T.C.
KIRŞEHİR AHİ EVRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

ATIK LASTİK ESASLI GEOPOLİMER BETONDAN ÜRETİLMİŞ YAPISAL ELEMANLARIN DENEYSEL VE ANALİTİK OLARAK İNCELENMESİ

FATİH SEZEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KIRŞEHİR
2025

T.C.
KIRŞEHİR AHİ EVRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

ATIK LASTİK ESASLI GEOPOLİMER BETONDAN ÜRETİLMİŞ YAPISAL ELEMANLARIN DENEYSEL VE ANALİTİK OLARAK İNCELENMESİ

FATİH SEZEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Furkan BİRDAL

KIRŞEHİR
2025

KIRŞEHİR AHİ EVRAN ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI
ETİK BEYANI

Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesini okuduğumu ve anladığımı ve Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde ve ortaya çıkan sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tez olarak sunduğum bu çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda bu konuda hakkımda yapılacak tüm yasal işlemleri ve aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

08/08/2025
Fatih SEZEN

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

İÇİNDEKİLER DİZİNİ ..... **I**
TEŞEKKÜR ..... **III**
ÖZET ..... **IV**
ABSTRACT ..... **V**
TABLOLAR DİZİNİ ..... **VI**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **VII**
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... **VIII**
1. GİRİŞ **1**
1.1. Geopolimer Üretimi ve Kullanılan Malzemeler 2
1.2. Çalışmanın Amacı ve Önemi 4
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR **7**
2.1. Literatürde Geopolimerler 18
2.3. Tez Kapsamında Kullanılan Malzemelere Yönelik Literatür Araştırması 20
2.3.1. Taban külü 21
2.3.2. Silis dumanı 22
2.3.3. Pomza 23
2.3.4. Atık lastik 26
2.3.5. Atık mermer 27
2.3.6. Alkali aktivatör 27
2.3.7. Saf su 28
2.4. Geopolimer Harcının Özelliklerini Etkileyen Faktörler 28
2.4.1. Kimyasal bileşenler 28
2.4.2. Alkali molaritesi, alkali-bağlayıcı oranı ve saf su 29
2.4.3. Isı kürü ve ısı süresi 30
3. MATERYAL VE METOT **31**
3.1. Numune Karışımlarında Kullanılan Malzemeler 31
3.1.1. Taban külü 31
3.1.2. Silis dumanı 31
3.1.3. Pomza 32
3.1.4. Atık lastik 32
3.1.5. Atık mermer 33
3.1.6. Alkali aktivatörü 33
3.1.7. Saf su 34

3.2. Numunelerin Hazırlanması ve Numune Boyutları 34
3.3. Kür Koşulları ve Ekipmanlar.....35
3.4. Mekanik Test Ekipmanları ve Deneyler.....36
3.5. Isı İletkenlik Katsayısı ve Deney Numunesi 37
3.6. Şekil Değiştirme Eğrisi ve Analitik Çalışmalar 37
3.7 Geopolimer Karışımların Hazırlanması ve Karışım optimizasyonu 37
3.8 Analitik Çalışmalar.....53
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....61
4.1 Deneysel Bulgular 61
4.1.1. Alkali aktivatör hazırlama aşamaları ve dikkat edilmesi gereken hususlar...61
4.1.2. Karışım bileşenlerinin geopolimerizasyon üzerine etkisi, priz alma ve deneyler.....63
4.1.3. K-21 karışımı ile sektör muadili ürünlerin karşılaştırılması 66
4.2. Analitik Bulgular.....67
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....71
KAYNAKLAR.....75
EKLER.....79
EK-1.....79
EK-2.....81
ÖZGEÇMİŞ.....83

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimime başladığım günden itibaren, ders süreci ve akademik gelişimimde gösterdiği sabırlı ve sakin duruşuyla örnek aldığım, akademik disiplinin ve bilim insanı kimliğinin nasıl olması gerektiğini bana öğreten değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Sayın Furkan BİRDAL hocama en içten şükranlarımı sunarım. Ayrıca tez çalışmam kapsamında desteklerini esirgemeyen İnşaat Mühendisliği Bölüm Başkanı Sayın Prof. Dr. Mehmet Mustafa ÖNAL ve Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Doç. Dr. Hasan DİLBAS hocalarıma saygılarımla teşekkürlerimi arz ederim.

Ayrıca çalışmada denenen karışımlarda kullanılan taban külü temininde yardımları için Kayseri Şeker Fabrikası Ar-Ge Merkezi ve Yönetimine teşekkür ederim.

Tezimi, çalışmalarım boyunca hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan, her zaman yanımda olan, varlıklarıyla bana güç veren sevgili aileme ithaf ediyorum. Özellikle bu süreçte sabır ve sevgileriyle bana ilham veren eşim ve canım kızım Eslem'e özel teşekkürlerimi sunuyorum.

Ağustos, 2025 Fatih SEZEN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ATIK LASTİK ESASLI GEOPOLİMER BETONDAN ÜRETİLMİŞ YAPISAL ELEMANLARIN DENEYSEL VE ANALİTİK OLARAK İNCELENMESİ

Fatih SEZEN

KIRŞEHİR AHİ EVRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

Danışman: **Dr. Öğr. Üyesi Furkan BİRDAL**
Yıl: 2025 Sayfa:VIII-83
Jüri: **Prof. Dr. Mehmet Mustafa ÖNAL**
Doç. Dr. Barış ERDİL
Dr. Öğr. Üyesi Furkan BİRDAL

Çimento üretiminde enerji tüketimi ve karbon salımı nedeniyle çevresel olumsuzluklar artmakta, bu durum alternatif yapı malzemelerine yönelimi teşvik etmektedir. Bu bağlamda, geopolimerler önemli bir alternatif sunmaktadır. Bu çalışmada tamamen atıklardan elde edilen bir geopolimer karışımın deneysel optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Karışımlarda endüstriyel atık olarak; lastik, mermer, beton ve taban külü kullanılmıştır. Doğal malzeme olarak ise pomza tercih edilmiştir. Deneysel çalışmalarda optimum dayanımlı, ısı verimli, sürdürülebilir ve tamamen atıkların geri dönüşümünden elde edilen bir geopolimer karışım hedeflenmiştir. Toplam 21 farklı karışım hazırlanarak basınç ve eğilme testleri uygulanmıştır. Sonuç olarak, 0.72 ton/m³ birim hacim ağırlığına, 0.47 W/mK ısı geçirgenlik katsayısına, 4.3 MPa basınç ve 0.93 MPa eğilme dayanımına sahip bir geopolimer elde edilmiştir. Elde edilen bu karışımdan üretilebilecek birim yapısal elemanların, dolgu duvarların inşasında kullanımı analitik olarak incelenmiştir. Analizlerde dolgu duvarlı çerçeve modelleri üzerinde statik itme analizi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma ile hafif, ısı yalıtımlı, sürdürülebilir ve tamamen atıklardan elde edilen inovatif bir yapı malzemesi geliştirilmiştir. Elde edilen geopolimer karışımın inşaat sektöründe tek başına veya diğer yapı malzemeleriyle birlikte kullanımı ele alınmıştır. Bu kapsamda ülkemizin sıfır atık vizyonuna, sektörel uygulamalara ve akademik literatüre katkı sağlanabilmesi hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilirlik, Geri dönüşüm, Yapı malzemesi, Geopolimer, Lifli atık lastik, Puzolanlar, Dolgu duvarlar.

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL INVESTIGATION OF STRUCTURAL ELEMENTS PRODUCED FROM WASTE TIRE-BASED GEOPOLYMER CONCRETE

Fatih SEZEN

KIRŞEHİR AHİ EVRAN UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

Supervisor:	**Asst. Prof. Dr. Furkan BİRDAL**
	Year: 2025 Pages: VIII-83
Juries:	**Prof. Dr. Mehmet Mustafa ÖNAL**
	Assoc. Prof. Dr. Barış ERDİL
	Asst. Prof. Dr. Furkan BİRDAL

Due to the high energy consumption and carbon emissions associated with cement production, environmental concerns have intensified, prompting a shift toward alternative construction materials. In this context, geopolymers offer a promising substitute. This study presents the experimental optimization of a geopolymer mixture composed entirely of waste-derived components. Industrial wastes such as rubber, marble, concrete debris, and bottom ash were utilized, alongside pumice as the sole natural material. The experimental program aimed to develop a geopolymer mixture that is mechanically robust, thermally efficient, sustainable, and entirely sourced from recycled waste. A total of 21 distinct mixtures were prepared and subjected to compressive and flexural strength tests. As a result, a geopolymer was obtained with a unit weight of 0.72 ton/m³, a thermal conductivity of 0.47 W/mK, a compressive strength of 4.3 MPa, and a flexural strength of 0.93 MPa. The potential application of structural units produced from this mixture in infill wall construction was analytically investigated. Static pushover analyses were conducted on frame models with infill walls to assess structural performance. This study successfully developed an innovative construction material that is lightweight, thermally insulating, sustainable, and entirely derived from waste. The feasibility of using the proposed geopolymer mixture either independently or in combination with conventional materials in the construction sector was evaluated. In this regard, the study aims to contribute to the national zero-waste vision, promote sectoral implementation, and enrich the academic literature on sustainable construction technologies.

Keywords: Sustainability, Recycling, Building material, Geopolymer, Fibrous waste tire, Pozzolans, Infill walls.

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 2.1. Taban külünün literatürdeki kimyasal içeriği.....**22**
Tablo 2.2. Asidik ve bazik pomzaların kimyasal bileşim oranları **23**
Tablo 2.3. Dünya pomza rezervleri **24**
Tablo 2.4. Türkiye'de pomzanın bölgelere göre rezervleri **24**
Tablo 2.5. Türkiye'de pomzanın yöresel rezervleri **25**
Tablo 2.6. Atık lastiklerin karışım türüne göre avantaj ve dezavantajları.....**26**
Tablo 3.1. Kullanılan numune boyutları.....**35**
Tablo 3.2. Pomza esaslı ilk 3 karışım numunesinin içerikleri.....**38**
Tablo 3.3. Pomza esaslı Karışım-4 numunesinin içerikleri.....**39**
Tablo 3.4. Pomza esaslı Karışım-5 numunesinin içerikleri.....**39**
Tablo 3.5. Çimento, silis dumanı ve pomza esaslı karışım numunelerinin içerikleri.....**40**
Tablo 3.6. Pomza esaslı karışımların içerikleri **42**
Tablo 3.7. Silis dumanı esaslı K-15 numune içerikleri **43**
Tablo 3.8. Taban külü esaslı numune içerikleri.....**44**
Tablo 3.9. Taban külü ve silis dumanı esaslı numune içerikleri **44**
Tablo 3.10. Pomza esaslı tamamen atıklardan oluşan numune içerikleri.....**46**
Tablo 3.11. Taban külü ve pomza esaslı K-20 numune içerikleri.....**46**
Tablo 3.12. Taban külü ve pomza esaslı K-21 numune içerikleri.....**48**
Tablo 3.13. K-21 basınç, eğilme dayanımı ve ısı geçirgenlik katsayısı sonuçları **51**
Tablo 3.14. K-21 için eşdeğer basınç çubuğu genişliği hesabı **55**
Tablo 3.15. E = 500 MPa için eşdeğer basınç çubuğu kalınlığı hesabı.....**56**
Tablo 3.16. E = 13969 MPa için eşdeğer basınç çubuğu kalınlığı hesabı.....**57**
Tablo 4.1. K-21 karışım oranları **65**
Tablo 4.2. K-21 numunesinin sektör muadilleri ile karşılaştırılması **67**

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Geopolimer betonun içerik bileşenleri **19**
Şekil 3.1. Taban külü prosesi..... **31**
Şekil 3.2. Silis dumanı..... **32**
Şekil 3.3. Pomza tozu **32**
Şekil 3.4. Granül ve lifli atık lastikler **33**
Şekil 3.5. Atık mermer **33**
Şekil 3.6. Sodyum hidroksit (NaOH) **34**
Şekil 3.7. Isı kürü uygulanan etüv fırını **35**
Şekil 3.8. Mekanik test ekipmanları **36**
Şekil 3.9. Alkali aktivatörünün hazırlanması **37**
Şekil 3.10. Karışım-1 (K-1), Karışım -2 (K-2) ve Karışım -3 (K-3) numuneleri..... **38**
Şekil 3.11. Karışım-4 (K-4) numunesi ve kalıplanmış hali..... **39**
Şekil 3.12. K-5 numunelerinin kalıptaki hali **40**
Şekil 3.13. K-6, K-7, K-8, K-9, K-10 ve K-11 numuneleri..... **41**
Şekil 3.14. K-6, K-7, K-8, K-9, K-10 ve K-11 numunelerinin son halleri..... **41**
Şekil 3.15. K-12, K-13 ve K-14 numuneleri **42**
Şekil 3.16. K-15 numunesinin hazırlanma aşamaları ve etüv sonrası **43**
Şekil 3.17. K-16 isimli taban külü esaslı numune **44**
Şekil 3.18. K-17 ve K-18 karışımlarının kalıplara dökülmesi..... **45**
Şekil 3.19. K-17 ve K-18 numunelerinin etüv sonrası görünümleri **45**
Şekil 3.20. K-20 karışım görseli..... **47**
Şekil 3.21. K-20 numuneleri 5 gün etüv sonrası durumları..... **47**
Şekil 3.22. K-21 numuneleri ve 7 günlük ısı kürü sonrası durumları **48**
Şekil 3.23. K-21 içeriğine uygun diğer kalıp dökümleri **49**
Şekil 3.24. K-21 50x50x50 mm küp numune basınç dayanım testi **50**
Şekil 3.25. K-21 40x40x160 mm numune eğilme dayanımı testi **51**
Şekil 3.26. K-21 150x150x150 mm küp numune basınç dayanım testi **51**
Şekil 3.27. Gerilme – şekil değiştirme testi..... **52**
Şekil 3.28. K-21 silindirine ait gerilme – şekil değiştirme grafiği **52**
Şekil 3.29. Referans çerçeve modeli **53**
Şekil 3.30. Referans çerçeve plastik mafsal tanımı **53**
Şekil 3.31. Referans çerçeve itme analizi sonucu **54**
Şekil 3.32. TBDY-2018 eşdeğer basınç çubuğu modelleme formülleri..... **54**
Şekil 3.33. K-21 karışımı birim eleman duvar modeli statik itme analizi..... **55**
Şekil 3.34. Referans ve K-21 malzemeli çerçeve kapasite karşılaştırılması **56**
Şekil 3.35. E=500 MPa, K-21 malzeme ve referans çerçeve kapasite karşılaştırılması. **57**
Şekil 3.36. Tüm analizlerin kapasite eğrilerinin karşılaştırılması **58**
Şekil 4.1. Alkali aktivatör hazırlama süreci **62**
Şekil 4.2. K-18 karışımının hacimsel artışı **63**
Şekil 4.3. Deney sonrası numune görünümü..... **66**
Şekil 4.4. Tüm analizlerin kapasite eğrilerinin karşılaştırılması **68**

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler		Açıklama
±	:	Artı Eksi
°C	:	Santigrad Derece
%	:	Yüzde

Kısaltmalar		Açıklama
Al_2O_3	:	Alüminyum Oksit
ECC	:	Çimento Esaslı Kompozit
CO_2	:	Karbondioksit
M	:	Molarite
KOH	:	Potasyum Hidroksit
K_2CO_3	:	Potasyum Karbonat
K_2SiO_3	:	Potasyum Silikat
SiO_2	:	Silisyum Dioksit
NaOH	:	Sodyum Hidroksit
Na_2CO_3	:	Sodyum Karbonat
Na_2SiO_3	:	Sodyum Silikat
H_2O	:	Su
TBDY	:	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği

1. GİRİŞ

Nüfus artışı ile birlikte endüstride çeşitli gereksinimler ortaya çıkmış ve bu ihtiyaçlar doğrultusunda inşaat sektörü hızla gelişmiştir. Ancak, sektörde tercih edilen doğal kaynakların hızla tükenmesi sürdürülebilirlik açısından büyük problem oluşturmuştur. Geleneksel yapı malzemelerinin kullanımı, doğal kaynakların aşırı tüketimine neden olmakta ve ortaya çıkan atıklar geri dönüşü olmayan çevresel sorunlara yol açabilmektedir. Bu durum, insanoğlunun çevresel etkilerini minimize edebilmesi adına yeni ve sürdürülebilir alternatiflerin araştırılmasını zorunlu kılmıştır. Bu tez çalışması ile çevre dostu, sürdürülebilir, inovatif, ekonomik yapı malzemelerinin araştırılması ve sektörel kullanıma sunulması amaçlanmıştır. Sürdürülebilir malzeme seçiminin, inşaat sektörünün çevresel etkilerini azaltmakla kalmayıp, gelecekte atıkların geri dönüşümü ile birlikte ekonomik açıdan da katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Çalışmamızda ilk olarak geleneksel Portland çimentosunun üretim sürecinde atmosfere salınan karbondioksit nedeniyle çevre dostu, yüksek mukavemet elde edilebilen, daha az karbon ayak izi bırakan geopolimerlerin seçimiyle bu katkının sağlanması amaçlanmıştır. Geopolimer bağlayıcılar normal Portland çimentosuna göre kıyasla daha hızlı dayanım kazanmakta ve her türlü kaya esaslı agregalarla bağlanabilmektedir (Davidovits, 2013). Geopolimerlerin oluşumunda kullanılan hammaddeler özellik bakımından tek başlarına bağlayıcılık özelliği taşımamaktadır. Ancak bu malzemeler alkali aktivatörleri ile reaksiyona girerek geopolimerizasyon sürecini başlatmaktadır. Doğal ve yapay atık malzemelerden elde edilebilen bu geopolimerler fazla enerjiye ihtiyaç duyulmadan üretilebilmektedir. Bu süreçte enerji maliyeti, atık yönetimi, düşük karbon salınımı ve daha az kaynak tüketimi gibi olumlu yönleri fayda/maliyet açısından alternatif malzemeler olarak kullanımını cazip hale getirebilmektedir. Gelişen teknolojinin etkisiyle birlikte büyüyen endüstrinin doğal bir sonucu olarak ortaya çıkan birçok atık bulunmakta ve her geçen gün hızla artmaktadır. Bu atıkların depolanması, bertaraf edilmesi ya da tekrardan kullanılması gerekmektedir. Depolanması veya bertaraf edilmesi durumunda çevreye vereceği zararlar göz önüne alındığında en doğru seçeneğin tekrar kullanılmasıyla ikincil hammadde olarak sürdürülebilirliğe katkı sağlaması olacaktır. Bu kapsamda tez çalışmasında öncelikle geopolimer karışımlar detaylı irdelenmiş, atık lastiklerin geopolimer karışımlarda kullanımı incelenmiştir. Literatürden elde edilen karışım oranları esas alınarak farklı birçok karışım hazırlanmış, inşaat sektöründe yapı malzemesi olarak kullanımı açısından en ideal karışım belirlenmiştir. Atık lastik esaslı sürdürülebilir bu geopolimer karışımın yapısal eleman üretiminde kullanımı

değerlendirilmiştir. Deneysel veriler esas alınarak atık lastik esaslı geopolimer ürünlerin sadece yeni yapı malzemesi olarak değil geleneksel yapısal sistemlerde dolgu duvarlı çerçevelerde güçlendirme veya yeniden yapı inşa süreçlerinde kullanılabilmesi analitik olarak araştırılmıştır.

1.1. Geopolimer Üretimi ve Kullanılan Malzemeler

Günümüz inşaat sektöründe en fazla kullanılan yapı malzemesi betondur. Artan yapılaşma ile birlikte beton tüketimi hızla artmaktadır. Beton malzemesinin maliyet ve çevresel problemler oluşturan kısmı çimentodur. Doğal kaynakların tüketimi, harcanan enerji miktarının fazlalığı ve çevreye verilen olumsuz etkiler göz önüne alındığında bu duruma çözüm üretilmesi önemli bir adım olacaktır. Endüstride ortaya çıkan atıklarda bulunan puzolanik özellikler sayesinde bu malzemeler ikincil bir hammadde gibi değerlendirilip çimentoya alternatif oluşturabilmektedir. Endüstriyel tesislerde fosil yakıtların yanması sonucunda fırın tabanlarında oluşan atıklara taban külü denmektedir. Taban külü, fırınlardan su jetlerinin yardımıyla atık havuzlarına transfer edilir. Bu türüne kuru taban külü denir. Koyu gri renklere sahip olup gözenekli yapısıyla granüler kum görüntüsüne benzemektedir. Diğer bir tür ise kazan cürufudur. İri yapıya sahip bu atık külleri sıvı halde atık havuzlarına transfer edilir ve su ile temasında kristalleşme başlar. Kazan cürufu sert, siyah renkli, köşeli ve camsı yapıya sahip bir malzemedir. Bu atıkların özellikleri yanan kömürün türüne, depolanma şekline, yanma süresine ve sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Dolayısıyla belli standartlara sahip bir yan ürün değildir. Öğütüldüğünde puzolanik özelliklerinde artış gözlemlenmektedir (Kaya, 2010). Kullanım alanları kısıtlı olmasından dolayı büyük çevre sorunu oluşturmaktadır. Kül havuzlarına dökülerek depolanması ile giderek artan atık miktarıyla oluşturduğu çevre sorununu çözebilmek için çok sayıda araştırma yapılmaktadır. Hammadde olarak kullanımıyla sürdürülebilir bir oluşuma katkı sağlanması amaçlanmaktadır (Bilgil ve ark., 2017). Diğer yönden, nüfusun ve gelişen teknolojinin artmasıyla araç kullanımı artmıştır. Araçların güvenli kullanımı için lastiklerin belirli bir ömrü bulunmaktadır. Faydalı ömrünü tamamlamış lastiklerin çevreye büyük bir atık sorunu oluşturduğu görülmektedir. Bu atıkları depolamak hacimce çok büyük alanlara ihtiyaç duyulmasına sebep olmaktadır. Zamanla toprağa da zararlı kimyasallar salıp çevreye zarar verme potansiyeline sahiptir. Bertaraf edip yok edilmesinde ise yine atmosfere salınacak olan karbon ayak iziyle olumsuz çevresel etki ortaya çıkaracaktır. Her sene dünyada milyonlarca lastik yakılmakta, gömülmekte, depolanmakta, yakıt olarak kullanılmakta, piroliz yöntemiyle

enerji üretiminde ve karbon siyahı elde edilmesi gibi birçok şekilde bertaraf edilmektedir (Qaidi ve ark., 2022). En doğru yöntemin faydalı ömrünü tamamlamış atık lastiklerin ikincil bir hammadde olarak kullanımını sağlamaktır. İnşaat sektöründe faydalı ömrünü tamamlamış atık lastiklerin kullanımıyla betonda sünekliliğe, mukavemete ve hafifliğe katkı sağlanacağı düşünülmektedir (Parçal, 2023). İnşaat sektöründe yapının iç dış kaplamalarında, zeminlerde, mutfak tezgahlarında, banyolarda, merdiven basamaklarında ve süslemelerde sıkça kullanılan mermerler maden yataklarından çıkarılırken ve tasarıma uygun üretim sırasında bloklarının ve plakalarının kesilmesi aşamalarında atık ortaya çıkarabilmektedir. Ortaya çıkan atık mermerin agrega olarak değerlendirilerek inşaat sektöründe yapı malzemesi olarak kullanımı amaçlanmaktadır (Özdemir, 2021). Yapılan bu çalışmada atık malzemelerin ikincil hammadde olarak kullanımıyla elde edilebilen geopolimerden sürdürülebilir bir karışım hedeflenmiştir. Böylece karışımın içeriğindeki atık malzemeler ile çevre dostu, ekonomik, geri dönüştürülebilir yeşil bina yapı malzemeleri üretilmek amaçlanmıştır. Karışımlarda uygulanan farklı reçeteler ile bir standart oluşturulmaya çalışılmıştır. Elde edilen bulgulara göre sektörde en uygun kullanım alanı araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarla puzolanik malzemelerden geopolimer hamuru tasarlanmıştır. İçeriğinde bağlayıcı olarak endüstriyel fırınların tabanında atık halde bulunan malzeme tercih edilmiştir. Geopolimer hamurun üretiminde puzolanik özellikleri nedeniyle sıkça tercih edilen uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi malzemeler yerine kullanım alanı daha kısıtlı olan taban külü kullanılmıştır. Puzolanik malzemeler arasında kullanım alanı kısıtlı olan taban külü depolama sorunu oluşturmakta ve çevreye verdiği zarar artmaktadır. Hem puzolanik özelliği hem de hafifliği nedeniyle tasarlanan geopolimer hamur karışımına pomza eklenmiştir. Pomza doğal halde doğada volkanik aktiviteler sonucu oluşan birbirinden bağımsız gözenekler bulunduran bir kayaçtır. Pomza çok uzun yıllardır inşaat sektöründe kullanılan bir malzemedir. Geopolimer hamur yapımında tercih edilen bu iki malzemeden pomza doğal, taban külü ise yapay puzolanik malzemedir. Sürdürülebilir, çevre dostu yeşil yapı malzemeleri üretmek amaçlanan bu çalışmada karışım bileşenleri büyük oranda atık malzemelerden seçilerek ekonomiye, çevre dostu tasarımlara ve sürdürülebilirliğe katkı sağlanması hedeflenmiştir. Bu kapsamda ilk olarak faydalı ömrünü tamamlamış atık lastik ikamesi ile hafif, süneklilik değerleri yüksek, kaynak tüketimi ve atık yönetimi açısından olumlu sonuçlar hedeflenen yeşil yapı malzemesi tasarımı incelenmiştir. İkincil olarak agrega seçiminde hem mukavemete olumlu katkı sağlayacağı düşünülen hem de geniş kullanım alanına sahip olan mermer atıkları tercih

edilmiştir. Puzolanik özellikleri nedeniyle tercih edilen taban külü ve pomza kıyaslandığında taban külünün ağır olmasına karşın pomza hafif bir malzemedir. Dolayısıyla karışımda ağırlık optimizasyonu sağlamaktadır. Agrega olarak tercih edilen lifli atık lastik ise karışımın sünekliliğini artırmakta, atık mermerden dolayı artan ağırlığı ise dengelemektedir. Puzolanik özelliklere sahip bu malzemeler tek başlarına mukavemet alamayacağı için alkali aktivatörleri ile tepkimeye girerek oluşumun tamamlaması gerekmektedir. Sıkça tercih edilen, kolay elde edilebilen ve kullanım alanı oldukça geniş olan sodyum hidroksit ile bu geopolimerizasyon sürecinin başlaması sağlanmıştır. Tüm bu çerçeve de atık lastik ve diğer atık malzemelerden oluşan, ısı iletkenlik direnci yüksek ve yığma bir birim için kabul edilebilir dayanım parametlerine sahip %100 atık ve doğal geri dönüşümünden bir yapı malzemesi elde edilebilmiştir.

1.2. Çalışmanın Amacı ve Önemi

Tez çalışmasında, geopolimer üretiminde kullanılan malzemelerin birbiriyle olan uyumunu belirlemek ve elde edilen geopolimer harcın mekanik ve fiziksel özelliklerini etkileyen parametreleri analiz etmek amacıyla literatür araştırması ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında farklı parametreler esas alınarak kıyaslamalar yapılmış ve bu doğrultuda en iyi sonucu veren, en kararlı özelliklere sahip karışım içeriği belirlenmeye çalışılmıştır. Bu süreçte optimum bileşimin saptanmasıyla, geopolimer harcın standartlaştırılması hedeflenmiştir. Araştırma bulguları doğrultusunda, belirlenen en iyi özelliklere sahip karışım temel alınarak inşaat sektöründe uygulanabilirliği değerlendirilmiş ve potansiyel kullanım alanları irdelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ile geopolimer bazlı bu yapı malzemesinin sektördeki sürdürülebilirliğe katkı sağlama potansiyeli değerlendirilmiştir. Çalışmada, puzolanik özelliklere sahip olan endüstriyel atık ve pomzanın birlikte kullanımı ile dayanıklı ve hafif bir yapı malzemesi elde edilmesi amaçlanmıştır. Endüstriyel atık kullanım alanlarının sınırlı olması ve giderek artan atık sorunu ortaya çıkarması nedeniyle, bu puzolanik malzemeye ilave fiziksel özellik avantajları sağlamak açısından pomza tercih edilmiştir. Agrega olarak, atık sorunu oluşturan ve faydalı ömrünü tamamlamış lifli atık lastik ile atık mermer kullanılmış; böylece geri dönüşüme büyük bir katkı sağlanması hedeflenmiştir. Bu kapsamda gerçekleştirilen çalışma, sürdürülebilir yapı malzemelerinin geliştirilmesine yönelik önemli bir adım niteliğindedir. Lifli atık lastik, atık mermer, endüstriyel atık ve pomza katkılı geopolimer yapı malzemesinin mekanik açıdan en iyi sonuç vereceği karışım oranının belirlenmesi ve bu oranların mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi

amaçlanmıştır. Bu kapsamda basınç ve eğilme dayanımı testleri yapılarak her bir karışım ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Endüstriyel atık ve pomza katkılı bu malzemenin ısı yalıtım parametreleri incelenmiş bu değerlere göre yapı malzemesi olarak kullanımı değerlendirilmiştir. Yapı sektöründe çok geniş kullanım alanına sahip betonun içeriğinde bulunan çimentonun çevre açısından olumsuz etkileri bulunmaktadır. Atmosfere salınan karbondioksit gazının yaşama olan etkilerini önlemek için doğru yöntemin karbon ayak izini azaltmak olduğu kabul edilmektedir. Bu çerçeve de Portland çimentosuna karşın etkili bir alternatif olan geopolimerler her ne kadar çevre dostu, ekonomik ve sürdürülebilir olsa da kullanım alanlarının kısıtlılığı, yapı malzemesi çeşitliliğinin azlığı ve kararlı standartlarının belirlenememesi nedeniyle sektörde yaygınlaşmamıştır. Her ne kadar ekonomik, çevre dostu, sürdürülebilir ve yeşil bina konseptine uygun olsa da geopolimerler ile standardizasyon oluşturulamadığı ve kullanım çeşitliliği arttırılamadığı için bu yapı malzemeleri üzerinde çok sayıda araştırma yapılmaktadır. Bu çalışmalar ile geopolimerlerin tercih edilebilirliği artırılıp sektörde faydalı kullanım alanları geliştirilmektedir. Bu tez çalışması ile bu kapsamdaki akademik literatüre katkı sunulabilmesi düşünülmüştür. Yapılacak yeni araştırmalar ve inovatif çalışmalar ile geopolimerlerin yapı sektöründeki rolü güçlendirilerek, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli katkılar sağlanabilecektir. Bu tez çalışmasının gelecekte geopolimer esaslı malzemelerin inşaat sektöründe daha yaygın kullanımına yönelik araştırmalara katkı sunabilmesi hedeflenmiştir. Yapılan araştırmalarda yapı malzemesi alanında geopolimer esaslı birçok bilimsel çalışma bulunmasına karşın bu malzemelerin gerçek yapısal uygulamalarda kullanımının oldukça sınırlı olduğu belirlenmiştir. Bu çerçevede tez çalışması sadece yapı malzemesi alanında olmayıp inovatif yapı malzemelerinin gerçek yapısal üretimini de kullanımını ele almaktadır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Tez çalışması kapsamında geopolimer karışımlar, atık lastiğin geri dönüşümü ve bunların yenilikçi yapı malzemesi üretiminde kullanabilirliğine yönelik detaylı bir literatür araştırması yapılmıştır. Ayrıca geopolimer karışımdan üretilmiş yapı malzemelerinin sektörel uygulamalarda kullanılabilirliği de araştırılmıştır. Deneysel çalışmalara esas karışım içeriklerinin belirlenmesinde literatür araştırmaları dikkate alınmıştır. Literatürde geopolimer esaslı birçok bilimsel araştırma yer almasına karşın bu malzeme türlerinin gerçek yapısal uygulamalarda kullanımının oldukça sınırlı olduğu görülmüştür. Ayrıca literatürde atıkların geri dönüşümü ve sürdürülebilir yapı malzemesi tasarımının güncel ve sektör açısından önemli bir başlık olduğu tespit edilmiştir.

Örneğin; Bilgil ve ark. (2017) çalışmalarında kullanım alanı kısıtlı olması nedeniyle büyük çevresel etkiler oluşturma potansiyeline sahip olan taban külü kullanmışlardır. Çalışmada endüstriyel gelişimin sonucunda ortaya çıkan bu atıkların en doğru şekilde değerlendirilmesinin gerektiği vurgulanmıştır. Bilgil ve ark., inşaat sektöründe atık olan taban külünün tuğla yapımında kullanımını araştırmıştır. Tuğla yapımında taban külünün hammaddeye katkı maddesi olarak kullanımının iyi bir alternatif olabileceğini göstermişlerdir. Dünya üzerinde enerji üretiminde en fazla tercih edilen yöntemin fosil yakıtların yakılması olduğu, bu işlem sonucunda ortaya çıkan atıkların %25'inin taban külü %75'inin ise uçucu kül olarak adlandırıldığı, bu atıkların tuğla yapımında kullanımıyla sürdürülebilir oluşum hedeflendiği, yeşil bina yapı malzemeleri ile çevre dostu yapısal elemanlar elde edilmek istendiği belirtilmiştir. Çalışmada yazarlar Dünya da olduğu gibi Türkiye'de de enerji üretiminde en çok tercih edilen yakıtın kömür olduğu, linyit kömürün yakılması sonucu yılda yaklaşık olarak 18 milyon ton uçucu kül, 6 milyon ton ise taban külünün atık olarak ortaya çıktığı, çalışmalarında ürettikleri numunelerin %100 oranında kilden elde edilmiş referans numunesi ve %10 dan %50 oranına kadar taban külü ikame edilmiş karışımlardan oluştuğu, %50 ikame edilmiş taban küllü karışımlarda büyük çatlaklar meydana geldiği, taban külünün %45 oranında ikame edilmesinin hedeflenen amaç doğrultusunda iyi bir alternatif olduğunu vurgulamışlardır.

Dolğun (2010), çalışmasında kendiliğinden yerleşen betonda öğütülmüş pomzanın etkisini araştırmıştır. Doğal puzolanik malzeme olan pomzanın Dünya rezervlerinin 7 de 1'inin Türkiye'de bulunduğunu, pomzanın boşluklu olan yapısının süngere benzediğini, volkanik olaylar sonucunda kimyasal ve fiziksel etkenlere karşı dayanıklı olduğunu, pomzanın asidik ve bazik olmak üzere iki çeşide ayrıldığını

belirtmiştir. En yaygın olarak bulunan asidik pomzanın beyaz ve kirli beyaz renklere, bazik pomzanın ise kahverengi ve siyaha daha renklere sahip olduğu belirtilmiştir. Asidik pomzanın daha viskoz ve silis değerlerinin daha yüksek olduğu çalışmada vurgulanmıştır. Araştırmada %10-15-20-25 oranlarında pomza, agrega yerine ikame edilerek farklı kür uygulanmıştır. Isı kürü uygulanan numunelerde kontrol numunesine göre basınç dayanımının düştüğü, kaynar kürde basınç değerinin arttığı, standart kürde ise kontrol numunesinin değerlerine yaklaşıldığı gösterilmiştir. Çalışmada sonuç olarak pomza ikamesinin doğrusal olarak suya ihtiyacı arttırdığı belirtilmiştir.

Toprak (2011), doktora tez çalışmasında termik santralden alınan taban külü ile alkali aktivatör birleşiminden geopolimer harç elde etmiştir. Elde ettikleri harcın birim hacim ağırlık, ultrases geçiş hızı, eğilme ve basınç dayanımları, priz süreleri ve hacim sabitlikleri parametrelerini belirlemiştir. Çalışma içeriğinde ülkemizdeki 13 termik santralden yılda yaklaşık 15 milyon ton uçucu kül ve 4 milyon ton taban külü elde edildiği, bir ton çimento üretiminde yaklaşık bir ton CO_2 açığa çıktığı literatür bilgisi verilmiştir. Yazar çalışmasında geopolimerlerin, uçucu kül, taban külü ve yüksek fırın cürufu gibi silis ve alüminli malzemelerin, Na_2SiO_3, NaOH ve KOH gibi alkalilerle aktivasyonu ile üretildiğini, öğütme işleminin, kür sıcaklığının ve süresinin, alkali tip ve miktarının geopolimerler özeliklerine etkileyen en önemli parametreler olduğu ifade etmiştir. Toprak çalışmasında geopolimer esaslı yapılan karışımlarda taban külü, kum, su, sodyum hidroksit ve sodyum silikat bulunduğu, sodyum hidroksitin %98 saflıkta kostik olarak bilinen 320 ℃'de eriyen beyaz renkli bir kimyasal olduğunu, sodyum silikatın ise cam suyu olarak da bilinen birçok sektörde kullanılan kimyasal olarak adlandırıldığını söylemiştir. Yazar geopolimer karışımlarda ilk olarak en uygun olan kimyasal karışıma karar vermek için farklı oranlarda alkali aktivatörler hazırlanması gerektiğini, literatürde taban külü esaslı basınç dayanımları 25 – 30 MPa aralığında değişen geopolimer harçlar üretilebildiğini, hava küründe numunelerin dayanım gelişiminin oldukça hızlı başladığını daha sonra yavaşladığını belirtilmiştir. Etüvde kür uygulamasının ise suyu erken uzaklaştırdığından dayanım kazanmaya olumsuz etkisine yer verilmiştir.

Pekdemir (2011), çalışmasında bir yapı tasarlanırken üç önemli hususa dikkat edilmesinin gerektiğinden bahsetmiştir. Bunların emniyet, ekonomi ve estetik olduğu belirtilmiştir. Çalışmada emniyet sınırları içinde kalmak kaydıyla, ekonomik yöntemler kullanılarak daha hafif beton üretimi hedeflemiştir. Hafif beton yapımında agrega yerine pomza agregası kullanımının olumlu etki sağladığı belirtilmiştir. Türkiye'de Nevşehir,

Van, Kayseri ve Erzurum'da pomza rezervleri bulunduğu, bu çalışmada Erzurum Pasinler yöresine ait pomza agregalar ve yapay puzolanlar olarak ise uçucu kül ve silis dumanı kullanıldığı belirtilmiştir. Böylece pomzanın ve puzolanların normal betona katkıları incelenerek pomza ilavesinin birim hacim ağırlığında düşme sağladığı sonucuna ulaşılmıştır. Ancak pomza miktarı artıkça dayanım azalmıştır. Çalışmada pomza miktarının artması ile birlikte bağımsız gözeneklerin oluşmasından dolayı ultrases geçirimliliğinde azalma gözlemlenmiştir.

Bideci (2011), çalışmasında beton karışımında pomza kullanımını araştırmıştır. Pomzanın volkanik hareketler sonucunda oluşan doğal gözenekli kayaçlar olduğu, inşaat sektöründe giderek öneminin arttığı, çevre dostu olan pomzanın ekonomiye katkısının fazla olduğu, düşük birim ağırlığı, ısı yalıtım özelliği, yangına karşı direnci gibi özelliklerinden dolayı tercih edilen bir ürün olduğu bilgisi yer almaktadır. Çalışmada çok yönlü olarak kullanılan polimerlerle pomza agregası kaplanarak agregalar üzerinde granülometri, özgül ağırlık ve birim hacim ağırlık deneyleri gerçekleştirilmiş, bu agregalar ile elde edilen beton numunelerinde yapılan çökme, birim hacim ağırlık, kuru birim ağırlık, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, su emme, donma-çözülme dayanım, sünme ve rötre deneyleri yapılmıştır. Yazarlar çalışmada agregaların polimerle kaplanması sayesinde su emme özelliğini azaltmaya ve yeni bir beton agregası elde etmeye çalışmıştır.

Akkaş (2011), çalışmasında volkanik faaliyetler sonucunda magmanın soğuması sonucu oluşan pomza agregalarını kullanılarak normal betondan daha hafif beton üretimini araştırmıştır. Belli oranlarda pomza ve agrega değişiklikleri ile elde edilen betonlardan kiriş üretilerek yük etkisi altındaki deformasyonları incelenmiştir. Çalışmada tüm agregaların pomza olduğu serilerde eğilme dayanımında düşüş gözlemlenmiş, mekanik ve fiziksel özellikler üzerinde en etkili parametrelerden birinin agrega olduğu belirtilmiştir. Hafif beton çalışmasında birim ağırlıkta azalmaya gitmenin yapısal yükleri azalttığından deprem gibi yatay yükler karşısında avantaj sağlayabileceği bilgisi verilmiştir.

Öztürk (2012), beton teknolojisinde enerji verimliliği üzerine yaptığı bir çalışmada dünyada enerji ihtiyacının her geçen gün hızla arttığını ve kaynaklarda hızla azalma olduğunu, bu nedenle verimli enerji kullanımının önem arz ettiğini, beton teknolojisinde de enerji verimliliğinin ısı ve ses yalıtımı ile öne çıktığını belirtmiştir. Bu çalışmada hafif agrega kullanılarak birim ağırlık düşürülmüş, fiziksel ve mekanik özellikler incelenerek ısı yalıtım özelliğinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. 15x15x15 cm

boyutlarında küp kalıplarda hazırlanan numuneler, 24 saat sonra kalıplarından çıkarılmış ve 23°C sıcaklıktaki suda 7 ila 28 gün boyunca kür havuzunda bekletilerek basınç dayanımı ve su emme özellikleri incelenmiştir. Çalışmada hafif agrega kullanılarak elde edilen betonun enerji verimliliği açısından büyük bir gelişim ortaya koyduğu belirtilmiştir.

Aydın (2015), çalışmasında atık lastik tozunun epoksi reçinesinde dolgu malzemesi olarak kullanımını araştırmıştır. Çalışmada 2 farklı reçine ve 4 farklı lastik karışımı hazırlanmış, lastik oranını kütlece %10 – 50 arasında ilave edilerek etkisi incelenmiştir. Lastik atıklarının geri dönüştürülerek ikincil hammadde olması sonucunda doğal kaynakların korunması, enerji tasarrufu sağlanması ve atık miktarının azaltılması hedeflenmiştir. Lastik kullanımının tüm numunelerde çekme özelliğini olumlu yönde arttırdığı görülmüştür.

Zubairu (2016), çalışmasında atık lastiklerin ECC karışımlarındaki etkisini incelemiştir. Çalışmada çimento esaslı kompozit (ECC), lif donatılı kompozitler olarak belirtilmiş, bu kompozitlerin basınç, çekme ve eğilme yükleri altında sünek ve toleranslı davranış gösterdiği ifade edilmiştir. Yazarlar çalışmalarında atık lastik liflerle üretilen ECC karışımları incelemişlerdir. Yüksek sıcaklığın ECC üzerinde atık lastik kullanımına bağlı olarak etkisi incelenmiş, 200℃-400℃-800℃ sıcaklıklarda araştırması yapılmıştır. Çalışmada atık lastik kullanımının artması ile 7 ve 28 günlük basınç, eğilme ve çekme dayanımlarında olumlu gelişmeler görülmüş, yüksek sıcaklık sebebiyle ortaya çıkan basınç dayanımındaki düşüşü atık lastik etkisinin sınırlandırdığı gözlemlenmiştir.

Öztürk (2016), çalışmasında büyük atık sorunu oluşturan faydalı ömrünü tamamlamış atık lastiklerin beton karışımında kullanımını incelemiştir. Atık lastik ilavesinin hafif beton elde edilmesinde ve yüksek eğilme tokluğunda fayda sağlayarak atık bertaraf edilmesine olanak sağladığını belirtmiştir. Bu çalışmada 25, 50 ve 75 mm uzunlukta kesilmiş atık lastikler kendiliğinden yerleşen beton içerisinde iri agrega ile hacimce yer değiştirilmiştir. Yapılan deneylerde atık lastiklerin taze betonda birim ağırlıkta düşüş sağladığını, uzunlukların arttıkça betonun donatı arasından geçişinin zor hale geldiğini, sertleşmiş betonda kuru birim ağırlığının azaldığını tespit etmiştir. Çalışmada, %10 oranında 25 mm uzunluğundaki atık lastiğin beton karışımına ilave edilmesi sonucunda optimum sonuçlar elde edilmiştir.

Kızar (2017), çalışmasında betonda atık malzeme kullanımı üzerine yoğunlaşmıştır. Atık olarak değerlendirilen malzemelerin büyük bir kısmı geri dönüştürülebilir malzeme olarak seçilmiştir. Çalışmada atık lastiklerin geri dönüşümü ve

beton içerisinde değerlendirilmesi de araştırılmıştır. Bu çalışmada enerji verimli binalar için yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, yüksek ses ve ısı yalıtımı olan beton tipleri elde etmek için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Çalışma kapsamında, farklı oranlarda agrega yerine atık malzeme ikame edilerek elde edilen numuneler üzerinde yapılan testler sonucunda, betonun mukavemetinde ve yoğunluğunda azalma gözlemlenmiştir. Buna karşılık, ısı ve ses yalıtımı özelliklerinde belirgin bir artış meydana gelmiştir.

Konak (2018), yüksek fırın cürufu ve taban külünün beton karışımında kullanımı üzerine bir çalışma yapmıştır. Granüle halde yüksek fırın cürufu, demir çelik sanayisinde önemli bir atık olarak tanımlanmıştır. Bu atığın puzolanik ve bağlayıcılık özelliğine sahip olduğu, taban külünün, kömürle çalışan termik santrallerde yanma sırasında, yanma kazanının altında biriken mikron boyutundaki atık olarak nitelendirildiği belirtilmiştir. Taban küllerinin betonlarda katkı maddesi olarak kullanılabildiği ifade edilmiş, granüle yüksek fırın cürufu ve taban külü gibi endüstriyel atıkların ince agrega olarak kullanımının, betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Balun (2019), çalışmasında, Portland çimentosu üretimi sırasında açığa çıkan CO_2 gazının çevresel etkileri nedeniyle alternatif bağlayıcıların kullanımını ele alınmıştır. Alüminosilikat yapıya sahip malzemelerin alkali çözeltilerle aktif edilmesi sonucu elde edilen geopolimerlerin bu alternatiflerden biri olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada, Bitlis yöresine ait pomzanın alkali çözeltilerle, %20 oranında Portland çimentosuna ikamesi incelenmiştir. Alkali çözelti olarak sodyum silikat ve potasyum hidroksit kullanılmıştır. Deneyler sonucunda 100°C'de 72 saat etüvde bekletilmiş 28 günlük pomza içeren hibrit numunelerde 91.09 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir.

Çelikten (2019), çalışmasında alkali ile aktive edilmiş hafif betonları incelemiştir. Bağlayıcı malzeme olarak yüksek fırın cürufu ve uçucu külü tercih etmiş, alkali olarak ise sodyum silikat ve sodyum hidroksiti farklı oranlarda kullanmıştır. Üretilen karışımlara birim ağırlık, ultrases geçiş hızı, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı testleri uygulamış ve parametreleri hesaplamıştır. Çalışmada beton karışımlarında farklı miktarda bazik pomza agregası kullanılmıştır. Birim ağırlık olarak daha düşük değerler elde edilmiştir. Numuneler yüksek sıcaklığa maruz kaldığında mikro yapılarda bozulmalar, mikro çatlak derinliği sıcaklık arttıkça çoğalmıştır. Bu çatlaklar kontrol numunesine göre alkali ile aktive edilmiş numunelerde daha fazla gözlemlenmiştir.

Şinik (2019), çalışmasında ana hammadde olarak termik santrallerde atık halde elde edilen uçucu kül kullanmıştır. Alkali aktivatör olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit tercih edilmiştir. Uçucu kül ve alkali aktivatörlerin en iyi şekilde tepkimeye

gireceği karışımlar belirlenmiştir. Hazırlanan karışımlar kalıplara dökülmüştür. Üç farklı sürede ve 3 farklı derecede etüve atılmıştır. Daha sonra bir gün laboratuvar ortamında bekletildikten sonra kalıptan alınmıştır. Daha sonra 24 saat su tankında bekletilen numunelerin su emme, görünen porozite, birim hacim ağırlığı ve görünen yoğunluk gibi fiziksel özellikleri tespit edilmiştir. 8 ve 24 saatlik kür sürelerinde 60°C'de en yüksek porozite ve su emme değerlerine ulaşıldığı belirtilmiştir. En düşük birim hacim ağırlıklarına 60°C'de ulaşılmıştır. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan geopolimer betonun fiziksel ve mekanik özeliklerini koruyabildiği gözlemlenmiştir. Bu karışımın sülfat etkilerine karşı oldukça dayanıklı olduğu fiziksel ve mekanik özelliklerini uzun süre koruduğu tespit edilmiştir.

Sarkaz (2020), çalışmasıyla inşaat sektöründe modern yapıların yapımı için sürdürülebilir, çevre dostu malzemelerin kullanımını araştırmıştır. Portland çimentosunun üretiminde çok miktarda atmosfere salınan sera gazları nedeniyle alternatiflerin arandığını, geopolimer kullanımının hem çevre dostu hem de enerji tasarrufu sağladığını, artan karayolu taşımacılığı ile ortaya çıkan atık lastiklerin büyük çevresel sorunlar oluşturduğunu, atık yönetimiyle çevreci ve sürdürülebilir yapı malzemeleri elde edilebildiğini belirtmiştir. Bu çalışmada endüstriyel bir atık olan yüksek fırın cürufunun kullanıldığı geopolimer beton içerisinde atık lastik eklenmesinin etkisi araştırılmıştır. Yapılan araştırmalarla atık lastik eklenmesi sebebiyle yayılma çapında azalma ve işlenebilirlik azalmıştır. Yüksek sıcaklık etkisinde yapılan incelemelerde sıcaklık arttıkça basınç dayanımında düşüş gözlemlenmiştir.

Topal (2020), çalışmasında yüksek fırın cürufunu sodyum silikat ve sodyum hidroksit ile aktive ederek geopolimer numuneler elde etmiştir. Çalışmada agrega olarak geri dönüştürülmüş beton kullanılmıştır. Deneyler sonucunda, yangın etkisi ile basınç dayanımında ve ultrases geçiş hızında azalma olduğu, su emme oranında, kılcal geçirimlilik katsayısında ve ağırlık değişiminde ise artış olduğu belirlenmiştir.

Cengiz (2020), çalışmasında, tuğla taban külü ve kolemanit katkılarının geopolimerizasyon yöntemleri ile ısı yalıtım malzemesi üretiminde değerlendirilebilmesini incelemiştir. Geopolimer köpüklerin düşük termal iletkenli, doğa dostu ürünler olmasından dolayı rağbet gördüğünü, köpük üretiminde en iyi sonuçlar metakaolin kullanılarak elde edilmiş olsa da diğer katkılarla da iyi sonuçlar elde edilebildiğini belirtmiştir. Maksimum oranda tuğla taban külü ve minimum oranda metakaolin sodyum silikat ve sodyum hidroksit ile aktive edilerek geopolimer elde

edilmiş, köpük oluşumunu sağlamak için hidrojen peroksit ilave edilmiş, yüzey aktif maddesi eklenerek gözenek oluşumunda homojenlik sağlanmıştır.

Şengül (2020), çalışmasında çimento üretiminde gerçekleşen yüksek miktarda sera gazı salınımı ve yüksek enerji ihtiyacı sebebiyle çevre dostu olan puzolanik özelliklere sahip atık maddelerin değerlendirilmesini ele almıştır. Öğütülen uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve taban külünün çimento harçlarına ikamesi sonucunda elde edilen harçların basınç dayanımı, boy uzama miktarları ve klorür iyonu geçirimliliğini test etmiştir. İnceleme sonuçları doğrultusunda dayanım ve dayanıklılık özelliklerine etkisi karşılaştırıldığında yüksek fırın cürufunun maksimum katkıyı sağladığını, uçucu külde bu etkinin basınç dayanımında yüksek fırın cürufuna göre daha düşük olduğunu, dayanıklılıkta ise yüksek fırın cürufuna yaklaştığı belirtilmiştir.

Hamid (2021), çalışmasını silika ve alüminanın, alkali aktivatörler ile kürlenmesi üzerine yapmıştır. Geopolimer bağlayıcıları çimento yerine kullanılabilecek alternatif bir malzeme olarak değerlendirdiğini, bu alternatif malzemelerin uçucu kül ve pomza tozu olduğunu, alkali aktivatör olarak ise 12 M sodyum hidroksit çözeltisini elde ettiğini belirtmiştir. Numuneleri 2, 4 ve 6 gün boyunca 60°C'de kürlendiğini, uçucu kül oranının artması ile özelliklerde iyileşme gerçekleştiğini, en iyi kürleme süresinin 6 gün olduğunu belirtmiştir.

Aksoy (2021), çalışmasında atık lastiklerin beton karışımına etkisini incelemiştir. Dünyada milyonlarca araç lastiğinin verimli ömrünü tamamlayıp atık hale geldiğini belirtmiştir. Bu atıkların doğaya zararını azaltmak için sürdürülebilir bir çalışmayla yan ürün olarak kullanılması gerektiğini söyleyerek, polimer katkılarla beton oluşumunda atık lastik katkısının araştırılmasını amaçlamıştır. İnce agrega yerine ikame edilen atık lastikleri çimento yerine %1 ve %2 oranlarında katarak beton oluşturmuştur. Tüm karışımlarda atık lastik miktarı arttıkça birim hacim ağırlığında ve basınç dayanımında azalma gözlemlenmiştir.

Özdemir (2021), çalışmasında, doğal kaynaklarımızdan olan Nevşehir yöresine ait asidik pomzayı agrega olarak, endüstriyel atık olan Kırşehir yöresinden temin edilen mermer tozunu ise farklı oranlarda çimentoya ikame malzemesi olarak kendiliğinden yerleşen hafif beton içeriğinde kullanmıştır. Yapılan deneylerle %15 oranında mermer tozu kullanımının uygun olacağı tespit edilmiştir. Mermer tozu kullanımının hem çevre kirliliği hem de sürdürülebilirlik açısından önem taşıdığını ifade edilmiştir.

Gul ve ark. (2021), çalışmasında mermer ocaklarında yapılan çalışmalar sonrasında ortaya çıkan atık mermerlerin ve verimli kullanım ömrünü tamamlamış atık

lastiklerin çevreye olumsuz etkilerini azaltmak için beton karışımında kullanımını değerlendirmiştir. Böylece hem atıkların çevreye zararının engellenmiş olunacağını hem de daha ekonomik malzemeler elde edilebileceğini belirtmişlerdir. Çalışmada mermer tozları ve atık lastik ince ve iri agrega yerine düşük oranlarda ikame edilmiştir. Yapılan deneylerin sonucunda mermer tozuyla üretimde çevre dostu beton üretimi mümkün olduğu ve lastikle beraber kullanımında dayanımda bir azalma gözlemlense de bu iki atıkla beton üretiminin uygun olduğu tespit edilmiştir.

Ulusoy (2021), atıkların çevre sorununa sebep vermemesi için atık lastiklerin betonda agrega olarak kullanımı üzerine bir çalışma yapmıştır. Yapılan deneylerde atık lastik ikamesinin basınç dayanımına bir katkısı gözlemlenmemiştir. Buna karşılık ısı iletkenliğinin azaldığı ve aşınma direncinin arttığı görülmüştür.

Ekiz Barış (2022), çalışmasını duvar birim elemanları üzerine yapmıştır. Çerçeve sistemli yapılarda yoğunluğu en fazla 1 gr/cm^3 ve basınç dayanımı 2.5-7.5 MPa arasında değerlere sahip duvar birim elemanları olan yatay ve düşey delikli pişmiş toprak tuğlanın, gazbeton blok ve bims blok gibi bölme duvar malzemeleri gibi ısı yalıtım kurallarını tek başına sağlayamadığını belirtmiştir. Öte yandan, gözenekli yapıya sahip olan bu malzemelerin, iklim koşullarına karşı bir koruyucu katman olmaksızın kullanılması halinde fiziksel ve mekanik performansının yüksek olmayacağını belirtmiştir. Bundan dolayı birden çok malzemenin beraber katman halinde duvarı oluşturması gerektiğini, böylece kendini taşıma, ısı yalıtımı ve kaplama gibi beklentilerin farklı malzemelerle karşılanacağını, bu karmaşık detay tasarımlarını ortadan kaldırıp monolitik duvar malzemesi üretimini amaçlamıştır. Yerel hammadde kaynaklarından üretilen, duvar elemanında kullanılabilen, belli dayanım ve rijitlik elde edilmiş, hafif ve kolay taşınabilen, iklim koşullarına uygun ısı geçirimliliğine sahip geleneksel çok katlı duvara nazaran daha az malzemeyle çimentosuz hafif geopolimer duvar elemanı üretimi gerçekleştirmek istemiştir. Yapılan incelemelerde ısıl performansını ek bir kaplama gerektirmeden sağlayan kendi içinde katmanlı ancak makro ölçüde homojen bir geopolimer üretilebileceğini tespit etmiştir.

Yılmazoğlu (2022), çalışmasında çevre sorunlarına sebep olan atık lastik, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel atıkların geopolimer beton yapımında kullanılmasıyla sürdürülebilir hale gelmesini incelemiştir. Farklı oranlarda atık lastiklerin agrega yerine ikamesiyle uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanılarak elde edilen geopolimer karışımlarına farklı kür sıcaklıklarını uygulamıştır. Yapılan testler sonucunda kauçuk liflerin mekanik dayanımlarında kısmi azalmaya neden olduğunu tespit etmiştir.

Uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun kullanım oranlarında yüksek fırın cürufunun artması sonucunda mekanik özelliklerde iyileşme gözlemlemiştir. Ayrıca yüksek sıcak kürlerin geopolimer betonun performansında azalmaya sebep olduğunu belirlemiştir.

Toregalıyev (2022), çalışmasında Portland çimentosunun çevreye verdiği zararların etkisini ve enerji ihtiyacını azaltmak için atık malzemeleri kullanarak beton üretimi üzerine incelemeler yapmıştır. Puzolanik özelliklere sahip öğütülmüş bazik pomza ile silis dumanı kullanarak geopolimer harç numuneler hazırlamıştır. İlk olarak pomza ve silis dumanı karışım oranları belirlenmiş daha sonra da alkali aktivatör olarak kullanılan sodyum hidroksitin molaritesi belirlenmiştir. 60℃ etüvde bekletilen numuneler üzerinde deneyler yapılmıştır. Polipropilen lif miktarı arttıkça birim hacim ağırlığının ve yayılma çapının azaldığını, su emme, basınç dayanımı ve eğilme dayanımı değerlerinin ise arttığını belirtmiştir.

Sağır (2022), tez çalışmasında yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer harçların yüksek sıcaklığa karşı dayanıklılığını incelemiştir. Bu incelemede silis dumanı ve atık lastik etkisi araştırılmıştır. 12 M sodyum hidroksit çözeltisi yüksek fırın cürufunu aktive ederek geopolimer harç elde etmiştir. Cüruf yerine silis dumanı, agrega yerine atık lastik ikame ederek kıyaslama yapılmıştır. Kürlenme işlemlerinden sonra 250℃, 500℃ ve 750℃ sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Ardından mekanik ve fiziksel testlerde silis dumanının etkisinin olumlu olduğunu tespit etmiştir. Atık lastik etkisi ise bu değerleri olumsuz etkilemiştir. Yüksek sıcaklıklara silis dumanı olumlu katkı sağlarken, atık lastik olumsuz etki oluşturmuştur. Tamamen atık olan silis dumanı, yüksek fırın cürufu ve atık lastik kullanımı ile sürdürülebilir malzemelerden oluşan ve çevresel sorunları ortadan kaldıran geopolimer bir karışım elde edilmiştir.

Öztürk (2023), çalışmasında düşük karbon emisyonu nedeniyle çimento yerine alternatif olan geopolimer betonların incelemesini yapmıştır. En büyük avantajlarından birisi olan tamamen atık malzemelerden elde edilen geopolimerlerin sürdürülebilirlik adına büyük bir katkı sağladığını, dezavantajlarından birisinin ise üretim standartlarının olmaması şeklinde belirtilmiştir. Donatılı bir yapı elemanında göstereceği davranışlar üzerine incelemelerin oldukça kısıtlı olduğunu söylenmiştir. Farklı karışım hazırlanmış ve en iyi karışım sonuçlarında elde edilen basınç dayanımının 65 MPa, kıvam koruma süresini ise 90 dakika olarak bulmuştur.

Al-Hadeethi (2023), çalışmasında pomzanın agrega olarak kullanıldığı hafif betonlarda ve normal betonlarda, atık lastik ikamesinin basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve titreşim özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Hafif betonda atık lastik kullanımı

sonucu basınç ve eğilme dayanımı sonuçları normal betonda atık lastik kullanımı ile elde edilen sonuçlardan daha düşük çıkmıştır. Atık lastik oranı arttıkça basınç dayanımında azalmalar gözlemlendiği belirtilmiştir.

Barkhadle (2023), çalışmasında uçucu küllerden geopolimer harçlar üretmiştir. Agrega olarak ise Kayseri yöresine ait pomza kullanmıştır. Alkali aktivatör olarak ise sodyum hidroksiti tercih etmiştir. Alkali aktivatörünün oranının artması ile işlenebilirlik artmıştır. En iyi işlenebilirlik %12 sodyum hidroksit içeren karışımda elde edilmiştir. Eklenen alüminyum tozu işlenebilirliğe olumlu katkı sağlamıştır. En düşük birim hacim ağırlığı 72 saatle en uzun süre ısıl küre maruz kalan numunelerde görülmüştür. Alüminyum tozuyla daha hafif gözenekli harçlar elde edilmiştir. Alkali oranı arttıkça daha hafif harçlar oluşmuştur. En yüksek basınç ve eğilme dayanımlarına %8 sodyum hidroksit oranına sahip olan karışımlarda görülmüştür.

Parçal (2023), çalışmasında Portland çimentosuna alternatif olarak atık malzeme olan uçucu kül esaslı geopolimer tercih etmiştir. Her geçen gün artan taşıt kullanımıyla çevresel sorun oluşturan atık lastikleri agrega yerine tercih edilebilirliğini, hafif betonda değerlendirerek geopolimer beton üretilebilirliğini incelemiştir. Kum yerine ikame edilen pomza ve atık lastiklerin artan oranlarla %100'e kadar çıktığı karışımlar incelenmiştir. Bu artışlarla beraber basınç ve eğilme dayanımlarında azalma gözlemlenmiştir. Atık lastik ve pomza oranının artmasıyla su emme oranının arttığını, birim hacim ağırlıkla beraber işlenebilirlik özelliğinin azaldığını belirtilmiştir. Isı iletkenlik değerlerinin referans numunesine göre lastik oranı arttıkça azaldığını belirtmiştir. Yalıtım açısından atık lastiğin katkısının iyi sonuçlar vermesiyle sürdürülebilir yapı malzemesi üretimi adına önemli bir adım atıldığını vurgulamıştır.

Biçer (2024), çalışmasında puzolanlar üzerine incelemeler yapmıştır. Çimentoya alternatif alkalilerle aktive edilebilen puzolanlar tercih edilmiştir. İlk aşamada bağlayıcı olarak atık tuğla tozu, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Sıkıştırılarak elde edilen betonları herhangi bir ısıl işlem görmeden havada kürlenmesini sağlamıştır. Aktivatör miktarı ve puzolan çeşidinin karışımların mekanik özelliklerini doğrudan etkilediğini belirtmiştir. İkinci aşamada iyi sonuç veren alkali aktivatörü sabit tutularak puzolanlar üzerinde farklı oranlarda karışım yapmıştır. Yapılan deneyler sonunda mekanik ve durabilite özellikleri belirlendiğinde birbirine yakın sonuçlar elde edildiğini ve çimentoya alternatif olarak kullanılabilirliğini tespit etmiştir.

Erkek (2024), çalışmasında çimentonun çevreye verdiği zararı ve ihtiyaç duyduğu enerji miktarını göz önüne alarak, atık malzemeler olan puzolanik malzemelerle

geopolimer beton üzerine incelemeler yapmıştır. Ancak mevcut puzolan kaynakların yetersizliği dikkate alındığında alternatif puzolanlara ihtiyaç duyulduğunu belirtmiştir. Alternatif puzolanlarla maliyet, mikro yapı ve mekanik özelliklerde iyileşme sağlamayı amaçlamıştır. Çimento yerine artan oranlarda pomza ve perlit ikameleri sonucu kullanılabilirliği incelemiştir. İri pomza ve genleştirilmiş perlitin öğütülmesi sonucu puzolanik aktivite göstermesiyle çimentoya alternatif olacağını belirtmiştir. Böylece maliyet ve karbon salınımında olumlu gelişmeye sebep vereceğini tespit etmiştir.

Literatürden elde edilen bilgiler çerçevesinde tez çalışmasında geopolimerizasyon süreci için alkali aktivatörü olarak sodyum hidroksit, puzolanik özellikleri yönünden endüstriyel atıklar arasından daha az araştırma yapılmış olan taban külü ile doğal kaynaklar arasında ülkemizde bol miktarda bulunan pomza, sürdürülebilirlik için faydalı ömrünü tamamlamış atık lastiklerden elde edilen lifli atık lastik ile inşaat sektöründe büyük bir atık oluşturan atık mermer tercih edilmiştir. Kullandığımız malzemeler yüksek oranda atık malzeme olması yönünden sürdürülebilir, çevre dostu ve ekonomik malzemelerdir. Literatür incelemeleri çerçevesinde puzolanik özelliklere sahip malzemeler çoğunlukla çimentoya ikame olarak kullanılmıştır. Puzolanik özelliklere sahip olan bu endüstriyel atıklar arasında daha az tercih edilen taban külü ve doğal kaynaklar arasında bulunan pomzanın birim hacim ağırlıklarının farklılığı nedeniyle karışım ağırlığını optimize etmesi, agrega olarak kullanılan atık halde bulunan atık lastik ile atık mermerin birim hacim ağırlıkları yönünden birbirini dengelemesi ve dayanım ile durabilite özellikleri açısından birbirini tamamlıyor olması tez çalışmasının malzeme içeriği açısından özgünlüğünü ve literatürden farkını ortaya koymaktadır. Tez çalışmasında ayrıca karışım içeriklerinde atık betonun etkisi de incelenmiştir. Bununla birlikte literatür araştırmalarında alkali aktivatör olarak kullanılan sodyum hidroksitin 8 ile 16 molariteye sahip değerler arasında tercih edildiği, elde edilen sonuçlar doğrultusunda 12 M alkali aktivatöründe en iyi sonuçların görüldüğü tespit edilmiştir. Tez çalışması kapsamında yapılan karışımlarda literatürdeki bu bilgilerden yararlanılarak 12 M tercih edilmiştir. Ancak farklı molariteye sahip karışımlar da denenmiştir. Geopolimer betonların üretimi sırasında alkali aktivatörü ile başlayan geopolimerizasyon sürecinin gerçekleşebilmesi için belirli zaman aralığında ısı kürü uygulanması gerekmektedir. Literatürde yapılan araştırmalar sonucunda optimum sıcaklık değerinin 65°C olduğu ve bu sıcaklık süresinin 5 ile 7 gün arasında uygulanması gerektiği bilgisi elde edilmiş ve karışımlarımızda da bu kür şartlarına uyulmuştur.

2.1. Literatürde Geopolimerler

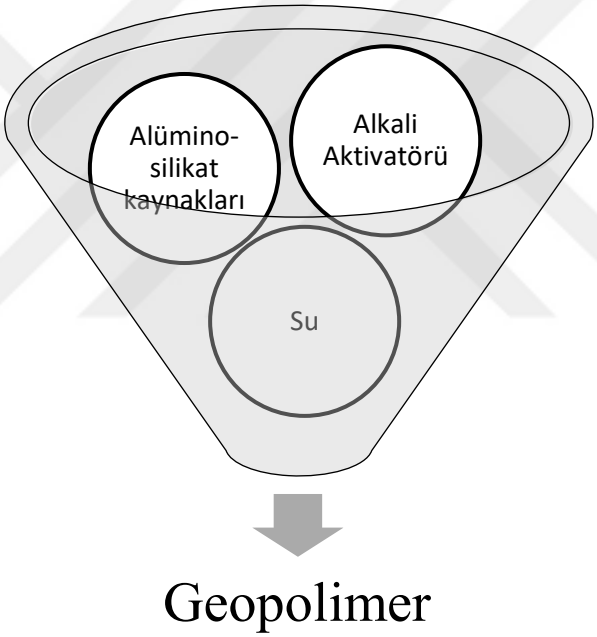
Geopolimer ve alkali aktive bağlayıcı sistemlerinin gelişimi, 20. yüzyılın başlarından itibaren yapılan çok sayıda çalışmanın birikimiyle şekillenmiştir. İlk olarak 1939 yılında Feret'in cürufları bağlayıcı malzeme olarak kullanması bu alandaki temel adımlardan biri olmuştur. 1940 yılında Purdon, alkali cüruf kombinasyonlarını deneyerek bu gelişmeyi ileri taşımıştır. Glukhovsky'nin 1959'daki teorik yaklaşımları ve 1965'teki uygulamaları, alkali çimentoların sistematik biçimde incelenmesine olanak sağlamıştır. 1979 yılında Joseph Davidovits, silikat ve alümina bazlı inorganik polimer yapılar için "geopolimer" terimini ilk kez kullanarak yeni bir bilimsel kavram sunmuştur. 1980'li ve 1990'lı yıllarda Forss, Langton ve Roy gibi araştırmacılar, uçucu kül ve cüruf bazlı bağlayıcıların özelliklerini analiz etmiş; Davidovits ve Sawyer, Pyrament çimentosunun patentini almış; Krivenko ise doktora tezinde bu sistemleri detaylandırmıştır.

Bu dönem aynı zamanda, alkali çözeltilerle aktive edilen bağlayıcıların dayanım, geçirgenlik, mikro yapı ve nükleer atık immobilizasyonu gibi çeşitli yönlerinin araştırıldığı önemli bir evre olmuştur. Deja, Malek, Kaushal, Talling, Brandstetr ve Wu gibi araştırmacılar bu alanda özgün katkılar sunmuştur. 1990'lı yılların ortalarından itibaren, metakaolin, kalsine kil ve kırmızı çamur gibi alternatif hammadde kaynaklarının da araştırmalara dâhil edildiği gözlemlenmiştir. 2000'li yıllarda ise Palomo, Puertas, Grutzeck, Sun ve Duxson gibi bilim insanları, hem bağlayıcı özelliklerin derinlemesine analizini gerçekleştirmiş hem de geopolimerlerin çevresel ve endüstriyel uygulama potansiyellerine araştırmıştır. 2008 yılından itibaren Provis ve Deventer tarafından yürütülen çalışmalarda ise, geopolimer sistemleri ve bu malzemelerin yapısal performansları üzerine odaklanılarak literatüre önemli katkılarda bulunulmuştur (Balun, 2019).

Geopolimer betonlar, sürdürülebilir yapı malzemeleri arasında çevresel ve teknik avantajlarıyla öne çıkmaktadır. Portland çimentosuna kıyasla üretim süreçlerinde önemli ölçüde daha az karbon dioksit salınımı gerçekleştiğinden, bu malzemeler çevre dostu alternatifler arasında değerlendirilmektedir. Ayrıca uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel atıkların kullanımı sayesinde atık yönetimine katkı sağlanmakta ve doğal kaynak tüketimi, özellikle kireçtaşı gibi hammaddelere olan ihtiyaç azaltılarak ekosistemin korunmasına destek olunmaktadır. Teknik açıdan değerlendirildiğinde, geopolimer betonlar asidik ve sülfat içeren agresif ortamlara karşı yüksek dayanım sergilerken, yangın ve yüksek sıcaklık koşullarında da 1000°C'ye kadar yapısal bütünlüğünü koruyabilmektedir. Düşük hidratasyon ısısı sayesinde büyük hacimli

dökümlerde çatlama riski azaltılmakta, ayrıca hızlı priz alarak yüksek erken dayanım sunmaktadır. Bu malzemeler aynı zamanda düşük kuruma rötreleriyle çatlak oluşumunu minimize ederken, alkali ortamda donatının korozyona karşı korunması bakımından da avantaj sağlamaktadır (Toprak, 2011).

Geopolimerler, tıpkı geleneksel Portland çimentosu gibi oda sıcaklığında priz alabilen bağlayıcı sistemlerdir. Çimento yerine alternatif olarak kullanıldıklarında, üretim süreçlerinde atmosfere salınan karbon ayak izini önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahiptirler. Bu çevresel avantaj, esas olarak hammadde olarak doğal ve endüstriyel yan ürünlerin değerlendirilmesinden kaynaklanmaktadır. Geopolimer sistemler temel olarak üç ana bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenler bağlayıcı hammaddeler, alkali aktivatörler ve su şeklinde ifade edilmektedir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Geopolimer betonun içerik bileşenleri (Davidovits, 2013)

Bağlayıcı olarak kullanılan hammaddeler; alümina ve silis bakımından zengin, doğal ya da yapay puzolanik özellikteki malzemelerdir. Doğal puzolanik kaynaklar arasında volkanik kökenli pomza, tüf ve metakaolin; yapay puzolanik materyaller arasında ise uçucu kül, yüksek fırın cürufu, taban külü ve silis dumanı gibi endüstriyel yan ürünler yer almaktadır. Bu alüminosilikat esaslı malzemeler, uygun alkali aktivatör çözeltileri ile reaksiyona girerek çimentoya benzer bağlayıcı özellikler kazanırlar. Kimyasal aktivasyon amacıyla genellikle sodyum silikat, sodyum hidroksit, sodyum

karbonat, potasyum silikat, potasyum hidroksit ve potasyum karbonat gibi alkaliler tercih edilmektedir (Cong ve Cheng, 2021).

Beton, sudan sonra dünya genelinde en çok kullanılan akışkandır. Her geçen gün daha büyük ve yeni binalar, bunların ihtiyaçları için altyapılar ve afetler öncesinde, sonrasında hızla yapılması gereken dönüşümlerle çok daha fazla çimentoya ihtiyaç duyulmaktadır. 1 ton Portland klinkerinin üretiminde doğrudan 0,55 ton CO_2 üretilir ve buna ek olarak karbon yakıtının yakılması sonucunda 0,40 ton CO_2 ortaya çıkar (Davidovits, 2013). Portland çimentosunun üretiminde bu oranı azaltabilecek bir teknoloji yoktur. İstisnai durum ise Portland çimentosuna ikame edilen uçucu küllerin sayesinde en fazla %10-15 CO_2 salınımının azaltılması sağlanabilmektedir. Buna istinaden geopolimerlerin üretiminde çok daha az CO_2 ortaya çıkar. Bu oran %40 ile %80-90 oranlarına kadar inebilmektedir. Böylece geopolimer kullanımıyla daha az karbon ayak izi sağlanmış olacaktır.

Geopolimer üretiminde kullanılan hammaddeler, doğal minerallerden endüstriyel ve tarımsal atıklara kadar geniş bir yelpazeye yayılmaktadır. Bu malzemeler, alümina ve silis bakımından zengin yapıları sayesinde alkali aktivasyonla bağlayıcı özellik kazanabilmektedir. Doğal kaynaklı hammaddeler arasında metakaolin, kil, laterit, mullit, diyatomit, kaolin, zeolit ve bentonit öne çıkmaktadır. Endüstriyel yan ürünler arasında uçucu kül, taban külü, yüksek kalsiyumlu uçucu kül, öğütülmüş granüler yüksek fırın cürufu, çelik cürufu, kırmızı çamur, kırmızı kil tuğla atığı, cam tozu, cam yünü kalıntısı, demir cevheri atıkları, boksit cevheri atıkları, içme suyu arıtma atıkları, yüksek magnezyumlu nikel cürufu, elektrolit manganez dioksit kalıntısı, kalsiyum karbür kalıntısı ve belediye katı atıkları yakma uçucu külü yer almaktadır. Tarımsal atıklar arasında ise pirinç kabuğu külü, palmiye yağı yakıt külü, zeytin biyokütle uçucu külü ve taban külü gibi malzemeler bulunmaktadır. Ayrıca, kömür yatakları ve seramik kili gibi doğal oluşumlar da potansiyel geopolimer karışım hammaddeleri arasında değerlendirilmektedir. Bu çeşitlilik, geopolimer teknolojisinin sürdürülebilirlik açısından sunduğu esnekliği ve atık yönetimi potansiyelini ortaya koymaktadır (Cong ve Cheng, 2021).

2.3. Tez Kapsamında Kullanılan Malzemelere Yönelik Literatür Araştırması

Geopolimer beton üretiminde, puzolanlar ve öğütülmüş mineral katkılar bağlayıcı fazın oluşumunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu katkıların, geleneksel Portland çimentosuna kıyasla daha ince tane boyutuna sahip olduğu ve dolayısıyla daha yüksek

reaktivite gösterdiği bildirilmektedir (Pekdemir, 2011). Silis veya silis ile birlikte alümin içeren ve doğal hallerinde bağlayıcı özellik göstermeyen bu malzemeler, ince öğütülmüş halleriyle nemli ortamda hidroksit iyonlarıyla reaksiyona girerek bağlayıcı özelliğe sahip hale gelmektedir (Dolğun, 2010). Söz konusu puzolanik malzemeler, kökenlerine göre iki temel gruba ayrılmaktadır: Doğal puzolanlar, doğada kendiliğinden bulunan ve genellikle volkanik süreçler sonucu oluşanlardır. Yapay puzolanlar ise yani sanayi faaliyetlerinin yan ürünleri olarak elde edilenlerdir.

Puzolanik malzemeler farklı tekniklerle değerlendirilerek bağlayıcı olarak kullanılabilmektedir. Bu değerlendirme yöntemleri üç ana başlık altında toplanmaktadır (Dolğun, 2010).

- Alkali aktivatörlerle doğrudan reaksiyonu ile geopolimer sistemlerde kullanımı.
- Portland çimentosunun üretimi sırasında klinkerle birlikte öğütülerek bağlayıcının kimyasal yapısına entegre edilmesi.
- Çimento esaslı harçların üretiminde belirli oranlarda ikame edilerek çevresel ve mekanik avantajların sağlanması.

2.3.1. Taban külü

Endüstriyel tesislerde fosil yakıtların yanması sonucu oluşan atıkların önemli bir kısmı, yanma sisteminin özelliklerine bağlı olarak farklı formlarda birikmektedir. Bu atıklardan biri olan taban külü, bacadan atmosfere ulaşamayan ve fırınların alt kısmında biriken iri taneli, yoğun ve camsı yapıya sahip katı malzemedir. Termik santrallerde oluşan toplam atığın yaklaşık dörtte birini taban külü oluştururken, geri kalan kısmı ise bacadan taşınarak çıkan ve daha ince taneli olan uçucu kül formundadır. Taban külü, fiziksel olarak kum benzeri yapısıyla uçucu külden ayrılmakta ve daha düşük yüzey alanına sahip olması nedeniyle farklı mühendislik uygulamalarında değerlendirilmektedir.

Taban külünün özellikleri, kullanılan kazan tipine göre değişiklik göstermektedir. Bu bağlamda, kuru tabanlı ve ıslak tabanlı olmak üzere iki temel kazan tipi bulunmaktadır. Kuru tabanlı kazanlarda, tam erime gerçekleşmeden fırın tabanına düşen ve katı halde toplanan atıklar "taban külü" olarak adlandırılırken; ıslak tabanlı kazanlarda, erimiş halde fırından çıkan ve doğrudan soğutma suyuyla temas ederek kristalleşen atıklar "taban cürufu" olarak tanımlanmaktadır. Taban cürufu, su ile temas sonucu ani soğuma etkisiyle siyah renkli, camsı ve sert kristal yapılar oluşturmaktadır. Bu oluşum farklılığı, taban külü ile taban cürufu arasında hem fiziksel hem de kimyasal özellikler bakımından

ayrışmalara neden olmakta ve bu durum malzemelerin kullanım alanlarının çeşitlenmesini sağlamaktadır.

Taban külünün depolanması, çevresel açıdan çeşitli riskler barındırmakta olup, bu malzemenin ikincil hammadde olarak değerlendirilmesi sürdürülebilirlik, çevre dostu yaklaşım ve ekonomik fayda açısından önemli bir alternatif sunmaktadır. Taban külünün fiziksel özellikleri, üretim sürecine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Genellikle gri renkli, gözenekli yapıda ve kum benzeri formda bulunmaktadır. Kimyasal özellikleri bakımından uçucu küllere benzerlik gösteren taban külleri, özellikle silika (SiO_2) ve alümina (Al_2O_3) açısından zengin bir bileşime sahiptir. Bununla birlikte kimyasal içerikleri, kullanılan fosil yakıt türü ve yanma koşullarına bağlı olarak farklılık arz etmektedir. Tablo 2.1'de, taban külünün ortalama kimyasal bileşimi sunulmakta olup, bu veriler malzemenin potansiyel kullanım alanlarının belirlenmesinde temel teşkil etmektedir (Şengül, 2020).

Tablo 2.1. Taban külünün literatürdeki kimyasal içeriği (Şengül, 2020)

İçerik Bileşeni	**Kimyasal İçeriği (%)**
Kalsiyum Oksit (CaO)	0-22
Silisyum Oksit (SiO_2)	21-60
Alüminyum Oksit (Al_2O_3)	10-37
Demir Oksit (Fe_2O_3)	5-37
Magnezyum Oksit (MgO)	0-4

2.3.2. Silis dumanı

Silis dumanı, endüstriyel üretim süreçlerinde oluşan bir yan üründür. Özellikle ferrosilikon alaşımının üretimi sırasında, kuvarsın yüksek sıcaklıklarda silikona indirgenmesiyle elde edilmektedir. Elektrik ark fırınlarında yaklaşık 2000 °C'ye ulaşan sıcaklıklarda fosil yakıtlarla ısıtılan saf kuvars, silikon monoksit buharı oluşturur; bu buharın oksitlenmesi sonucunda mikro silika (silis dumanı) meydana gelir. Silis dumanı, çok ince tane boyutlarına sahip olup yüksek puzolanik özellik göstermektedir. Parçacıkların yaklaşık %95'i 1 μm'nin altındadır ve ortalama çimento tanecik boyutlarına kıyasla yaklaşık 100 kat daha küçüktür. Küresel şekilli yapısıyla birlikte özgül yüzey alanı 13.000–30.000 m^2/kg arasında değişmektedir. Kimyasal bileşimi büyük oranda amorf silisyum dioksitten (SiO_2) oluşur; bu oran genellikle %85–95 arasında değişmekte olup, düşük miktarlarda demir, magnezyum ve alkali

oksitler de içermektedir. Rengi genellikle gri tonlarında olup, bu tonlama içerdiği karbon miktarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Silis dumanının kimyasal özellikleri, sadece kullanılan hammaddeye değil, aynı zamanda fırın sisteminde kullanılan elektrotların kalitesi ve silikonun saflığı gibi üretim parametrelerine de bağlıdır (Sağır, 2022; Yolcu, 2023).

2.3.3. Pomza

Pomza taşı, volkanik kökenli bir kayaç olup, magmatik faaliyetler sonucu yüzeye çıkan lavların ani soğuması esnasında bünyesindeki gazların süratle ayrışmasıyla oluşan yüksek oranda gözenekli bir yapıya sahiptir. Bu gözeneklerin çoğunluğu birbiriyle bağlantısız olduğundan, pomzanın su ve gaz geçirgenliği oldukça düşüktür. Bu yapısal özelliği, pomzanın hafifliği ve üstün ısı ile ses yalıtımı sağlaması nedeniyle hafif beton ve yalıtım malzemesi üretiminde etkin şekilde kullanılmasına olanak tanır. Pomza, doğal bir alüminosilikat minerali olarak, alkali aktivasyonla inorganik bağlayıcılara dönüşebilen bir tür puzolandır. Jeokimyasal bileşimine bağlı olarak pomza iki ana gruba ayrılır. Bunlar asidik pomza ve bazik pomza olarak adlandırılmaktadır. Literatürde en yaygın bulunan türü asidik pomzadır. Bu tür, beyaz ve açık tonlarda olup, Mohs sertlik skalasında 5–6 arasında bir değere sahiptir ve yoğunluğu yaklaşık 0,5–1 g/cm³'tür. Bazik pomza ise kahverengi ile siyah tonları arasında değişen renklere sahiptir; benzer sertlik aralığına sahip olmakla birlikte, daha yüksek yoğunluk değeriyle (1–2 g/cm³) karakterize edilir. Ayrıca, bazik pomza henüz sıvı fazdayken asidik pomza katı faza geçmiş olabilmektedir. Bu durum kristalleşme sıcaklıklarındaki farklılığı göstermektedir (Dolğun,2010). Tablo 2.2'de asidik ve bazik pomzaların kimyasal bileşim oranları verilmiştir.

Tablo 2.1. Asidik ve bazik pomzaların kimyasal bileşim oranları (Dolğun, 2010)

Bileşim	Asidik Pomza	Bazik Pomza
Silikon Dioksit	70	45
Alüminyum Oksit	14	21
Demir Oksit	2,5	7
Kalsiyum Oksit	0,9	11
Magnezyum Oksit	0,6	7
Sodyum Oksit + Potasyum Hidroksit	9	8
Diğer	3	1

Pomza taşı, dünya genelinde çoğunlukla asidik karakterde bulunmaktadır. Küresel pomza rezervlerinin yaklaşık yedide biri ülkemiz sınırları içinde yer almakta olup, bu durum Türkiye'yi önemli üretici ülkeler arasında konumlandırmaktadır (Tablo 2.3). Ülkemizdeki pomza rezervleri ağırlıklı olarak Doğu Anadolu ve İç Anadolu Bölgelerinde yoğunlaşmıştır (Tablo 2.4). Özellikle Bitlis-Tatvan, ardından Kayseri'nin Talas ve Tomarza ilçeleri ile Nevşehir'in Avanos ve Ürgüp yöreleri, doğal pomza kaynaklarının en zengin bulunduğu alanlar arasında öne çıkmaktadır (Tablo 2.5) (Dolğun, 2010).

Tablo 2.2. Dünya pomza rezervleri (Dolğun, 2010)

Kıtalar ve Ülkeler	**Miktar (milyon ton)**
Türkiye	2.836
Orta Amerika	80
Güney Amerika	80
Kuzey Amerika	12.000
İtalya	2.000
Avrupa Toplamı	5.336
Avustralya	500
Dünya Toplamı	17.996

Tablo 2.3. Türkiye'de pomzanın bölgelere göre rezervleri (Dolğun, 2010)

Bölgeler	**Miktar (m^3)**	**Rezerv %**
Doğu Anadolu	1.368.012.000	%56
İç Anadolu	1.057.893.334	%43
Diğer	30.983.250	%1

Tablo 2.4. Türkiye'de pomzanın yöresel rezervleri (Dolğun, 2010)

Yeri	Miktarı (m^3)
Isparta-Gölcük	30.983.250
Ankara-Güdül-Tekköy	8.070.000
Nevşehir-Avanos-Ürgüp	404.412.834
Nevşehir-Derinkuyu	48.660.500
Kayseri-Gömeç	13.250.000
Kayseri-Develi	58.500.000
Kayseri-Talas-Tomarza	525.000.000
Bitlis-Tatvan	1.100.000.000
Van-Erciş-Kocapınar	154.625.000
Van-Mollakasım	5.950.000
Ağrı-Patnos	27.812.000
Ağrı-Doğubeyazıt	26.875.000
Kars-Iğdır-Kavaktepe	40.156.250
Kars-Diğer	11.718.750

Pomza, çok çeşitli endüstriyel alanlarda kullanılabilmesine rağmen, başta inşaat sektörü olmak üzere farklı disiplinlerde değerlendirilen çok yönlü bir malzemedir. Tekstil, tarım, kimya ve endüstriyel teknoloji alanlarında işlevsel özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir. Ancak pomzanın en yaygın ve stratejik kullanımı inşaat sektöründedir. Burada özellikle hafif yapı malzemesi olarak öne çıkmaktadır. Düşük birim hacim ağırlığı, yüksek ısı ve ses yalıtım kapasitesi, ayrıca yapısal sistemin ağırlığını azaltmasına bağlı olarak deprem yüklerine karşı göstermiş olduğu olumlu etkiler, bu malzemeyi yapı sektöründe cazip kılmaktadır. Pomzanın düşük yoğunluğa sahip olması, yapı yüklerini azaltmakta, bu durum taşıyıcı sistemlerde donatı kullanımını optimize etmektedir. Aynı zamanda, yüksek ısı yalıtım performansı sayesinde ilave izolasyon malzemesi ihtiyacını azaltmakta, böylece hem maliyet hem de enerji verimliliği açısından avantaj sağlamaktadır(Dolğun, 2010).

2.3.4. Atık lastik

Faydalı ömrünü tamamlamış ya da üretim sürecinde hatalı olarak elde edilen araç lastikleri, atık lastik olarak tanımlanır. Bu tür atıklar, yüksek hacimleri nedeniyle ciddi depolama sorunları oluşturmakta. Aynı zamanda çevresel açıdan önemli riskler barındırmaktadır. Gelişigüzel biriktirildiklerinde, hem doğal yaşam üzerinde olumsuz etkiler ortaya çıkarmakta hem de yangın riski taşıyan büyük yığınlar haline gelmektedirler. Ayrıca, bu tür atıkların bertarafı sırasında atmosfere yayılan yüksek miktarda toksik gazlar, geniş çevre alanlarında toprak ve hava kirliliğine neden olmaktadır. Söz konusu çevresel ve ekonomik sorunların önlenmesi adına, atık lastiklerin ikincil hammadde olarak değerlendirilmesi, sürdürülebilir ve çevre dostu bir atık yönetimi stratejisi olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntem, karbon ayak izini azaltmakta, aynı zamanda ekonomik kazanımlar sağlamaktadır. Atık lastikler, hiçbir işlem uygulanmadan doğrudan kullanılabileceği gibi, ön işleme tabi tutularak (kesme, öğütme vb.) farklı formlara dönüştürülerek de yapı sektöründe değerlendirilebilir. Özellikle geopolimer beton üretiminde agreganın yerini alabilecek biçimde kullanımları hem geri dönüşüm açısından hem de malzeme performansı bakımından kullanım amacına ve karışımdaki diğer bileşenlerin türüne göre çeşitli avantajlar ve dezavantajlar sunmaktadır (Tablo 2.6) (Sarkaz, 2020).

Uygulanan işlemler sonucunda atık lastikler üç temel formda elde edilir:

- Toz lastik: 0–1 mm boyutlarında,
- Granül lastik: 1–4 mm boyutlarında,
- Fiber (lif) lastik: lifli yapıda parçalanmış form.

Bu sınıflandırma, geopolimer betonun fiziksel ve mekanik özelliklerini etkileyen önemli bir parametre olup, araştırmalarda dikkate alınması gereken bir değişkendir.

Tablo 2.5. Atık lastiklerin karışım türüne göre avantaj ve dezavantajları (Sarkaz, 2020)

Avantajları	Dezavantajları
Düşük birim hacim ağırlık	Düşük basınç dayanımı
Aşınmaya karşı yüksek direnç	Düşük çekme dayanımı
Yüksek süneklilik kapasitesi	Düşük eğilme dayanımı
Yüksek elastiklik	
Şok ve titreşim emme kapasitesi	
Çekme ve çatlamaya karşı direnç	
Su geçirgenliğini artırma	
İyi klorür iyonu emme direnci	

2.3.5. Atık mermer

Jeolojik süreçler sırasında kalsit kristallerinin boşluksuz, sıkı bir mozaik yapısı oluşturmasıyla meydana gelen kayaçlara mermer denir. Mermer oluşumları, çoğunlukla Alp–Himalaya kuşağında konumlanan jeotektonik bölgelerde yoğun olarak gözlemlenmektedir. Düşük gözeneklilik oranına sahip olan mermerler hem yüksek dayanım özellikleri hem de estetik görünümleri sayesinde insanlık tarihi boyunca yaygın olarak kullanılan doğal yapı malzemeleri arasında yer almıştır. Zaman içinde kullanım alanları artarak çeşitlenmiştir. Başta inşaat sektörü olmak üzere, heykeltıraşlık, mezar yapımı, süs eşyaları üretimi ve iç mekân dekorasyonu gibi çeşitli alanlarda mermerler tercih edilmektedir. Ancak madenlerden çıkarılması, kesilmesi ve nihai forma getirilmesi aşamalarında ciddi miktarda atık mermer oluşmaktadır. Genellikle küçük ebatlarda ve düzensiz biçimde oluşan bu atıkların, doğrudan kullanım potansiyeli sınırlıdır. Bu nedenle, atık mermerlerin sürdürülebilirlik ilkeleri ve ekonomik verimlilik çerçevesinde yeniden değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, söz konusu atıklar, geopolimer beton üretiminde agrega malzemesi olarak kullanılarak değerlendirilmiş; böylece hem malzemenin dayanım özelliklerinin artırılması hem de çevresel atık sorununun çözümüne katkı sağlanması hedeflenmiştir (Rahimi, 2021; Özdemir, 2021).

2.3.6. Alkali aktivatör

Alkali aktivatörler, sodyum ve potasyum esaslı, suda çözünebilen alkali metal bileşiklerinden oluşmaktadır. Bu bileşikler, tek başlarına kullanılabildikleri gibi, belirli oranlarda karıştırılarak da kullanılabilirler. Geopolimer sistemlerinde en yaygın tercih edilen alkali aktivatörler arasında sodyum silikat (Na_2SiO_3), sodyum hidroksit (NaOH), sodyum karbonat (Na_2CO_3), potasyum silikat (K_2SiO_3), potasyum hidroksit (KOH) ve potasyum karbonat (K_2CO_3) yer almaktadır (Biçer, 2024). Özellikle sodyum hidroksit ve sodyum silikat, etkinlikleri ve erişilebilirlikleri nedeniyle en sık kullanılan aktivatörlerdir. Bu çözeltiler, alüminosilikat içeriğine sahip bağlayıcılarla kimyasal reaksiyona girerek üç boyutlu polimerik ağ yapıları oluştururlar. Alkali çözelti molaritesinin artması, erken yaş dayanım gelişimini hızlandırmaktadır. Yaygın olarak kullanılan sodyum hidroksit, tuzlu suyun elektroliziyle elde edilen, "kostik soda" olarak da bilinen beyaz renkli, 320 °C'de eriyen ve akkor sıcaklıklarda uçucu özellik gösteren bir kimyasaldır (Toprak, 2011). Genellikle 8–16 M aralığında sodyum hidroksit çözeltileri tercih edilmekte olup, uygun molarite değeri, bağlayıcının yapısı ve karışım bileşenlerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Ancak, belirli bir değerin üzerinde molarite artışı,

bağlayıcının dayanımını artırmakla birlikte, kalsiyum hidroksit oluşumuna ve buna bağlı kimyasal çözünmelere yol açabilmektedir. Alkali çözelti/bağlayıcı oranı, geopolimer karışımının reolojik ve mekanik özellikleri üzerinde belirleyici bir parametredir. Aktivatör çözeltisinin büyük bir kısmının sudan oluşması nedeniyle, karışıma giren toplam su miktarı da bu oranla doğru orantılı olarak artmaktadır. Aşırı su içeriği, daha zayıf mikro yapılar oluşmasına ve dolayısıyla basınç dayanımında düşüşlere neden olabilmektedir. Geopolimerlerin oluşum sürecinde kür yöntemi ve süresi de son derece kritik bir rol oynamaktadır. Geopolimerizasyon süreci sırasında, bağlayıcının sertleşmesi için genellikle ısı kürüne (termo-kür) ihtiyaç duyulur. Bu amaçla en uygun ve etkili yöntemlerden biri olarak fırın kürü önerilmektedir. Çünkü bu yöntem, reaksiyonu hızlandırarak nihai dayanımın elde edilmesini kolaylaştırmaktadır (Çelikten, 2019).

2.3.7. Saf su

Kimyasal formülü H_2O olan saf su, içerisinde herhangi bir mineral, iyon, tuz ya da organik madde barındırmayan, yüksek saflık derecesine sahip bir su türüdür. Doğal ortamda bu saflık düzeyinde suya rastlanması oldukça nadirdir; bu nedenle saf su genellikle laboratuvar koşullarında çeşitli arıtma yöntemleriyle elde edilmektedir. Bu çalışmada kullanılan saf su, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'nden temin edilmiştir.

2.4. Geopolimer Harcının Özelliklerini Etkileyen Faktörler

Geopolimer harcın nihai özellikleri üzerinde belirleyici olan çok sayıda parametre bulunmaktadır. Bu parametreler; kullanılan bağlayıcının kimyasal ve mineralojik bileşimi, alkali aktivatörlerin türü ve bileşimi, aktivatör çözeltilerinin molaritesi, aktivatör/bağlayıcı oranı, agrega tipi ile tane boyutu dağılımı gibi bileşen özelliklerini kapsamaktadır. Bunlara ek olarak, karışım içerisindeki su miktarı, uygulanan kür yöntemi ve kür süresi gibi işleme koşulları da geopolimer matrisin mikro yapı oluşumu ve mekanik performansı üzerinde doğrudan etkilidir. Bu bölümde, söz konusu parametrelerin geopolimer harcın dayanım, işlenebilirlik, uzun vadeli dayanıklılık ve çevresel performans üzerindeki etkileri detaylı olarak değerlendirilmiştir.

2.4.1. Kimyasal bileşenler

Geopolimer beton üretiminde kullanılan başlıca bileşenler, genellikle endüstriyel süreçlerin birincil ürünleri elde edilirken ortaya çıkan ikincil malzemelerden, yani

endüstriyel atıklardan oluşmaktadır. Bu malzemeler standartlaştırılmış hammaddeler olmadığından, belirli bir kalite ve bileşim standardına sahip olmamaları doğaldır. Özellikle yüksek fırın cürufu, uçucu kül, metakaolin ve silis dumanı gibi katkıların bileşimleri; kaynağı olan endüstriyel tesisin türüne, proses koşullarına ve kullanılan hammaddelere bağlı olarak önemli ölçüde değişkenlik gösterebilir. Aynı endüstriyel tesiste dahi, farklı üretim dönemlerinde elde edilen atık malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri homojen olmayabilir. Bu özellikler geopolimer sistemlerde kullanılacak bağlayıcı bileşenlerin performans öngörülerini karmaşıklaştırmakta ve malzeme karakterizasyonuna yönelik sistematik bir yaklaşımı zorunlu kılmaktadır. Dolayısıyla, geopolimer betonun performansını optimize edebilmek için kullanılan atık malzemenin detaylı bir şekilde analiz edilmesi ve her karışıma özgü tasarımın yapılması büyük önem taşımaktadır.

2.4.2. Alkali molaritesi, alkali-bağlayıcı oranı ve saf su

Aktivatörlerin hazırlanmasında belirleyici olan parametrelerin başında molarite gelir. Çözeltinin molaritesi, karışım içerisindeki aktif iyon konsantrasyonunu ve dolayısıyla reaksiyon hızını doğrudan etkiler. Yüksek molarite değerleri, genellikle erken yaşta mukavemet kazanımını hızlandırırken, belirli bir seviyeye kadar nihai basınç dayanımında da artış sağlayabilir. Ancak bu değerlerin optimum aralığın üzerine çıkması durumunda zararlı etkiler gözlemlenebileceği de unutulmamalıdır. Ayrıca, alkali-bağlayıcı oranı geopolimer betonun taze ve sertleşmiş özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Alkali aktivatörlerin hazırlanması sırasında su kullanımı zorunludur ve bu nedenle alkali-bağlayıcı oranının artması, genellikle karışıma ilave edilen su miktarının da artmasına yol açar. Su miktarındaki bu artış ise, oluşan mikro yapının daha gözenekli hale gelmesine neden olabilir. Sonuç olarak, gözenekli yapı artışı malzemenin basınç dayanımında düşüşe sebep olabilmektedir. Bu nedenle söz konusu oranların titizlikle belirlenmesi, karışım tasarımı açısından büyük önem arz etmektedir. Deneysel gözlemlere göre, aktivatör çözeltilerinin hazırlanmasında kullanılan suyun türü de geopolimerizasyon reaksiyonlarını etkileyebilmektedir. Örneğin, normal musluk suyuyla hazırlanan karışımlarda priz alma davranışı gözlemlenmemiş, ancak saf su kullanıldığında sistemin priz alarak sertleşmeye başladığı belirlenmiştir. Bu durum, suyun içerisindeki iyonik bileşimin reaksiyon mekanizmasına etkisi bağlamında daha ayrıntılı şekilde incelenmelidir (Çelikten, 2019).

2.4.3. Isı kürü ve ısı süresi

Geopolimer beton sistemlerinde dayanım kazanımı, geleneksel Portland çimentosu esaslı betonlardan farklı olarak ısıya bağlı olarak gerçekleşen bir polimerizasyon sürecine dayanmaktadır. Bu nedenle klasik beton üretiminde yaygın olarak uygulanan su küründen ziyade, ısı kürü geopolimer sistemler için çok daha etkili bir yöntemdir. Geopolimerizasyon süreci, aktivatör çözeltisi ile reaksiyona giren puzolanik nitelikli malzemelerin, ısı enerjisinin etkisiyle çözünüp yeniden düzenlenerek üç boyutlu polimerik ağ yapılar oluşturmasıyla gerçekleşir. Bu süreçte, ısı kürünün uygulanması reaksiyonu hızlandırmakta, böylece erken nihai mukavemet gelişimini olumlu yönde etkilemektedir. Deneysel bulgulara göre, kür işlemi 60 °C ile 70 °C sıcaklık aralığında kontrollü bir şekilde gerçekleştirildiğinde, geopolimer betonun basınç dayanımı açısından en yüksek performans değerlerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu sıcaklık aralığında 5 ila 7 gün süreyle kesintisiz kür uygulanması, özellikle alüminosilikat reaksiyonlarının tamamlanmasını destekleyerek homojen ve yoğun bir mikro yapı oluşumuna katkı sağlamaktadır. Bu da hem erken yaşta hem de uzun vadeli mekanik dayanım üzerinde olumlu etkiler oluşturmaktadır. Sonuç olarak, geopolimer beton tasarımında ısı kür koşullarının dikkatle planlanması, bağlayıcının etkinliğini artırarak sürdürülebilir ve yüksek dayanımlı yapı malzemeleri elde edilmesini sağlamaktadır (Şinik, 2019).

3. MATERYAL VE METOT

Tezin bu bölümünde geopolimer karışım optimizasyonuna yönelik kullanılan materyal ve deneysel- analitik metot detaylandırılmıştır.

3.1. Numune Karışımlarında Kullanılan Malzemeler

Bu bölümde geopolimer numunelerinin hazırlanmasında kullanılan malzemeler hakkında bilgi verilmiştir.

3.1.1. Taban külü

Çalışmada kullanılan taban külü farklı sanayi kuruluşlarından numune olarak temin edilmiştir. Temin ettiğimiz atık taban külü Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi'nin Mühendislik-Mimarlık Fakültesinin Yapı Malzemeleri Laboratuvarlarında bulunan Los Angeles Aşındırma Cihazında 25 demir bilye ile 5000 devirde öğütülmüş, toz haline getirilmiştir. Şekil 3.1'de öğütülmüş taban külü gösterilmiştir. Karışım içeriklerinde bu malzeme %45 ile %55 arasında oranlarda kullanılmıştır.

Şekil 3.1. Taban külü prosesi

3.1.2. Silis dumanı

Çalışmada kullanılan silis dumanı ya da mikrosilika olarak adlandırılan malzeme yüksek oranda amorf silika içermektedir. Toz halde temin edilen silis dumanı Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Genellikle gri renkte nano boyutlara sahip tozdur. Karışım içeriklerinde %7 ile %50 arasında oranlarda kullanılmıştır.

Şekil 3.2. Silis dumanı

3.1.3. Pomza

Çalışmada kullanılan pomza Nevşehir yöresinden elde edilmiştir. İnce pomza ve iri pomza Şekil 3.3'de gösterilmiştir. Çalışmada hem asidik iri pomza hem de ince pomza belli oranlarda kullanılmıştır. Karışım içeriklerinde %10 ile %50 arasında oranlarda bulunmaktadır.

Şekil 3.3. Pomza tozu

3.1.4. Atık lastik

Çalışmada kullanılan atık lastikler sektörde faaliyet gösteren bir atık lastik dönüşüm firmasından temin edilmiştir. Faydalı ömrünü tamamlamış araç lastiklerinden granül ve lifli yapıda elde edilen atık lastikler Şekil 3.4'de gösterilmiştir. Karışım içeriklerinde %5 ile %15 arasında oranlarda kullanılmıştır.

Şekil 3.4. Granül ve lifli atık lastikler

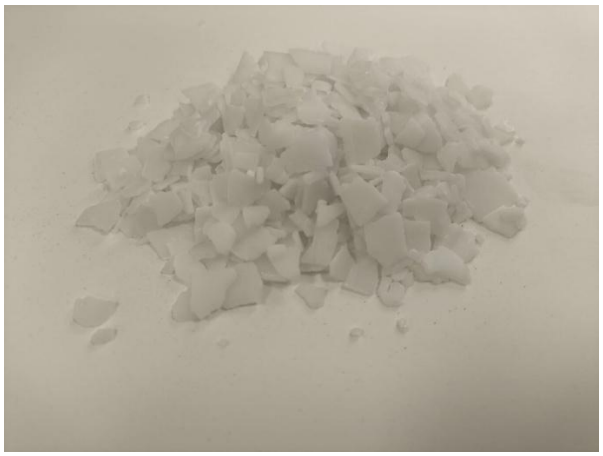
3.1.5. Atık mermer

Çalışmada kullanılan atık mermer Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesine ait Yapı Malzemeleri Laboratuvarında önceki çalışmalarda kullanılmış Kırşehir ilimizdeki mermer sanayisinde ortaya çıkan atık mermerlerdir. Atık durumdaki mermer Şekil 3.5'de gösterilmiştir. Karışım içeriklerinde %5 ile %10 arasında oranlarda kullanılmıştır.

Şekil 3.5. Atık mermer

3.1.6. Alkali aktivatörü

Çalışmada kullanılan alkali aktivatörü olarak sodyum hidroksit (NaOH) tercih edilmiştir. %98 saflıkta bulunan sodyum hidroksit Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Her bir molarite için saf suya litre başına 40 gr eklenmektedir.



Şekil 3.6. Sodyum hidroksit (NaOH)

3.1.7. Saf su

Çalışmada alkali aktivatör hazırlamak için kullanılan saf su Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi bünyesinde bulunan Merkezi Araştırma ve Uygulama Laboratuvarından temin edilmiştir.

3.2. Numunelerin Hazırlanması ve Numune Boyutları

Tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, öncelikle alkali aktivatör çözeltisinin hazırlanmasıyla numune üretim sürecine başlamıştır. Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit tercih edilmiş olup, çözeltinin hazırlanmasında kullanılan suyun kalitesi ve ortam koşullarının reaktif kararlılığı üzerindeki etkileri göz önünde bulundurulmuştur. Sodyum hidroksitin molekül kütlesi 40 gr/mol olduğundan, her 1 litre saf suya istenilen molariteye karşılık gelecek şekilde her molarite değeri için 40 gr sodyum hidroksit eklenerek farklı molaritelerde alkali aktivatör çözeltileri (8 M, 12 M, 14 M, 16 M ve 18 M) hazırlanmıştır. Özellikle son karışımlarda laboratuvar ortamında temin edilen saf su kullanılarak çözeltinin saflığı sağlanmıştır. Geopolimer harçlarının hazırlanmasında kullanılan bağlayıcılar ilk aşamada kuru karışım olarak homojenize edilmiştir. Bu karışımın yeterli homojenliğe ulaşmasının ardından daha önce hazırlanan alkali aktivatör çözeltisi yavaş yavaş karışıma ilave edilmiş, karışım tekrar düşük devirli mikserle karıştırılarak akışkan ancak kendini taşıyabilen kıvamda geopolimer harç elde edilmiştir. Elde edilen harç, Tablo 3.1'de verilen farklı boyutlardaki kalıplara dökülerek priz alması amacıyla beklemeye alınmıştır.

Tablo 3.1. Kullanılan numune boyutları

Kalıplar	Boyutlar (mm)
Küp Numuneler	50x50x50
Kiriş Numuneler	40x40x160
Silindir Numuneler	150x300
Standart Küp Numuneler	150x150x150
Isı Geçirgenlik Numunesi	150x150x50

3.3. Kür Koşulları ve Ekipmanlar

Geopolimerizasyon sürecinin tamamlanabilmesi ve priz işleminin gerçekleşmesi için harçların belirli sıcaklıklarda ısı kürü işlemine tabi tutulması gerekmektedir. Bu bağlamda, hazırlanan numuneler ilk olarak 24 saat boyunca oda sıcaklığında bekletilmiş, ardından üniversitemiz laboratuvarında bulunan etüv fırınında 65°C sıcaklıkta ısı kürü uygulanmıştır (Şekil 3.7). Isı kürü süreleri numunelere göre farklılık göstermiştir. Başlangıçta uygulanan 5 günlük kesintili ısı kürleri, iç kısımlarda yeterli priz sağlanamaması nedeniyle 7 gün boyunca kesintisiz olarak uygulanmıştır. Isı kürü süresince kalıplar fırın içerisine yerleştirilmiş ve çevre sıcaklığının sabit tutulmasına özen gösterilmiştir.

Şekil 3.7. Isı kürü uygulanan etüv fırını

3.4. Mekanik Test Ekipmanları ve Deneyler

Isı kürü uygulanan ve priz işlemi başarıyla tamamlanan numuneler, mekanik performans testlerine tabi tutulmuştur. Deneyler kapsamında aşağıdaki testler gerçekleştirilmiştir:

- **Basınç Dayanımı Testi**: 5x5x5 cm ve 15x15x15 cm ebatlarındaki numuneler kullanılmıştır.
- **Eğilme Dayanımı Testi**: 3 nokta eğilme deneyi yöntemiyle 4x4x16 cm boyutlarındaki kiriş numuneleri test edilmiştir.
- **Şekil Değiştirme Eğrisi**: 15x30 cm silindir numune üzerinde uygulanarak elastisite modülü ve deformasyon kapasitesi gibi özellikler tespit edilmiştir.

Şekil 3.8. Mekanik test ekipmanları

3.5. Isı İletkenlik Katsayısı ve Deney Numunesi

Geopolimer betonun sadece mekanik değil, termal performansı da değerlendirilmiştir. Nihai karışım ısı geçirgenlik testlerine tabi tutulmak üzere 15x15x5 cm boyutlarında kalıplanmıştır. Bu testler, Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi bünyesinde gerçekleştirilmiştir.

3.6. Şekil Değiştirme Eğrisi ve Analitik Çalışmalar

Geopolimer betonun mekanik dayanımı kadar, deformasyon kapasitesi de yapı malzemesi olarak kullanılabilirliğini etkilemektedir. Bu nedenle 15x30 cm boyutlarındaki silindir numune üzerinde gerilme-şekil değiştirme eğrisi belirlenmiştir. Deney, üniversitemiz laboratuvarlarında bulunan basınç test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Bu test, numunenin elastik ve plastik davranışlarının değerlendirilmesi açısından önemli bilgiler sağlamıştır. Bununla birlikte SAP2000 yazılımında elde edilen geopolimer karışımı betonarme yapılarda dolgu duvar olarak kullanılması durumunda yatay yük kapasitesini artırıp artırmadığı karşılaştırmalı çerçeve itme analizi modelleri üzerinden incelenmiştir. Analitik çalışmada karışım modeli için deneysel şekil değiştirme eğrisi esas alınmıştır.

3.7 Geopolimer Karışımların Hazırlanması ve Karışım optimizasyonu

Araştırmada ilk olarak alkali aktivatörünü hazırlamak için tercih ettiğimiz sodyum hidroksitin molaritesinin belirlenmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır. 12 M alkali aktivatör, literatür araştırmalarından yola çıkarak belirlenmiştir (Tuntaş, 2023). Saf suya litre başına 1 M için 40 gr sodyum hidroksit eklenerek 12 M alkali aktivatörü hazırlanmıştır (Şekil 3.9).

Şekil 3.9. Alkali aktivatörünün hazırlanması

Bir sonraki aşamada 12 M alkali aktivatörü ile karıştırılmak üzere 3 adet kontrol numunesi hazırlanmıştır. Tablo 3.2'de bu kontrol numunelerine ait içerikler verilmiştir. Pomza esaslı bu karışımlarda agrega olarak standart kum kullanılmıştır. Kuru karışımlar ilk olarak homojen olacak şekilde karıştırıldıktan sonra 12 M alkali aktivatörü eklenerek geopolimer hamuru elde edilmiştir. Bu karışım 4x4x16 cm ölçülerde kalıplara yerleştirilerek priz alması için bekletilmiştir. Şekil 3.10'da priz almayan Karışım-1 (K-1), Karışım-2 (K-2) ve Karışım-3 (K-3) numuneleri görülmektedir. Çalışmanın bu aşamasında ısıl işlem uygulanmadan karışımların priz durumları incelenmiştir. 72 saat süre sonunda numunelerde priz gözlenmemiştir.

Tablo 3.2. Pomza esaslı ilk 3 karışım numunesinin içerikleri

	Pomza (gr)	**Agrega (gr)**	**Atık Lastik (gr)**	**Alkali Aktivatörü (gr)**	**Süper Akışkanlaştırıcı (gr)**
K-1	1000	500	250 Granül	800 (12 M)	60
K-2	1000	500	250 Fiber	800 (12 M)	60
K-3	1000	500	250 Granül+Fiber	800 (12 M)	60

Şekil 3.10. Karışım-1 (K-1), Karışım -2 (K-2) ve Karışım -3 (K-3) numuneleri

İlk 3 kontrol numunesinde priz gerçekleşmediği için yeni kontrol numunesinde süper akışkanlaştırıcı kullanılmadan Tablo3.3'de verilen içeriklere uygun yeni numune karışımı tasarlanmıştır. İlk olarak kuru karışım hazırlandıktan sonra 12 M alkali aktivatörü eklenerek geopolimer hamuru hazırlanmıştır. Şekil 3.11'da görüldüğü üzere 4x4x16 cm ölçülerde ki kalıplara yerleştirilerek priz alması için bekletilmiştir. Bu karışım içinde ısıl işlem uygulanmamıştır. Bu karışımda ilk 3 kontrol numunesine göre daha katı bir malzeme elde edilmiştir. Ancak burada da istenen priz seviyesine ulaşılamamıştır.

Tablo 3.3. Pomza esaslı Karışım-4 numunesinin içerikleri

	Pomza (gr)	Agrega (gr)	Atık Lastik (gr)	Alkali Aktivatörü (gr)
K-4	100	50	25 Granül+Fiber	100 (12 M)

Şekil 3.11. Karışım-4 (K-4) numunesi ve kalıplanmış hali

3 adet kontrol numunesinde olduğu gibi K-4 numunesinde de priz gerçekleşmeyince ısı kürü uygulanmak üzere K-4 numunesi etüvde 65°C'de 4 saat bekletilmiştir. Bu işlem sonunda da prizin tam olarak gerçekleşmediği görülmüştür. Alkali aktivatörünü hazırlanırken kimyasal tepkimelerden minimum şekilde etkilenmek için laboratuvar dışında açık alanda uygulama gerçekleştirilmiştir. Yapılan karışımlarda priz gerçekleşmemesi üzerine alkali aktivatörünün hava şartlarından etkilendiğini düşünülerek oda sıcaklığında tekrardan yeni karışım hazırlanmıştır.

Tablo 3.4. Pomza esaslı Karışım-5 numunesinin içerikleri

	Pomza (gr)	Agrega (gr)	Atık Lastik (gr)	Alkali Aktivatörü (gr)
K-5	1000	500	250 Granül+Fiber	1000 (12 M)

Tablo 3.4'de verilen içeriğe uygun şekilde K-5 numunesi hazırlanmıştır. Yapılan kuru karışım oda sıcaklığında hazırlanan 12 M alkali aktivatörü ile karıştırılarak kalıplara dökülmüştür. Hazırlanan numuneler priz almamıştır. Alkali aktivatörünün hazırlanmasında ortam sıcaklığının etkisinin olmadığı belirlenmiştir (Şekil 3.12). Bu aşamada priz almama sebepleri olarak yeterli bağlayıcının bulunmadığı veya sodyum hidroksit ile atık lastiğin hesaplanamayan bir kimyasal tepkime oluşturabileceği

değerlendirilmiştir. Bu durumun geopolimer betonun oluşmasında olumsuz etki ortaya çıkarabileceği düşünülmüştür. Bu değerlendirmeler göz önüne alınarak farklı bağlayıcı türleri kullanılarak karışımdaki diğer bileşenlerin priz üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Şekil 3.12. K-5 numunelerinin kalıptaki hali

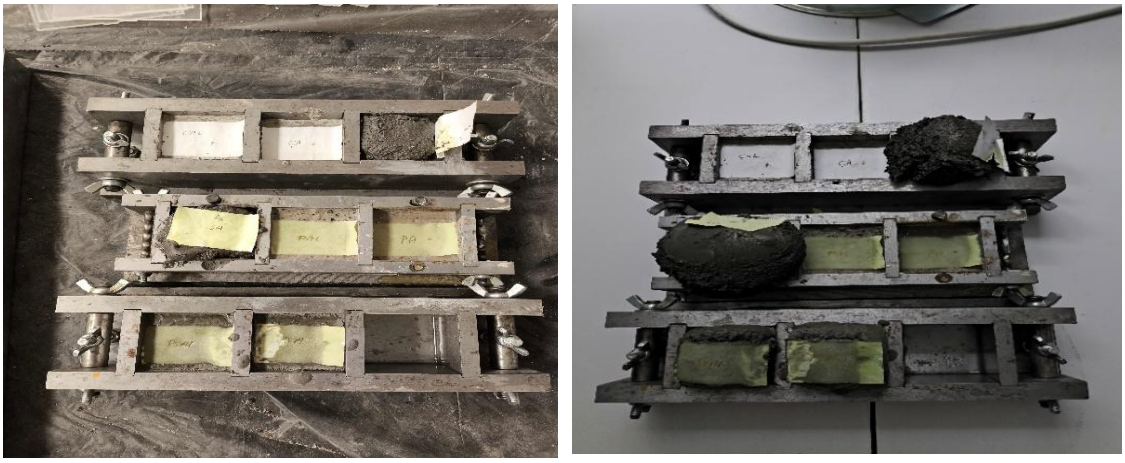
Yapılan araştırmalarda pomzanın 2 türünün bulunduğu görülmüştür. Asidik ve bazik pomza olarak nitelendirilen bu malzemelerin geopolimer karışımdaki etkisi incelenmiştir. Çalışma da kullanılan pomza türünün asidik olması sebebi ile priz üzerine etkisi irdelenmiştir. Geopolimer karışımlarda ise silis dumanı ve pomza belli oranlarda tek başına veya birlikte kullanılmıştır. Atık lastik etkisini gözlemlemek için bazı karışımlara atık lastik eklenmemiştir. Bu aşamada belirlenen karışımların içerikleri Tablo 3.5'de verilmiştir.

Tablo 3.5. Çimento, silis dumanı ve pomza esaslı karışım numunelerinin içerikleri

	Bağlayıcı ve miktarı (gr)	**Agrega (gr)**	**Atık Lastik (gr)**	**Su ve Alkali Aktivatör (gr)**
K-6	Silis dumanı 100	50	25	12 M NaOH 100
K-7	Silis dumanı 100	50		12 M NaOH 100
K-8	Pomza 100	50	25	12 M NaOH 100
K-9	Pomza 100	50		12 M NaOH 100
K-10	Pomza 80 Silis dumanı 20	50	25	12 M NaOH 100
K-11	Pomza 80 Silis dumanı 20	50		12 M NaOH 100

Şekil 3.13. K-6, K-7, K-8, K-9, K-10 ve K-11 numuneleri

Tablo 3.5'de verilen içeriğe göre hazırlanan karışımlardan K-6 ve K-7 karışımlarında bağlayıcı olarak silis dumanı kullanılmıştır. Bu karışımlarda hacimsel artış gözlemlenmiştir (Şekil 3.14). Gözenekli yapıya sahip bu numunede priz gerçekleşmemiştir. Ancak numunenin hacim değişimi gözlenen üst kısmında oldukça sert bir katman oluşmuştur. K-8 ve K-9 karışımlarında kullanılan bağlayıcı ise pomza olarak belirlenmiştir. Burada karışımlardan birine atık lastik eklenmemiştir. Bu karışım ile atık lastiğin priz üzerinde ki etkisi araştırılmıştır. Ancak önceki numunelerde olduğu gibi pomza esaslı bu son karışımlarda da priz işlemi gerçekleşmemiştir. K-10 ve K-11 karışımlarında pomza (%80) ve silis dumanı (%20) beraber kullanılmıştır. Bu karışımlarda hacimsel artış gözlemlenmiştir. Bu hacimsel artışta silis dumanının efektif olduğu belirlenmiştir. Ancak numune jel kıvamında kalmış ve priz almamıştır.



Şekil 3.14. K-6, K-7, K-8, K-9, K-10 ve K-11 numunelerinin son halleri

Bu aşamaya kadar hazırlanan 11 karışımda istenen sonuçlar elde edilememiştir. Priz işleminin gerçekleşmeme nedenleri üzerinde düşünülmüş ve farklı molariteye sahip alkali aktivatörleri hazırlanması planlanmıştır. Tablo 3.6'da pomza esaslı ve farklı molariteye sahip karışım içerikleri verilmiştir. 8 M, 16 M ve 18 M alkali aktivatörleri ile hazırlanan pomza esaslı karışımlar Şekil 3.14'de olduğu gibi kalıplara dökülmüştür. Farklı molariteye sahip pomza esaslı K-12, K-13 veK-14 numunelerinde de priz gözlemlenmemiştir. Dolayısıyla normal ortam koşullarında ısıl işlem olmadan tüm varyasyonlar denenmiş ve yeterli prizin oluşmadığı görülmüştür.

Tablo 3.6. Pomza esaslı karışımların içerikleri

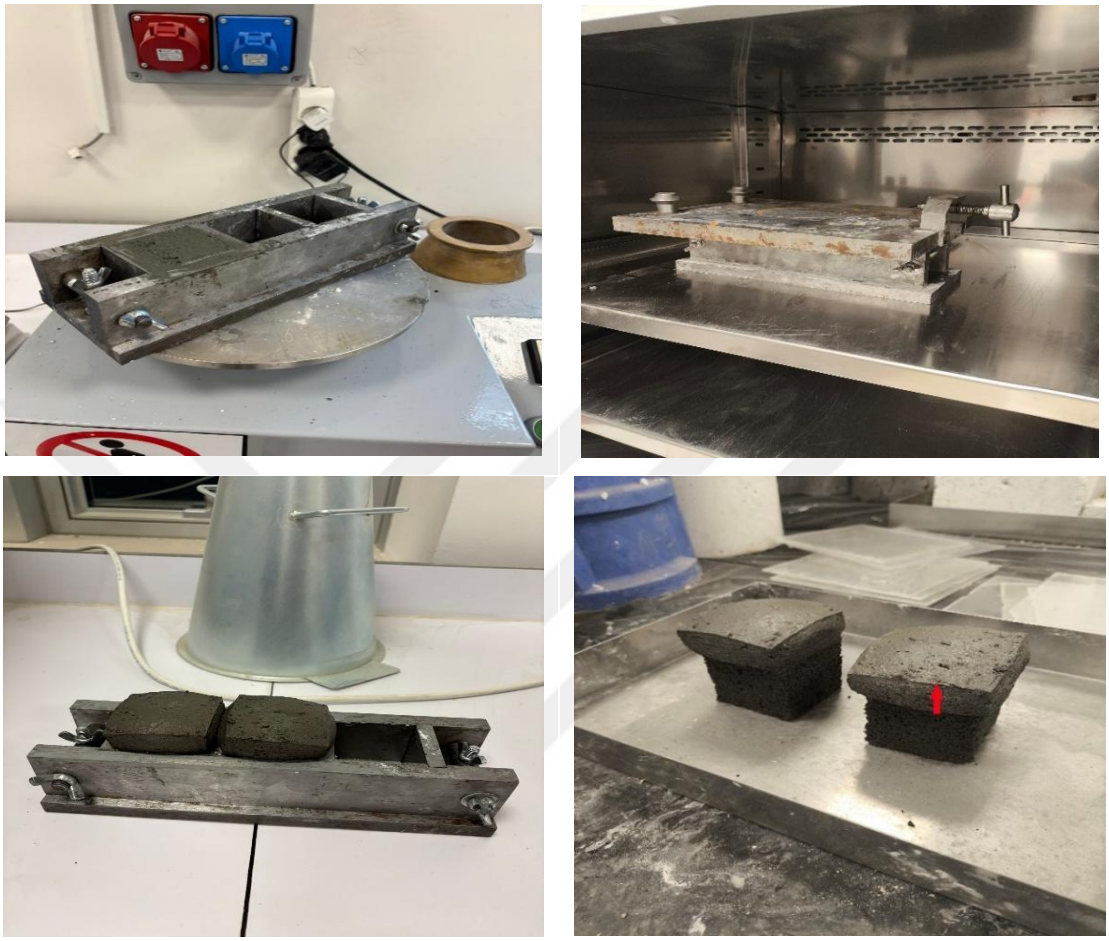
	Pomza (gr)	**Agrega (gr)**	**Atık Lastik (gr)**	**Alkali Aktivatörü (gr)**
K-12	100	50	25	100 (8 M)
K-13	100	50	25	100 (16 M)
K-14	100	50	25	100 (18 M)

Şekil 3.15. K-12, K-13 ve K-14 numuneleri

K-15 karışımında silis dumanı, iri pomza, atık beton ve atık lastik kullanılmış, alkali aktivatörü olarak ise 8 M sodyum hidroksit tercih edilmiştir (Tablo 3.7). Silis dumanı esaslı karışımlarda hacimsel artış gözlemlendiği için Şekil 3.16'da görülen K-15 karışımı kalıba döküldükten sonra üzerine başka bir kalıp konularak ağırlık oluşturulmuştur. Bir gün üzerinde ağırlıkla bekletilen numuneler ağırlıkla beraber etüve 65°C'de 12 saat ısı kürüne tabi tutulmuştur. Etüvden çıkarıldıktan sonra numuneler kontrol edilmiş ve ağırlık kaldırılarak tekrar etüvde 24 saat ısı kürü uygulanmıştır. Bu süreçte numune yüksekliğinin %50 si oranında hacimsel artışla beraber gözenekli bir malzeme yapısı oluşmuştur.

Tablo 3.7. Silis dumanı esaslı K-15 numune içerikleri

	Silis Dumanı (gr)	Pomza (gr)	Atık Beton (gr)	Atık Lastik (gr)	Alkali Aktivatör (gr)
K-15	200	60	40	50 Granül + Fiber	200 (8 M)



Şekil 3.16. K-15 numunesinin hazırlanma aşamaları ve etüv sonrası

Farklı parametreler değişken olarak seçilerek hazırlanan 15 numune karışımı sonucunda istenilen hedefe ulaşılamamıştır. K-15 numunesine basınç testi uygulanmış, test esnasında numunenin dağıldığı görülmüştür. Bu husus karışımlarda tam bir bağlayıcılığın oluşmadığını göstermiştir. Bununla birlikte karışımlarda basınç dayanımını artıracak yeni yaklaşımlar araştırılmıştır. K-16 karışımında basınç dayanımını artırmak için endüstri tesislerinden elde edilen taban külü denenmiştir. Ayrıca karışımda 14 M sodyum hidroksit tercih edilmiştir. Bağlayıcılığı artırabilmek için etüv süresi uzatılmıştır. Bu kapsamda Tablo 3.8'de verilen içeriklere uygun şekilde K-16 karışımı hazırlanmıştır.

Tablo 3.8. Taban külü esaslı numune içerikleri

	Taban Külü (gr)	Agrega (gr)	Alkali Aktivatörü (gr)
K-16	200	100	100 (14 M)

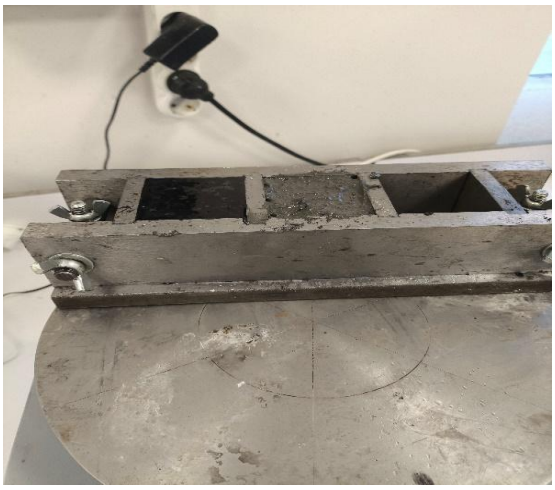
Taban külü esaslı bu karışımda 48 saat etüv sonunda kısmen priz gözlemlenmiş ancak karışımın dayanımının çok düşük olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.17). Yapılan araştırmalarda sodyum hidroksit karışımında kullanılan suyun önemli olduğu tespit edilmiştir. Bu aşamaya kadar yapılan tüm karışımlarda çeşme suyu kullanılmıştır. K-16 karışımından sonra çeşme suyu yerine saf su temin edilmiştir. Saf su etkisinin gözlemlenebilmesi için K-17 ve K-18 karışımları hazırlanmıştır. Burada saf su kullanımının yanında taban külü ve silis dumanı ayrı ayrı denenmiştir.

Şekil 3.17. K-16 isimli taban külü esaslı numune

Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi bünyesinde bulunan Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezinden temin edilen saf su ile 12 M sodyum hidroksit bulunan alkali aktivatörü hazırlanmıştır. Taban külü ve silis dumanı esaslı K-17 ve K-18 karışım içerikleri Tablo 3.9'da verilmiştir.

Tablo 3.9. Taban külü ve silis dumanı esaslı numune içerikleri

	Bağlayıcı (gr)	Agrega (gr)	Alkali Aktivatörü (gr)
K-17	150 (Taban külü)	75	75 (12 M)
K-18	100 (Silis dumanı)	50	50 (12 M)



Şekil 3.18. K-17 ve K-18 karışımlarının kalıplara dökülmesi

Hazırlanan K-17 ve K-18 karışımları bir gün oda sıcaklığında bekletildikten sonra ısı kürü uygulanmak üzere etüvde 65°C'de 12 saat bekletilmiştir. Isı kürü işleminden sonra K-17 priz almıştır. K-18 ise önceki silis dumanı esaslı karışımlarda olduğu gibi yine hacimsel artış ve gözenekli yapı gözlemlenmiştir. Önceki numunelere göre hacimsel artışın daha fazla olduğu görülmüştür (Şekil 3.19).

Şekil 3.19. K-17 ve K-18 numunelerinin etüv sonrası görünümleri

K-16 karışımında ısıl işlem uygulanmasına rağmen priz almama sebebinin alkali aktivatörde kullanılmayan saf sudan kaynaklandığı tespit edilmiştir. Silis dumanlı karışımda (K-18) beklendiği üzere priz gerçekleşmiş ancak hacimsel artışla gözenekli yapıya sahip bir malzeme ortaya çıkmıştır. Bu malzeme tez kapsamında elde edilen yan bir ürün olarak değerlendirilmiştir. Bundan sonraki karışımlarda silis dumanı hacimsel bütünlüğü bozduğu için kullanılmamıştır. K-17 karışımında ise priz oluşmasına rağmen istenen dayanım elde edilememiştir. Bunun sebebinin ısıl işlem süresi olduğu değerlendirilmiştir. Taban külü kullanımından dolayı malzeme birim hacim ağırlığının arttığı gözlemlenmiştir. Tüm bu veriler çerçevesinde hem basınç dayanımını artırmak hem de malzemenin birim hacim ağırlığını azaltmak için K-19 karışımı denenmiştir. K-19 karışımında pomza ince ve iri olmak üzere iki şekilde kullanılmıştır. Basınç dayanımını artırabilmek için ise taban külü yerine laboratuvarda bulunan atık beton tercih edilmiştir. Tablo 3.10'da içeriği verilmiş olan K-19 karışımına 2 gün boyunca etüvde 65°C'de ısı kürü uygulanmıştır.

Tablo 3.10. Pomza esaslı tamamen atıklardan oluşan numune içerikleri

	Pomza (gr)	İri Pomza (gr)	Atık Beton (gr)	Atık Lastik (gr)	Alkali Aktivatör (gr)
K-19	300	100	50	75	300 (12 M)

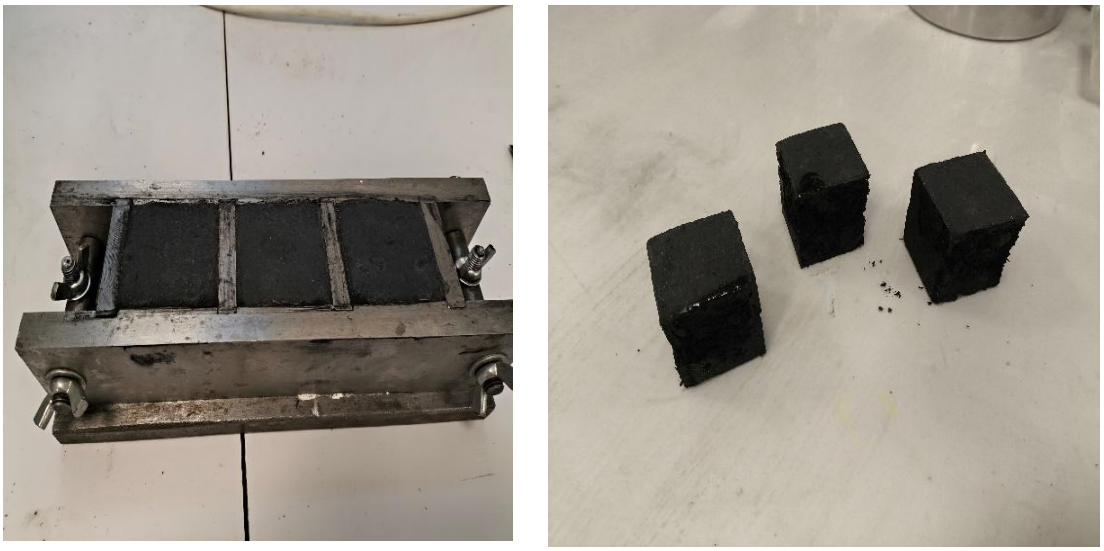
K-19 karışımı sonunda istenilen priz elde edilmiş, numune basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur. Numunenin basınç dayanımı 1 MPa değerinin altında kalmıştır. Bununla birlikte atık beton taban külüne oranla birim hacim ağırlığını artırmıştır. Bu sebeple tekrardan taban külü kullanımı tercih edilmiştir. K-17 numunesine göre basınç dayanımını daha da artırmak için karışıma atık mermer ilave edilmiştir. Tablo 3.11'de K-20 karışım içeriği verilmiştir. Burada sodyum hidroksit molaritesi 12 M olarak seçilmiştir. K-20 karışımı 3 adet 5x5x5 cm küp kalıplara dökülmüştür.

Tablo 3.11. Taban külü ve pomza esaslı K-20 numune içerikleri

	Taban Külü (gr)	Pomza (gr)	Atık Mermer (gr)	Atık Lastik (gr)	Alkali Aktivatör (gr)
K-20	400	50	50	75	200 (12 M)

Şekil 3.20. K-20 karışım görseli

Kalıplara dökülen K-20 karışımları 5 gün boyunca 65°C'de etüvde bekletilerek priz ve dayanım alması beklenmiştir (Şekil 3.21). Ancak burada ısıl işlem laboratuvar güvenliği açısından kesintili olarak uygulanabilmiştir. Bu 5 günlük süre içerisinde numuneler toplam 60 saat ısıl işleme tabi tutulmuştur. Isı küründen sonra basınç dayanımı testleri yapılmıştır. Test sonunda priz işleminin dış kısımlarda gerçekleştiği, 1.1 MPa dayanım elde edildiği, ancak iç kısımlarda hala priz gerçekleşmediği gözlemlenmiştir. Bu aşamada numunelere ısıl işlemin kesintisiz olarak uygulanması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Gerekli önlemler alınarak hazırlanan K-21 karışımına ısıl işlem 7 gün kesintisiz olarak uygulanmıştır. Tablo 3.12'de K-21 içeriği verilmiştir.

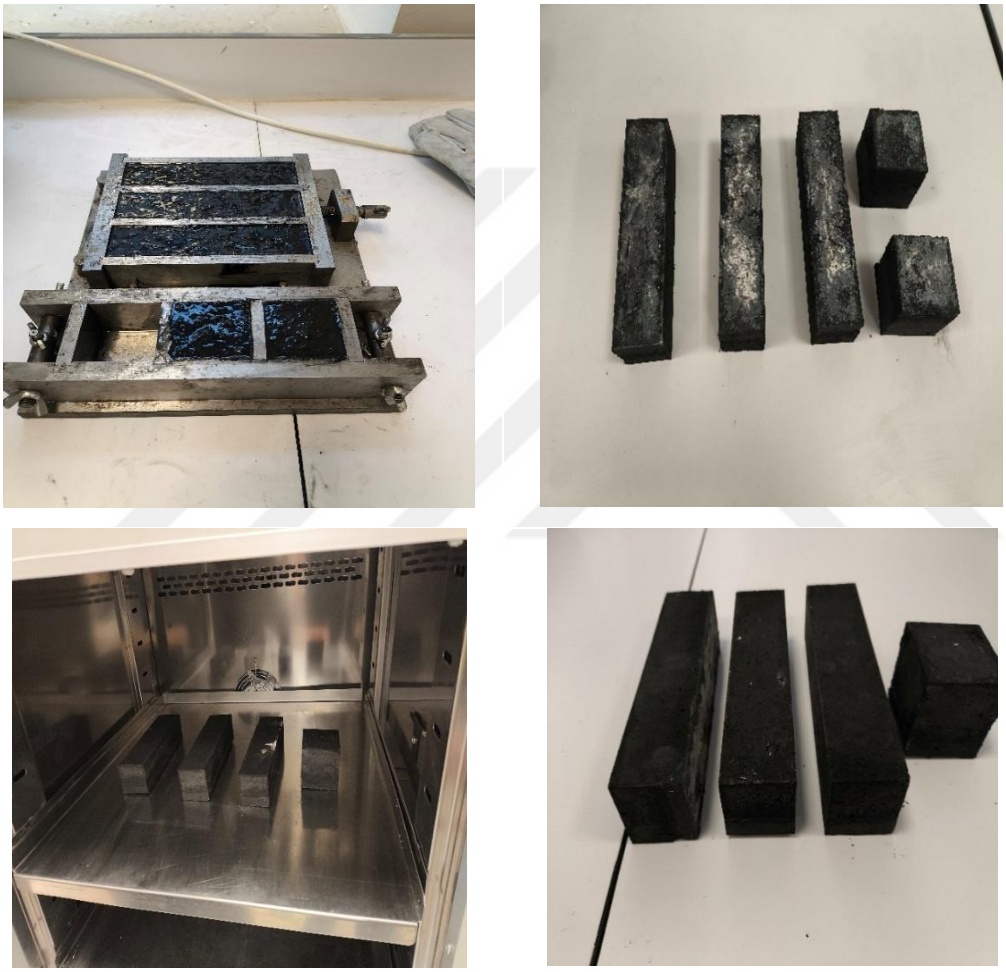


Şekil 3.21. K-20 numuneleri 5 gün etüv sonrası durumları

K-21 karışım içeriğinde malzeme oranları değiştirilmiştir. Karışımın hafifletilmesi için taban külü ve atık mermer oranı azaltılmış, pomza oranı artırılmıştır. Ayrıca atık lastik oranı da azaltılarak basınç dayanımında belirgin bir artış hedeflenmiştir.

Tablo 3.12. Taban külü ve pomza esaslı K-21 numune içerikleri

	Taban Külü (gr)	**İri Pomza (gr)**	**Atık Mermer (gr)**	**Atık Lastik (gr)**	**Alkali Aktivatör (gr)**
K-21	350	75	25	50	280 (12 M)



Şekil 3.22. K-21 numuneleri ve 7 günlük ısı kürü sonrası durumları

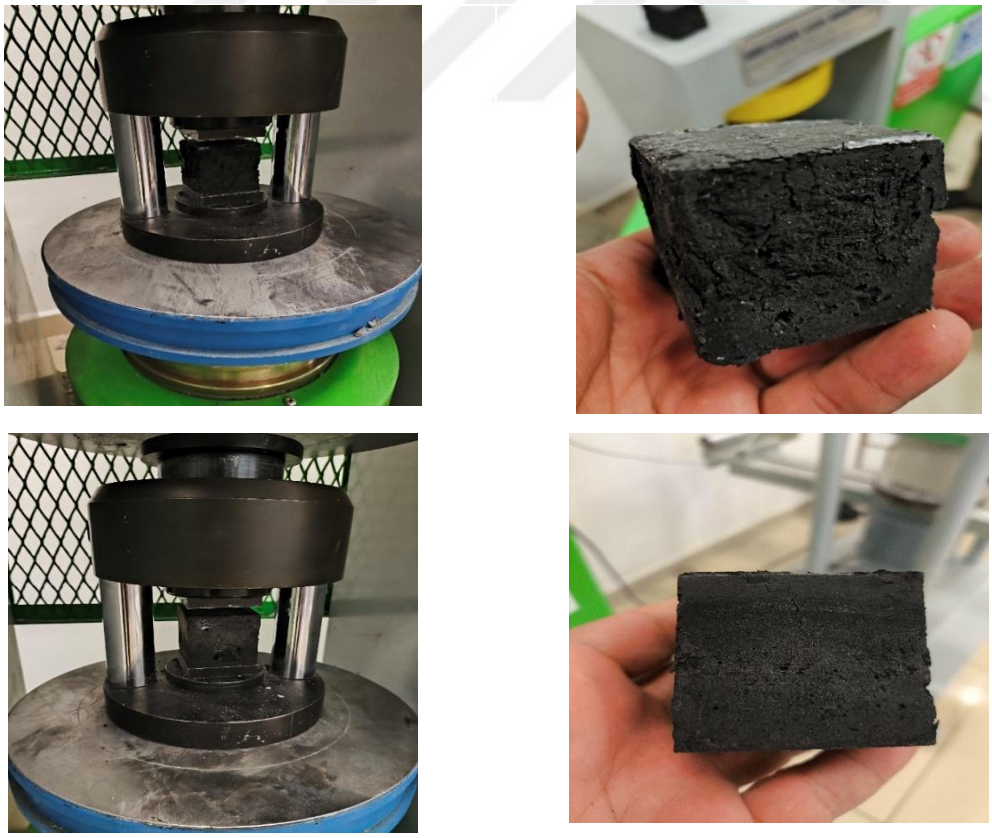
K-21 numunesi 7 gün sonunda etüvden çıkarılmış, numuneye basınç testi uygulanmıştır. Basınç dayanımı testi sonunda 40x40x160 mm numunelerde ortalama basınç dayanımı 4.66 MPa olarak elde edilmiştir. 50x50x50 mm küp numunelerde ise ortalama basınç dayanımı 4 MPa olarak bulunmuştur. Tüm numuneler dikkate alındığında ortalama basınç dayanımının 4.3 MPa değerinde olduğu görülmüştür. Eğilme

dayanımı ise 0.93 MPa olarak belirlenmiştir (Tablo 3.13). K-21 karışımı tez çalışmasında optimize edilen nihai karışım olarak seçilmiştir. Bu karışımdan 150x150x150 mm küp numune, 150x300 mm silindir numune ve ısı geçirgenlik testi için 150x150x50 mm plaka numune üretilmiştir.

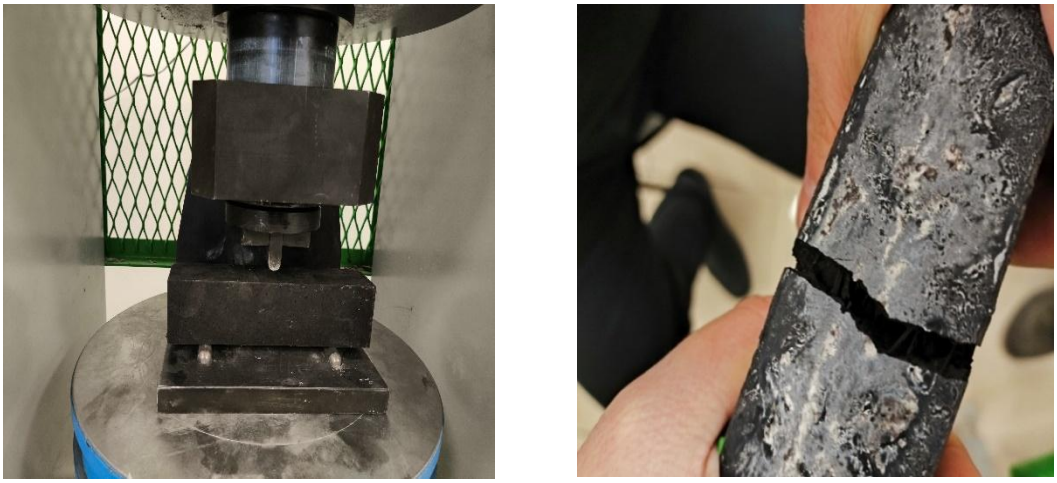
Şekil 3.23. K-21 içeriğine uygun diğer kalıp dökümleri

K-21 karışımlarından oluşan numunelerin birim hacim ağırlığı 0.72 ton/m^3, ısı geçirgenlik kat sayısı ise 0.47 W/mK olarak ölçülmüştür. Ancak yapılan testlerde büyük ölçekli küp numunede numunenin iç kısımlarının henüz tam sertleşmediği ve 7 gün kesintisiz ısıl işlemin numune ölçeği büyüdükçe artırılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. 150x300 mm silindir numune için gerilme-şekil değiştirme eğrisi belirlenmiş, Şekil 3.25'de grafik olarak gösterilmiştir. Silindir ve 150x150x150 mm küp numunelerde boyut etkisi, narinlik, içsel kürlemenin tam sağlanamaması sebepleriyle küçük numunelere oranla dayanımın %25'ine ulaşılabilmiştir. 150x150x150 mm küp

numune için basınç dayanımı değeri 1.1 MPa, silindir numunesi için 0.9 MPa değerinde belirlenmiştir (Tablo 3.13). Bu sonuç atık lastikten üretilecek yapı malzemesi ürünlerinin minimum boyutlara ve kalınlığa sahip olması gerektiğini göstermiştir. Ancak silindir numune üzerinde uygulanan testlerde oldukça sünek bir malzeme elde edilebildiği görülmüştür. Tez çalışmasında yüksek sünekliliğe sahip bu malzemenin, yüksek dayanıma sahip başka yapı malzemeleri ile kaplanarak dayanım kapasitesinin de artırılabileceği değerlendirilmiştir. K-21 karışımı ile %100 atık ve doğal malzemelerden oluşan bir geopolimer elde edilebilmiştir. Analitik çalışmalarda bu malzemenin yapısal bir çerçeve içerisinde dolgu duvar olarak kullanılması durumuna göre çerçeve kapasitesine etkisi incelenmiştir. Analitik çalışmalar öncesinde K-21 içeriğinde oluşan deney numunelerine basınç ve eğilme testi uygulanmıştır. Deneylerde öncelikle 50x50x50 mm boyutlarına sahip küp numunelere basınç testi yapılmıştır. Sonrasında 40x40x160 mm boyutlarına sahip numunelere öncelikle eğilme testi sonrasında basınç testi uygulanmıştır. Bu testler tamamlandıktan sonra 150x150x150 mm küp numune ve 150x300 mm silindir numune deneyleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.24. K-21 50x50x50 mm küp numune basınç dayanım testi



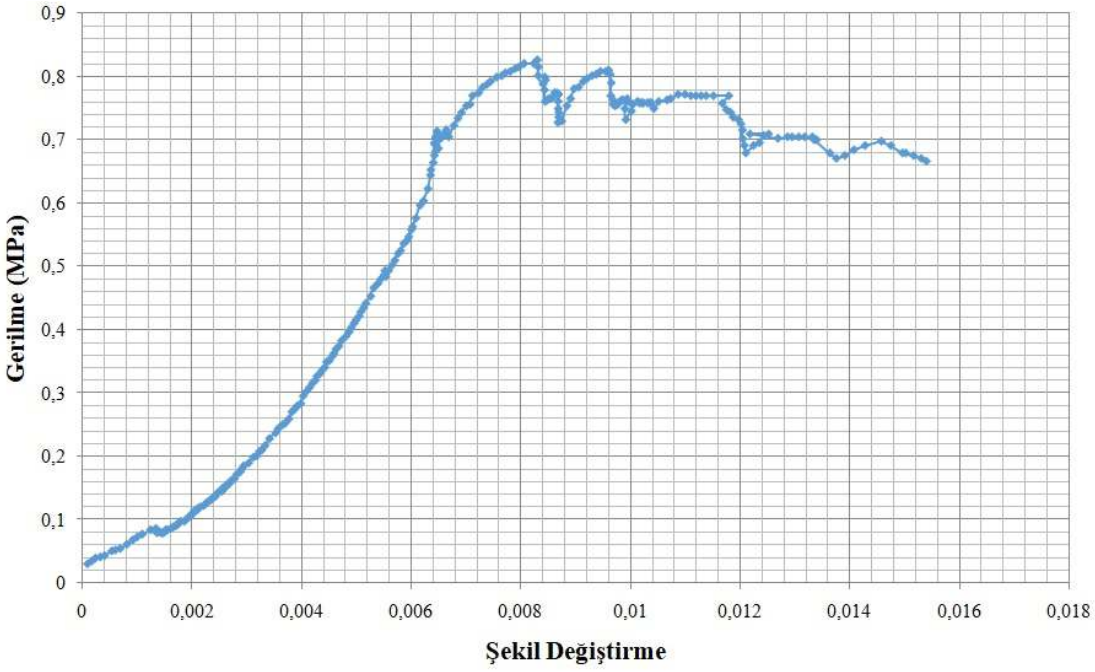
Şekil 3.25. K-21 40x40x160 mm numune eğilme dayanımı testi

Şekil 3.26. K-21 150x150x150 mm küp numune basınç dayanım testi

Tablo 3.13. K-21 basınç, eğilme dayanımı ve ısı geçirgenlik katsayısı sonuçları

Numune İsmi	Basınç Dayanımı	Eğilme Dayanımı	Isı Geçirgenlik Katsayısı
K-21 50x50x50_1	3,8 MPa		
K-21 50x50x50_2	4,2 MPa		
K-21 40x40x160_1	4,1 MPa	0,8 MPa	
K-21 40x40x160_2	4,1 MPa	0,9 MPa	
K-21 40x40x160_3	5,8 MPa	1,1 MPa	
K-21 150x150x150	1,1 MPa		
K-21 150x300	0,9 MPa		
K-21 50x150x150			0.47 W/mK

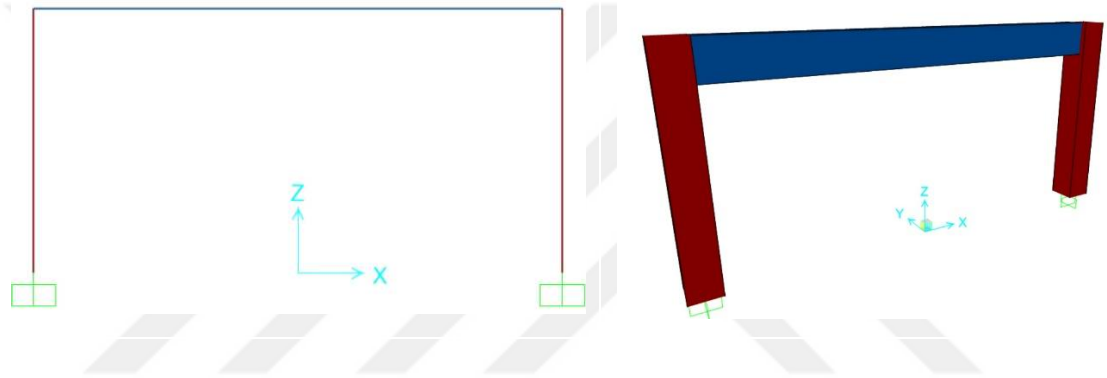
Şekil 3.27. Gerilme – şekil değiştirme testi



Şekil 3.28. K-21 silindirine ait gerilme – şekil değiştirme grafiği

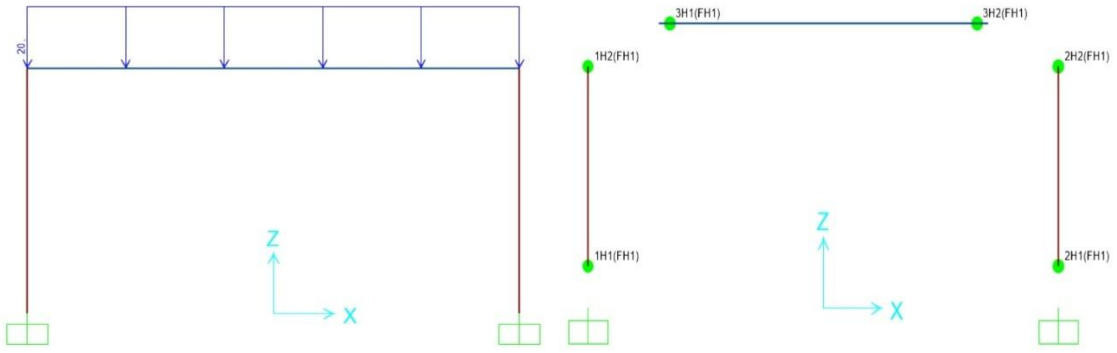
3.8 Analitik Çalışmalar

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneyler sonucunda K-21 karışımı en optimum karışım olarak belirlenmiştir. %100 atık ve doğal bileşenlerden oluşan geopolimer bu malzemenin inşaat sektöründe farklı amaçlar için kullanılabileceği değerlendirilmiştir. Burada ilk olarak bu malzemeden üretilebilecek 100x100x200 mm birim elemanların dolgu duvarlarda kullanılması durumunda betonarme çerçevedeki kapasite artışı incelenmiştir. Bu kapsamda SAP2000 programında bir referans çerçeve modellenmiştir. Bu referans çerçeve 3000 mm yüksekliğe, 6000 mm açıklığa sahiptir. Kolon boyutları 400x400 mm, kiriş boyutları ise 250x500 mm ölçülerdedir. Çerçeve beton malzemesi C30 olarak belirlenmiştir.



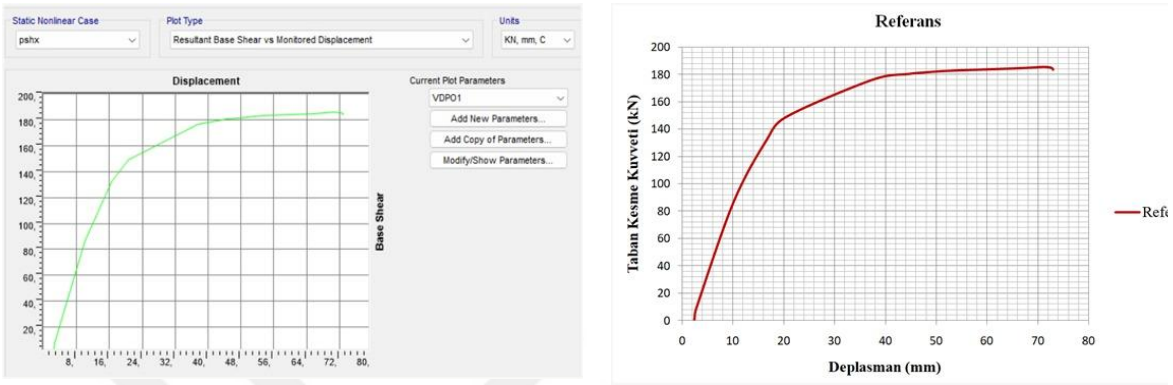
Şekil 3.29. Referans çerçeve modeli

Referans çerçeve modeline statik itme (Pushover) analizi uygulanmıştır. Çerçeve üzerine kolonlarda $N/N_0 = 0.1$ olacak şekilde eksenel yük tanımlanmıştır. Çerçevede kolon ve kirişler için fiber mafsal modeli kullanılmıştır.



Şekil 3.30. Referans çerçeve plastik mafsal tanımı

Deformasyon kontrollü olarak gerçekleştirilen itme analizi sonucunda statik itme eğrisi elde edilmiştir. Referans çerçevenin maksimum taban kesme kuvveti değerinin 183.68 kN, maksimum yatay deplasmanının ise 72,95 mm olduğu statik itme eğrisinden görülmüştür.



Şekil 3.31. Referans çerçeve itme analizi sonucu

Referans çerçeveye tez çalışmasında elde edilen %100 atık ve doğal malzemeden oluşan K-21 karışımı esas alınarak 100x100x200 mm boyutlarında birim elemanlar, TBYD-2018 15C.2. Dolgu Duvarların Hasır Çelik Donatılı Özel Sıva ile Güçlendirilmesi bölümünde yer alan 15C.1 ve 15C.2 denklemleri kullanılarak dolgu duvarların eşdeğer basınç çubukları ile modellenmiştir. (TBDY, 2018; Sağliyan, 2018; Garip ve ark.;2023).

$$a_d = 0.175\,(\lambda_d\, h_k)^{-0.4}\, r_d \qquad \textbf{(15C.1)}$$

$$\lambda_d = \left[\frac{E_d\, t_d \sin 2\theta}{4 E_c\, I_k\, h_d}\right]^{\frac{1}{4}} \qquad \textbf{(15C.2)}$$

TBDY-2018

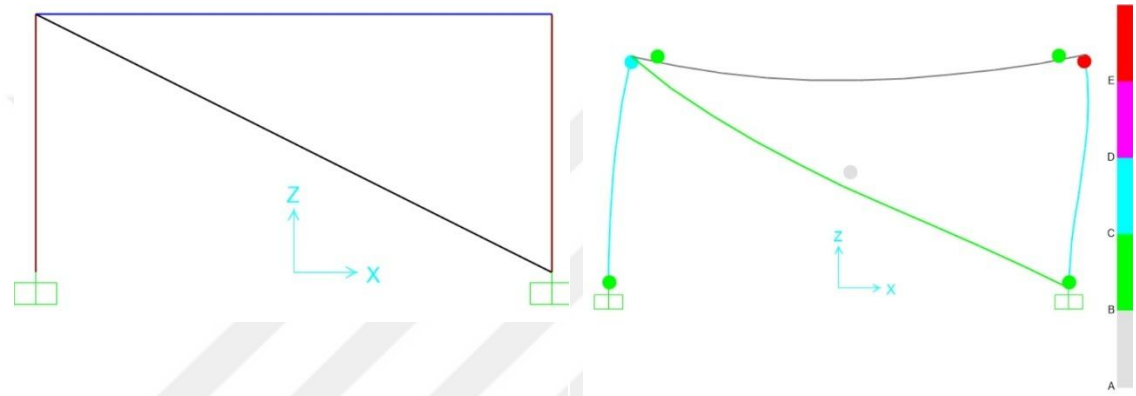
Şekil 3.32. TBDY-2018 eşdeğer basınç çubuğu modelleme formülleri

Şekil 3.28'den K-21 malzemesinin E modülü 100 MPa olarak hesaplanmıştır. Denklemlerde E_d dolgu duvarın elastisite modülünü, t_d dolgu duvarın kalınlığını, θ eşdeğer basınç çubuğunun yatayla olan açısını, E_c çerçeve betonun elastisite modülünü, I_k kolonun atalet momentini, h_d dolgu duvarın yüksekliğini, λ_d eşdeğer basınç çubuğu katsayısını, h_k kolon boyunu, r_d dolgu duvarın köşegen uzunluğunu, a_d ise eşdeğer basınç çubuğunun genişliğini göstermektedir. Tüm bu parametreler hesaplanarak K-21 karışımı için eşdeğer basınç çubuğu kalınlığı Tablo 3.14'de 1,04 m olarak hesaplanmıştır. Dolgu

duvar elastisite modülü ve kalınlığına sahip eşdeğer basınç çubuğu SAP2000'de referans çerçeve için modellenmiştir. K-21 malzemesi ile modellenen çerçevede statik itme analizi gerçekleştirilmiş ve referans çerçeve kapasite eğrisi ile karşılaştırılmıştır. Modelde eksenel basınç çubuğu içinde fiber mafsal uygulanmıştır.

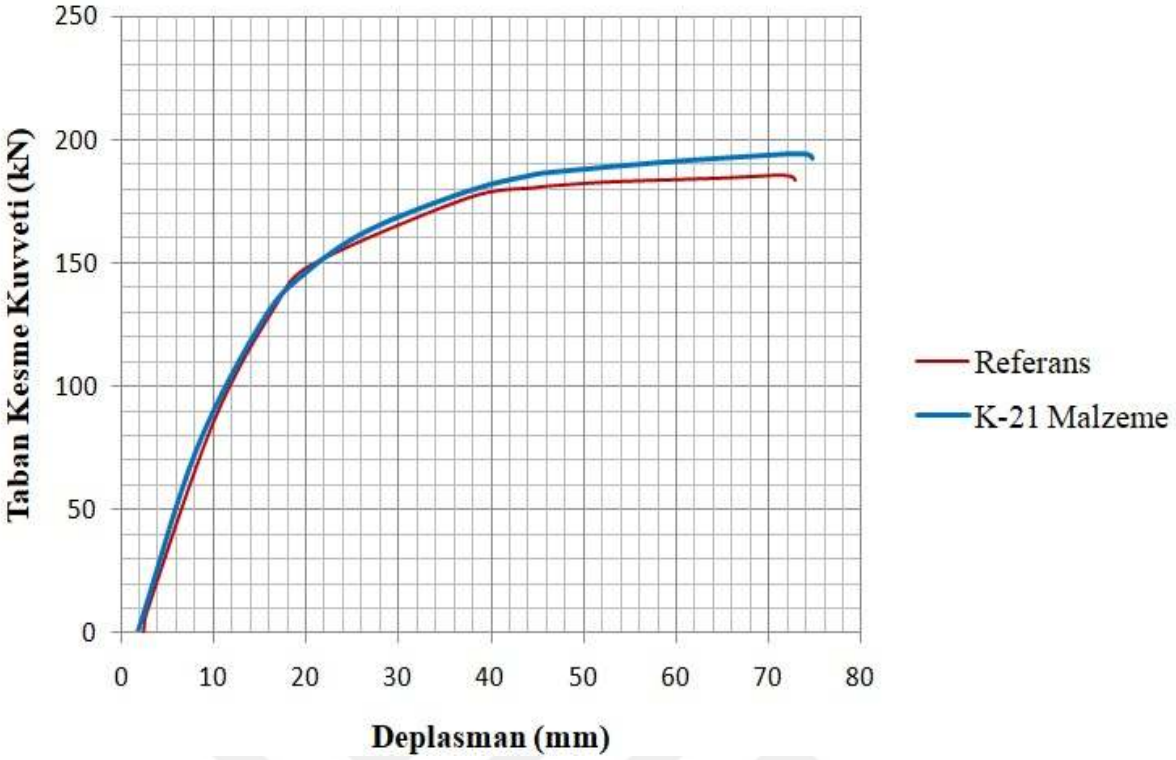
Tablo 3.14. K-21 için eşdeğer basınç çubuğu genişliği hesabı

E_d (MPa)	t_d (m)	sin2θ	E_c (MPa)	I_k (m^4)	h_d (m)	r_d (m)	λ_d	h_k (m)	a_d (m)
100	0,1	0,86	31000	0,002	2,4	6,09	0,35	3	1,04



Şekil 3.33. K-21 karışımı birim eleman duvar modeli statik itme analizi

Analiz sonucunda referans çerçeve ile atık lastik esaslı dolgu duvarlı çerçeve kapasite eğrileri karşılaştırılmıştır (Şekil 3.34). İki statik itme eğrisi karşılaştırıldığında maksimum taban kesme kuvveti değeri açısından %4.9, yatay deplasman açısından %2.77 bir artış gözlenmiştir. Atık lastikten oluşan birim elemanın boyutları arttıkça içsel kürlemenin tam olarak oluşamaması nedeniyle dayanım parametresinde olumsuz etkilendiği deneysel çalışmalarda görülmüştür. K-21 karışımı için silindir basınç dayanımı 1 MPa olsa da 40x40x160 mm boyutlu numunelerde 4.4 MPa değerine ulaşılabilmiştir. Dolayısıyla birim elemanda boyutlar küçüldükçe elastisite modülünün de artacağı düşünülmüştür. Bu yaklaşımla dolgu duvar E modülü 500 MPa olabileceği varyasyonu düşünülerek ikinci bir analiz gerçekleştirilmiştir. 500 MPa dolgu duvar E modülü için eşdeğer basınç çubuğu kalınlığı hesaplanmıştır. Değerler Tablo 3.15'de verilmiştir.



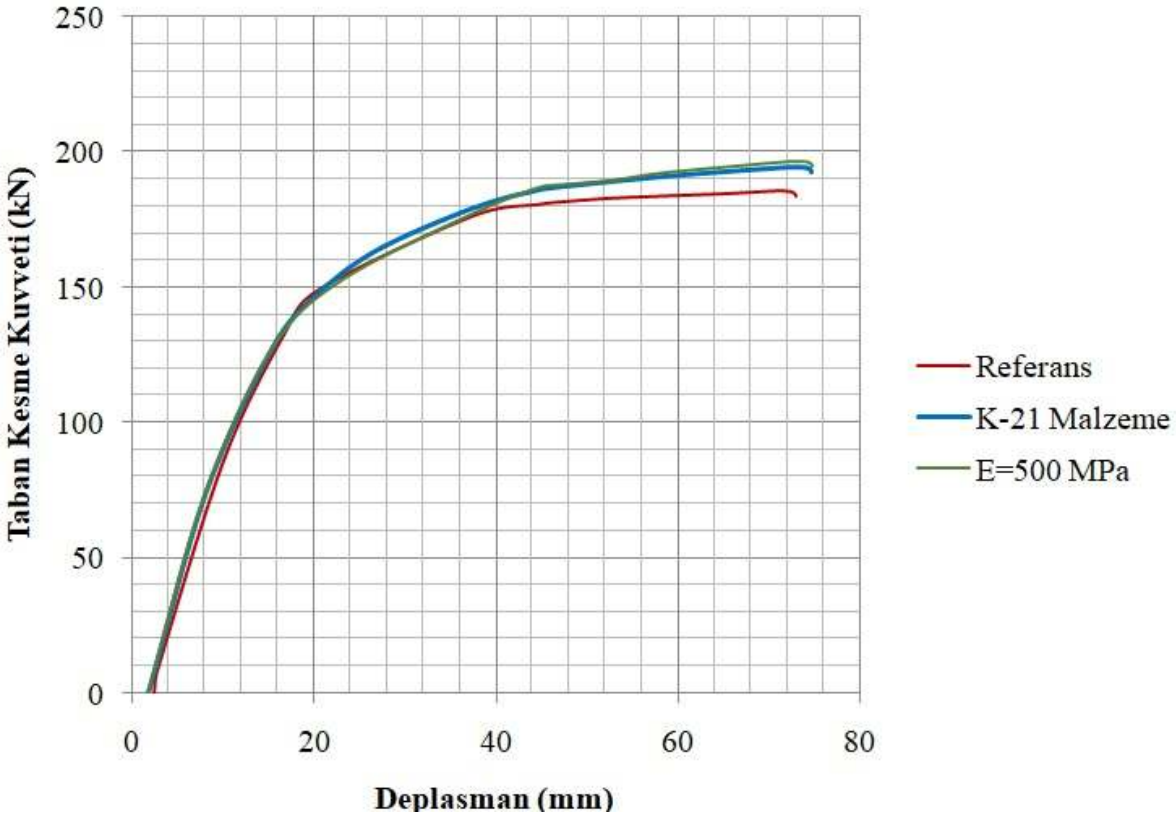
Şekil 3.34. Referans ve K-21 malzemeli çerçeve kapasite karşılaştırılması

Tablo 3.15. E = 500 MPa için eşdeğer basınç çubuğu kalınlığı hesabı

E_d (MPa)	t_d (m)	sin2θ	E_c (MPa)	I_k (m^4)	h_d (m)	r_d (m)	λ_d	h_k (m)	a_d (m)
500	0,1	0,86	31000	0,002	2,4	6,09	0,51	3	0,89

Tablo 3.14'de verilen değerler için statik itme analizi gerçekleştirilmiş ve diğer iki analiz ile karşılaştırılmıştır. Şekil 3.35'de sonuçlar gösterilmiştir. Elastisite modülünün 500 MPa olması sonucu maksimum taban kesme kuvveti değeri referans çerçeveye göre %6 artış göstermiştir. Şekil 3.35 incelendiğinde E modülünün 500 MPa olması varyasyonu kapasitede önemli bir artış oluşturmamıştır. Bu noktada K-21 malzemesinin yüksek dayanımlı bir malzeme ile kaplanması durumu irdelenmiştir. 100x100 mm^2 kesit alanına sahip 500 MPa elastisite modülü değerinde birim elemanın 28000 MPa E modülüne sahip başka bir malzeme ile her doğrultuda 20 mm kaplandığını düşünürsek alansal oranlardan (100/196)x500+(96/196)x28000=255+13714=13969MPa (Topçu ve ark., 2007) elastisite modülüne sahip bir birim eleman elde edilebileceği hesaplanmıştır. Ancak bu hesaplama literatürden kuramsal bir yaklaşımla yapılmıştır. Atık lastik esaslı bir yapısal elemanın farklı bir malzeme ile kaplanması durumunda iki malzemenin birlikte çalışma durumu deneysel olarak da gözlemlenmelidir. Burada gerçekleştirilen analitik çalışmada atık lastik esaslı yapısal ürünün, mekanik özellikleri

daha iyi başka bir malzeme ile kaplanması sonucunda ortaya çıkacak yeni kompozit malzeme varyasyonun çerçeve davranışına etkisi incelenmiştir. Literatürden yararlanılarak gerçekleştirilen kuramsal hesaplama ile E modülünün 13969 MPa olması durumu için eşdeğer basınç çubuğu kalınlığı hesabı yapılmış ve Tablo 3.15'de verilmiştir.

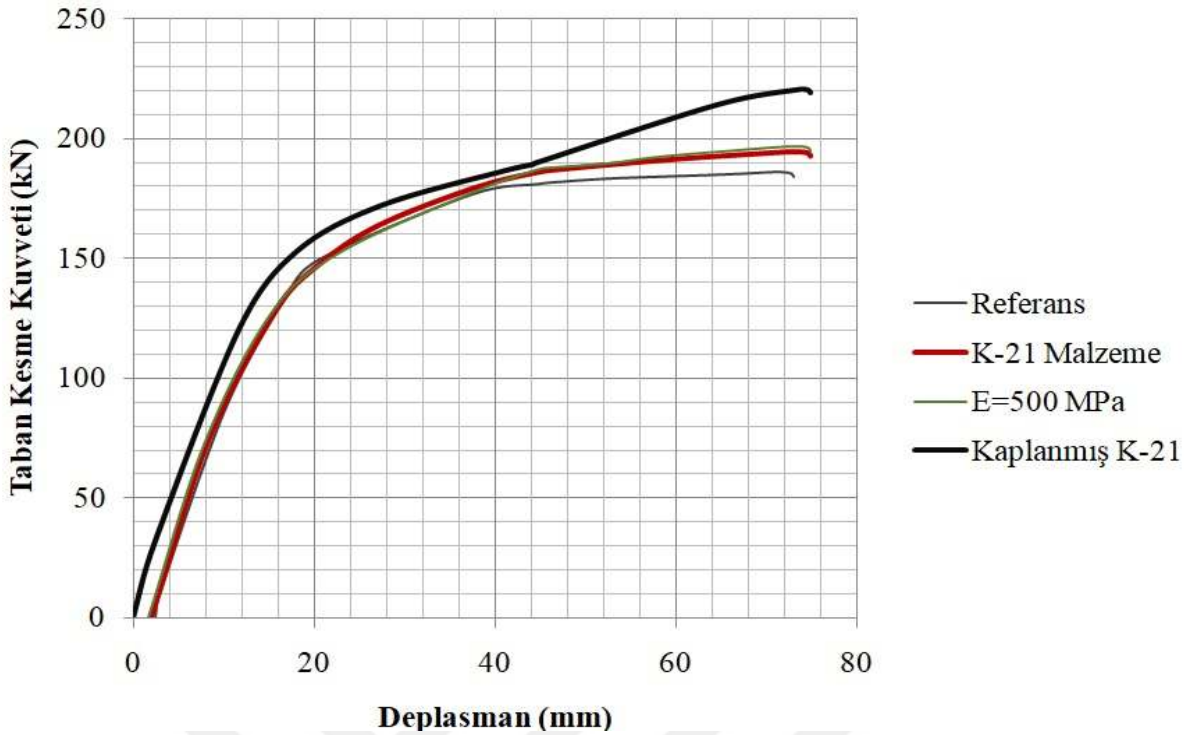


Şekil 3.35. E = 500 MPa, K-21 malzeme ve referans çerçeve kapasite karşılaştırılması

Tablo 3.16. E = 13969 MPa için eşdeğer basınç çubuğu kalınlığı hesabı

E_d (MPa)	t_d (m)	sin2θ	E_c (MPa)	I_k (m^4)	h_d (m)	r_d (m)	λ_d	h_k (m)	a_d (m)
13969	0,1	0,86	31000	0,002	2,4	6,09	0,35	3	0,64

Tüm statik itme analizi sonuçları kıyaslandığında K-21 malzemesinin yüksek dayanımlı bir malzeme ile kaplanması varyasyonu analizi sonucunda maksimum taban kesme kuvveti değerinde %19.6 bir artış hesaplanmıştır. Ancak bu değer kaplama malzemesi özellikleri, kaplama malzemesi ile atık lastik esaslı malzeme arasındaki aderansa göre değişkenlik gösterebilmektedir. Bununla birlikte birim elemanların birleşimi için uygulanan harcın özellikleri de buradaki parametreyi değiştirebilecektir.



Şekil 3.36. Tüm analizlerin kapasite eğrilerinin karşılaştırılması

Yapılan analizler tez kapsamında ki deneysel çalışmalarda elde edilen atık lastik katkılı ve %100 atık ve doğal malzemeden oluşan karışımın geleneksel yapılarda çerçeve kapasitesini artırmaya yönelik dolgu duvar olarak kullanılabilmesi için yüksek dayanımlı bir malzeme ile kaplanması gereksinimini ortaya koymuştur. Bu kaplama atık lastik esaslı birim elemanların yapısal sistemlerde sağlıklı kullanımı açısından da gerekli olabilecektir. Ancak K-21 atık lastik esaslı sürdürülebilir geopolimer karışımın yapı sistemleri haricinde inşaat sektöründe farklı amaçlar içinde (parke taşı, bahçe duvarı, atık depolama alanlar, sönümleme kapasitesi yüksek olması sebebiyle bariyer ve bordür, temel veya döşeme altı izolasyonu) kullanılabileceği görülmüştür. Çalışma ile hafif, ısı yalıtım kapasitesi yüksek, sürdürülebilir ve tamamen atık geri dönüşümünden bir yapı malzemesi elde edilebilmiştir. Elde edilen malzeme tek başına veya farklı yapı malzemeleri ile kombinasyon yapılarak yapı sektöründe farklı amaçlarla kullanıma uygun potansiyele sahiptir. Çalışma sonucunda elde edilen geopolimer yapı malzemesi ile inşaat sektörünün birçok farklı alt alanında kullanılabilecek geri dönüştürülmüş bileşenlerden oluşan sürdürülebilir inovatif bir yapı malzemesi çözümü geliştirilmiştir. Özellikle malzemenin hafif olması, ısı geçirgenlik katsayısının düşük olması, yüksek deformasyon kapasitesi avantajları, malzemeden oluşan birim elemanı sargılayan yüksek dayanımlı bir malzeme ile birleştiğinde kompozit özelliklere sahip yenilikçi bir sürdürülebilir yapı

malzemesi çözümünü ortaya çıkaracaktır. Burada geopolimer malzemenin sürdürülebilir, yüksek dayanımlı tasarlanmış çimento esaslı kompozitler ile kaplanması sonucunda sürdürülebilirlik parametresi etkilenmeden geopolimer karışımın eksik yönleri tamamlanarak sektör açısından tercih edilebilir bir çözüm elde edilebileceği düşünülmektedir. Ancak tez kapsamında geleneksel yöntemlerle maliyet açısından bir karşılaştırma yapılmamıştır. Atık lastik esaslı ürünlerin ekonomik açıdan değerlendirilmesi için yaşam döngüsü analizlerinin yapılması gerekmektedir. Tez kapsamında atık lastik esaslı sürdürülebilir bir geopolimer karışımın tasarımına ve bu karışımdan elde edilebilecek birim yapısal elemanların dolgu duvar uygulamalarında kullanımı analitik olarak irdelenmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tez çalışması kapsamında atık lastik esaslı geopolimer karışımların yapı malzemesi olarak kullanılabilmesine yönelik deneysel ve analitik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda 21 farklı karışım içeriği hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlarda farklı malzemelerin, alkali aktivatörün, ısıl işlemin priz ve dayanım üzerindeki etkisi incelenmiştir. Beklenen priz ve dayanım elde edilinceye kadar bu parametreler değiştirilmiş ve nihai karışım elde edilmiştir. Nihai karışımın mekanik, fiziksel ve ısı geçirgenlik parametreleri belirlenmiştir. Nihai karışım esas alınarak atık lastik esaslı geopolimerlerin yapısal sistemlerde dolgu duvar olarak kullanımı analitik olarak irdelenmiştir. Bu çerçevede çalışma kapsamında bulgular iki başlık altında değerlendirilmiştir. Deneysel ve analitik bulguları içeren bu değerlendirmeler ile atık lastik esaslı geopolimer karışımların inşaat sektöründe üretim ve kullanımına yönelik detaylandırmalar yapılmıştır.

4.1 Deneysel Bulgular

Fiber ve granül esaslı atık lastiklerden geopolimer karışım hazırlanmasına yönelik laboratuvar ortamında birçok ön karışım denemesi yapılmış, bu karışımlardan anlamlı olan 21 tanesi tez kapsamında sunulmuştur. Deneylerde alkali aktivatör hazırlama aşamaları ve dikkat edilmesi gereken hususlar, molarite ve karışım bileşenlerinin etkisi, priz alma süreci, ısıl işlem uygulaması gibi hususlar üzerinde bulgular verilmiştir. Çalışma ile büyük çevresel yük oluşturan atık lastiklerin, sürdürülebilir geopolimerler karışımda kullanımı ve inşaat sektörüne bir ürün olarak sunulabilmesi hedeflenmiştir. Bu çerçevede tez çalışması ile %100 atık ve doğal malzemeden oluşan çimentosuz bir yapı malzemesi elde edilebilmiştir. Bu bölümde elde edilen yapı malzemesinin mekanik, fiziksel ve ısı geçirgenlik parametreleri açısından sektör muadili malzemeler ile karşılaştırması yapılmıştır.

4.1.1. Alkali aktivatör hazırlama aşamaları ve dikkat edilmesi gereken hususlar

Geopolimer karışımlarda bağlayıcılığı oluşturan en önemli parametre alkali aktivatördür. Çalışmada alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit kullanılmıştır. Katı olarak temin edilen sodyum hidroksit için literatürde önerilen 12 M için çözelti hazırlanmıştır. Alkali aktivatör çözeltisi hazırlanırken ilk aşamada çeşme suyu kullanılmıştır. Deneysel karışımlarda çeşme suyu kullanımının geopolimerizasyon

sürecini olumsuz etkilediği görülmüştür. Bu sebeple çözelti hazırlanırken saf su kullanılması önerilmiştir. Bununla birlikte çözelti hazırlanırken reaksiyon oluşmayacak cam bir kap ve yine reaksiyon oluşturmayacak bir karıştırma aracı kullanılmalıdır. Çözelti hazırlanıp 24 saat beklenildikten sonra geopolimer karışıma eklenmesi gerekmektedir. Bu süre beklenilmeden geopolimer karışıma eklendiğinde priz süreci oldukça uzamaktadır. Bununla birlikte homojen bir karışımın elde edilmesi güçleşmektedir. Alkali aktivatör hazırlık sürecinde gerekli iş sağlığı ve güvenliği önlemleri alınmalıdır. Çözeltiyi hazırlayan teknik personelin koruyucu eldiven, gözlük ve kıyafet giymesi önemlidir. Karışım, iyi havalandırma sağlanan bir ortamda veya açık havada gerçekleştirilmelidir. Karışım hazırlanmadan önce esas alınacak molarite değerine göre sodyum hidroksit ve saf su tartılarak hazır edilmelidir. Elde edilmek istenilen geopolimer karışım miktarı düşünülerek yeterli alkali aktivatör bulundurulmalıdır. Çünkü her çözelti hazırlama sürecinde 24 saat bekleme gerekmektedir. Deneysel çalışmalarda 8 M, 12 M, 14 M, 16 M ve 18 M farklı çözeltiler hazırlanmıştır. Karışımlarda literatür esas alınarak 12 M kullanılmıştır. Molarite arttıkça çözeltinin yoğunluğu artmaktadır. Çözelti hazırlanırken bir miktar ısı çıkışı olmaktadır. Bu durumun yüksek molarite değerlerinde daha fazla oluştuğu gözlenmiştir. Eğer karışımda daha yüksek molarite kullanılacaksa çözeltinin hazırlandığı kabın ve homojen çözelti elde etmek için bekletilen ortamın titizlikle seçilmesi gerektiği belirlenmiştir.

Şekil 4.1. Alkali aktivatör hazırlama süreci

4.1.2. Karışım bileşenlerinin geopolimerizasyon üzerine etkisi, priz alma ve deneyler

Alkali aktivatör çözelti hazırlanması aşaması tamamlandıktan sonra geopolimer karışım hazırlama sürecine geçilmiştir. Tez çalışmasında atık lastik esaslı sürdürülebilir bir geopolimer karışım elde edilmek istendiğinden dolayı, karışımlarda atık lastik ve alkali aktivatör sabit tutularak diğer karışım içerikleri değiştirilmiştir. Karışımlarda iri pomza, ince pomza, silis dumanı, atık beton, taban külü, atık mermer ayrı ayrı veya birlikte denenmiştir. Bu parametrelerde en dikkat çekici sonuç silis dumanı kullanıldığında gözlenmiştir. Silis dumanı esaslı K-18 karışımında %50-100'e varan hacimsel artış belirlenmiştir. Şekil 38'de görüleceği üzere 50x50x50 mm boyutlarında numune üzerinde sert bir katmanın kendiliğinden oluştuğu gözlenmiştir. Bu husus atık lastik ve silis dumanı esaslı bu geopolimer karışımının inşaat sektöründe zemin iyileştirmesi gibi alanlarda değerlendirilebileceğini göstermiştir. Ancak tez çalışması bu kapsamda olmadığı için buna ilişkin testler gerçekleştirilmemiştir.

Şekil 4.2. K-18 karışımının hacimsel artışı

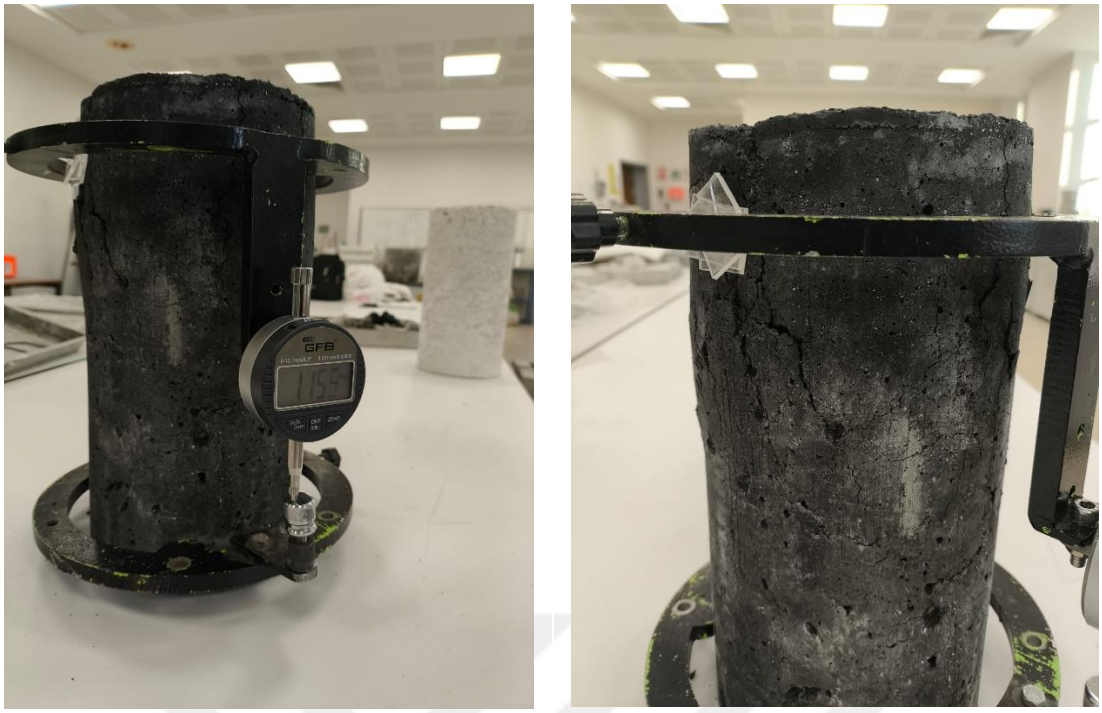
Geopolimer karışımlarda pomza, atık beton ve taban külü geopolimerizasyon sürecinde uyum göstermiştir. Bu malzemelerde silis dumanında olduğu gibi bir hacimsel artış oluşmamıştır. Atık beton ve taban külünün oranı arttıkça karışımın ağırlaştığı belirlenmiştir. Tez kapsamında sürdürülebilir, geri dönüşüm ve sıfır atık vizyonuna katkısı olan bir yapı malzemesi tasarımı elde edilmek istendiğinden dolayı halihazırda erişimi kolay atık ve doğal malzemelerin kullanımı ön plana alınmıştır. Atık betonun geopolimerizasyon süreçlerinde kullanılmadan önce belli bir proses geçirme ihtiyacı olduğundan dolayı hali hazırda var olan atık malzemelere yoğunlaşılmıştır. Alkali aktivatör ve puzolanik malzeme oranı 0,5-1 arasında değiştirilerek priz alma süreci gözlenmiştir. En iyi sonuç 0,65 oranında elde edilmiştir. Bu oran arttıkça çok akışkan bir kıvam elde edildiği, oran düştükçe kuru bir karışıma ulaşıldığı belirlenmiştir. Geopolimerizasyon sürecinde önce malzemelerin kuru karıştırılıp, sonra alkali çözeltinin ilave edilebileceği görülmüştür. Bu işlem uygulanırken de gerekli iş sağlığı ve güvenliği önemleri alınmalıdır. Kalıp için reaksiyon oluşmayacak çelik kalıp kullanılmalıdır. Atık lastiğin karışımın düktilitesini artırmaya yönelik fiber olarak kullanımının önemli olduğu belirlenmiştir. Bu sebeple granül atık lastikten ziyade fiber atık lastikler tercih edilebilir. Karışım optimizasyonu sonrasında fiber atık lastik, taban külü, atık mermer, pomza ile uygun bir geopolimerizasyon elde edilebileceği görülmüştür. Karışımlarda öncelikle ısıl işlem uygulanmadan oda sıcaklığında hazırlanan numuneler 48 saat bekletilmiştir. Ancak herhangi bir priz gözlenmemiştir. Sonrasında karışımlara 12 saatten başlayarak ve artacak şekilde ısıl işlem uygulanmış, kesintili olarak uygulanan ısıl işlemlerde kısmen priz oluşsa da beklenen priz gerçekleşmemiştir. Isıl işlem sıcaklığı olarak literatürden 65℃ belirlenmiştir. Deneysel araştırmalarda atık lastik esaslı geopolimerizasyon sürecinde ısıl işlemin en az 5 gün kesintisiz uygulanması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Bununla birlikte deney numunesi boyutları arttıkça uygulanan ısının numunenin iç katmanlarına erişebilmesi için bu sürenin 7 veya daha uzun süre uygulanması gerektiği görülmüştür. Bu sonuca, aynı karışımdan 50x50x50 mm küp ve 150x150x150 mm küp basınç dayanımı değerlerinin oldukça farklı elde edilmesi ile ulaşılmıştır. Dolayısıyla atık lastik esaslı geopolimerlerden üretilecek birim yapı elemanlarının boyutlarının minimize edilmesi verimli ısıl işlem açısından önemlidir. Karışım optimizasyonu sonucunda karışımın hazırlanması, priz ve dayanım kazanma, %100 atık ve doğal malzeme kullanımı, mekanik ve fiziksel özellikler, ısı geçirgenlik parametresi açısından en ideal K-21 karışımına ulaşılmıştır (Tablo 4.1). Bu karışıma 5 gün kesintisiz 65℃'de ısıl işlem uygulanmıştır. Tablodaki oranlar toplam 780 gr bir geopolimer karışım için verilmiştir.

Bu oranlara ulaşılmada birçok ön karışım hazırlanmıştır. Bu oranların belirlenmesinde karışımın işlenebilirliği, sürdürülebilirliği, hafif bir malzeme elde edilebilmesi ve mekanik özellikler için en iyi değerlerin elde edilebilmesi parametreleri esas alınmıştır. Karışımda taban külü ve atık mermer artırıldığında dayanım parametresi olumlu etkilenmiş ancak birim hacim ağırlık artmıştır. Pomza artırıldığında birim hacim ağırlık azalmış bununla birlikte işlenebilirlik ve dayanım da olumsuz etkilenmiştir. Atık lastik artırıldığında işlenebilirlik ve priz olumsuz etkilenmiştir. Birçok deneme neticesinde Tablo 4.1'de verilen en ideal karışım oranlarına ulaşılmıştır. K-21 karışımı kullanılarak hazırlanan numunelere basınç ve eğilme testi uygulanmıştır. Küçük boyutlu numunelerde (Tablo 3.13) ortalama 4.3 MPa basınç dayanımı, 0.93 MPa eğilme dayanımı elde edilmiştir. Numune boyutları büyüdükçe içsel kürlemenin tam oluşmaması, numune kusurları, narinlik etkisi gibi parametrelerden dolayı dayanım olumsuz etkilenmiştir. 0.72 ton/m^3 birim hacim ağırlığa sahip bu karışımdan üretilen plaka numunelere ısı geçirgenlik testi uygulanmış 0.47 W/mK değeri elde edilmiştir.

Tablo 4.1. K-21 karışım oranları

	Taban Külü (gr)	**İri Pomza (gr)**	**Atık Mermer (gr)**	**Atık Lastik (gr)**	**Alkali Aktivatör (gr)**
K-21	350	75	25	50	280 (12 M)

Atık lastik esaslı sürdürülebilir geopolimer karışımın priz alması ve sertleşmesi için en önemli parametrenin ısıl işlem olduğu görülmüştür. Kesintisiz uygulanması gereken bu ısıl işlemin küçük boyutlu numuneler için en az 5 gün, büyük boyutlu numuneler için ise en az 7 gün uygulanması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Tez çalışmasında atık lastik esaslı geopolimer karışım için farklı malzemeler denenmiş ve en ideal karışım oranlarına ulaşılmaya çalışılmıştır. Tez kapsamı dışında farklı malzemelerle atık lastik esaslı bir geopolimer karışım elde edilmek istenirse nihai karışıma ulaşılabilmek için birçok ön deney yapılması gerektiği görülmüştür. Bu kapsamda karışım tasarımı optimizasyonuna yönelik yazılımların kullanılabileceği değerlendirilmiştir. K-21 karışımından üretilen silindir numuneye gerilme- şekil değiştirme eğrisini belirlemeye yönelik basınç testi uygulamıştır. Malzemenin oldukça sünek olduğu görülmüştür. Test sonucunda numune bütünlüğünün korunduğu, gevrek bir dağılma oluşmadığı belirlenmiştir (Şekil 4.3). Bu sünek davranışın bir yapı malzemesinde bulunmasının farklı kullanım amaçları için önemli avantajlar içerdiği düşünülmüştür.



Şekil 4.3. Deney sonrası numune görünümü

4.1.3. K-21 karışımı ile sektör muadili ürünlerin karşılaştırılması

Tez kapsamında nihai karışım oranları belirlenen atık lastik esaslı geopolimer karışımdan üretilmiş deney numunelerinin mekanik, fiziksel ve ısı geçirgenlik parametreleri inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılan kargir birim eleman ürünlerinin parametreleri ile Tablo 4.2'de karşılaştırılmıştır (Toklu, 2009; Sevil ve ark., 2010). Atık lastik esaslı karışımdan elde edilen numunelerin basınç ve eğilme dayanımı diğer malzemeler ile karşılaştırıldığında oldukça iyi bir sonuca ulaşılabildiği belirlenmiştir. Bununla birlikte ısı iletkenlik katsayısı değerleri karşılaştırıldığında daha yüksek bir ısı iletim parametresi elde edilmiştir. Yaptığımız araştırmalarda betonarmenin ısı iletkenlik katsayısı değerinin 2.1 W/mK olduğu görülmüştür. Bu açıdan kıyaslandığında K-21 malzemesi yalıtım malzemesi olarak nitelendirilebilecek değere sahiptir. Birim hacim ağırlık kıyaslamasında ise atık lastik esaslı karışımın bims malzemesine yakın bir değerde olduğu görülmüştür. Bu çerçevede tez kapsamında elde edilen geopolimer karışım esaslı ürünlerin hafif yapı malzemesi olarak tanımlanmıştır. Tüm bu parametrelerin yanı sıra tez çalışmasında elde edilen karışım sürdürülebilirlik açısından çok önemli bir değere sahiptir. Çünkü atık lastik esaslı geopolimer karışım %100 atık ve doğal malzeme bileşenlerinden oluşmakta, karışımda geopolimer özelliğe bağlı olarak çimento bulunmamaktadır. Bağlayıcılığın alkali aktivatörle sağlandığı bu ürün içeriğinin sektörde

ulaşabilmesi çok kolay ve büyük oranda atık olarak nitelendirilen malzemelerden oluşmasının fayda/maliyet açısından avantajlar sağlayacağı düşünülmektedir.

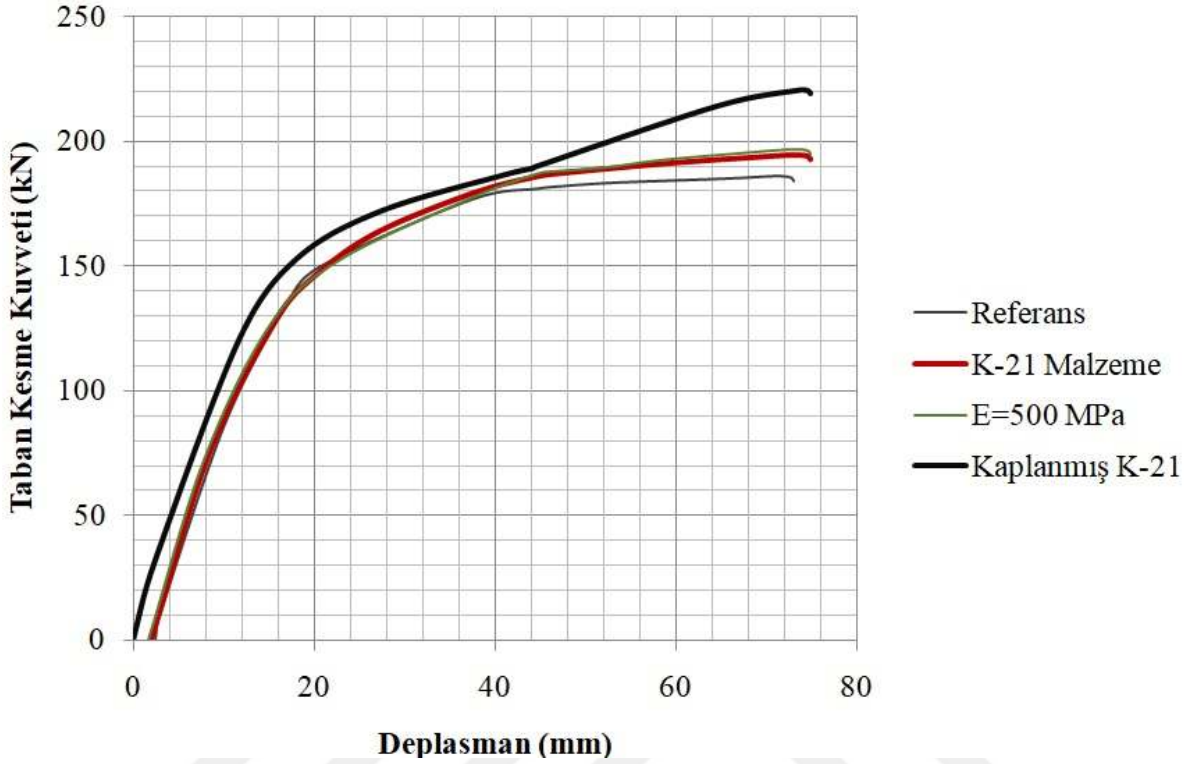
Tablo 4.2. K-21 numunesinin sektör muadilleri ile karşılaştırılması, bims, gazbeton, tuğla: (Toklu, 2009; Sevil ve ark., 2010; Aydın ve ark., 2011).

Yapı Malzemesi/Parametre	**Bims**	**Gazbeton**	**Tuğla (8,5luk)**	**K-21 Numunesi**
Basınç Dayanımı	2,5 MPa	4 MPa	2.5 MPa	4.3 MPa
Eğilme Dayanımı	1 MPa	1.1 MPa	-	0.93 MPa
Isı Geçirgenlik Katsayısı	0.18 W/mK	0.11 W/mK	0.32 W/mK	0.47 W/mK
Birim Hacim Ağırlık	0.65 ton/m^3	0.4 ton/m^3	0.7 ton/m^3	0.72 ton/m^3

4.2. Analitik Bulgular

Tez çalışması kapsamında elde edilen K-21 karışımı için 150x300 mm silindir numune test sonuçlarında gerilme – şekil değiştirme eğrisi elde edilmiştir. Şekil 3.27'de verilen gerilme – şekil değiştirme eğrisinden malzemenin E modülü 100 MPa olarak belirlenmiştir. Ancak burada silindir numunenin boyut etkisi, içsel kürlemenin tam olarak sağlanamaması ve numune kusurlarının büyük ölçekte daha efektif hale gelmesi durumlarına göre basınç dayanımı küçük numunelere oranla daha küçük çıkmıştır. Dolayısıyla küçük boyutlarda bir silindir veya küp numuneye gerilme – şekil değiştirme eğrisini bir test uygulandığında elastisite modülünün daha yüksek çıkacağı öngörülmüştür. Bu kapsamda ilk olarak dolgu duvarsız bir çerçeve modellenmiş bu çerçeveye statik itme analizi uygulanmıştır. Analiz sonucunda çerçevenin kapasite eğrisi elde edilmiştir. Çerçeve içerisine TBDY-2018'e göre eş değer basınç çubuğu yöntemi ile K-21 karışımından oluşan dolgu duvar modellenmiş ve itme analizi uygulanmıştır. Analiz sonucunda çerçevede taban kesme kuvveti değeri açısından %4.9'luk artış gözlenmiştir. Malzemenin elastisite modülü değerinin 500 MPa olarak öngörüldüğü durumda ise taban kesme kuvveti değerinde olan artışın %6 olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte atık lastik esaslı geopolimerden oluşan karışımın yüksek dayanımlı çimento esaslı başka kompozitler ile 20 mm kaplanması kuramsal varyasyonu durumunda artacak elastisite modülüne bağlı olarak taban kesme kuvveti değerindeki artışın %19.6 seviyelerine çıkabileceği belirlenmiştir. Ancak atık lastik esaslı karışımın farklı bir malzeme ile kaplanması sonucu ortaya çıkacak kompozit malzemenin her açıdan deneysel olarak incelenmesi önemlidir. Burada sadece kuramsal bir hesaplama ile elastisite modülü

belirlenen kompozit malzemenin çerçeve üzerindeki etkisi analitik bir çalışma ile incelenmiştir.



Şekil 4.4. Tüm analizlerin kapasite eğrilerinin karşılaştırılması

Bu kapsamda K-21 karışımından elde edilen yapı malzemelerinin sektördeki eşdeğerleri gibi yapı sistemlerinde dolgu duvar olarak kullanılabilirliği Tablo 4.2'de verilen kıyaslama neticesinde görülmüştür. Bununla birlikte atık lastik esaslı geopolimer karışımın yüksek deformasyon özelliği kullanılarak dolgu duvarlı çerçevelerin yatay kapasitelerinin artabileceği değerlendirilmiştir. Ancak atık lastik esaslı geopolimer karışımın yüksek dayanımlı sünek bir malzeme ile kaplanması sonucunda dolgu duvarlarda daha yüksek kapasite artışları elde edilebileceği ortaya konmuştur. Ancak tüm bu uygulamalarda atık lastik esaslı ürünlerin sağlık açısından değerlendirilmesi gerekmektedir. Tez çalışması kapsamında atık lastik esaslı geopolimer karışımların fiziksel, mekanik ve ısı geçirgenlik parametreleri açısından yapı malzemesi olarak kullanılıp kullanılamayacağı değerlendirilmiştir. Bu karışımın sağlık açısından kullanımına yönelik yapılacak bir değerlendirme tez çalışması kapsamı dışındadır. Ancak yüksek deformasyon kapasitesine sahip bu malzemenin sağlık açısından elverişli ve

yüksek dayanıma sahip başka bir malzeme ile kaplanmasının bir çözüm önerisi olarak tartışılabileceği değerlendirilmiştir.

Tüm bu deneysel ve analitik bulgular sonucunda atık lastik esaslı geopolimer karışımlardan üretilecek yapı malzemelerinin inşaat sektöründe farklı kullanım amaçlı ürün olarak değerlendirilebileceği, bu ürünlerin inşaat sektöründe sürdürülebilirlik parametresini artıracağı ve ülkemizin sıfır atık vizyonuna önemli katkıda bulunabileceği görülmüştür. Çalışmanın atık lastik bertarafı, sürdürülebilir geopolimer karışımlar, yenilikçi yapı malzemeleri başlıklarında akademik ve sektör çalışmalarına katkı sunabilmesi hedeflenmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında atık lastik esaslı sürdürülebilir geopolimer karışım tasarımı ve bu karışımda inşaat sektöründe kullanılabilecek bir yapı malzemesi üretimi başlıkları deneysel ve analitik çalışmalar ile araştırılmıştır. Bu kapsamda ilk olarak geopolimer bir karışımın tasarım detayları ve geopolimer karışım bileşenleri irdelenmiştir. Atık lastik esaslı sürdürülebilir geopolimer karışımda sodyum hidroksit alkali aktivatör olarak seçilmiştir. Farklı molarite oranlarında aktivatörler hazırlanmış, literatür araştırması ve ön deneyler sonucunda 12 M en ideal değer olarak belirlenmiştir. Çalışmada alkali aktivatör hazırlanırken dikkat edilmesi gereken hususlar ve alkali aktivatör ile geopolimer karışımın diğer bileşenlerinin karıştırılması süreçleri bulgular bölümünde detaylandırılmıştır. Atık lastik esaslı geopolimer karışımı için küçük ölçekli birçok ön deney gerçekleştirilmiş, bu deneylerden anlamlı bir veri elde edilebilenler tez kapsamında materyal metot bölümünde verilmiştir. Atık lastik ve alkali aktivatörün sabit parametreler olarak ele alındığı bu karışımlarda iri pomza, ince pomza, atık beton, atık mermer, taban külü, silis dumanı ayrı ayrı veya belirli oranlarda karıştırılarak denenmiştir. Bu aşamada karışım parametrelerine yönelik elde edilen en önemli sonuç silis dumanının geopolimer karışımda hacimsel olarak %100 varan bir artışa sebep olduğu tespitidir. Bu noktada düzgün bir geometriye sahip bir numune üretilmek istenirse geopolimer karışımda silis dumanının kullanılmaması gerektiği belirlenmiştir. Taban külü ile birlikte pomza, dayanım-birim hacim ağırlık optimizasyonu açısından en uygun karışımı ortaya çıkarmıştır. Atık beton, atık mermer ve taban külünün karışımında artırılması karışım ağırlığını artırmıştır. Karışım çalışmalarında elde edilen diğer bir sonuç ise alkali aktivatör ile puzolanik malzeme oranının 0,65 seviyesinde karışımın işlenebilirliği ve priz alma süresi açısından olumlu etki ortaya çıkardığı olmuştur. Alkali aktivatör arttıkça karışımın priz alma süresi uzamış, daha fazla ısıl işlem uygulama gereksinimi artmıştır. Bu durumun üretimde enerji maliyetini artıracağı değerlendirilmiştir. Çalışmada atık lastik esaslı geopolimer bir karışımda birçok parametrenin etkili olduğu görülmüştür. Tez kapsamında belirli bir metodoloji izlenerek bir yazılım kullanılmadan karışım optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Ancak çalışma sonucunda birçok parametrenin etkilediği böyle bir denklemde optimizasyon esaslı tasarım yazılımlarının kullanılabileceği önerilmiştir. Karışım çalışmalarında ulaşılan önemli bir sonuç ise alkali aktivatör çözelti hazırlanmasında kesinlikle saf su kullanılması gerektiği ve çözeltinin homojen karışım olması açısından en az bir gün bekletilmesi gerektiği olmuştur. Alkali aktivatör ve geopolimerizasyon sürecinde iş sağlığı ve

güvenliği kurallarına dikkat edilmesi gerektiği gözlük, eldiven ve buna uygun giysinin kullanılması gereksinimi ve karışım ekipmanlarında karışım ile reaksiyona girmeyecek araç ve gereçlerin tercih edilmesi önerilmiştir. Sektörde atık lastik fiber ve granül halde bulunmaktadır. Fiber olarak temin edilecek atık lastiklerin geopolimer karışımın düktilitesi açısından daha elverişli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

21 farklı karışım sonucunda K-21 karışımı olarak tanımlanan en ideal karışım içeriği ve oranlarına ulaşılmıştır. Karışım içeriklerinin değerlendirilmesinde numunenin priz alması, karışımın işlenebilirliği, ağırlığı ve mekanik özellikleri esas alınmıştır. Bu aşamada tez kapsamında elde edilen en önemli sonuç atık lastik esaslı geopolimer karışımların 65°C'de en az 5 gün kesintisiz ısıl işlem uygulanması gereksinimi olmuştur. Bu çerçevede elde edilen numunenin katman kalınlığı 100 mm'nin üzerine çıktığında 5 günlük ısıl işlem süresinin içsel kürleme açısından yeterli olamayacağı görülmüştür. K-21 karışımından 50x50x50 mm, 40x40x160 mm, 150x150x150 mm, 150x300 mm ve 50x150x150 mm boyutlarında numuneler üretilmiş, bu numunelere basınç ve eğilme testi uygulanmış, ısı geçirgenlik katsayısı belirlenmiş ve birim hacim ağırlıkları ölçülmüştür. 150x300 mm silindir numune üzerinde kompressometre cihazı yardımıyla malzeme gerilme – şekil değiştirme eğrisi elde edilmiştir. Tüm deneyler sonucunda birim hacim ağırlığı 0.72 ton/m^3, basınç dayanımı 4.3 MPa, eğilme dayanımı 0.93 MPa, ısı geçirgenlik katsayısı 0.47 W/mK ve E modülü 100-500 MPa arasında bir malzeme elde edilmiştir. Elastisite modülündeki değişim deney numunelerindeki boyut etkisine bağlı dayanım parametresinin değişimi ile açıklanmıştır. Elde edilen veriler sektörde kargir birim elemanların değerleri ile kıyaslandığında hafif, ideal dayanımda, ısı verimli bir yapı malzemesinin elde edilebildiği görülmüştür. Bu malzemenin %100 atık ve doğal malzemelerden oluşması sürdürülebilirlik ve ülkemizin sıfır atık vizyonu çerçevesinde önemli olarak değerlendirilmiştir. Ancak tez çalışmasında atık lastik esaslı geopolimer karışımlardan elde edilecek yapı malzemelerinin sağlık ve çevre açısından bir analizi yapılmamıştır. Halihazırda atık lastik esaslı bazı ürünler peyzaj amaçlı kullanılmaktadır. Tez kapsamında deneysel ve analitik çalışmaları gerçekleştirilen atık lastik esaslı geopolimerlerden üretilmiş yapı malzemelerinin yapısal sistemlerde çerçevelerde dolgu duvar olarak kullanımı analitik olarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda mekanik, fiziksel ve ısı iletkenlik değerleri açısından ve düşük birim hacim ağırlığı sebebi ile dolgu duvar olarak tercih edilebileceği ancak dayanım ve sağlık açısından başka bir malzeme ile kaplanıp kompozit bir çözüme ulaşılabileceği değerlendirilmiştir. Yapılan deneylerde bu karışımın yüksek deformasyon kabiliyetine sahip olması ve dayanım parametresinin

kompozit çözüm ile artırılması sayesinde çerçevelerde enerji yutma kapasitesi açısından katkı sunabileceği analiz edilmiştir. Atık esaslı geopolimer malzemelerden üretilen yapı malzemelerinin inşaat sektöründe farklı kullanım amaçları içinde tercih edilebileceği düşünülmüştür. Örneğin parke taşı üretiminde, sönümleme kapasitesi yüksek olması sebebiyle bariyer ve bordür üretiminde, atık malzeme depolama alanında, temel veya döşeme altı izolasyonda değerlendirilebileceği ele alınmıştır.

Tez çalışması ile endüstride büyük hacimde atık olarak ortaya çıkan; atık lastik, atık mermer, cüruf, taban külü, atık beton gibi malzemelerin ve ülkemizde rezervi yüksek doğal malzemelerin yenilikçi yapı malzemesi ve bu malzemeden yapı ürünlerinin tasarımı ile ekonomiye kazandırılması, sıfır atık vizyonuna katkı sunulabilmesi amaçlanmıştır. Bu çerçevede çimentosuz ve %100 atık ve doğal malzemeden oluşan bir yapısal ürün tasarlanmıştır. Deneysel ve analitik çalışmalar ile bu yapısal ürünün sektörel bazlı kullanımı ele alınmıştır. Tüm bu değerlendirmeler neticesinde atık lastik esaslı geopolimer karışımların inşaat sektöründe efektif çözümler sunabileceği belirlenmiştir. Ancak tez çalışmasında bu ürünlerin üretim prosesi ve mevcut sistemlere göre maliyet açısından kıyaslaması yapılamamıştır. Bu kapsamda atık lastik esaslı geopolimer karışımların sektöre kazandırılabilmesi için karşılaştırmalı maliyet ve yaşam döngüsü analizleri gerekli olabilecektir. Karışımda her ne kadar çimento bulunmasa da büyük çapta üretim aşamasında alkali aktivatör hazırlama maliyeti etkili bir parametredir. Ancak karışımda alkali aktivatör dışındaki malzemelerin atık olarak sınıflandırılması ve erişiminin kolay olması maliyetler açısından olumlu bir etki ortaya çıkaracaktır. Bu kapsamda belirtilen bu analizlerde tamamlandığında atık lastik esaslı geopolimer ürünlerin fayda/maliyet açısından sektörel bazda kullanımı her açıdan ele alınmış olacaktır. Ayrıca elde edilen malzemenin farklı yapı malzemeleri ile kombinasyonu neticesinde ileri inovatif çözümlere ulaşılabileceği değerlendirilmiştir. Tez çalışması ile atıkların geri dönüşümü, sürdürülebilirlik, karbon emisyonunun azaltılması, atık malzemelerin ekonomiye kazandırılması, ileri yapı malzemelerinin ve yenilikçi yapısal ürünlerin tasarımı başlıklarında sektörel ve akademik çalışmalara katkı sunulabilmesi hedeflenmiştir.

KAYNAKLAR

Akkaş, A. (2011). *Pomza agregalı hafif betonların taşıyıcılık özelliklerinin araştırılması* (Tez no: 309698) [Doktora tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp

Aksoy, S. R. (2021). *Atık lastik katkılı farklı polimer içeren betonların özelliklerinin incelenmesi* (Tez no: 673146) [Yüksek lisans tezi, Düzce Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp

Akgül, T., Aydın, F., Aydın, E., & Vural, İ. (2011). *Konutlarda kullanılan farklı duvar çeşitlerinin ısı yalıtım performanslarının incelenmesi*. Engineering Sciences, *6*(4), 1250-1258. https://doi.org/10.12739/nwsaes.v6i4.5000066937

Aydın, P. (2015). *Lastik atığının kompozit yapımında değerlendirilmesi* (Tez no: 409889) [Yüksek lisans tezi, Selçuk Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp

Al-Hadeethi, M. İ. M. (2023). *Yüksek oranda hurda lastik kullanımının taşıyıcı hafif ve normal betonun basınç dayanımı ve eğilme dayanımı ile titreşim özelliği üzerindeki etkisi* (Tez no: 806672) [Yüksek lisans tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp

Balun, B. (2019). *Alkalilerle aktive edilmiş bitlis yöresi pomzası içeren hibrit bağlayıcıların üretilebilirliğinin incelenmesi* (Tez no: 539013) [Doktora tezi, Fırat Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp

Barkhadle, A. N. (2023). *Pomza agregası kullanılarak üretilen hafif geopolimer harçların fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelenmesi* (Tez no: 821437) [Yüksek lisans tezi, Erciyes Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp

Biçer, M. C. (2024). *Alkalilerle aktive edilmiş puzolan bağlayıcılı silindirle sıkıştırılmış harç ve beton geliştirilmesi* (Tez no: 855671) [Yüksek lisans tezi, Ege Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp

Bideci, A. (2011). *Polimer kaplı pomza agregalarla elde edilen betonların özelliklerinin araştırılması* (Tez no: 300220) [Doktora tezi, Trakya Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp

Bilgil, A., Uçurum, M., Gökçe, M. V., & Fener, M. (2017). *Endüstriyel taban külü atığı içeren kil tuğla üretimi*. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 6(2), 483-491. https://doi.org/10.28948/ngumuh.341298

Cengiz, E. (2020). *Kolemanit katkılı yüksek oranda tuğla taban külü içeren jeopolimerik ısı yalıtım malzemesi* (Tez no: 646793) [Yüksek lisans tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp.

Cong, P. & Cheng, Y. (2021). *Advances in geopolymer materials: A comprehensive review*. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 8(3), 283-314.

CSI (Computers and Structures Inc.). SAP2000 Structural Analysis and Design.CSI, Licensed to Kirsehir Ahi Evran University. 2004.

Çelikten, S. (2019). *Alkali ile aktive edilmiş hafif betonların özelliklerinin araştırılması* (Tez no: 561406) [Doktora tezi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp

Davidovits, J. (2013). *Geopolymer cement*. www.geopolymer.org

Dolğun, O. (2010). *Kendiliğinden yerleşen betonlarda öğütülmüş pomza kullanılabilirliğinin araştırılması* (Tez no: 271488) [Yüksek lisans tezi, Niğde Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp

Ekiz Barış, K. (2022). *Doğal puzolan esaslı hafif jeopolimer duvar malzemesi* (Tez no: 713986) [Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp

Erkek, B. (2024). *Alternatif puzolanik malzemelerin kullanımının araştırılması* (Tez no: 858285) [Yüksek lisans tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp

Garip, Z. Ş., & Dibekoğlu, Ş. (2023). *Deprem etkisindeki betonarme binalarda dolgu duvarların davranışa etkilerinin incelenmesi.* International Journal of Engineering Research and Development, *15*(2), 344-360.

Hamid, M. A. H. (2021). *Mechanical and durability properties of the geopolymer cement produced with pumice powder and fly ash* (Tez no: 670976) [Yüksek lisans tezi, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp

Kaya, A. İ. (2010). *A study on blended bottom ash cements* (Tez no: 268926) [Yüksek lisans tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp

Kızar, S. (2017). *Atık lastiklerin bina yapı ve duvar elemanlarında kullanılabilirliğinin araştırılması, ısıl ve ses performanslarının incelenmesi* (Tez no: 458851) [Yüksek lisans tezi, Batman Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp

Konak, S. (2018). *Granüle yüksek fırın cürufu ve taban külü ince agregaları ile üretilmiş betonun gerilme şekil değiştirme davranışının incelenmesi* (Tez no: 530191) [Yüksek lisans tezi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp

Özdemir, C. (2021). *Kırşehir yöresi atık mermer tozu katkılı kendiliğinden yerleşen hafif betonların mühendislik özelliklerinin araştırılması* (Tez no: 673520) [Yüksek lisans tezi, Kastamonu Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp

Öztürk, H. (2016). *Atık lastik katkısının kendiliğinden yerleşen betonların mühendislik özelliklerine etkileri* (Tez no: 456318) [Yüksek lisans tezi, Düzce Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp

Öztürk, M. (2012). *Pomza ve perlit içerikli hafif betonun fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelenmesi* (Tez no: 318024) [Yüksek lisans tezi, Namık Kemal Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp

Öztürk, M. (2023). *Yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer betondan üretilen kirişlerin davranışının incelenmesi* (Tez no: 785800) [Doktora tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp

Parçal, İ. (2023). *Hafif geopolimer beton üretiminde atık lastiğin agrega olarak değerlendirilmesi* (Tez no: 844175) [Yüksek lisans tezi, Konya Teknik Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp

Pekdemir, M. (2011). *Hasankale Pasinler pomzası ile üretilen betonların bazı mekanik özelliklerinin araştırılması* (Tez no: 299795) [Yüksek lisans tezi, Atatürk Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp

Rahimi, R. G. (2021) *Atık lastik ile üretilmiş çevre dostu betonlarda agrega granülometrisinin dayanım özellikleri üzerine etkisi* (Tez no: 674876) [Yüksek lisans tezi, Fırat Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp

Qaidi, S. M., Mohammed, A. S., Ahmed, H. U., Faraj, R. H., Emad, W., Tayeh, B. A. & Sor, N. H. (2022). *Rubberized geopolymer composites:* A comprehensive review. *Ceramics International*, *48*(17), 24234-24259.

Sağır, M. A. (2022). *Yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer harcın yüksek sıcaklık altındaki özelliklerine ince lastik atığının ve silis dumanının etkisi* (Tez no: 775436) [Yüksek lisans tezi, İnönü Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp

Sağlıyan, S. (2018). *Dolgu Duvarların Modellenme Yaklaşımlarının Betonarme Çerçeve Davranışına Etkisi*. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 30(2), 165-174.

Sarkaz, A. M. H. (2020). *Atık lastik katkılı geopolimer betonun mekanik özelliklerinin incelenmesi* (Tez no: 621933) [Yüksek lisans tezi, Kastamonu Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp

Sevil, T., Baran, M., & Canbay, E. (2010). *Tuğla dolgu duvarların B/A çerçeveli yapıların davranışına etkilerinin incelenmesi*; deneysel ve kuramsal çalışmalar. International Journal of Engineering Research and Development, *2*(2), 35-42.

Şengül, Ç. G. (2020). *Benzer inceliğe sahip uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve taban külü içeren çimento bağlayıcılı kompozit sistemlerin dayanım ve dayanıklılık özellikleri* (Tez no: 659462) [Yüksek lisans tezi, Kırıkkale Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp

Şinik, O. (2019). *Geopolimer betonlarda dayanıklılık özelliklerinin araştırılması* (Tez no: 566841) [Yüksek lisans tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp

TBDY, (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.

Toklu, K. (2009). *Pomza taşından üretilen bims blok kalitesinin artırılma olanaklarının araştırılması* (Tez no: 252831) [Yüksek lisans tezi, İstanbul Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp

Topal, Ö. (2020). *Yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen geopolimer betonların yangın dayanımına geri dönüştürülmüş agreganın etkisinin araştırılması* (Tez no: 624703) [Yüksek lisans tezi, İnönü Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp

Topçu, İ. B., & Uğurlu, A. (2007). *Betonda Elastisite Kuramı ve Baraj Betonları için Statik E-Modülünün Kompozit Modellerle Tahmini*. Teknik Dergi, 18(86), 4055-4067.

Toprak, M. U. (2011). *Termik santral taban küllerinden alkali aktivasyon ile geopolimer üretilmesi* (Tez no: 285352) [Doktora tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp

Toregalıyev, B. (2022). *Geopolimer harçlarda öğütülmüş bazik pomza ve silis dumanının bağlayıcı olarak kullanılmasının incelenmesi* (Tez no: 750638) [Yüksek lisans tezi, Akdeniz Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp

Tuntaş, A. (2023). *Kolemanit atığı ve pomza tozu ile üretilen geopolimer harçların mekanik ve durabilite özellikleri* (Tez no: 803019) [Yüksek lisans tezi, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp

Ulusoy, A. (2021). *Atık lastik agregası içeren normal ve yüksek dayanımlı betonların aşınma ve termal iletkenlik davranışlarının incelenmesi* (Tez no: 689793) [Yüksek lisans tezi, Harran Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp

Yılmazoğlu, A. (2022). *Kauçuk lif katkılı geopolimer betonların mekanik ve durabilite özelliklerinin araştırılması* (Tez no: 744799) [Doktora tezi, Kocaeli Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp

Zubairu, S. U. (2016). *Atık lastik liflerinin çimento esaslı kompozitlerin mekanik özelliklerine etkisinin araştırılması* (Tez no: 444859) [Yüksek lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp

EKLER

EK-1

Anadolu Üniversiteler Birliği 3. AR-GE Proje Pazarı katılım belgesi;

EK-2

2. Uluslararası Geleceğin Mühendisliği Kongresi katılım belgesi;

Certificate of Participation

THE CERTIFICATE IS PROUDLY PRESENTED TO:

Fatih SEZEN

attended the 2nd International Future Engineering Conference
held on April 28-29, 2025 / Baku Engineering University, Baku, Azerbaijan
organised by Baku Engineering University, Şirnak University & IKSAD Institute
with an oral presentation entitled

MULTI-PURPOSE BUILDING MATERIAL DESIGN WITH OPTIMIZATION OF SUSTAINABLE GEOPOLYMER MIXTURE WITH FIBROUS WASTE TYRE AND SLAG ADDITIVES

Prof. Dr. Agasi MELIKOV
Vice Rector of Baku Engineering University
ORGANIZING BOARD HEAD (Azerbaijan)

Assoc. Prof. Dr. Mahmut DİRİK
Şırnak University
ORGANIZING BOARD HEAD (Türkiye)

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Fatih SEZEN
Uyruğu	T.C.
Orcid Numarası	0009-0004-0700-0473

Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	Çukurova Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölümü	İnşaat Mühendisliği Bölümü
Mezuniyet Yılı	2021
Yüksek Lisans	
Üniversite	Kırşehir Ahi Evran
Enstitü Adı	Fen Bilimleri
Anabilim Dalı	İnşaat Mühendisliği
Mezuniyet Tarihi	2025

Tezden Üretilen Makaleler ve Bildiriler

Uluslarası Konferans ve Sempozyumlarda Sunulan Bildiriler

Sezen, F. ve Birdal, F. (28-29 Nisan 2025) Lifli Atık Lastik ve Cüruf Katkılı Sürdürülebilir Geopolimer Karışımı Optimizasyonu ile Çok Amaçlı Yapı Malzemesi Tasarımı*, IFEC2025 2. Uluslararası Geleceğin Mühendisliği Kongresi, Bakü-AZERBAYCAN*