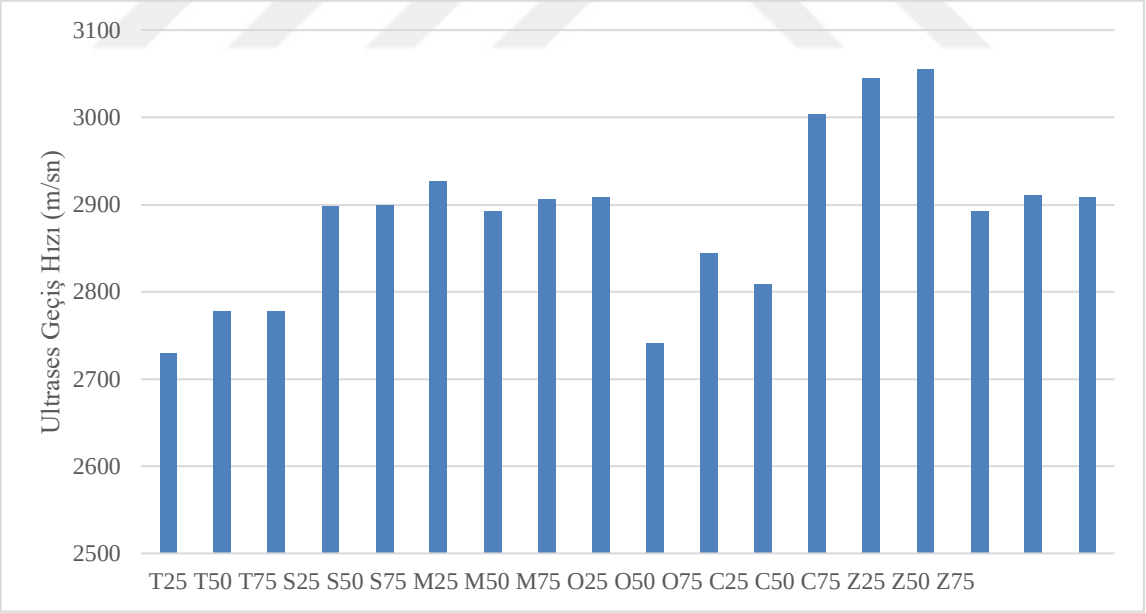
Şekil 45: Donma çözünme testi sonrası eğilme dayanımı sonuçları.

Donma çözülme deneyleri kapsamında numunelerin donma çözülme etkisinde oldukça iyi performans sergilediği görülmektedir. Karışımlar içerisinde S75 serisi donma çözülmeye karşı en çok etkilenen seri olduğu görülmüştür. Ayrıca, M75 serisi ise donma çözülme etkisine karşı

en iyi performansı göstermiştir. Bu serinin eğilme dayanımı 17,54 MPa olarak elde edilmiştir. Numuneler genel olarak değerlendirildiğinde donma çözülme etkisinde bünyesinde boşluklar ne kadar çok olursa donma çözülme etkisinde meydana gelecek genleşmeler daha iyi tolere edilerek daha etkili bir performans sergilendiği deney sonuçlarından görülmektedir.

4.8.3 Ultrases Geçiş Hızı Sonuçları

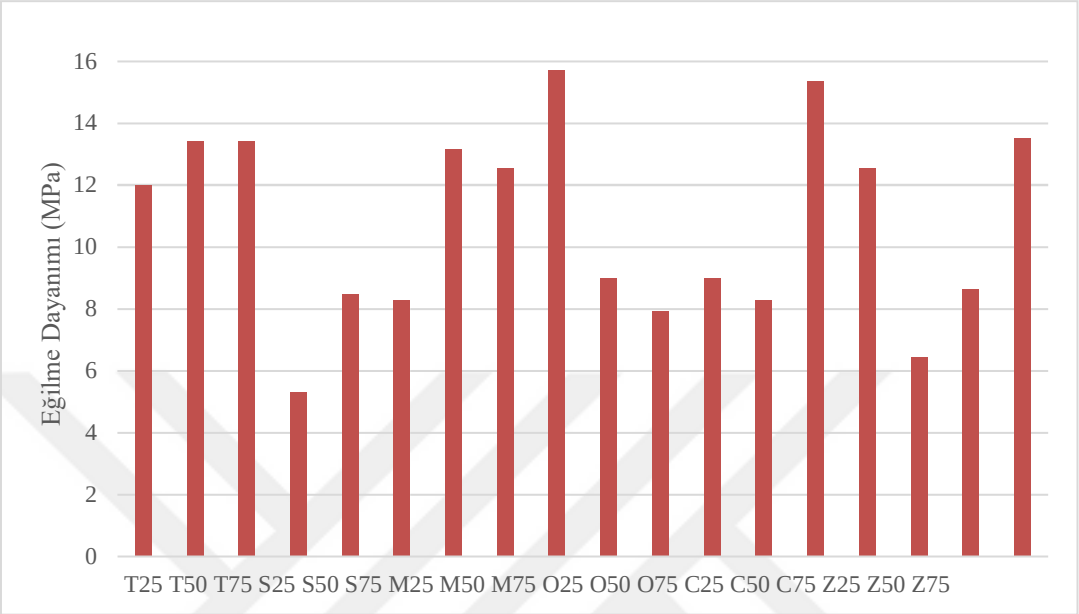
Donma çözülme testi sonrası elde edilen ultrases geçiş hızı değerleri Şekil 46'da gösterilmektedir. Donma çözülme deneyi sonrasında gerçekleştirilen hız testi sonucunda ilk duruma göre geçiş hızlarında kayda değer bir düşüş gözlenmiştir. Ultrases hız testinin çalışma mantığına baktığımızda, ultrases dalgalarının kaynaktan alıcıya ulaşma süresi hesaplandıktan sonra, dalgaların geçtiği mesafenin süreye bölünmesiyle hız bulunmuş olur. Numune içerisinde çatlak veya boşluklar oluşması durumunda yol uzayacağı için hız azalmış olacaktır. Bu durumdan yola çıkacak olursak, hız değerleri düştüğü için donma çözülme deneyinden sonra numunelerin içerisinde çatlaklar veya boşluklar oluşmuş olabileceği çıkarımını yapabilmektedir.



Şekil 46: Donma çözünme testi sonrası numunelerin ultrases geçiş hızı sonuçları.

4.8 MAGNEZYUM SÜLFAT ETKİSİ DENEYİ

4.8.1 Eğilme Dayanımı Sonuçları

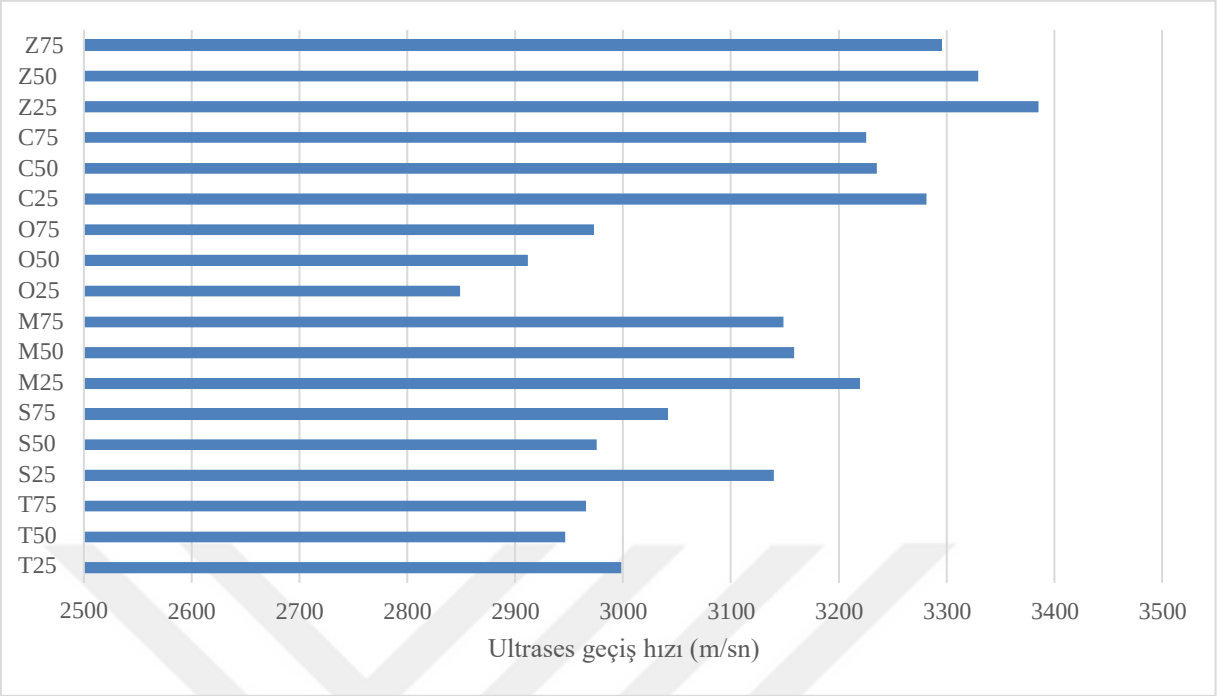


Şekil 47: Magnezyum sülfat testi sonrası eğilme dayanımı sonuçları.

Magnezyum sülfat etkisine maruz bırakılan ve bünyesinde farklı tür endüstriyel atık içeren malzemeler bir arada değerlendirildiğinde magnezyum sülfat etkisine karşı tüm numuneler oldukça iyi bir performans sergilemiştir. Tüm numuneler göz önüne alındığında magnezyum sülfat etkisine karşı en iyi performans sergileyen serinin M75 serisi olduğu görülmektedir. Bu seri 15,58 MPa eğilme dayanımı sonucu verdiği gözlemlenmiştir. S25 serisi ise magnezyum sülfat etkisi altında en kötü performans sergileyen seri olduğu yapılan bu deneysel çalışmada ortaya konmuştur.

4.8.2 Ultrases Geçiş Hızı Sonuçları

Magnezyum sülfat etkisi testi sonrası elde edilen ultrases geçiş hızı değerleri Şekil 48'de gösterilmektedir. Ultrases deneyi sonuçlarına bakıldığında, bazı numunelerde hız azalırken bazılarında artış olduğu gözlemlenmiştir. Artışın sebebi ıslak ortamda bırakılan numunelerin zaman içerisinde boşluklarının dolmasıyla açıklanabilmektedir. Geçiş hızının düşme sebebi olarak ultrases cihazının çalışma prensibi göz önünde bulundurulduğunda numunelerin içerisinde magnezyum sülfat etkisinden dolayı boşluk ve çatlaklar oluşması olarak açıklanabilmektedir.



Şekil 48: MgSO4 etkisine maruz kalan serilerin ultrases hızı değerleri.

5 TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, geopolimer kompozitlere farklı endüstiyel atık malzemeler eklenerek bazı mekanik ve durabilite özellikleri incelenmiştir. Ayrıca farklı lifler kullanılarak endüstriyel atık eklenmesinin lifler ile olan ilişkileri de araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir:

1. En yüksek birim ağırlık değeri ise tuğla tozu ve seramik tozlu serilerden elde edilmiştir.
2. Tuğla tozu ikameli seriler ortalama 63,5 Mpa'lık bir basınç dayanımı sonucu sergileyerek referans seriye nazaran tüm ikame değerlerinde artış gösteren seriler olmuşlardır
3. Tuğla tozu ikameli seriler hariç diğer tüm endüstriyel atıklı serilerde kontrol serisine nazaran basınç dayanımındaki artış oranının ikame oranının artışıyla daha da düştüğü ortaya çıkmıştır
4. Endüstriyel atık ikamelerinde basınç dayanımına katkı açısından en olumsuz sonucu ortalama %24'lük kayıp ile odun tozu atığı vermiştir.
5. 28 günlük dayanımlar için kontrol serisine nazaran hiçbir endüstriyel atık ikamesinin eğilme dayanımı gelişimine olumlu katkısı olmadığı ortaya çıkmıştır.
6. Lifli seriler içerisinde kontrol serisine kıyasla basınç dayanımda tek azalma PP lifli serilerde elde edilirken diğer lifli serilerdeki artışlarda dikkate değer seviyede artışlar olmadığı sonucuna varılmaktadır.
7. Lif takviyesi ile eğilme dayanımı kontrol serisine nazaran tüm seriler için ortalama %25'lik dayanım artışına sebep olmuştur. En yüksek dayanım gelişimi ortalama %29'lık dayanım artışı ile bazalt lif takviyesinden elde edilirken, en düşük gelişim ise %22'lik dayanım artışı ile PP lif takviyeli serilerden elde edilmiştir. Tüm serilerde lif takviyesinin hacimce artması ile beraber dayanımdaki gelişiminde arttığı gözlenmektedir. Bu noktadan endüstriyel atıklı geopolimerlerde eğilme özelliklerinin iyileştirilmesi açısından lif kullanımının oldukça faydalıdır denilebilir.
8. Endüstriyel atık ikamesinin yarmada çekme dayanımlarını genel olarak iyileştirmediği görülmektedir.
9. Yüksek sıcaklık etkisinde 600 derecede dayanım kayıpları ciddi seviyelere ulaşıp neredeyse numunelerin 28 günlük dayanımının yarısına kadar kayıplar söz konusu olmuştur. 900 derece sıcaklıkta numunelerin tatmin edici basınç dayanımı değerleri vermediği ve dayanım kaybı değerlerinin %70'lerin üzerine çıktığı görülmüştür.

10. 400, 600 ve 800 derecede eğilme dayanımı değerlerinde çok ciddi düşüşler gözlenmiştir. 200 derecede tüm seriler için ortalama eğilme dayanımı değeri 8,32 MPa iken bu değer 400, 600 ve 800 derece için sırasıyla 6,13, 4,17 ve 1,91 MPa değerlerine kadar düşmüştür.
11. 400 derece sıcaklıkta ağırlık kaybı oranı %2,51 ile %5 arasında, 600 derecede %3,64 ile %6,37 arasında ve 800 derecede %4,45 ile %9,30 arasında değiştiği görülmüştür. Zeolit tozu ikameli serinin her bir yüksek sıcaklık testi girişiminde en az ağırlık kaybı sonucu verdiği ortaya çıkmıştır.
12. Cam tozu ikamesi aşınma deneyinde en çok tahribata uğrayan harç olarak ortaya çıkmıştır.

Bu tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar bir arada değerlendirildiğinde atık malzeme olarak tuğla tozu, cam tozu, seramik tozu, odun külü, mermer tozu ve zeolitin geopolimer kompozit üretiminde agrega ile yer değiştirmesinin üretilen harç numunelerin mekanik ve kalılıcık özellikleri üzerinde olumlu bir etkisi olduğu görülmektedir. Bu durum, her yıl yüzbinlerce ton atık olarak atıl durumda bekleyen atık malzemelerin geopolimer harç ve beton üretimine olanak sağlaması ve bu atıkların değerlendirilmesi kapsamında önemli olduğu sonucunu doğurmaktadır.

Bununla birlikte yapılan deneysel çalışmalar ışığında tuğla tozunun bir atık olarak değerlendirilmesi durumunda diğer atık malzemelere kıyasla geopolimer harçların mekanik ve durabilite özelliklerine daha olumlu etkide bulunduğu görülmüştür. Bu durum ülkemizin her bölgesinde yer alan tuğla fabrikalarında her yıl on binlerce ton elde edilen atık tuğlanın ve kentsel dönüşüm kapsamında dönüştürülen yapılarda elde edilen geri dönüşüm tuğla atık malzemelerinin daha ekonomik geopolimer kompozitlerin üretimine olanak sağlayabileceğini göstermektedir.

Bu çalışmalar ışığında diğer araştırmacılara öneri olarak; agrega olarak doğal kum yerine geri dönüşüm agregası kullanarak daha çevreci geopolimer kompozitlerin üretilebileceği bu çalışma kapsamında önerilerden birisi olarak değerlendirilebilir.

KAYNAKLAR

[1] Aleem, M. A., & Arumairaj, P. D. (2012). Geopolymer concrete–a review. International journal of engineering sciences & emerging technologies, 1(2), 118-122.

[2] Davidovits, J. (2013). Geopolymer cement. A review. Geopolymer Institute, Technical papers, 21, 1-11.

[3] Şinik, O. (2019). Geopolimer betonlarda dayanıklılık özelliklerinin araştırılması (Master's thesis).

[4] Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M., & Bhattacharyya, S. K. (2015). Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Construction and building materials*, *85*, 78-90.

[5] Albitar, M., Ali, M. M., Visintin, P., & Drechsler, M. (2017). Durability evaluation of geopolymer and conventional concretes. *Construction and Building Materials*, *136*, 374-385.

[6] Tuyan, M., Boyacı, O. C., Çakır, Ö. A., & Ramyar, K. Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Betonların Mekanik Özelik Ve Yüksek Sıcaklık Dirençlerinin Araştırılması.

[7] Bayuaji, R., Yasin, A. K., Susanto, T. E., & Darmawan, M. S. (2017, September). A review in geopolymer binder with dry mixing method (geopolymer cement). In AIP Conference Proceedings (Vol. 1887, No. 1, p. 02002

[8] Mitchell, J.K. ve Soga, K., (2005). Fundamentals of Soil Behavior, John Wiley and Sons, Inc. , Hoboken, New Jersey

[9] Kakali, G.; Perraki T.; Tsivilis S.; Badogiannis E. (2001). "Thermal treatment of kaolin: the effect of mineralogy on the pozzolanic activity". Applied Clay Science. 20 (1–2): 73–80.

[10] Siddique R.,Klaus J., Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review, Volume 43, Issues 3–4, Pages 392-400, March 2009

[11] Bakharev, T. (2000). Alkali Activated Slag Concrete: Chemistry, Microstructure and Durability, Department of Civil Engineering, Monash University, Melbourne, Australia.

[12] Uysal F.F.,Bahar S.,Cüruf çeşitleri ve kullanım alanları, Volume 19 , Issue 1, Pages 37 – 52, Year 2018

[13] Yüksel İ.,A review of steel slag usage in construction industry for sustainable development,Environment, Development and Sustainability volume 19, pages369–384 (2017)

[14] Wong C. L.,Mo K. H.,Yap S. P.,Alengaram U. J.,Ling T. C., Potential use of brick waste as alternate concrete-making materials: A review, Journal of Cleaner Production,Volume 195, Pages 226-239,10 September 2018

[15] Kinuthia J.M., Nidzam R.M., Towards zero industrial waste: Utilisation of brick dust waste

in sustainable construction,Volume 31, Issue 8, Pages 1867-1878, August 2011

[16] Rogers S. B.,Evaluation and Testing of Brick Dust as a Pozzolanic Additive to Lime Mortars for Architectural Conservation,University of Pennsylvania,2011

[17] Singh M., Chaudhary K., Srivastava A.,Sangwan K. S., Bhunia D., Journal of Building Engineering,A study on environmental and economic impacts of using waste marble powder in concrete,Volume 13, Pages 87-95, September 2017

[18] Amr S. ,Dieb E., Kanaan D. M.,Ceramic waste powder an alternative cement replacement –Characterization and evaluation, Sustainable Materials and Technologies,Volume 17, e00063, September 2018

[19] Raval1 A. D., Dr.Indrajit N.,Prof. Pitroda J. Ceramic Waste : Effective Replacement Of Cement For Establishing Sustainable Concrete, International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) - Volume4 Issue6- June 2013

[20] Aliabdo A. A., Elmoaty M. , Aboshama A. Y. Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete,Construction and Building Materials,Volume 124, Pages 866-877, 15 October 2016

[21] Siddique R.,Utilization of wood ash in concrete manufacturing,Resources, Conservation and Recycling,Volume 67, Pages 27-33, October 2012

[22] A. Arshad, I. Shahid, U.H.C. Anwar, M.N. Baig, S. Khan, K. Shakir, The wastes utility in concrete, Int. J. Environ. Res. 8 (4) (2014) 1323–1328.

[23] (Wikipedia (2021). Sodyum hidroksit. Vikipedi, Özgür Ansiklopedi. Erişim tarihi 18.05.2021, *url://tr.wikipedia.org/w/index.php?title=Sodyum_hidroksit&oldid=25435662*).

[24] National Center for Biotechnology Information (2021). PubChem Compound Summary for CID 14798, Sodium hydroxide. Retrieved May 22, 2021 from *https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Sodium-hydroxide*

[25] Oh, S. Y., Yoo, D. I., Shin, Y., & Seo, G. (2005). FTIR analysis of cellulose treated with sodium hydroxide and carbon dioxide. Carbohydrate research, 340(3), 417-428.

[26] Wikipedia (2020). Sodyum silikat. Vikipedi, Özgür Ansiklopedi. Erişim tarihi 18.05.2021 *url://tr.wikipedia.org/w/index.php?title=Sodyum_silikat&oldid=24309822*

[27] Jefferis, S. A. (2003). Grouts and grouting. Advanced Concrete Technology Set, Elsevier, Oxford.

[28] Olivia, M. and Nikraz, H. (2013). ‘‘Properties of Fly Ash Geopolymer Concrete in Seawater’’ Cement and Concrete Research.

[29] Hardjito, D., & Rangan, B. V. (2005). Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete

[30] Kayacıklı, İ. E. (2020). Farklı geopolimer betonların dayanımlarının zamanla değişimi ve durabilitesi (Master's thesis, İstanbul Gelişim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)

[31] Haddad, R.H., Alshbuol, O. (2016). Production of geopolymer concrete using natural pozzolan: A parametric study. Constr. Build. Mater. 114(1), 699-707

[32] Part, W. K., Ramli, M., & Cheah, C. B. (2015). An overview on the influence of various factors on the properties of geopolymer concrete derived from industrial by-products. Construction and Building Materials, 77, 370-395

[33] M. Olivia, H. Nikraz Properties of fly ash geopolymer concrete designed by Taguchi method Mater Des, 36 (2012), pp. 191-198

[34] Sofi, M., Van Deventer, J. S. J., Mendis, P. A., & Lukey, G. C. (2007). Engineering properties of inorganic polymer concretes (IPCs). Cement and concrete research, 37(2), 251-257.

[35] Altındal, İ. (2020). Değişik geopolimer beton numunelerin farklı kür koşulları altında basınç dayanımının değişimi (Master's thesis, İstanbul Gelişim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

[36] Davidovits, J. (1994, October). Properties of geopolymer cements. In First international conference on alkaline cements and concretes (Vol. 1, pp. 131-149). Kiev State Technical University, Ukraine: Scientific Research Institute on Binders and Materials

[37] Ümit, Y. U. R. T., & EMİROĞLU, M. Zeolit İkameli Geopolimer Betonlarda Kür Şartlarının Etkileri. Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 8(2), 396-402

[38] Wallah, S. E. and Rangan, B.V., "Low Calcium Fly Ash Based Geopolymer Concrete: Long Term Properties." Research Report GC2, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, 2006

[39] Li Z., Ding Z., Zhang Y., (2004). Development of Sustainable Cementitious Materials, Proceedings of International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology, Beijing, China, 55-76

[40] Sumajouw, M. D. J. and Rangan, B.V., "Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete: Reinforced Beams and Columns" Research Report GC3, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, 2006

[41] *Siddique* R.,*Klaus* J., *Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A reviewVolume 43, Issues 3–4,* Pages 392-400, March 2009

[42] TS EN 196-1, (2012). Çimento Deney Metodları – Bölüm 1: Dayanım Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

[43] TS EN 1015-11, (2000). Kağır Harcı Deney Metodları-Bölüm 11: Sertleşmiş Harcın Basınç ve Eğilme Dayanımının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

[44] Zhang, Y.J., Li, S., Wang, Y.C. ve Xu, D.L., (2012). "Microstructural and strength evolutions of geopolymer composite reinforced by resin exposed to elevated temperature", Journal of Non-Crystalline Solids, 358: 620–624.

[45] Kong, D.L.Y., Sanjayan, J.G., Crentsil, K.S., (2007). “Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures”, Cement and Concrete Research, 37: 1583–1589.

