



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



HAFİF GEOPOLİMER BETON ÜRETİMİNDE
ATIK LASTİĞİN AGREGA OLARAK
DEĞERLENDİRİLMESİ

İbrahim PARÇAL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Aralık-2023
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

İbrahim PARÇAL tarafından hazırlanan “HAFİF GEOPOLİMER BETON ÜRETİMİNDE ATIK LASTİĞİN AGREGA OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ” adlı tez çalışması 12/12/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Ülkü S. KESKİN

.....

Danışman

Doç. Dr. Arife AKIN

.....

Üye

Doç. Dr. Sadık Alper YILDIZEL

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt Uyan
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması BAP Koordinatörlüğü tarafından 231004001 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İbrahim PARÇAL

Tarih:12/12/2023

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAFİF GEOPOLİMER BETON ÜRETİMİNDE ATIK LASTİĞİN AGREGA OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

İbrahim PARÇAL

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Arife AKIN

2023, 65 Sayfa

Jüri

Danışman: Doç. Dr. Arife AKIN
Prof. Dr. Ülkü S. KESKİN
Doç. Dr. Sadık Alper YILDIZEL

İnşaat sektörü günden güne gelişmekte ve malzeme kullanım oranları, artan nüfusla birlikte her geçen gün yükselmektedir. Kompozit bir malzeme olan beton içerisinde, bağlayıcı olarak portland çimentosu tercih edilmektedir. Portland çimentosu üretimi sırasında doğaya yüksek miktarda CO₂ yaymaktadır. Bu durum portland çimentosu yerine alternatif malzeme arayışını hızlandırmıştır. Günümüzde alternatif malzeme olarak doğal veya yapay puzolanların kullanımı araştırılmaktadır. Puzolanlar arasında çokça tercih edilenlerden biri uçucu küldür. Diğer taraftan artan araç kullanımıyla beraber araç lastiği kullanımı da artmıştır. Bununla birlikte meydana gelen atık lastik fazlalığı önüne geçilmesi gereken bir kirlilik sorunu yaratmaktadır.

Yapılan tez çalışması kapsamında amaç, atık lastiğin hafif geopolimer beton içerisinde pomza yerine kullanılabilirliğini test etmektir. Bu sebeple atık lastik (0-5 mm) ve pomza (0-5 mm), %10, %40, %70 ve %100 oranlarında kum (0-5 mm) ile yer değiştirilmiştir. Elde edilen geopolimer harç numuneleri üzerinde mini yayılma, birim hacim ağırlık, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, su emme, ısı iletkenlik katsayısı deneyleri yapılmıştır.

Çalışma kapsamında yapılan deneylerde, atık lastik ve pomza kullanım oranı arttıkça eğilme ve basınç dayanımı azalmış, referans numune diğer numunelere göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Kompozit içerisindeki hafif agrega (atık lastik ve pomza) hacmi arttıkça su emme değerlerinin arttığı, birim hacim ağırlık ve genel olarak işlenebilirlik değerlerinin ise azaldığı gözlenmiştir. Isıl iletkenlik deneylerinde ise hafif agrega hacminin artmasıyla kompozitin ısı iletkenlik katsayısı değerleri referans numuneye göre daha düşük çıkmıştır, yani yalıtım özelliğini olumlu yönde etkilemiştir. Genel olarak farklı oranlarda pomza yerine atık lastiğin kullanımının yalıtım açısından iyi sonuçlar vermesi yönüyle sürdürülebilirlik bakış açısıyla hafif geopolimer betonda agrega olarak değerlendirilebileceği kanaatine varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Atık lastik, geopolimer beton, hafif beton, pomza

ABSTRACT

MS THESIS

USE OF WASTE TIRE AS AGGREGATE IN LIGHTWEIGHT GEOPOLYMER CONCRETE PRODUCTION

İbrahim PARÇAL

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Building materials**

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Arife AKIN

2023, 65 Pages

Jury

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Arife AKIN

Prof. Dr. Ülkü S. KESKİN

Assoc. Prof. Dr. Sadık Alper YILDIZEL

The construction industry is developing day by day and material usage rates are increasing day by day with the increasing population. Portland cement is preferred as the binder in concrete, which is a composite material. Portland cement emits high amounts of CO₂ into nature during its production. This situation has accelerated the search for alternative materials instead of Portland cement. Nowadays, the use of natural or artificial pozzolans is being investigated as alternative materials. One of the most preferred ones among the pozzolans is fly ash. On the other hand, with the increasing vehicle usage, the use of vehicle tires has also increased. However, the excess waste tires creates a pollution problem that must be prevented.

The aim of the thesis study is to test the usability of waste tires instead of pumice in lightweight geopolymer concrete. For this reason, waste tires (0-5 mm) and pumice (0-5 mm) were replaced with sand (0-5 mm) at the rates of 10%, 40%, 70% and 100%. Mini-spreading, unit volume weight, compressive strength, bending strength, water absorption and thermal conductivity coefficient tests were carried out on the obtained geopolymer mortar samples.

In the experiments carried out within the scope of the study, as the rate of waste tire and pumice usage increased, bending and compressive strength decreased, and the reference sample gave better results than other samples. It was observed that as the volume of light aggregate (waste tire and pumice) in the composite increased, water absorption values increased, while unit volume weight and general workability values decreased. In thermal conductivity experiments, as the volume of lightweight aggregate increased, the thermal conductivity coefficient values of the composite were lower than the reference sample, meaning that it affected the insulation property positively. In general, it has been concluded that the use of waste tires instead of pumice in different proportions gives good results in terms of insulation and can be evaluated as aggregate in lightweight geopolymer concrete from a sustainability perspective.

Keywords: Waste tire, geopolymer concrete, lightweight concrete, pumice

ÖNSÖZ

Okul hayatımda her zaman bana yardımcı olan ve beni destekleyen aileme ve yakın çevreme teşekkürlerimi sunarım. Yüksek lisans eğitimimin yanı sıra, lisans eğitimimde de yanımda olan ve her zorlukta sabırla benden desteğini esirgemeyen Doç. Dr. Arife AKIN hocama sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalışmadaki maddi desteği için BAP' a ve deneylerde bana yardımcı dokunan arkadaşlarıma ve bu çalışmayı yapmamız için bizlere imkân veren herkese çok teşekkür ederim.

İbrahim PARÇAL
KONYA-2023



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Geopolimer Betonda Kullanılan Puzolanlar	3
1.1.1. Yüksek fırın cürufu	3
1.1.2. Yüksek fırın cürufunun betonda kullanımı	4
1.1.3 Uçucu kül	5
1.1.4. Uçucu külün betonda kullanımı	6
1.1.5. Silis dumanı	6
1.1.6. Silis dumanının betonda kullanımı	7
1.2. Geopolimer Betonda Kullanılan Aktivatörler.....	7
1.2.1. Sodyum Silikat.....	7
1.2.2. Sodyum Hidroksit	8
1.3. Geopolimer Betonda Durabilite	8
1.4. Geopolimer Betonun Kullanım Alanları.....	8
1.5. Geopolimer Betonda Kür Koşullarının Etkisi.....	8
1.6. Hafif Beton.....	9
1.7. Hafif Betonların ve Kullanılan Agregaların Sınıflandırılması.....	9
1.8. Hafif Beton Kullanım Alanları	10
1.9. Hafif Beton Avantaj ve Dezavantajları.....	11
1.10. Hafif Beton Üretimi	11
1.11. Pomza.....	12
1.12. Atık Lastik.....	12
1.13. Atık Lastik Sınıfları	13
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	15
3. MATERYAL VE YÖNTEM	29
3.1. Kullanılan Malzemeler.....	29
3.1.1. Uçucu kül	29
3.1.2. Kum.....	30
3.1.3. Atık lastik.....	31
3.1.4. Pomza.....	31
3.1.5. Sodyum hidroksit.....	32
3.1.6. Sodyum silikat.....	33
3.1.7. Su	34
3.2. Numunelerin Hazırlanması	34
3.3. Alkali Çözeltinin Hazırlanması.....	35

3.4. Geopolimer Beton Karışımının Hazırlanması ve Karışım Oranları.....	36
3.5. Deneyler	38
3.5.1. Taze beton deneyleri	38
3.5.2. Sertleşmiş beton deneyleri	40
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	44
4.1. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları	44
4.2. Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları.....	45
4.3. Su Emme Deney Sonuçları	46
4.4. Mini Yayılma Deney Sonuçları	47
4.5. Birim Hacim Ağırlık Deney Sonuçları	48
4.6. Isıl İletkenlik Deney Sonuçları	50
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	52
KAYNAKLAR	54

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Al_2O_3	: Alüminyum oksit
Fe_2O_3	: Demir (III) oksit
FeSi	: Ferrosilisyum
CaO	: Kalsiyum oksit
CO_2	: Karbondioksit
MgSO_4	: Magnezyum sülfat
SiO_2	: Silika
SiO	: Silisyum monoksit
NaOH	: Sodyum hidroksit
Na_2SiO_3	: Sodyum silikat
NaSO_4	: Sodyum sülfat

Kısaltmalar

RN	: %100 kumdan oluşan numune
AA10	: %10 atık lastik ve %90 kumdan oluşan numune
AA40	: %40 atık lastik ve %60 kumdan oluşan numune
AA70	: %70 atık lastik ve %30 kumdan oluşan numune
AA100	: %100 atık lastikten oluşan numune
AP10	: %10 pomza ve %90 kumdan oluşan numune
AP40	: %40 pomza ve %60 kumdan oluşan numune
AP70	: %70 pomza ve %30 kumdan oluşan numune
AP100	: %100 pomzadan oluşan numune

1. GİRİŞ

İnsanların en temel ihtiyaçlarından biri barınma ihtiyacıdır. Bu ihtiyacı gidermek adına dünyada en çok tercih edilen yapı malzemesi betondur. Dünya nüfusunun her geçen gün arttığı göz önüne alındığında da tercih edilmeye devam edeceği muhtemeldir. Kompozit bir yapı malzemesi olan beton su, çimento ve agregadan meydana gelmektedir. İşlenebilirliği fazla olan beton istenilen kalıpta üretilebilmektedir. Kurduğunda ise yüksek dayanımlara ulaşmaktadır. Günümüzde pek çok araştırma sonucu çimento yerine farklı bağlayıcılar kullanılarak değişik beton türleri üretilmiş ve geleneksel betonun yerine yeni alternatifler bulunmuştur.

Betonda bağlayıcı olarak kullanılan en popüler çimento türü portland çimentosudur. 2015 yılında Türkiye’de yaklaşık olarak 75 milyon ton çimento üretilmiştir (Kalaycıklı, 2020). Portland çimentosu İngiltere’de keşfedilen, organik bileşenlere sahip bir malzemedir. Yüksek sıcaklıklarda iyi performans vermektedir. Aynı zamanda dayanım değerleri yeterli miktarlara ulaşmaktadır. Buna karşın üretilirken fazla miktarda enerji gerekmede, enerji kaynakları her geçen gün azaldığı için hem zararlı hem de çok masraflı olmaktadır. Portland çimentosu üretimi sırasında ağırlığına oranla, 0,8 oranında karbondioksit (CO_2) gazı açığa çıkarak doğayı kirletmektedir. Yüksek oranda CO_2 salınımı ozon tabakasını yırtmaktadır. Bu küresel ısınmayı ve felaketleri beraberinde getirmektedir.

Belirtilen zararlı sonuçlardan dolayı geleneksel beton yerine alternatif olarak geopolimer betonlar kullanılabilir. Geopolimer betonlar 1978 yılında Davidovits’un çalışmalarıyla, mühendislik alanında kullanılmaya başlamıştır (Altındal, 2020). Üretimi sırasında çok az CO_2 gazı meydana geldiği için çevre dostudur. Aynı zamanda atık malzemeler kullanıldığı için üretimi sırasında çok az enerji harcanır ve buna bağlı olarak geleneksel betondan daha ucuzdur.

İçerisinde atık malzeme olarak puzolanlar kullanılabilir. Puzolanlar yapay ve doğal olmak üzere 2’ye ayrılır. Doğal puzolanlar; volkanik tüfler, camlar, tras, ısıtılmış işlem görmüş killer, şeyller ve diatomitlerdir. Yapay olanlar ve geopolimer betonda en çok tercih edilen puzolanlar ise yüksek fırın cürufu, F ve C tipi uçucu küller, silis dumanı ve metakaolindir. Bu puzolanik malzemeler geopolimer beton içerisinde alkalin ile aktive edilerek kullanıldığında daha verimli sonuçlar vermektedir. Geopolimer betonların erken dayanımı bazı durumlarda geleneksel betona göre düşük çıksa da nihai

dayanım geleneksel betonu geçmektedir. Yüksek sıcaklıklara ve çevresel etkilere karşı dayanıklı olan geopolimer beton bu özelliğini alümino-silikat esaslı olmasına borçludur.

Geopolimer beton bahsedilen bu özellikleriyle, geleneksel betona rakip olmayı başarmıştır. Lakin avantajlı özellikleri yukarıda bahsedilenler ile bitmemektedir. Geopolimer beton kullanımı ile elde edilecek avantajlar şu şekildedir;

- a) Çevre kirliliğini azaltması ve yüksek dayanıklılık gerektiren çevresel koşullara karşı yüksek performans göstermesi,
- b) Geopolimer beton üretimi için gerekli bileşenler atık malzemelerden oluştuğu için ucuz olması ve yine atık malzemeler kullanıldığı için çevre dostu olması,
- c) Geopolimer betonda CO₂ gazı salınımının düşük olması,
- d) Zararlı sera gazı emisyonlarının oluşmaması,
- e) Geleneksel betona göre daha az kür süresine sahip olması
- f) Eğilme ve basınç dayanımının geleneksel betona yakın, bazı durumlarda fazla olması,
- g) Isıl işleme karşı dayanıklılık göstermesi ve asit sülfat saldırılarına karşı dayanıklı olması
- h) Radyoaktif ışınlarla karşı daha az geçirgen olmasıdır.

Geopolimer betonun kullanım alanları sahip olduğu avantajlar neticesinde her geçen gün artmaktadır. İstinat duvarları, betonarme su tankları, barajlar ve ön germeli köprüler gibi yerlerde kullanılan geopolimer betonun ilk kullanıldığı bina, Avustralya'daki Queensland Üniversitesi Küresel Değişim Enstitüsüdür. Bina 2013 yılında inşa edilmiştir. Gelecek nesillere daha temiz ve daha güzel bir dünya bırakmak herkesin sorumluluğundadır. Bu doğrultuda gelecek nesillere faydalı olabilmemiz açısından geopolimer betonun kullanım alanları artmalı ve daha çok tercih edilmeye başlanmalıdır.

Nüfusun ve üretimin hızla ilerlemesi ile beraber otomobil kullanımı artmış ve buna bağlı olarak otomobillerde kullanılan atık lastikler önemli birer sorun haline gelmiştir. Dünya geneline yılda 1 milyona yakın atık lastik üretilmekte ve her yıl yaklaşık 1 milyar lastik kullanım ömrünü tamamlamaktadır. 2030 yılının sonuna kadar 5 milyar tondan fazla atık lastiğin ömrünü tamamlayacağı düşünülmektedir. Bu durum göz önüne alınarak geri dönüşümlü lastikler üretilmiştir. Üretilen lastikleri kullanım

yerlerine iletirken tekrardan atık lastik oluştuğu görülmüş ve atık lastik oranı buna rağmen artmaya devam etmiştir. Bunun önüne geçmek için atık lastiklerin farklı alanlardaki kullanımının arttırılması d ş n lm ştir.

Geopolimer beton ve atık lastik birlikte kullanılarak hafif beton üretme çabası devam etmektedir. Bu sayede beton  evre dostu olmakla kalmayıp hem ucuz hem de hafif olmaktadır. Hafifliğin yanında buna bağlı olarak deprem yüklerini normal betona göre az almakta ve deprem kuşağında bulunan ülkemiz adına büyük bir avantaj haline gelmektedir. Bu yüzden ülkemiz ekonomisi,  evre kirliliğinin giderilmesi ve can güvenliği adına geopolimer betonda atık lastik kullanımı hakkında çalışmalar arttırılarak atık lastiğin kullanımı yaygınlaştırılabilir.

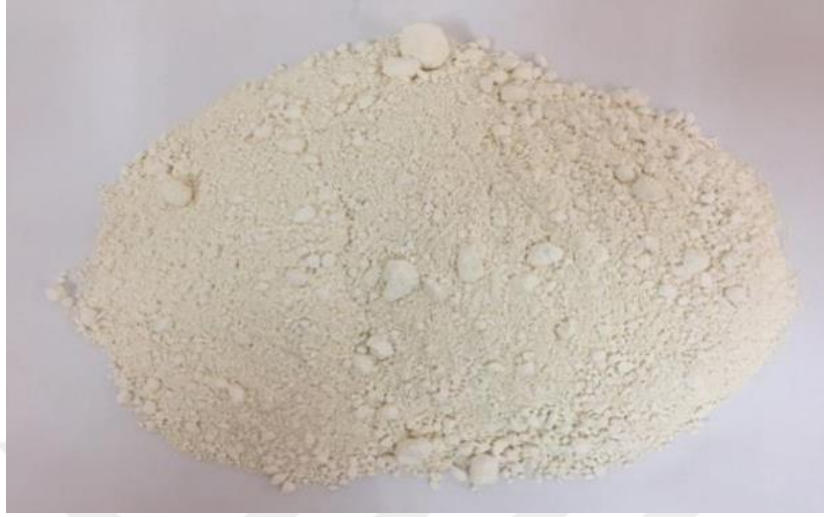
Bu çalışmada atık lastiğin çevresel olumsuz etkilerini hafifletmek amacıyla, bir yalıtım malzemesi olarak yine çevreye dost geopolimer beton içerisinde kullanmak suretiyle değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Literatürde ve uygulamada kabul görmüş ve yalıtım özelliği yüksek olan doğal hafif agrega sınıfına giren pomza agregası yerine atık lastiğin kullanımı ile elde edilen geopolimer harçların taze ve sertleşmiş hal özellikleri araştırılarak karşılaştırılmıştır. Bu amaçla atık lastik ve pomza belirli oranlarda normal ağırlıktaki ince agrega ile yer değiştirilmiş, taze halde işlenebilirlik ve birim hacim ağırlık, sertleşmiş halde basınç ve eğilme dayanımı ile ısı iletkenlik deneyleri yapılmıştır. Ayrıca konu ile ilgili yapılan deneyler kapsamında, hafif geopolimer beton yerine hafif geopolimer harç üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu sayede daha kontrollü, daha az malzeme kullanılması gibi avantajlardan faydalanılarak, gerçek geopolimer hafif beton davranışının değerlendirilmesinde tahmin aracı olarak kullanılabileceği d ş n lm ştir.

1.1. Geopolimer Betonda Kullanılan Puzolanlar

1.1.1. Yüksek fırın cürufu

Yüksek fırın cürufu, içeriğinde silika, alümina ve kükürt gibi malzemeler bulunan demir cevherinin yaklaşık 1600  C sıcaklıklarda yakılmasıyla, eriyik bir halde elde edilir (Altındal, 2020). Soğutulma şekline ve hızına bağlı olarak kristalize veya amorf yapıya bürünebilir. Erimiş halde bulunan yüksek fırın cürufu hızlı soğutulduğuunda granüle bir hal almaktadır. Daha sonra  ğ t lerek çimentonun

içerisinde veya alkali aktivatörler ile tek başına bir bağlayıcı olarak kullanılabilir. Öğütülmüş yüksek fırın cürufu şekil 1.1’de gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Öğütülmüş yüksek fırın cürufu (Altındal, 2020)

Yapısında fazla miktarda bulunan CaO sayesinde bağlayıcı özellik kazanmaktadır. Taze betonda kullanıldığında işlenebilirlik, pompalanabilirlik, priz süresi ve terleme gibi özellikleri arttırmakta, su ihtiyacı, hava içeriği, hidrasyon ısısı ve ısı gelişimi gibi özellikleri ise düşürmektedir. Aynı zamanda yüksek fırın cürufu kullanımı betonda kimyasal etkilere karşı direnç sağlamaktadır.

Yüksek fırın cürufu kullanılan betonun erken dayanımı düşük olsa da nihai dayanımı çok yüksek olduğundan portland çimentosu yerine tercih edilebilir. Portland çimentosuna göre çok daha az karbondioksit (CO_2) salınımı gerçekleştiğinden ve atık bir malzeme olduğundan hem çevre dostu hem de enerji kullanımı düşük bir malzemedir. Portland çimentosu gibi nemden etkilenmediği için depolanması daha kolay bir malzemedir (Kalaycıklı, 2020).

1.1.2. Yüksek fırın cürufunun betonda kullanımı

Geopolimer betonda, düşük sıcaklıkta ve aktive edilmeden kullanıldığında basınç dayanımının düşmesine yol açar. Bu sebeple kullanılırken, sodyum hidroksit, sodyum silikat gibi aktifleştiriciler ile kullanılmalıdır. Betonda doğru kullanıldığında mukavemette artış sağlamaktadır. Aynı zamanda kullanıldığı betonu sülfat, asit ve tuz gibi dış etkilere karşı dayanıklı hale getirmektedir. Yüksek fırın cürufu geopolimer

beton, yüksek sıcaklıklarda kürlendiğinden ve hidratasyon ısıları yüksek olduğundan bazı yüzeysel çatlaklarla karşılaşmaktadır. Böyle durumlarda erken dayanımı geleneksel betona göre düşük olsa da sonuca nihai dayanım olarak bakıldığında geleneksel betonu geride bırakmaktadır.

1.1.3 Uçucu kül

Uçucu küller termik santrallerde kömür yakımı sonucu elde edilmektedir. Havaya yükselerek bacadan çıkmaya çalışan küller, genellikle elektrofiltreler ile tutulmaktadır. Uçucu küller gri renkli olmaktadır. Küre şeklindedirler ve tane çapları 1 - 150 μm arasında değişmektedir. Yoğunlukları 2,1-2,7 g/cm^3 arasındadır. Özgül yüzeyleri 1800-1500 cm^2 civarında olabilmektedir.

Uçucu küllerin belirlenen standartlara göre farklı şekilleri vardır. CaO oranı %10'dan az olan uçucu küller F tipi uçucu kül olarak sınıflandırılmaktadır. Taş kömürünün %10-15'i kül olarak ortaya çıkmaktadır. Bu küllerin %75-85'i, yakılan kazandan ayrılmaya çalışan gazlar ile ortaya çıkmaktadır. Elektrofiltreler ve silikon toz toplayıcılar ile bu küller biriktirilerek, F tipi uçucu küller elde edilmektedir.

CaO oranı %10'dan fazla olan, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 bileşenlerinin toplam oranı %50'den fazla olan uçucu küllere ise C tipi uçucu kül denilmektedir. C tipi uçucu küller linyit kömürünün yanması sonucu açığa çıkan küllerin, elektrofiltreler ve silikon toz toplayıcılar ile tutulması sonucu meydana gelmektedir. C tipi uçucu kül ile yapılan çoğu çalışmada, F tipi uçucu küle göre daha düşük basınç dayanımları elde edilmiştir. Şekil 1.2'de F ve C tipi uçucu küller gösterilmiştir.



Şekil 1.2. F ve C tipi uçucu kül görünümleri (Özcan ve Güngör, 2019)

Betonda kullanım şekline göre dayanımlarda artış sağlayan uçucu küller çoğu zaman kullanılmadan atılmaktadır ve doğayı kirletmektedir. Bu kapsamda hava ve çevre kirliliğini engellemek, ileride büyük illerde oluşacak agrega probleminin önüne geçmek için F ve C tipi uçucu küllerin kullanımı daha da yaygınlaştırılmalıdır (Altındal, 2020).

1.1.4. Uçucu külün betonda kullanımı

Uçucu küllerin, geopolimer betonda kullanıldığında gösterdiği basınç dayanımı, uçucu külün sınıfına, kür koşullarına ve alkali aktivatör oranlarına bağlı olarak değişmektedir. Uçucu küllerin bünyesinde silisli ve alüminli bileşikler bulunduğu için, betonda sadece bağlayıcı olarak değil, katkı maddesi olarakta kullanılabilir. Uçucu külün geleneksel betonda bu şekilde kullanımı, hidrasyon ısısını düşürmektedir. Aynı zamanda küçük yapıları olduğundan, betondaki boşlukları kapatarak mukavemet artışına katkı sağlamaktadır (Kalaycıklı, 2020).

Yapılan çalışmalara göre uçucu kül kullanılan betonlarda, portland çimentosu kullanılan betonlara göre daha az rötre çatlağı ile karşılaşmıştır (Özcan ve Güngör, 2019).

1.1.5. Silis dumanı

Silis dumanının taneleri çok incedir hatta nano boyuta kadar inebilir. Bu nano boyuttaki toz, silisyum metallerinin elektrik fırınlarında yakılmasıyla ortaya çıkar. Silis dumanı sıcaklıklara göre hal değiştirebilir. Yüksek sıcaklıklarda gaz halinde, düşük sıcaklıklarda ise amorf yapıda bulunabilir. Okside olanlar daha çok elektrik fırınlarının üst kısımlarında toplanır. Silis dumanını fırının üst kısımlarından toplamak ya da orada biriktirmek için kolektörler kullanılabilir. Çoğunlukla gri renkte bulunur. Örnek bir silis dumanı görüntüsü Şekil 1.3’de verilmiştir.



Şekil 1.3. Silis dumanı (Kalaycıklı, 2020)

1.1.6. Silis dumanının betonda kullanımı

Silis dumanı amorf yapıya sahip olduğundan ve ince yapıda olduğundan aktivitesi yüksektir. Bu sebepten betonda genellikle katkı maddesi yerine kullanılmaktadır. Çimento miktarını %10 oranlarına kadar düşürmesine rağmen, çok ince tanelerden oluştuğu için, taze betonun kıvamını ve işlenebilirliğini azaltmakta ve su ihtiyacını artırmaktadır. Buna karşın aktivitesi yüksek olduğu için, beton dayanımını büyük ölçüde olumlu etkilemektedir (Kalaycıklı, 2020).

Silis dumanının geopolimer beton içerisinde kullanımı miktarına bağlı olarak yüksek sıcaklıklara karşı direncini arttırmaktadır. Eğilme ve basınç dayanımını kötü yönde etkilememesi için geopolimer betonda kullanımı %20 oranından az olmalıdır. Yüksek sıcaklıklarda silis dumanı tarafından emilen suyun buharlaşarak serbest kalması halinde, geopolimer beton içerisinde oluşan gerilmeden dolayı patlamalar yaşanabilmektedir (Keklik, 2020).

1.2. Geopolimer Betonda Kullanılan Aktivatörler

1.2.1. Sodyum Silikat

Sodyum silikat, en büyük silikat grubu içinde bulunur. Dünyadaki mineral kitlesinin tamamına yakını silikatlar oluşturmaktadır. Silikatların ise %30'u mineraldir. Dünyada en fazla silikat minerali yer alır. O nedenle oksijen ve silisyum elementleri, dünyada en fazla bulunan elementlerdir. Bunlara silisyum ve oksijen bileşikleri de eklendiğinde, dünyada bulunan element ve bileşiklerin çoğu elde edilmiş olur. Dünyada yaklaşık 600 silikat minerali vardır. Doğada var olan silikat mineralinin

temel yapısı, merkezde bir silisyum atomu ve köşelerde ise silisyum atomuna bağlanmış dört adet oksijen atomu bulunan elementtir (Altındal, 2020).

1.2.2. Sodyum Hidroksit

Sodyum ve hidroksit atomlarından oluşan bir birleşiktir. Gösterimi NaOH şeklindedir. Rengi beyazdır ve katıdır. Diğer özelliklerinin yanı sıra iyonik olan bu birleşik su içerisinde kolaylıkla çözünür. pH değeri oldukça yüksek olduğundan bazik bir maddedir.

1.3. Geopolimer Betonda Durabilite

Geopolimer betonlarda kimyasal dayanıklılık çok yüksektir. Kimyasal etkilere karşı dirençleri hala test edilmekte olan bu betonlarda basınç dayanımı, kullanılan alkali aktivatörler ve oranları, su/bağlayıcı oranı, hangi geopolimerin kullanıldığı ve kür koşulları gibi etkenlere bağlı olarak farklılık göstermektedir. Geopolimer betonlarda kimyasal direncin yanı sıra, yüksek sıcaklıklara dirençte oldukça fazladır.

1.4. Geopolimer Betonun Kullanım Alanları

Geopolimer beton dünyanın çoğu yerinde kullanılmaktadır. Örneğin; Avustralya'da bulunan, Queensland Üniversitesi Küresel Değişim Enstitüsü binası geopolimer betonun ilk kullanıldığı binadır. Normal, hazır ve püskürtme gibi kullanım şekilleri olan geopolimer beton, zaman ilerledikçe araştırmalar sonucu daha değişik kullanım şekillerine sahip olmaktadır (Altındal, 2020). Geopolimer betonun geçirimsizliği bilinen bir özelliktir. Bu bağlamda geopolimer beton su tankları, istinat duvarları ve barajlarda kullanılmaktadır. Örnek olarak, Amerika Birleşik Devletleri'nde uçucu külün ilk kez kullanıldığı Hoover Barajı buna bir örnek olarak verilebilir. Ayrıca Eskişehir'de yapılan Gökçekaya Barajı da buna bir örnek olarak verilebilir (Özcan ve Güngör, 2019).

1.5. Geopolimer Betonda Kür Koşullarının Etkisi

Geopolimer betona uygulanacak kür sıcaklığı ve süresi basınç dayanımını oldukça etkilemektedir. Yapılan çoğu çalışmada, bu sıcaklık değeri 20 °C ile 100 °C

arasında gözükmeaktadır. Geopolimer betonun yüksek sıcaklıkta kürlenmesi basınç dayanımını yükseltmektedir. Fakat belirli bir sıcaklıktan sonra geopolimer beton olumsuz etkilenmektedir. Ayrıca belirli bir eşik geçildikten sonra geopolimer beton hızlı priz almakta yani reaktiviteyi tetiklemektedir. Bu zararlı eşğin yaklaşık 100 derece olduğu düşünülmektedir.

Uygun kür sıcaklığı yanında birde uygun kür süresi büyük önem arz etmektedir. Yapılan çalışmalar neticesinde bu sürenin birkaç saat veya birkaç gün arasında sınırlandığı düşünülmektedir. Geopolimer betonun, portland çimentolu betonu basınç dayanımında yakalayabilmesi veya geçebilmesi için ısıtılabilir kür uygulanması gerektiği bilinmektedir. Bu uygulanacak ısıtılabilir kür silika ve alümina maddelerinin çözünmesini hızlandırarak geopolimerizasyonu arttırmaktadır. Geopolimerizasyonun fazlası betonun özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Yüksek sıcaklıktaki kür betona uzun süre uygulanırsa büzölmeye ve dehidrasyona sebep olmaktadır (Altındal, 2020).

1.6. Hafif Beton

Genel olarak hafif betonlar içerisinde, hafif agrega, sadece iri agrega veya gözenekli çimento hamuru kullanarak elde edilen yapı elamanına verilen isimdir. Yoğunluğu 2000 kg/m^3 'ün altında olan betonlar hafif beton ismiyle adlandırılır.

Yönetmelik bazında inceleme yapıldığında TS EN 206-1'de hafif beton yoğunluğunun $800\text{-}2000 \text{ kg/m}^3$ arasında olması istenmekte, ACI 213R-03'de $1120\text{-}1960 \text{ kg/m}^3$ yoğunluğunda, TS 2511'de ise 1900 kg/m^3 yoğunluğunda olması istenmektedir. Basınç dayanımının yaklaşık 16-17 MPa ve üzerinde olduğu betonlardır (Antaki, 2020).

Hafif betonlar hafif agrega kullanılarak üretildiğinde segregasyon ihtimali geleneksel betondakine kıyasla daha fazla olmaktadır.

1.7. Hafif Betonların ve Kullanılan Agregaların Sınıflandırılması

Hafif betonlar çeşitli yollarla üretilebilmektedir. Yaygın olarak hafif agrega kullanımıyla elde edilen hafif betonlar kullanılan agreganın durumuna cinsine ve miktarına göre farklı dayanımlar vermektedir. Gösterdikleri basınç dayanımına ve betonun birim ağırlığına göre elde edilen hafif betonlar 3 farklı sınıfa ayrılmıştır. Bunlar şu şekilde verilebilir;

- Yalıtımlı beton: Bu tip betonun birim ağırlığı $0,6 \text{ kg/dm}^3$ ve altında olmakta, basınç dayanımı ise $2,5 \text{ MPa}$ altında olmaktadır.
- Yarı yalıtımlı, yarı taşıyıcı beton: Birim ağırlık değeri $0,6-1,2 \text{ kg/dm}^3$ ve basınç dayanımı değeri $2,5-10 \text{ MPa}$ arasında olan betonlar yarı yalıtımlı, yarı taşıyıcı beton olarak sınıflandırılmaktadır.
- Taşıyıcı beton: Hafif taşıyıcı betonlarda birim ağırlığın $1,2-2,0 \text{ kg/dm}^3$ arasında, basınç dayanımının ise $10-16 \text{ MPa}$ arasında olması istenmektedir.

Hafif betonda yapay ve doğal agrega olmak üzere iki çeşit hafif agrega kullanılmaktadır. Bunlardan birkaçı ve en çok kullanılanlar pomza, perlit, cüruf ve şeyl olarak sıralanabilir. Çizelge 1.1’ de hafif agregaların sınıfları ve çeşitleri detaylı bir şekilde verilmiştir.

Çizelge 1.1. Hafif betonda kullanılan agrega çeşitleri (Anonim, 2020)

Doğal Agregalar	Yapay Agregalar
Pomza	Genleştirilmiş perlit
Diyatomit	Genleştirilmiş kil
Tüfler	Genleştirilmiş vermikülit
Lav cürufu	Yüksek fırın cürufu
	Uçucu kül

1.8. Hafif Beton Kullanım Alanları

Hafif beton dayanım olarak geleneksel betona göre kısmen daha dayanıksız olsa da üretim şekline göre yalıtım özelliği değişmekte ve geleneksel betonu geçebilmektedir. Yalıtım özelliği sayesinde çatı şaplarında, ara katlar arası yalıtımda ve yangın riski taşıyan yerlerde kullanılabilir. Hafif betonda yoğunluğun düşük olması istenmektedir. Bu gereksinimi sağlamak için yapısı gereği boşluklu ve kütlece hafif agrega tercih edilir. Hafiflik özelliğinden faydalanarak otoyollarda çöken yerlerin tamirinde ve dolgu malzemesi olarak kullanılabilir. Kütlece hafif olması sayesinde deprem yüklerini az almaktadır. Bu sayede deprem tehlikesi yüksek yerlerde, güvenlik açısından yapısal hafif betonda tercih edilebilmektedir.

1.9. Hafif Beton Avantaj ve Dezavantajları

Hafif betonun avantajları aşağıda listelenmiştir;

1. Betonun hafifliğinden dolayı yapıya etkiyen deprem yükleri azalmaktadır.
2. Hafiflikten dolayı binaya etki eden yükler azalacağından daha küçük kolan ve kiriş boyutları gerekecektir. Bu sayede hem betondan hem donatıdan tasarruf sağlamış olacaktır.
3. Ses ve ısı yalıtım özellikleri yüksektir.
4. Homojendirler
5. Taşınması kolaydır ve yangına dayanıklıdır.

Hafif betonun dezavantajları aşağıda listelenmiştir;

1. Yoğunluğu düşüktür ve boşlukludur. Buna bağlı olarak basınç dayanımı normal betona göre daha düşüktür.
2. Hafif betonun elastisite modülü düşüktür. Kirişlerde kullanıldığında dönme ve sehim ihtimalleri daha fazla olur.
3. Malzeme bakımından normal betona göre ucuz olsa da çimento fazla gerektiğinden pahalılaşmaktadır.
4. Hafif betonda segregasyon ihtimali daha yüksektir. Bu sebepten işinde usta kişilerce yapılması gerekmektedir.
5. Kesme dayanımı düşüktür.

1.10. Hafif Beton Üretimi

Hafif betonlarda segregasyon ihtimali yüksektir. Dökümü sırasında gerekli önlemler alınmalı ve bu işlem işinin ehli kişiler tarafından gerçekleştirilmelidir. Normal betonun çimento ile arasındaki aderans hafif betona göre düşüktür. Hafif beton bu aderans sayesinde çimentodan ayrılmayarak agregada bir çatlak oluşturmakta, normal beton ise çimento ile agrega arasında bir çatlak oluşturmaktadır.

Hafif beton üretilirken su/çimento oranına çok dikkat edilmelidir. Kullanılan agregalar boşluklu ve pürüzlü bir yapıda olduğundan beton karışımı içerisindeki suyu emecek ve betonda rötire çatlakları oluşturacaktır. Bu sorun beton nemlendirilse bile çözülmemektedir. Beton üretilirken su miktarına dikkat edilerek sorun çözülebilir.

1.11. Pomza

Pomza, içerisinde bulunan gazların bünyesinden ayrılmasıyla boşluklu bir yapıda oluşur. Meydana gelen bu boşlukların birleştiği bir nokta olmadığından, kış aylarında sıcak kalmak ve yaz aylarında serinlemek için izolasyon malzemesi olarak kullanılır. Ülkemiz pomza açısından oldukça zengindir. Dünya pomza rezervinin neredeyse yarısını bünyesinde barındırmaktadır. Bu rezervin büyük bir çoğunluğu iç Anadolu bölgesinden çıkmaktadır. En çok çıkarıldığı il ise Bitlis'tir. Pomza volkanik olaylar neticesinde oluşmuş camsı bir volkanik kayadır. Bu nedenle volkanik faaliyetlerin olduğu yerlerde daha çok bulunmaktadır (Antaki, 2020).

Pomza asidik veya bazik olmak üzere 2 çeşittir. Asidik pomza beyaz renkte ve tonlarında, Bazik pomza kahverengi renkte ve tonlarında olabilir. Hafif beton içerisinde genellikle asidik pomza kullanılmaktadır. Bazik pomzanın yoğunluğu 2 gr/cm^3 değerine çıkabilirken, asidik pomzanın yoğunluğu en fazla 1 gr/cm^3 değerine kadar artmaktadır. Şekil 1.4' de bir asidik inşaat pomzası örneği gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Beyaz renkli inşaat pomzası

1.12. Atık Lastik

Atık araba lastikleri farklı yöntemlerle geri dönüştürülerek çeşitli alanlarda tekrar kullanılmaktadır. Beton içerisinde kullanılan atık lastik granül halde olmalıdır. Granül hale getire bilmek için önce lastik içerisinde bakıl teller çekmek suretiyle alınır.

Sonrasında parçalanarak mıknatıs yardımıyla metallerinden ayrılır. Ortaya çıkan malzeme istenilen boyutlarda küçültülür. Atık lastiğin inşaatta kullanımı eski yıllardan beri yol ve kaldırımında devam etmektedir. Günümüzde ise binalarda hafif agrega olarak kullanımı araştırılmaktadır (Sarkaz, 2020).

Atık lastik beton içerisinde kullanıldığında basınç, çekme ve eğilme dayanımlarını düşürmektedir. Avantajlarına bakıldığında dezavantajlarından daha fazladır. Atık lastiğin avantajları aşağıda verilmiştir;

- ✓ Oldukça hafiftir.
- ✓ Esnek bir yapıya sahiptir.
- ✓ Darbe emme özelliği vardır.
- ✓ Yüksek yalıtıma sahiptir.
- ✓ Aşınmaya dayanıklıdır (Söylemez, 2022).

1.13. Atık Lastik Sınıfları

Atık lastikler kullanıma hazır hale getirilmeden önce yeniden kaplama, granül hale getirme, yakıt olarak kullanma ve ham madde olarak kullanma gibi işlemlerden geçmektedir. İnşaat sektöründe beton içerisinde agrega olarak kullanılacak atık lastikler granül hale getirilerek değerlendirilir. Betonda kullanılan atık lastikler sahip oldukları çapa göre sınıflandırılmaktadır. Atık lastik sınıfları Çizelge 1.2’ de ve örnek atık lastik görünümü Şekil 1.5’de gösterilmiştir.

Çizelge 1.2. Atık lastik sınıfları ve kullanım alanları (Sarkaz, 2020)

Türleri	Boyut		Üretim Yöntemi	Betondaki Uygulaması
Doğranmış/Ufalanmış	<u>Doğranmış</u> Uzunluk Genişlik	: 300-430 mm : 100-150 mm	Birincil, ikincil veya her iki parçalama işlemi	Agrega yerine
	<u>Dilimlenmiş</u> Uzunluk Genişlik	: 100-230 mm : 13-76 mm		
Kırıntı Lastik		: 0,425-4,75 mm	Kıracak mil Granül Mikro mil	Kum yerine
Öğütülmüş lastik		: 0,0075-0,475 mm	Magnetik ayrışma Eleme	Çimento yerine
Lastik lif	Uzunluk Şerit	: 8,5-21,5 mm : ≤ 8 mm boyunda	Doğranmış lastiklerden	Güçlendirilmiş fiber olarak



Şekil 1.5. Örnek atık lastik görünümü



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Ali ve ark. (2020), yapılan çalışmada çevre kirliliğini azaltmak adına atık lastik ve uçucu kül birleştirilerek geopolimer beton üretmeye ve bazı özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışmada uçucu kül, kıyılmış kauçuk, kum, iri agrega, süper akışkanlaştırıcı, alkali aktivatörler kullanılmıştır. Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat tercih edilmiştir. Sodyum hidroksit derişimi 10 M olarak ayarlanmıştır. Karışımlarda uçucu kül miktarı sabit tutularak kıyılmış lastik kum ile hacimce %10, %20 ve %30 oranlarında yer değiştirilmiştir. Numunelere 60 °C sıcaklıkta 48 saat boyunca ısı kürü uygulanmıştır. Numuneler üzerinde basınç dayanımı, ultrasonik darbe hızı, yoğunluk testleri yapılmış ve XRD analizi gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak atık lastiğin uçucu kül ile birlikte kullanımı betonun yoğunluğunu düşürmüş ama %10 oranında fazla kullanımı basınç dayanımını olumsuz etkilemiştir.

Azmi ve ark. (2016), yapılan çalışmada uçucu kül ile atık lastiğin birlikte kullanımı araştırılmış ve atık lastiğin farklı oranlarda kullanımının oluşturacağı etkiler gözlenmiştir. Çalışmada F sınıfı uçucu kül, kırıntı kauçuğu, agrega ve alkali aktivatörler kullanılmıştır. Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat seçilmiştir. Sodyum hidroksitin derişimi 12 M olarak ayarlanmıştır. Sodyum hidroksitin sodyum silikata oranı 1/2, aktivatör/bağlayıcı oranı ise 1/2,5 olarak sabitlenmiştir. Hazırlanan karışımlar 5x5x5 cm küp kalıplara dökülmüş ve deney gününe kadar oda sıcaklığında kürlenmeye bırakılmıştır. Numuneler üzerinde basınç dayanımı testi uygulanmıştır. Sonuçlara bakıldığında 28 günlük basınç dayanımı %10 kırıntı kauçuk oranında %50 oranında azalmış ve kırıntı kauçuk miktarı arttıkça azalma devam etmiştir.

Azmi ve ark. (2019), yapılan çalışmada kırıntı kauçuğun farklı oranlarda kullanımının etkilerini araştırmak amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında uçucu kül, kırıntı kauçuk, agrega, alkali aktivatör malzemeleri kullanılmıştır. Uçucu kül sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltileri ile aktive edilmiştir. Sodyum hidroksit çözeltilisinin derişimi 10 M olarak ayarlanmış ve sodyum silikat ile karıştırılırken karışım oranı 2,0 olarak belirlenmiştir. Karışımında uçucu kül/alkali aktivatör oranı 2,5 olarak belirlenmiştir. Kırıntı kauçuk karışım esnasında agrega ile %5, %10, %15 ve %20 oranlarında yer değiştirilmiştir. Hazırlanan numuneler deney gününe kadar oda sıcaklığında küre bırakılmıştır. Numuneler üzerinde basınç dayanımı, su emme, yoğunluk, morfoloji,

kompozisyon testleri yapılmıştır. Sonuçlara bakıldığında kırıntı kauçuk ilavesi basınç dayanımı hariç diğer testleri olumlu etkilemiş ama basınç dayanımını düşürmüştür. Yüksek mukavemet gerektiren betonlarda atık lastik kullanımı uygun görülmemiştir.

Başpınar ve Kurtuluş (2018), yapılan çalışmada kullanılan malzemelerin geopolimer köpük beton üzerine etkileri incelenmiştir. Çalışmada uçucu kül Türkiye termik santrali seyitömer'den ve yüksek fırın cürufu Karabük demir çelik fabrikasından alınarak kullanılmıştır. Numune karışımları hazırlanırken önce sıvı kısım hazırlanmış, daha sonra katı kısım ilave edilerek karıştırılmıştır. Sıvı kısımda sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltilerinden faydalanılmıştır. Malzemeler 5 dakika karıştırıldıktan sonra 10x10x10 cm kalıplara dökülerek küp numuneler hazırlanmıştır. Numuneler 60°C sıcaklıkta, 24 saat kürlendikten sonra, içerisine katılan perlite miktarına göre köpürmesine ve zamanla birim hacim ağırlıktaki değişimlerine bakılmıştır. Aynı zamanda numuneler basınç dayanımı testlerine de maruz bırakılmıştır. Çalışmaların sonucunda perlitin az kullanımı sonucu betonun daha iyi köpürdüğü, yüksek fırın cürufu miktarı arttıkça betonda çatlakların oluştuğu ve numunelerin basınç dayanımının 1,5 MPa olduğu gibi durumlar görülmüştür. Bunlara karşın, çatlamalardaki artışın iri agregaya ve fiber kullanımı ile azaltılabileceği ve 1,5 MPa basınç dayanımının köpük betonlar için standartları sağladığı söylenmiştir.

Bhavani ve ark. (2021), yapılan çalışmada atık lastik agregaya ile değiştirilirken uçucu kül de zeolit ile değiştirilmiş ve oluşan geopolimer beton üzerinde bazı testler uygulanmıştır. Çalışmada uçucu kül, zeolit, GGBS, atık lastik, atık lastik tozu, alkali aktivatörler malzeme olarak kullanılmıştır. Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltileri kullanılmıştır. Sodyum hidroksitin molaritesi 12 olarak ayarlanmış ve sodyum silikatla karışım oranı 1,5 olarak belirlenmiştir. Hazırlanan tüm karışımlarda %35 uçucu kül, %5 zeolit ve %60 GGBS kullanılmış, kaba agregaya %2,5 oranında kauçuk yongaları ile değiştirilmiştir. İnce agregaya ve nehir kumu ise %5, %10, %15 ve %20 oranlarında kauçuk tozu ile değiştirilmiştir. Numuneler üzerinde 28 ve 56'ncı günlerde basınç dayanımı, bölünmüş çekme dayanımı, darbe direnci ve donma-çözünme testleri uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre %20 kauçuk kullanımı betonun direncini arttırmış fakat basınç dayanımını düşürmüştür. Bu tip betonların darbeye maruz kalan yerlerde kullanımı uygun görülmüştür.

Binici ve ark. (2012), yapılan çalışmada yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis kumu ve pomza kullanılarak karışımlar hazırlanmış ve karışımlar sodyum hidroksit ile aktive edilerek fiziksel, mekanik, radyasyon geçirgenliği özelliklerine bakılmıştır. Belirtilen malzemelerin geopolimer beton üretiminde kullanımı amaçlanmıştır. Hazırlanan karışımlarda sodyum hidroksit değerleri sabit tutularak, 800, 900 ve 1000 gr kum kullanılmıştır. Bu şekilde her bir bağlayıcı malzemeden 3 adet numune üretilmiştir. 100°C ve 150°C olmak üzere 2 farklı sıcaklığa göre toplamda 24 numune elde edilmiştir. Numuneler 4 x 4 x 16 cm ve 10 x 10 x 10 cm boyutlarındadır. Hazırlanan numuneler üzerinde su emme, birim hacim ağırlık, eğilme dayanımı, basınç dayanımı, ultrasonik ses geçirgenlik ve lineer soğurma katsayısı deneyleri yapılmıştır. Su emme oranı açısından en iyi bağlayıcı yüksek fırın cürufu olarak belirlenmiştir. Bu sayede ultrasonik ses geçirgenlik deneyi, eğilme deneyi ve basınç deneyinde en iyi sonuçları yüksek fırın cürufu elde etmiştir. Eğilme ve basınç dayanımı sonuçlarının iyi çıkması, ultrasonik ses geçirgenlik sonucunun yüksek olmasına ve tanecikler arası boşluğun az olmasına bağlanmıştır. Radyasyon geçirgenlik testinde yüksek fırın cürufu en başarılı bağlayıcı olarak görülmüş ve radyasyon etkisine maruz yapılarda kullanılabilir bir malzeme olduğu düşünülmüştür.

Çavuş ve Ağaoğlu (2019), yapılan çalışmada sodyum hidroksit, potasyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılarak aktifleştirilen zeolit, uçucu kül ve diatomit ikameli geopolimer betonların fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Numuneler üretilirken, uçucu kül, diatomit, zeolit, standart kum ve 3 çeşit aktifleştirici kullanılmıştır. Kullanılan standart kumun tane boyutu maksimum 2 mm olarak alınmıştır. Numunelerde çimento kullanılmamış ve 40x40x160 mm olarak hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler 24 saat 75 °C’de kürlenmiştir. 350 gr uçucu kül ve değiştirilerek 150 gr diatomit, zeolit kullanılmıştır. Numuneler üzerinde eğilme dayanımı deneyi, ultra ses geçiş hızı deneyi ve basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Eğilme dayanımı testinde en yüksek sonucu diatomit ile uçucu kül kullanılan ve sodyum silikat aktifleştiricili numune vermiştir. En düşük değeri aynı malzemelerin kullanıldığı ama potasyum hidroksit ile aktifleştirilen numune vermiştir. En yüksek dayanım 3,5 MPa, en düşük dayanım ise yaklaşık 0,2 MPa çıkmıştır. En yüksek basınç dayanım değeri, zeolit ikameli ve sodyum silikatla aktifleştirilen numunede 19,4 MPa olarak belirlenmiştir. En düşük dayanım ise diatomitten yararlanılan potasyum hidroksit

aktifleştiricili numuneden elde edilmiştir. Genel sonuçlara bakıldığında numunelerin fiziksel özellikleri ile dayanımları arasında doğrusal bir ilişki olduğu görülmüştür.

Durak (2021), yapılan çalışmada ısıl kür işleminin geopolimer betonun dayanımı üzerindeki etkisi incelenmeye çalışılmıştır. Çalışmada uçucu kül, kum, aktivatör olarak sodyum hidroksit, su malzemeleri kullanılmıştır. Uçucu kül F sınıfı olarak seçilmiştir. Karışım oranlarına göre 5 çeşit numune üretilmiştir. Önce uçucu kül ve solüsyon karıştırılmış sonra kum ilave edilmiştir. Numuneler 4x4x16 cm boyutlarında hazırlanmıştır. Kalıplara dökülen numuneler 50, 75, 90 °C sıcaklıklarda 24 saat boyunca sıcaklık kürüne tabi tutulmuşlardır. Kürden sonra her çeşit numune belirli sürelerde beklemeye alınmıştır. Beklemesi biten numuneler üzerinde eğilme dayanımlarına ve basınç dayanımlarına bakılmaya başlanmıştır. Çalışmada ısıl kür sonrası hemen kırılan numunelerin basınç dayanımları çok düşük çıkmıştır. Isıl kür sonrası bekleyen numunelerin ise basınç dayanımları, bekleme süresi arttıkça artmıştır. Eğilme dayanımlarına bakıldığında ise basınç dayanımları ile aynı durum söz konusu olmuştur. En yüksek basınç dayanımı 90 °C kürden sonra 180 gün bekleyen numunenin, en düşük dayanım ise 50 °C kürden sonra hiç beklemeyen numunenin olmuştur. Sonuç olarak ısıl kür işleminden sonra numunelerin dayanım artışının devam ettiği anlaşılmıştır.

Hardjito ve ark. (2004), yapılan çalışmada yerel bir elektrik santralindeki silolardan elde edilen F tipi uçucu kül kullanılarak bazı deneysel çalışmalar yapılmış ve portland çimentosunun CO₂ salınımı göz önüne alınarak, yerine alternatif bulmak amaçlanmıştır. Ayrıca yapılan çalışmalarda sodyum hidroksit ve sodyum silikat aktivatörleri kullanılmıştır. Deneyler için yüksek oranda su azaltıcı katkı kullanılarak, 10x20 cm boyutlarında 5 silindir numune hazırlanmıştır. Numuneler bazı değişkenleri farklı tutularak, basınç dayanımı, kurulma büzülmesi, sürünme ve sülfat etkisi gibi testlere tabi tutulmuştur. Testler sonucunda, aktivatör oranı artması, kür sıcaklığı 30°C ila 90°C arasında tutulması, kür süresinin 6 ila 96 saat arasında olması, yeterli miktarda yüksek oranda su azaltıcı katkı kullanımı gibi durumlarda geopolimer betonun basınç dayanımının arttığı gözlemlenmiştir. Bunların yanı sıra su/geopolimer katı oranı artmasının, betonun basınç dayanımını düşürdüğü ve betonun sülfata karşı çok iyi direnç gösterdiği görülmüştür. Çalışma neticesinde uçucu kül esaslı geopolimer beton hazırlamanın en iyi karışım oranları, kür sıcaklıkları ve süreleri elde edilmiştir.

İlkenntapar ve Eren (2020), yapılan çalışmada genleştirilmiş polistiren ile ırmak kumu %20, 40, 60, 80, 100 miktarında yer değiştirilerek elde edilen geopolimer harcın fiziksel, mekanik ve ısı geçirimsizlik özellikleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında uçucu kül, ırmak kumu, sodyum hidroksit, su, genleştirilmiş polistiren, ajan malzemeleri kullanılmıştır. Uçucu kül F sınıfı olarak seçilmiştir. Irmak kumu ise 0-4 mm tane boyutunda kullanılmıştır. Hazırlanan numunelere 48 saat ve 24 saat boyunca 75 °C’de sıcaklık kürü uygulanmış ve aktivite sağlanmıştır. Hazırlanan numuneler üzerinde eğilme dayanımı, basınç dayanımı, işlenebilirlik, birim ağırlık, su emme, boşluk oranı, yarmada çekme dayanımı, yüksek sıcaklık dayanımı, kılcal su emme, ultrasonik atımlı dalga hızı, ısı iletkenlik ve EDX analizi deneyleri yapılmıştır. Basınç ve eğilme dayanımı deneyindeki numuneler 4x4x16 cm, yarmada çekme dayanımındaki numuneler ise 15,5x14x4 cm olarak ayarlanmıştır. İşlenebilirlik %60 genleşmiş polistiren oranından sonra azalmıştır. 48 saat kür uygulanan geopolimer betonun basınç ve eğilme dayanımı 24 saat kür uygulanan numuneye göre artış göstermiştir. Genleşmiş polistiren eklemesi numunelerde arttıkça yarmada çekme dayanımı azalmıştır. Yüksek sıcaklık deneyi öncesi uygulanan 48 saatlik sıcaklık kürü, numunelerin deney için pozitif sonuç vermesini sağlamıştır. 48 saat kür uygulanan numunelerin ultrasonik geçiş hızı, 24 saat kür uygulanan numunelere göre daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca genleşmiş polistiren ikamesi betonun özelliklerini her yönde arttırmış ve ısı iletkenliğini düşürmüştür. Yani betonda yalıtımı da sağlamıştır.

İpek ve ark. (2022), yapılan çalışmada literatürde yapılan çalışmaları bir araya getirerek atık lastiklerin betonda agrega olarak kullanımı ile ilgili bilgi vermek amaçlanmıştır. Çalışmada atık lastiklerin her geçen gün bir sorun haline geldiği vurgulanmıştır. Bununla birlikte bu sorunu ortadan kaldırmak için atık lastikleri yakma, yeniden kaplama veya kıyarak inşaat malzemesi olarak kullanma gibi çözümlerin düşünüldüğü de söylenmiştir. Atık lastiğin içeriği ve üretiminde kullanılan malzemeler, atık lastiğin depolanması ile oluşturduğu çevresel etkileri vb. konulara da yer vermiştir. İnşaat sektöründe atık lastiğin kullanımına değinerek, lastik agregasının betonun işlenebilirliğine, birim ağırlığına, reolojik davranışına, dayanım ve elastisite modülüne, kırılma parametrelerine ve betonun aşınma direncine etkileri anlatılmıştır. Sonuç olarak lastik agregası yüksek oranlarda ve kötü özelliklerde kullanıldığında betonu kötü etkilemiştir. Bu yüzden lastik agregası detaylı bir inceleme ve deneyden geçirildikten sonra kullanılması uygun görülmüştür.

İpek ve Mermerdaş (2022), yapılan çalışmada atık lastik malzemesinin agrega olarak geopolimer betonda yeniden kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çalışma kapsamında F sınıfı uçucu kül, 4 mm nehir kumu, kırıntı kauçuk ve alkali aktivatörler kullanılmıştır. Akışkanlığı sağlayabilmek için sonradan süper akışkanlaştırıcı katılmıştır. Uçucu kül Çatalağzı termik santralinden temin edilmiştir. Hazırlanan karışımlarda kullanılan nehir kumu, hacimce %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında kırıntı kauçuk ile yer değiştirilmiştir. Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit 12 M derişiminde hazırlanmış ve sodyum silikat ile 1/2 oranında karıştırılmıştır. Hazırlanan numuneler üzerinde akış tablası testi, reoloji testi, birim ağırlık değişim testi ve kuma testi uygulanmıştır. Sonuçlara bakıldığında kırıntı kauçuğu geopolimer betonu kötü etkilememiş ve kullanım oranı arttıkça betonu hafif hale getirmiştir. Buna bağlı olarak atık lastik agregasının inşaatla kullanılmaya elverişli bir malzeme olduğuna karar verilmiştir.

Kaya (2020), yapılan çalışmada F ve C tipi uçucu külün birlikte kullanılmasıyla üretilen geopolimer harçların fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. F ve C tipi uçucu külün yanında potasyum ve sodyum hidroksit malzemeleri de kullanılmıştır. Çalışmanın amacı portland çimentosu kullanımını azaltarak, yerine yeni alternatifler bulmak ve buna bağlı olarak CO₂ salınımını düşürmektir. Aynı zamanda enerji tüketimini düşürmekte hedeflenmiştir. Uçucu külür %0, 10, 20, 30, 40, 50 oranlarında kullanılarak karışımlar hazırlanmış ve bir grup karışıma %10 oranında potasyum oksit, bir grup karışıma %10 oranında sodyum oksit eklenmiştir. Karışımlara gerekli diğer malzemeler de eklendikten sonra, 40 mmx40 mmx160 mm kalıplara dökülerek toplamda 22 seri harç numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler üzerinde yayılma tablası deneyi, birim hacim ağırlık deneyi, boşluk oranı ve su emme oranı deneyi, ultra ses geçiş hızı deneyi, eğilme dayanımı deneyi ve basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Daha sonra numunelerin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri incelenmiş ve yorumlanmıştır. Deneylerin sonucunda en yüksek değerlere ulaşan bağlayıcı oranının, %60 C tipi uçucu kül ile %40 F tipi uçucu külün karışımı olduğu gözlenmiştir. Ayrıca sodyum hidroksit kullanılarak aktive edilmiş karışımların, potasyum hidroksit ile aktive edilen karışımlardan daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Bunlara bakılarak uçucu kül kullanımında optimum karışım oranının %60 C tipi uçucu kül, %40 F tipi uçucu kül olduğuna karar verilmiştir.

Kürklü (2016), yapılan çalışmada granüle yüksek fırın cürufu (GYFC) kullanılan geopolimer harcın fiziksel ve mekanik özellikleri incelenerek, malzemenin geopolimer betonda kullanılabilirliğinin ispatlanması amaçlanmıştır. Çalışmada kullanılan GYFC Karadeniz Ereğli Demir Çelik Fabrikasından temin edilmiş ve bunun yanında aktivatör olarak sodyum hidroksit, sodyum silikat çözeltileri kullanılmıştır. Numuneler hazırlanırken öncelikle bağlayıcı olan GYFC, NaOH ve sodyum hidroksit 3 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra agrega olarak GYFC eklenerek 3 dakika daha karıştırılmıştır. Hazırlanan karışım 4x4x16 cm boyutlarında kalıplara dökülerek likit/bağlayıcı ve NaOH/Sodyum silikat oranlarına göre numuneler hazırlandıktan sonra 24 saat ortam sıcaklığında küre bırakılmıştır. Mekanik olarak eğilme ve basınç dayanımı testlerine tabi tutulan numunelerin, fiziksel olarak görünür yoğunluk, görünür porozite, su emme ve birim hacim ağırlık gibi parametrelerine bakılmıştır. Testlerde en yüksek performansı 0,7 likit/bağlayıcı oranlı, NaOH ve sodyum silikat aktivatörlerinin birlikte kullanıldığı numuneler vermiştir. Çalışmanın sonucunda en ideal NaOH-Sodyum silikat oranı 2:1 veya 3:0 olarak görülmüştür. Bu sayede, gerekli bileşenler eklendiğinde granüle yüksek fırın cürufunun geopolimer betonda kullanılabilirliği kanıtlanmıştır.

Lloyd ve Rangan (2010), yapılan çalışmada uçucu kül üzerine yapılan kapsamlı çalışmanın bir derlemesi sunulmuştur. Çalışmada kullanılan uçucu küller F ve C tipi uçucu küllerdir. Derleme çalışmasında geopolimer betonun üretimi, karışımlarının oranları, özellikleri, ekonomik faydaları ve kalkınmaya yönelik geopolimer beton katkılarından bahsedilmiştir. Geopolimer betonun üretimi başlığı altında Su/geopolimer katı oranının kütlece geopolimer betonun basınç dayanımı ve işlenebilirliği üzerindeki etkisini belirlemek için testler yapılmıştır. Test numuneleri, 100x200 mm'lik silindirlerdir. Numuneler 4 saat ile 96 saat arasında 60 °C'de ısıtma işlemine tabi tutulmuştur. Bu kürlenme süresi 24 saati aştıktan sonra çok etki göstermemiştir. Kuru kürlenme, buhar kürlenmesinden daha etkili olmuştur. Yapılan testler sonucunda su/geopolimer katı oranı arttıkça işlenebilirliğin arttığı, ancak basınç dayanımının düştüğü gözlemlenmiştir. Geopolimer beton, portland çimento betonunun üretim teknikleriyle üretilmeye çalışılmış ve sonuç olarak taze geopolimer betonun genellikle yapışkan kıvamda olduğu, yaş karıştırma süresi arttıkça basınç dayanımının arttığı gözlemlenmiştir.

Memon ve ark. (2011), yapılan çalışmada farklı kür sıcaklıklarının, kendiliğinden yerleşen geopolimer betonun mukavemeti üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada F sınıfı uçucu kül, 14 mm boyutlarında kaba agregaya doymuş yüzey kuru durumunda, 5 mm boyutlarında kum ince agregaya olarak, alkali aktivatör olarak ise sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanılmıştır. Alkali karışımlar 12 M olarak hazırlanmıştır. Başlangıçta uçucu kül, ince agregaya ve iri agregaya 2,5 dakika karıştırılmıştır. Sonrasında alkali solüsyonlar eklenmiş ve karışım hazırlanmıştır. Hazırlanan karışım 10x10x10 cm kalıplara dökülmüştür. Kalıplara dökülen numunelere 24, 48, 72, 96 saat sürelerinde ve 60, 70, 80, 90 °C sıcaklıklarda kür uygulanmıştır. Numuneler üzerinde basınç dayanımı deneyi yapılmış, kür sıcaklığının ve süresinin etkisi incelenmiştir. Sonuçlara bakıldığında 70 °C sıcaklıkta 96 saat kürlenen numune en yüksek basınç dayanımını vermiştir. Numunelerde 48 saate kadar basınç dayanımı önemli ölçüde artmıştır. Lakin 96 saat kür süresi yine de en yüksek dayanımı vermiştir. 70 °C sıcaklık miktarı kürlenme için en uygun sıcaklık olarak görülmüştür.

Muhammad ve ark. (2019), yapılan çalışmada ısıtma işleminin geopolimer betona etkisi incelenmiştir. Çalışma kapsamında F sınıfı uçucu kül, en büyük tane boyutu 4,75 mm olan agregaya, sodyum hidroksit ve sodyum silikat malzemeleri kullanılmıştır. Alkali aktivatör ölçekleri 8, 10 ve 12 M olarak seçilmiştir. 90 numune hazırlanmış ve bunlardan 18 tanesi silindirik numune olarak seçilmiştir. Numuneler 60, 70, 80, 100 °C sıcaklıkta 24 saat boyunca fırında kürlenmiştir. Daha sonra test gününe kadar oda sıcaklığında bırakılmıştır. Numuneler 15x15x15 cm, 10x10 cm, 10x10x15 cm olarak 3 farklı boyutta küp ve silindirik olarak hazırlanmıştır. Numunelerin basınç dayanımını belirlemek için testler yapılmıştır. Test sonuçlarına bakıldığında aktivatör derişimi 12 M olan numune 32,10 MPa ile en yüksek basınç dayanımını vermiştir. Deneyler kapsamında daha yüksek sıcaklık kürü uygulanması, daha yüksek polimerizasyon hızı ile sonuçlanmıştır. Kür sıcaklığının basınç dayanımına etkisi incelendiğinde 80 °C sıcaklıkta kürlenen 28 günlük basınç dayanımına bakılan numune en yüksek basınç dayanımını, ortam sıcaklığında kürlenen numunenin 1 günlük dayanımı ise en düşük basınç dayanımını vermiştir. Çalışma sonucunda 12 M karışım miktarı ve 80 °C kürleme sıcaklığı numuneler için optimum olarak belirlenmiştir.

Noushini ve Castel (2016), yapılan çalışmada düşük kalsiyum içerikli uçucu kül esaslı geopolimer betona ısı kürünün etkisi incelenmiştir. Çalışma kapsamında F sınıfı

uçucu kül, ultra ince uçucu kül, yüksek fırın cürufu, aktivatör olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanılmıştır. Aktivatör karışımlarının molaritesi 12 M olarak seçilmiştir. Çalışmada kaba ve ince agregadan yararlanılmıştır. Numuneler %70 oranında F sınıfı uçucu kül, %20 oranında ultra ince uçucu kül, %10 oranında yüksek fırın cürufundan oluşturulmuştur. Numunelere kireç suyu kürlemesi, sızdırmaz ortam kürlemesi, ısı kürlemesi olmak üzere 3 çeşit kür uygulanmıştır. Kireç suyu kürü yalnızca geopolimer betonla kıyaslanmak için yapılan portland çimentolu numuneye uygulanmıştır. Isı kürü uygulanan geopolimer betonlarda ise 60, 75, 90 °C sıcaklıklar ve 8, 12, 18, 24 saat kür süreleri tercih edilmiştir. Numuneler üzerinde basınç dayanımı, statik kiriş elastisite modülü, poisson oranı, ultrasonik darbe hızı testleri yapılmıştır ve 100x200 mm'lik silindirik numuneler kullanılmıştır. Isı kürlemesi geopolimer betonun basınç dayanımını 27,4-62,3 MPa arasında artırmıştır. 75 °C sıcaklığa kadar kür süresini arttırmak geopolimer betonun basınç dayanımını artırmıştır ve portland çimentosunun basınç dayanımını düşürmüştür. F sınıfı uçucu kül içeren numunenin ortamda kürlenmesi uygun görülmemiştir.

Özen (2021), yapılan çalışmada değişik kür sıcaklıklarının ve süresinin volkanik tüf kullanılan geopolimer beton üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada Bayburt volkanik tüfü, aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat malzemeleri kullanılmıştır. İlk olarak volkanik tüf ile sodyum hidroksit karıştırılmış ve daha sonra sodyum silikat eklenmiştir. Aktivatör molaritesi 14 M olarak belirlenmiştir. Karışım gerekli sürelerde karıştırıldıktan sonra 5x5x5 cm kalıplara dökülmüştür. Numuneler 40 °C ve 80 °C sıcaklıklarda kürlenmiştir. Kür 7, 28, 56 ve 90 gün olarak uygulanmıştır. Numuneler kalıplardan çıkarıldıktan sonra basınç dayanımı ve mikro yapı analizi deneyleri uygulanmıştır. En yüksek basınç dayanımı sonucunu 40 °C sıcaklıkta 90 gün kürlenen numune 30 MPa olarak vermiştir. Kür sıcaklığı arttıkça, kürde geçirilen sürenin artmasının dayanımı düşürdüğü görülmüştür. Çalışmalar sonucunda volkanik tüf malzemesinin verdiği dayanımlara bakılarak, inşaat sektöründe kullanılabilir olduğu anlaşılmıştır.

Sarkaz (2020), yapılan çalışmada atık lastiklerin çevrede oluşturduğu kirliliği ortadan kaldırmak için yüksek fırın cürufu ile karıştırılarak numune üzerinde ölçümler yapılmıştır. Çalışma kapsamında yüksek fırın cürufu, agrega, atık lastik, alkali aktivatör ve su kullanılmıştır. Kullanılan agrega ince ve silis kumu olmak üzere 2 çeşittir. Atık

lastik ise önce 3 farklı çapta toplanmış ve bunlar eşit oranda karıştırılmıştır. Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır. Sodyum hidroksitin molaritesi 16 olacak şekilde ayarlanmıştır. Karışım hazırlanırken agrega boyutlarına göre sırası ile %5, %10 ve %15 oranlarında atık lastik agrega ile yer değiştirilmiştir. Hazırlanan numuneler önce 24 saat boyunca kalıplarda bekletilmiştir. Daha sonra 24 saat boyunca 70 °C sıcaklıkta etüvde kürlenmiş ve deney gününe kadar laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Numuneler üzerinde Basınç dayanımı, eğilme dayanımı, ultra ses geçiş hızı ve yüksek sıcaklık etkisi gibi testler uygulanmıştır. Sonuçlara bakıldığında atık lastik ile üretilen betonların 40-50 MPa gibi dayanımlara ulaştığı ve yüksek kompoziteye sahip betonlar üretilebileceği anlaşılmıştır.

Sevinç (2021), yapılan çalışmada Afşin-Elbistan uçucu külünün geopolimer betonda kullanılıp kullanılamayacağı incelenmiştir. Çalışmada Afşin-Elbistan termik santralinden alınan öğütülmüş ve öğütülmemiş uçucu kül, 0-4 mm kırma kum, şebeke suyu, aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır. Numuneler hazırlanırken aktivatör molaritesi 10M ve 14M olarak seçilmiştir. Hazırlanan numuneler 60 ve 90 °C sıcaklıkta 24 saat tutulmuştur. Bazı parametreler değiştirilerek toplam 16 farklı numune hazırlanmıştır. Numuneler üzerinde birim hacim ağırlığı, ultrasonik ses geçiş hızı, basınç dayanımı, XRD ve TGA analizleri deneyleri uygulanmıştır. Öğütülmüş uçucu külün kullanıldığı numuneler daha fazla basınç dayanımı vermiştir. Ayrıca kür sıcaklığının artması ve aktivatör oranlarının yükselmesi basınç dayanımını arttırmıştır. Öğütülmüş uçucu kül kullanımı boşlukları azaltmış ve buna bağlı olarak ses miktarı yükselmiştir. Sonuç olarak Afşin-Elbistan külünün geopolimer betonda kullanılabilirliği kanıtlanmıştır.

Söylemez (2022), yapılan çalışmada Atık lastik ince agrega şeklinde kullanılarak oluşturulan betonun mekanik ve bazı durabilite özellikleri araştırılmıştır. Çalışmada malzeme olarak portland çimentosu, silis dumanı, köpük ajanı, atık lastik kauçuğu agregası ve Kastamonu şebeke suyu kullanılmıştır. Portland çimentosu %0 ve %20 oranlarında silis dumanı ile kum ise %100 oranında atık lastik agregası ile yer değiştirilmiştir. Köpük ajanı her bir silis dumanı oranı için %20, %40 ve %60 oranlarında kullanılmıştır. Karışımlar su/bağlayıcı oranı 0,75 olarak hazırlanmış ve kalıplara yerleştirilmiştir. Kalıptan çıkarılan numuneler 28 gün boyunca 20 °C suda küre bırakılmıştır. Hazırlanan numuneler üzerinde taze hal, basınç dayanımı, eğilme

dayanımı, ısı iletkenlik, porozite ve su emme, kuruma büzülmesi, kapilarite, aşınma direnci, donma-    nme ve asit testleri yapılmıştır.

Topçu ve Sofuo lu (2020), yapılan çalışmada pres filtre atı ı ve uçucu kül kullanılarak elde edilen numunelerin farklı kür koşulları, elek çapları ve su içeriğindeki özellikleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında pres filtre atı ı, uçucu kül, standart kum, karma suyu ve alkali aktivatörler kullanılmıştır. Pres filtre atı ı olarak Eskişehir şeker fabrikasından alınan atıklar tercih edilmiştir. Alkali aktivatör olarak ise sodyum silikat kullanılmıştır. Numuneler hazırlanırken %10-%90 ve %20-%80 oranlarında pres filtre atı ı-uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu kül boyutları 75  m elekten geçen ve geçemeyen olarak birbirinden ayrılmıştır. Numuneler hazırlandıktan sonra 24 saat hava k r  sabit tutularak 48 ve 72 saat, 120  C etüv k r  uygulanan, aynı zamanda hem 48 saat 120  C etüv k r  hem de 24 saat 140  C etüv k r  uygulanan numuneler olarak birbirinden ayrılmıştır. Numuneler üzerinde taze ve sertleşmiş birim ağırlıkları testi ve basınç dayanımı testi yapılmıştır. Deneylerin sonuçlarına bakıldığında 75  m elekten geçen uçucu k ll  numuneler geçmeyenlere göre daha ağır gelmiştir. En yüksek basınç dayanımını 72 saat sıcaklık k r  uygulanan ve 75  m elekten geçen uçucu kül içerikli numune vermiştir. Zaman geçtikçe de basınç dayanımı artmıştır. 48 saat k r uygulanan ve 75  m elekten geçemeyen uçucu k ll  numune ise zaman geçtikçe basınç dayanımını kaybetmiştir. Numunelerin ince taneli uçucu küllerden yapılması ve 72 saat k r uygulanmasının dayanımı arttıracak  düşünülmüştür.

Tuyan ve ark. (2020), yaptığı çalışmada F ve C tipi uçucu kül kullanılarak üretilen geopolimer betonların mekanik özellikleri ve yüksek sıcaklık dirençleri araştırılmıştır. Çalışmada C tipi uçucu kül (CUK) soma termik santralinden, F tipi uçucu kül (FUK) biga termik santralinden elde edilerek kullanılmıştır. Geopolimer betonla sonuçlarını karşılaştırmak adına geleneksel beton üretimi için  zmir'den CEM I 42,5 R  imentosu kullanılmıştır. Karışımlar hazırlanırken doygun yüzey kuru agregalar kullanılmıştır. 300 g FUK (YS) ve 300 g CUK (YS) kullanılarak hazırlanan karışımlar 75 C etüvde 5 gün, 300 g CUK (OS) ve 0,5 oranla 300 g 50FUK-50CUK (OS) kullanılarak hazırlanan karışımlar ortam sıcaklığında 28 gün kürlenmiştir. 300 g  imento kullanılarak hazırlanmış 0,65 ve 0,75 su/ imento oranlarına sahip karışımlar ise suda 28 gün kürlenmiştir. Karışımlardan beton numuneler hazırlanmış ve bu numuneler üzerinde TS EN 12390-3 standardına göre basınç dayanımı, TS EN 12390-6 standardına

göre yarmada çekme dayanımı, TS EN 12390-5 standardına göre eğilme dayanımı vb. deneyler uygulanmıştır. Deneyler sonucunda Basınç dayanımı 40,3 MPa, yarmada çekme dayanımı 3 MPa, eğilme dayanımı 6,1 MPa değerleriyle FUK (YS) en yüksek dayanıma sahip çıkmıştır. Aynı zamanda FUK (YS) %37 basınç dayanımı azalmasıyla en yüksek sıcaklık dayanımına ulaşmıştır. Yapılan deneylerden alınan sonuçlara göre F tipi uçucu kül kullanılarak üretilen karışım, geleneksel betonu hem mekanik hem de yüksek sıcaklık dayanımında geride bırakmıştır. C tipi uçucu kül ile üretilen beton yüksek sıcaklıklarda kürlendiğinde geleneksel betondan düşük özelliklerde, ortam sıcaklığında kürlendiğinde ise geleneksel betonlara yakın özelliklerde performans vermiştir. %50 F tipi, %50 C tipi karıştırılarak üretilen beton ortam sıcaklığında kürlendiğinde geleneksel betondan daha düşük sonuçlar vermiştir.

Wallah (2009), yapılan çalışmada ısıyla kürlenmiş uçucu kül esaslı geopolimer betonun kuruma büzülmesi incelenmiştir. Çalışma kapsamında F sınıfı uçucu kül, 20 mm, 14 mm, 7 mm boyutlarında iri ve ince agrega, sodyum silikat ve sodyum hidroksit malzemeleri kullanılmıştır. Numuneler 75x75x285 mm ve 100x200 mm olarak prizmatik ve silindirik olarak hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler 60 °C’de 24 saat süre ile kuru veya buhar kürüne maruz bırakılmıştır. Daha sonra kürden çıkan numuneler üzerinde kuruma büzülmesi deneyi yapılmıştır. En yüksek basınç dayanımını kuru sıcaklıkta kürlenene numune vermiştir. Geopolimer betonun 1 yıllık kuruma büzülmesi en fazla 100 mikro gerilim kadar ölçülmüştür. Yani ısıyla kürlenene geopolimer betonun kuruma büzülmesi çok düşük çıkmıştır.

Wallah (2010), yapılan çalışmada uçucu kül esaslı geopolimer betonun sünme davranışı incelenmiştir. Çalışma kapsamında F sınıfı uçucu kül, 20 mm, 14 mm, 7 mm, boyutlarında kaba ve ince agregalar doygun yüzey kuru durumda, sodyum hidroksit, sodyum silikat ve su azaltıcı katkı malzemesi kullanılmıştır. Numuneler 150x300 mm silindir kalıplara dökülmüştür. Kalıplara dökülen numuneler 60 °C’de 24 saat süre ile kuru ve buhar kürü olmak üzere iki çeşit küre sokulmuştur. Kürden çıkarılan numuneler üzerinde sünme testi yapılmıştır. 1 yıl boyunca ağırlık altında tutulan numune 15-29*10⁶ MPa arasında basınç dayanımı kaybetmiştir. 67 ile 40 MPa arasında basınç dayanımı kalmıştır. Numunenin basınç dayanımı arttıkça sünme miktarı azalmıştır.

Yahya ve ark. (2018), yapılan çalışmada atık lastik agregası ile yer değiştirilmiş ve oluşan geopolimer betona deniz suyunun etkisi incelenmiştir. Çalışmada uçucu kül, atık lastik, agregası, alkali aktivatörler malzeme olarak tercih edilmiştir. Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltileri kullanılmıştır. Sodyum hidroksit çözeltisinin derişimi 12 M olarak belirlenmiştir. Sodyum silikat ve sodyum hidroksitin karışım oranı 2,5 olarak ayarlanmıştır. Kırıntı kauçuk %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında iri agregası ile yer değiştirilmiştir. Numuneler 3 gün oda sıcaklığında bekletildikten sonra 28 ve 60 gün boyunca deniz suyuna maruz bırakılmıştır. Numuneler üzerinde basınç dayanımı, yoğunluk ve ağırlık değişimi testleri uygulanmıştır. Sonuçlara bakıldığında atık lastik kullanımı betondaki gözenekleri arttırdığı için daha fazla su çekmesine ve ağırlığının suya maruz kaldığında artmasına sebep olmuştur. Artan kauçuk kullanımı ise betonun basınç dayanımını olumsuz etkilemiştir.

Yaprak ve ark. (2015), yapılan çalışmada taban külü ve yüksek fırın cürufu malzemeleri 0:100, 25:75, 50:50, 75:25, 100:0 oranlarında karıştırılarak, meydana getirilen geopolimer harçların mekanik özellikleri araştırılmıştır. CEM I 42,5 R tipi çimento kullanılarak referans numune hazırlanmıştır. Aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltilerinden yararlanılmıştır. Üretilen tüm harç numunelerinde su/çimento oranı 0,35, agregası/ bağlayıcı oranı 1,25 oranında tutuşmuştur. Deneylerde 4x4x16 cm boyutlarında numuneler hazırlanmıştır. Numuneler 24 saat sonra kalıptan çıkarılmıştır ve +5 °C, +20 °C sıcaklıklarda deney gününe kadar kürlenmiştir. Biri referans, diğer 15 tanesi aktivasyon çözeltisi 16 farklı karışım için toplam 192 adet numune hazırlanmıştır. Numunelere 7. ve 28. günlerde, 3 noktalı eğilme deneyi ve tek eksenli basınç deneyine tabi tutulmuşlardır. Deneyler sonucunda aktivasyon çözeltisi ve taban külü kullanılan numunelerde basınç dayanımının düştüğü gözlemlenmiştir. Geopolimer betonda yalnızca yüksek fırın cürufu kullanıldığında aktivasyon çözeltisi kullanılırsa, betonun basınç dayanımında iyileşme olduğu kararına varılmıştır. %100 oranında taban külü kullanıldığında, 20 °C sıcaklıkta kürlenmiş numunelerin 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları arasındaki fark azalmaktadır. Ayrıca hazırlanan numunelerin tamamında, sodyum silikat çözeltisi %25 oranından yukarıda kullanıldığında, mekanik özellikleri düşürmüştür. Buna bağlı olarak sodyum silikat çözeltisi oranının, %25 oranından düşük olması önerilmiştir.

Yaprak ve Kaplan (2016), yapılan çalışmada farklı kür sıcaklıklarının ve sürelerinin, taban külü ikameli geopolimer betonlar üzerindeki mekanik ve termal etkisi incelenmiştir. Çalışma kapsamında yüksek fırın cürufu, taban külü, referans numune için çimento, aktivasyon için sodyum silikat ve sodyum hidroksit karışımları kullanılmıştır. Yüksek fırın cürufu öğütülmemiş halde ve taban külü Çayırhan termik santralinden getirilmiştir. Karışımlarda 0-2 mm agrega kullanılmıştır. Numunelerde kullanılan taban külü oranları %0, 25, 50, 75, 100 olarak uygulanmıştır. Kür yöntemleri ise 20 °C sıcaklıkta 28 gün, 30 °C sıcaklıkta 36 saat, 50 °C sıcaklıkta 96 saat olmak üzere 3 çeşit olarak seçilmiştir. Sonuçlara bakıldığında taban külü ve yüksek fırın cürufu için kürün yüksek ısıda olması gerektiğini ve uzun hidrasyon süresine ihtiyaç duyulduğunu görülmüştür. Bu sebepten en düşük basınç dayanımı 30 °C sıcaklıkta 36 saat kürlenmiş numunede görülmüştür. Benzer durumlar eğilme dayanımında da görülmüş ve düşük sıcaklıkta kısa süreli kür yetersiz kalmıştır. Çalışma neticesinde hızlandırılmış kür işleminin etkili bir yöntem olduğu kabul edilmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde yapılacak deneylerden ve deneylerde kullanılacak olan geopolimer betonun üretim şeklinden, kullanılan malzemelerden, kullanılan malzeme özelliklerinden bahsedilmiştir.

3.1. Kullanılan Malzemeler

3.1.1. Uçucu kül

Yapılan deneysel çalışmada Çatalağzı Termik Santralinden gelen F sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan uçucu kül Şekil 3.1’de, malzemenin kimyasal analizi ise Çizelge 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Deneylerde kullanılan uçucu kül

Çizelge 3.1. Uçucu kül kimyasal analizi

Kimyasal Analiz	Değerler (%)
SiO ₂	58,75
Al ₂ O ₃	25,24
Fe ₂ O ₃	5,76
S+A+F	89,75
CaO	1,46
MgO	2,22
SO ₃	0,08
K ₂ O	4,05
Na ₂ O	0,60
KK	1,12
Cl	0,015

3.1.2. Kum

Yapılan çalışmada agrega olarak Konya yöresinden temin edilen 0-5 mm boyutlarında kuru kum kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan kum Şekil 3.2’de verilmiştir.

**Şekil 3.2.** Deneylerde kullanılan kuru kum

3.1.3. Atık lastik

Deneylerde 0-5 mm boyutlarında ve $0,5 \text{ gr/cm}^3$ özgül ağırlığa sahip atık lastik kullanılmıştır. Kullanılan atık lastik geri dönüşüm tesisinden temin edilmiştir. Deneylerde atık lastik hem betonu hafifletmek hem de yalıtımını arttırmak için agregaya hacimce %10, %40, %70 ve %100 oranlarında yer değiştirilerek kullanılmıştır. Kullanılan atık lastiğin örnek bir görüntüsü Şekil 3.3 'de verilmiştir.



Şekil 3.3. Deneylerde kullanılan atık lastik

3.1.4. Pomza

Yapılan deneylerde 0-5 mm boyutlarında ve $0,83 \text{ gr/cm}^3$ özgül ağırlığa sahip pomza taşı kullanılmıştır. Pomza taşı Konya'da yerel bir firmadan temin edilmiştir. Kullanılan pomza, atık lastiğin dayanımı ile kıyaslanmak için agregaya hacimce %10, %40, %70 ve %100 oranlarında değiştirilmiştir. Şekil 3.4'de deneyde kullanılan pomzanın bir örneği verilmiştir.



Şekil 3.4. Deneylerde kullanılan pomza taşı

3.1.5. Sodyum hidroksit

Alkali aktifleştirci olarak kullanılan sodyum hidroksit uçucu küle bağlayıcılık özelliği katmaktadır. Yapılan deneysel çalışmada Konya’da bulunan Yetiş Kimya Temizlik Kozmetik San. Tic. Ltd. Şti firmasından temin edilen sodyum hidroksit (NaOH) kullanılmıştır. NaOH granül halde olup deney sırasında gerekli gramajı ayarlamak için küçültülmüştür. Deneysel çalışmalarda kullanılan NaOH Şekil 3.5’de, malzemenin kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.



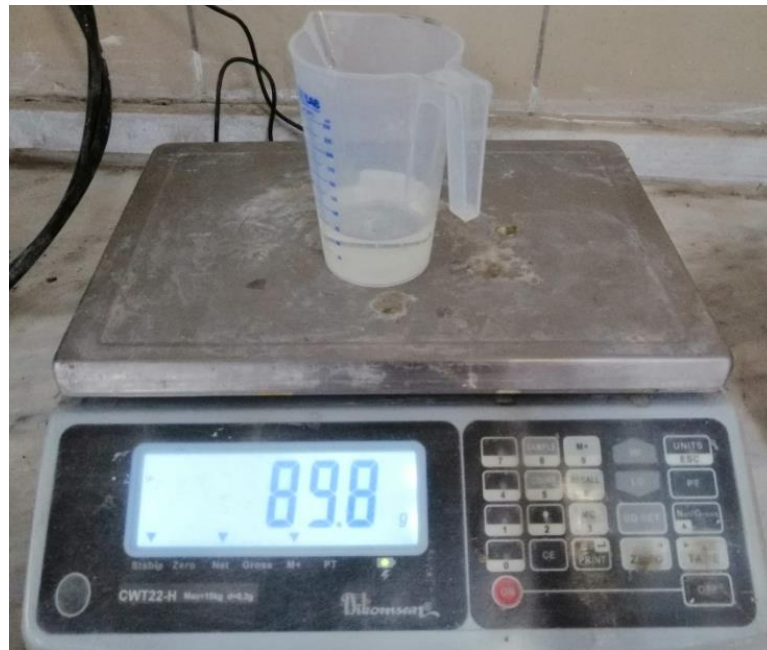
Şekil 3.5. Deneylerde kullanılan sodyum hidroksit

Çizelge 3.2. Sodyum hidroksit fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal Formülü	NaOH
Görünüm	Beyaz/Flake
Saflık (%)	98,0
Yoğunluk (gr/cm ³)	2,13
Erime Noktası (°C)	323
Kaynama Noktası (°C)	1388
Molekül Ağırlığı (g/mol)	40,01
Suda Çözünürlük (g/L)	1110

3.1.6. Sodyum silikat

Sodyum silikat, uçucu kül gibi puzolanik malzemeler ile birlikte kullanılmakta ve aktifleştirici rol almaktadır. Yapılan ön deney çalışmalarında Konya’da bulunan Yetiş Kimya Temizlik Kozmetik San. Tic. Ltd. Şti firmasından temin edilen sodyum silikat kullanılmıştır. Sodyum silikat sıvı haldedir ve viskozitesi sudan yüksektir. Ön deneylerde kullanılan sodyum hidroksit Şekil 3.6’da malzemenin kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.3’de verilmiştir.

**Şekil 3.6.** Ön deneylerde kullanılan sodyum silikat

Çizelge 3.3. Sodyum silikat fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal Formülü	Na ₂ SiO ₃
Görünüm	Renksiz sıvı
Yoğunluk (gr/cm ³)	1,43
Baume (Bé)	43,66
Na ₂ O (%)	12,555
SiO ₂ (%)	25,95
Su (%)	61,5
Modül	2,067

3.1.7. Su

Karışımların hazırlanmasında şebeke suyu kullanılmıştır. Su/bağlayıcı oranını 0,5 olarak sabit tutmak için 1 dm³ numuneye 225 gr su eklenmiştir.

3.2. Numunelerin Hazırlanması

Yapılacak araştırma kapsamında öncelikle ön deneyler için numune hazırlanmıştır (Şekil 3.7). Ön deneylerde hazırlanan numuneler üzerinde sadece basınç ve eğilme deneyleri yapılmıştır. Ön deneylerde çıkan sonuçlara göre en yüksek basınç ve eğilme dayanımını veren sodyum hidroksit/sodyum silikat oranına göre karışım oranları ayarlanmıştır. Deneyler için hazırlanan numuneler üzerinde basınç dayanımı, eğilme dayanımı, ısıl iletkenlik katsayısı ve su emme testleri uygulanmıştır. Eğilme deneyinden çıkan parça ile basınç deneyi yapılacağından 40x40x160 mm boyutlarında dikdörtgen çelik kalıp kullanılmıştır. Isıl iletkenlik deneyi için 150x150x150 mm boyutlarında kalıp kullanılarak çıkan numune deney için 3 eşit parçaya bölünmüştür. Su emme deneyi için ise 100/200 boyutlarında silindirik kalıp kullanılmıştır. İlk olarak kalıplar temizlenmiştir. Numunelerin kalıplardan kolaylıkla çıkabilmesi için kalıp yağı kullanılarak kalıplarda kuru yer kalmayacak şekilde yağlanmıştır. Deneyler için hazırlanan numuneler Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.7. Ön deneylerde hazırlanan numuneler



Şekil 3.8. Deneyler için hazırlanan numuneler

3.3. Alkali Çözeltinin Hazırlanması

Çalışma kapsamında ön deneyler için alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat seçilmiştir. Kullanılacak sodyum hidroksit katı ve granül formunda satın alındığı için öncelikle suda çözmek gerekmiştir. Ön deneylerde kullanılmak üzere her karışım oranında 1 dm^3 malzeme için gerekli sodyum hidroksit hazırlanmıştır. Ön deneylerde toplam 5 karışım oranı vardır. Her karışım oranı için hazırlanan sodyum hidroksit miktarı farklı olduğundan su/bağlayıcı oranını 0,5 değerinde tutmak için kullanılacak sodyum hidroksiti 10 M derişiminde hazırlamak için gerekli su miktarı ve sodyum silikatın içerisinde bulunan su miktarı hesaplanmış ve karışımında kullanılacak toplam su miktarından düşülmüştür. Sodyum hidroksit ve sodyum silikat 1/0, 3/1, 1/1, 1/3 ve 0/1 oranlarında karıştırılmıştır. Ön deneylere göre en iyi sonuçlar 1/0 oranında

elde edildiğinden diğer deneylerde sadece sodyum hidroksit kullanılmıştır. Alkali karışım hazırlanırken öncelikle sodyum hidroksitin yarısı eklenmiş ve 2 dakika karıştırılmıştır. Daha sonrasında diğer yarısı eklenerek 2 dakika daha karıştırılmıştır. Hazırlanan tüm sodyum hidroksit çözöldüğünde karışımda kayda değer bir ısı yükselmesi meydana gelmiş ve geopolimer beton hazırlamada kullanılmak üzere soğumaya bırakılmıştır. Soğumaya bırakılan sodyum hidroksit karışımı Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9. Hazırlanıp soğumaya bırakılan sodyum hidroksit karışımı

3.4. Geopolimer Beton Karışımının Hazırlanması ve Karışım Oranları

Yaptığımız çalışmada asıl amaç atık lastiği pomza ile kıyaslayarak kullanılabilir bir hafif malzeme olduğunu ortaya çıkarmak olduğu için atık lastik ve pomza, agrega ile eşit oranlarda yer değiştirilmiştir. Ön deneylerde her karışım oranı için 1 dm³, deneylerde ise her karışım oranı için toplamda 7 dm³ numune hazırlanmıştır. Her bir karışım oranını tek seferde hazırlamak için 20 dm³ beton mikseri kullanılmıştır. Öncelikle referans numune hazırlanmıştır. Referans numunede kullanılan kum %10 miktarı hacmi belirli bir kap içerisine konularak, aynı hacimdeki atık lastik ve pomza ile yer değiştirilmiştir. Bu sayede diğer karışım oranları için gerekli atık lastik ve pomza miktarı hesaplanmıştır. Her karışım oranı için toplamda 3150 gr uçucu kül, 1575 gr su, 630 gr NaOH kullanılmıştır. Agregası, atık lastik ve pomza miktarı hacimce değiştirilen oranlara göre farklılık göstermiştir. Karışımlar hazırlanırken öncelikle tartılan agrega, atık lastik, pomza ve uçucu kül gerekli miktarlarda miksere eklenerek 2 dakika düşük devirde karıştırılmıştır. Homojen haldeki malzeme üzerine hazırlanan sodyum hidroksit

çözültisi eklenmiş ve 1 dakika düşük devirde, 3 dakika ise orta devirde karıştırılmıştır. Mikser durdurulmuş ve kenarlara biriken malzeme bir mala yardımıyla orta bölüme alınarak 2 dakika daha orta devirde karıştırılmaya devam edilmiştir. Karışımlarda her numune çeşidi için 40x40x160 mm boyutlarında olacak şekilde 3 adet, toplamda 27 adet basınç deneyi ve eğilme deneyi numunesi, 150x150x150 mm boyutlarında olacak şekilde toplam 9 adet ısı iletkenlik deney numunesi, 100/200 mm boyutlarında olacak şekilde toplam 9 adet su emme deney numunesi hazırlanmıştır. Yapılan çalışmalarda geopolimer betonda bağlayıcı malzeme olarak F sınıfı uçucu kül kullanıldığında 60-90 °C arasında kürün uygun olduğu kanaatine varılmıştır. Sıcaklık kürünün süresi arttıkça geopolimer betondaki dayanımın yükseldiği görülmüştür. Ancak 24 saatten sonra gerçekleşen dayanım artışları, bu sürenin içerisinde gerçekleşen dayanım artışlarından daha azdır. Hazırlanan numunelere 6 saat 80 °C sıcaklığında etüv kürü uygulanmış ve etüvden çıkan numuneler 28 gün boyunca laboratuvar koşullarında küre bırakılmıştır. Yapılan isimlendirmede birinci ve ikinci harf karışımında kullanılan agregaların baş harfi, devamında gelen rakam ise ikinci agreganın birinci agrega ile hacimce yüzde kaç oranında yer değiştiğini simgelemektedir. Örneğin AA10 numunesi %10 atık lastik kullanılan numune iken, AP10 numunesi %10 pomza kullanılan numunedir. Şekil 3.10'da karışımın hazırlanması gösterilmiştir. Çizelge 3.4'de ön deneylerde ve Çizelge 3.5'de deneylerde kullanılan 1 dm³ için karışım oranları verilmiştir.



Şekil 3.10. Karışımın hazırlanması

Çizelge 3.4. Ön deneylerde 1 dm³ karışım için kullanılan malzeme miktarları

Numune	Uçucu kül (g)	Su (g)	Sodyum hidroksit (g)	Sodyum silikat (g)	Agrega (g)
1	450	225	90	0	1350
2	450	225	67,5	22,5	1350
3	450	225	45	45	1350
4	450	225	22,5	67,5	1350
5	450	225	0	90	1350

Çizelge 3.4. Deneylerde 1 dm³ karışım için kullanılan malzeme miktarları

Numune	Uçucu kül (g)	Su (g)	Sodyum hidroksit (g)	Agrega (g)	Atık lastik (g)	Pomza (g)
RN	450	225	90	1350	0	0
AA10	450	225	90	1215	42,85	0
AA40	450	225	90	810	171,43	0
AA70	450	225	90	405	300	0
AA100	450	225	90	0	428,57	0
AP10	450	225	90	1215	0	71,43
AP40	450	225	90	810	0	285,71
AP70	450	225	90	405	0	500
AP100	450	225	90	0	0	714,29

3.5. Deneyler

3.5.1. Taze beton deneyleri

3.5.1.1. Mini yayılma deneyi

Yayılma deneyindeki amaç hazırlanan beton karışımının işlenebilirliğini ve akışkanlığını ölçmektir. Deney esnasında 70 ve 100 mm boyutlarında üst ve alt çaplara sahip 60 mm yüksekliğinde bir kesik koni kullanılmıştır. Deney ASTM C1611 standardına uygun gerçekleştirilmiştir. Mikserde hazırlanan karışım kesik konu içerisine dökülmüştür. Kalıba herhangi bir vurma işlemi veya sıkıştırma işlemi uygulanmamıştır. Kalıp yavaşça kaldırılmış ve kesik koni içerisindeki numunenin yayılımının durması beklenmiştir. Yayılım durduktan sonra oluşan yuvarlak şeklin x ve y doğrultusunda

Çapları ölçülmüştür. Ölçülen iki çapın ortalaması alınarak yayılma çapı bulunmuştur. Yapılan deneyin rneği Şekil 3.11' de gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Mini kme-yayılma deney rneği

3.5.1.2. Birim hacim ağırlık deneyi

Birim hacim ağırlık deneyinde, hazırlanan geopolimer beton karışımı hacmi bilinen 150x150x150 mm boyutlarındaki numune kalıbına dökülmüştür. Bu kalıplardan çıkan numuneler sonrasında ısı iletkenlik deneyi için kullanılmıştır. Karışım fazla akışkan olduğundan numunelere herhangi bir şişleme işlemleri uygulanması gerekmemiştir. Kalıplar bir miktar karışım ile doldurulduktan sonra az miktarda titreşim uygulanmış ve kalan boş kısımda karışım eklenmiştir. Karışımın ağırlığı tartılmış ve kalıbın hacmine bölünerek her bir karışım oranı için birim hacim ağırlıklar hesaplanmıştır. Birim hacim ağırlık deney rneği Şekil 3.12'de gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Birim hacim ağırlık deney rneği

3.5.2. Sertleşmiş beton deneyleri

3.5.2.1. Basınç dayanımı deneyi

Basınç dayanımı deneyi TS EN 196-1 standartlarına uygun gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımı deneyi için, eğilme dayanımı deneyinde kullanılmak üzere hazırlanan 40x40x160 mm boyutlarındaki numunelerin, eğilme deneyi sonrası ikiye bölünen parçaları üzerinde 40x40 mm basınç başlığı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımı uygulanan yükün yüzey alanına bölünmesi ile F/A şeklinde hesaplanmıştır. Öncelikle deney aleti temizlenmiştir. Deneye tabi tutmak için her numuneden 3 adet kırılmıştır ve çıkan değerlerin ortalaması alınmıştır. Numunelerin deney düzeneğine denk gelen yüzeylerinde pürüz olmayacak şekilde ayarlanmış ve gevşek çıkıntılar giderilmiştir. Numune tam kırıldığı anda deney aletindeki en yüksek değer okunmuş ve kaydedilmiştir. Değerler “kN” olarak ölçülmüştür. Kullanılan deney düzeneğinin görüntüsü Şekil 3.13’de gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Basınç dayanımı deney düzeneği

3.5.2.2. Eğilme dayanımı deneyi

Eğilme dayanımı deneyi 40x40x160 mm boyutlarındaki numuneler üzerinde ve TS EN 196-1 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar her karışım

oranı için 3 adet numunenin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Eğilme dayanımı deneyinde kırılan numune parçası üzerinde daha sonra basınç dayanımı deneyi uygulanmıştır. Basınç dayanımı deneyinde olduğu gibi öncelikle deney aleti temizlenmiştir. Deneyde kullanılacak numunenin pürüzsüz olan yüzeyi belirlenmiş ve makinedeki mesnetler üzerine yerleştirilmiştir. Makinada bulunan iki mesnet arası mesafe 10 cm olarak ayarlanmıştır. Numune olabildiğince mesnetler üzerinde ortalanmaya çalışılmıştır. Deney başladıktan sonra numune kırılıncaya kadar yük uygulanmış ve numune kırıldığı andaki değer kaydedilmiştir. Her karışım çeşidinden 3 adet numune deneye tabi tutulmuş ve bu sonuçların ortalaması alınmıştır. Eğilme dayanımı deney düzeneği Şekil 3.14’de gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Eğilme dayanımı deney düzeneği

3.5.2.3. Su emme deneyi

Betonda yetersiz sıkıştırmadan ya da kullanılan malzemeden dolayı gözenekler oluşabilir. Bu gözeneklere su girerek kış aylarında donarak betonu çatlatabilmekte ve betona zarar verebilmektedir. Betonu oluşabilecek bu boşluklar açısından kontrol etmek adına su emme deneyi yapılmıştır. Su emme deneyi ASTM C642 standardına uygun olarak yapılmıştır. Deneylerde 100/200 mm boyutlarındaki silindirik numunelerden kesilen, 100/50 mm boyutlarında silindirik parçalar kullanılmıştır. Sonuçlar her karışım oranı için 3 adet numunenin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Bunun için önce

numuneler etüvde 105 °C sıcaklıkta 24 saat bekletilmiş ve kuru ağırlığı ölçülmüştür. Sonrasında 24 saat su içerisinde bekletilerek su emmiş ağırlığı tartılmıştır. Su emme oranı Denklem 3.1'den hesaplanmıştır. Numunelerin su emme esnasında örnek bir görüntüsü Şekil 3.15'de gösterilmiştir.

$$\text{Su emme oranı (\%)} = ((B-A) / A) * 100 \quad (3.1)$$

A = Kuru ağırlık (g)

B = Suyu doymuş ağırlık (g)



Şekil 3.15. Su emme deney düzeneği

3.5.2.4. Isıl iletkenlik katsayısı deneyi

Isıl iletkenlik deneyi ASTM C518 ve EN 12667 standartlarına göre yapılmıştır. Deney anında 150x150x150 mm boyutlarında küp numunelerden kesilen, 150x150x50 mm boyutlarında plaklar kullanılmıştır. Sonuçlar her karışım oranı için 3 adet numunenin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Hazırlanan numuneler ölçüm için Kayseri Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezine gönderilmiştir. Ölçümde kullanılmış olan cihaz Şekil 3.16'da gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Thermtest HFM-100 deney aleti

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

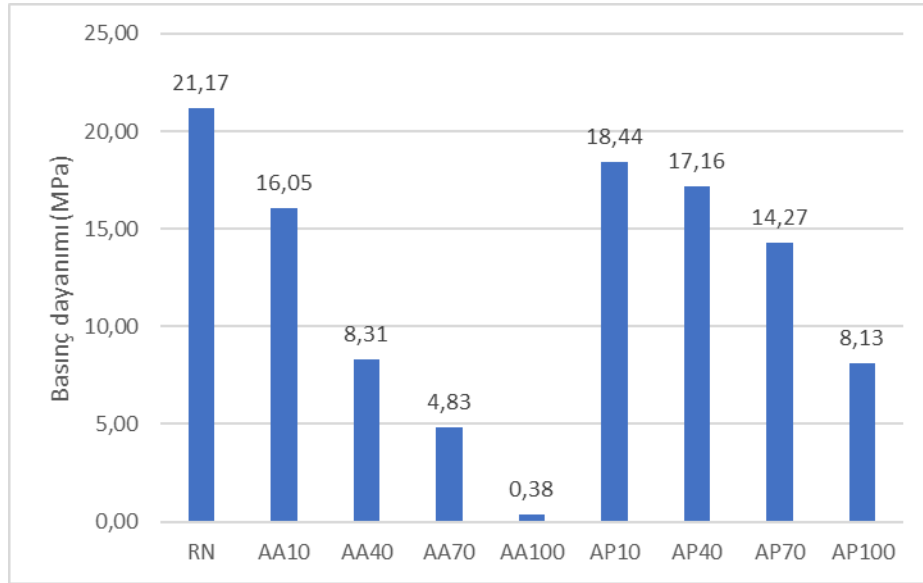
Bu bölümde elde edilen sonuçlar gösterilmiş ve sonuçlar üzerinden geopolimer betonda kullanılan atık lastiğin hafif agregası olarak çeşitli özellikler bakımından pomza ile kıyası yapılarak kullanılabilir olup olmadığı değerlendirilmiştir.

4.1. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

Sonuçlara göre, en yüksek basınç dayanımı değeri RN numunede ve en düşük basınç dayanımı değeri AA100 numunesinde çıkmıştır. AA100 numunesinde basınç dayanımındaki ani düşüşün sebebinin, atık lastik ile uçucu külün, atık lastik haricinde başka bir agregası olmadığından uçucu kül ile düzgün yapışmaması olduğu düşünülmektedir. Sonuçlar kıyaslandığında pomza ve atık lastik kullanım oranı yükseldikçe dayanımın belirli miktarlarda düştüğü gözlenmiştir. Lakin pomza ve atık lastik hafif agregası olarak değerlendirileceğinden dayanımın düşmesi bir sorun teşkil etmemektedir. Ayrıca %40 kullanım oranına kadar atık lastik ve pomza kullanılan numuneler arasındaki dayanım farkı çok fazla açılmadığından, düşük miktarda dayanım gerektiren yerlerde %40 atık lastik oranından yararlanılarak atık lastik hafif beton içerisinde agregası olarak değerlendirilebilir. Sonuçlar Çizelge 4.1’de ve grafik olarak Şekil 4.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Basınç dayanımı değerleri (MPa)

Numune adı	Basınç dayanımı (MPa)
RN	21,17
AA10	16,05
AA40	8,31
AA70	4,83
AA100	0,38
AP10	18,44
AP40	17,16
AP70	14,27
AP100	8,13



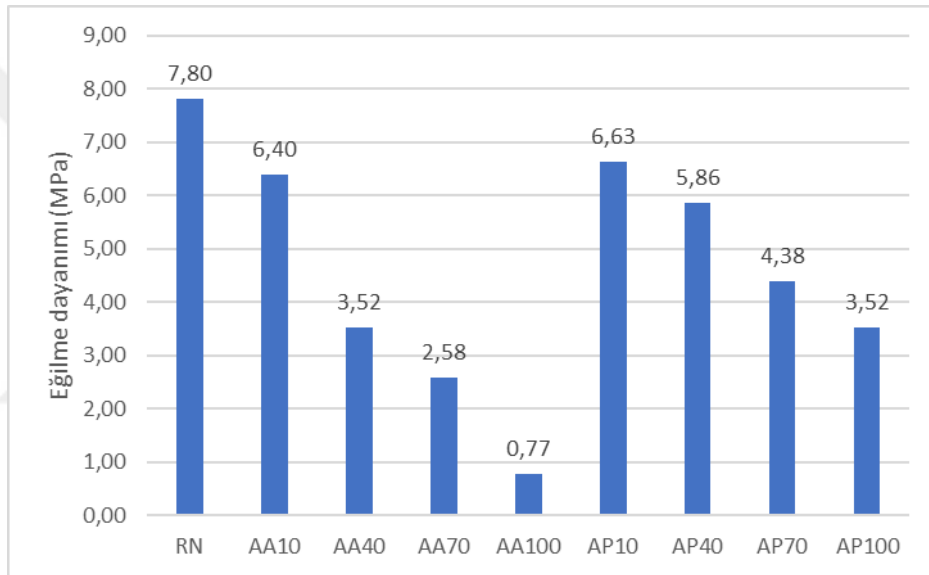
Şekil 4.1. Numunelerin 28. gündeki basınç dayanım sonuçları

4.2. Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları

Sonuçlara göre, en yüksek eğilme dayanımı değeri RN numunesinde, en düşük eğilme dayanımı değeri AA100 numunesinde çıkmıştır. Basınç dayanımında da olduğu gibi AA100 numunesinde eğilme dayanımının diğer numunelere oranla fazla düşüşünün sebebinin, atık lastiğin pürüzsüz yüzeyinden dolayı uçucu kül ile düzgün bir yapışma sağlayamaması olduğu düşünülmektedir. Sonuçlar kıyaslandığında pomza ve atık lastik kullanım oranı yükseldikçe eğilme dayanımının belirli miktarlarda düştüğü gözlenmiştir. Pomza kullanılan numunelerin eğilme dayanımlarının, atık lastik kullanılan numunelerden yüksek çıktığı gözlenmiştir. Ancak pomza ve atık lastik kullanılan numunelerdeki eğilme dayanımı farkı %70 kullanım oranına kadar çok fazla olmamıştır. Bu sebepten dolayı düşük dayanım gerektiren yerlerde hafif beton içerisinde agrega olarak %70 kullanım oranına kadar atık lastikten yararlanılabilir. Sonuçlar Çizelge 4.2’de ve grafik olarak Şekil 4.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Eğilme dayanımı değerleri (MPa)

Numune adı	Eğilme dayanımı (MPa)
RN	7,80
AA10	6,40
AA40	3,52
AA70	2,58
AA100	0,77
AP10	6,63
AP40	5,86
AP70	4,38
AP100	3,52

**Şekil 4.2.** Numunelerin 28. gündeki eğilme dayanım sonuçları

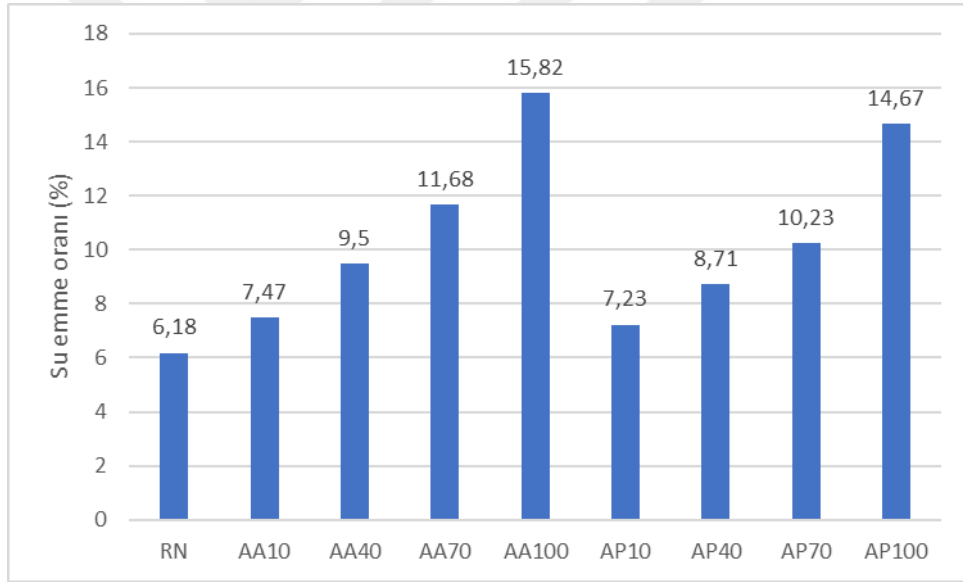
4.3. Su Emme Deney Sonuçları

Sonuçlara göre en yüksek su emme oranına sahip numune AA100 numunesidir. En düşük su emme oranına sahip numune ise referans numunedir. Atık lastik ve pomza kullanım oranları yükseldikçe su emme oranlarında artış gözlenmiştir. Literatüre bakıldığında pomzanın çok fazla su emdiği bilinmektedir. Buna karşın atık lastik pomzayı su emme oranında geçmiştir. Su emme oranlarının yüksek çıkması, numunedeki gözeneklerin fazla olduğunu göstermektedir. Bu nedenle en çok gözeneğe, yani en çok su emme oranına sahip numune en yüksek yalıtım miktarına sahip olacaktır. Deneylerden çıkan sonuçlara bu bağlamda değerlendirildiğinde en yüksek yalıtıma

sahip olacak numunenin AA100 olması beklenmektedir. Sonuçlar Çizelge 4.3’de, grafik olarak kıyaslanması ise Şekil 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.3. 28.gündeki su emme oranları (%)

Numune adı	Kuru ağırlık (g)	Doygun ağırlık (g)	Su emme oranı (%)
RN	818,47	869,07	6,18
AA10	795,87	855,33	7,47
AA40	709,87	777,33	9,5
AA70	601,47	671,73	11,68
AA100	472,73	547,53	15,82
AP10	790,73	847,93	7,23
AP40	734,93	798,93	8,71
AP70	656,4	723,53	10,23
AP100	572,67	656,67	14,67



Şekil 4.3. 28. gündeki su emme oranlarının karşılaştırılması

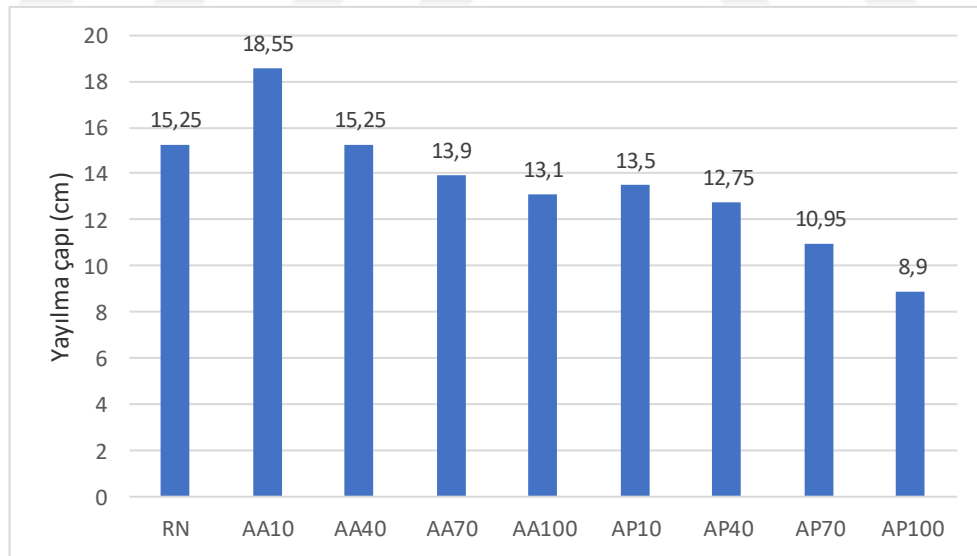
4.4. Mini Yayılma Deney Sonuçları

Numuneler arasında en yüksek yayılma çapı AA10 karışımına, en düşük yayılma çapı ise AP100 karışımına aittir. %10 atık lastik kullanılan AA10 numunesinde, lastik yüzeyi pürüzsüz olduğundan agreganın atık lastiğe tutunması zorlaşmış ve işlenebilirlik artmıştır. Ancak kullanılan atık lastik miktarı yükseldikçe, lastikler birbirine yapışmaya başlamış ve işlenebilirlik, kullanım oranı arttıkça azalmıştır. Agrega yerine pomza

kullanılan numunelerde ise pomzanın su emme kabiliyetinin fazla olmasından dolayı artan kullanım oranlarında işlenebilirliğin azaldığı dolayısıyla yayılma çaplarının da azaldığı görülmüştür. Hazırlanan 9 karışımın işlenebilirliğini ve diğer özelliklerini kıyaslayabilmek için su/bağlayıcı oranı sabit tutulduğundan, pomza miktarı arttıkça su emme miktarı artmış ve buna bağlı olarak işlenebilirlik azalmıştır. Elde edilen yayılma çapları Çizelge 4.4’de, grafik olarak Şekil 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Mini yayılma deney sonuçları

Numuneler	Yayılma çapı (cm)
RN	15,25
AA10	18,55
AA40	15,25
AA70	13,9
AA100	13,1
AP10	13,5
AP40	12,75
AP70	10,95
AP100	8,9



Şekil 4.4. Yayılma çaplarının karşılaştırılması

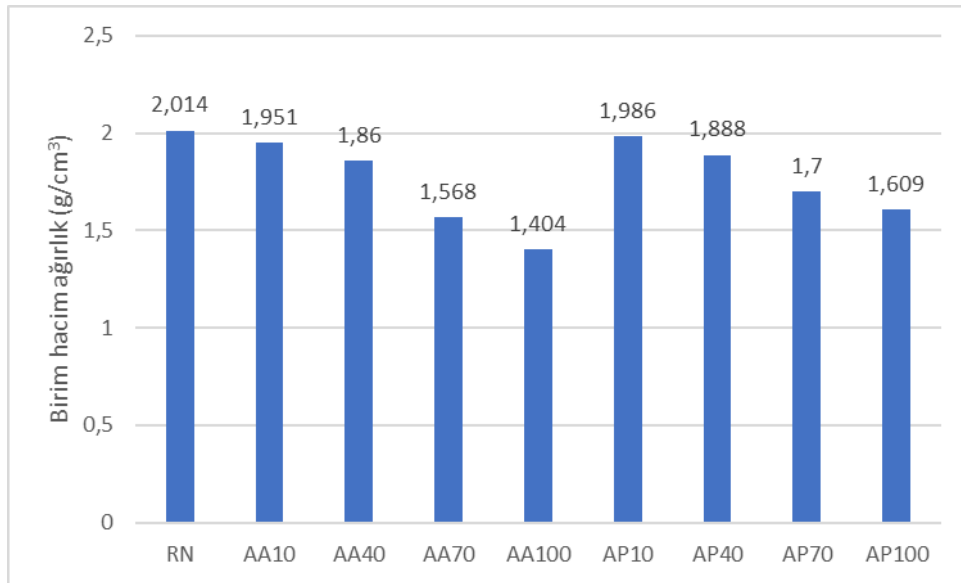
4.5. Birim Hacim Ağırlık Deney Sonuçları

Sonuçlara bakıldığında, en yüksek birim hacim ağırlık değeri RN, en düşük birim hacim ağırlık ise AA100 numunesine aittir. Atık lastik ve pomza birer hafif

agrega olduğundan kullanım oranları arttıkça betonun birim hacim ağırlığı azalmıştır. TS EN 206 standartlarına göre hafif beton birim hacim ağırlığının 0,8 ile 2,0 gr/cm³ arasında olması istenmektedir. Birim hacim ağırlığı 0,3-0,8 gr/cm³ arasında olanlar yalıtım betonu, 0,8-1,4 gr/cm³ arasında olanlar orta mukavemetli hafif beton, 1,4-2,0 gr/cm³ arasında olanlar ise taşıyıcı hafif beton olarak adlandırılmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre, tamamen kum kullanılan RN numunesi hariç, atık lastik ve pomza kullanılan karışımlar birim hacim ağırlıkları bakımından taşıyıcı hafif beton sınıfına girmektedir. Karışımların birim hacim ağırlık değerleri Çizelge 4.5’de, grafik olarak Şekil 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 4.5. Birim hacim ağırlık deney sonuçları

Numuneler	Birim hacim ağırlık (gr/cm ³)
RN	2,014
AA10	1,951
AA40	1,860
AA70	1,568
AA100	1,404
AP10	1,986
AP40	1,888
AP70	1,7
AP100	1,609



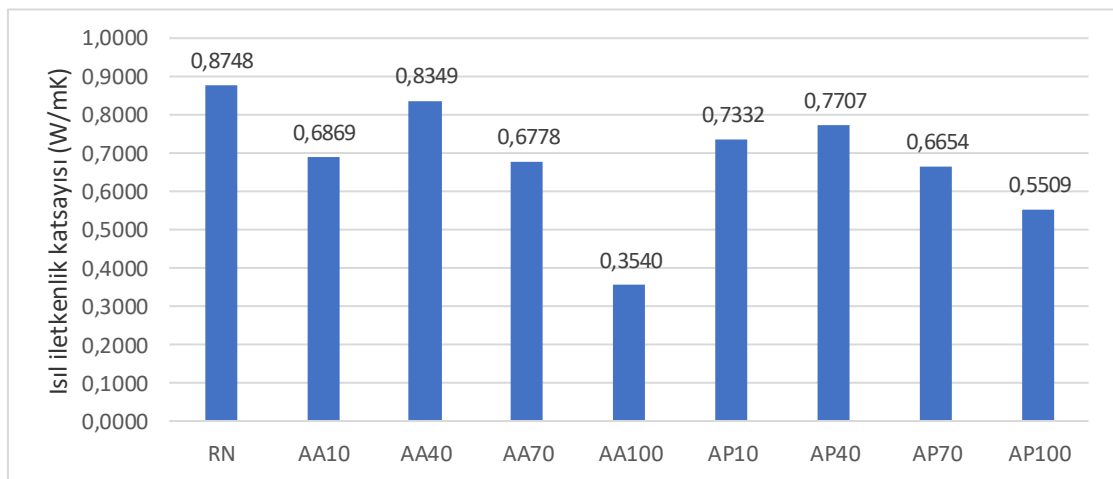
Şekil 4.5. Birim hacim ağırlık deney sonuçlarının karşılaştırılması

4.6. Isıl İletkenlik Deney Sonuçları

Sonuçlar incelendiğinde, en iyi yalıtım sağlayan numune AA100 numunesi, en kötü yalıtım sağlayan numune ise beklendiği gibi referans numune olmuştur. Her sonuç için 3 adet numuneden elde edilen sonuçların ortalaması alınmıştır. AA40 ve AA70 numuneleri görüldüğü gibi yalıtım özelliği olarak AP40-AP70 numunelerinin gerisinde kalmıştır. Geopolimer beton içerisinde atık lastik kullanımı arttıkça, betondaki yalıtım özelliğinin yükseldiğini söyleyebiliriz. Numunelerin ısı iletkenlik katsayısı değerleri Çizelge 4.6’da, grafik olarak Şekil 4.6’da verilmiştir.

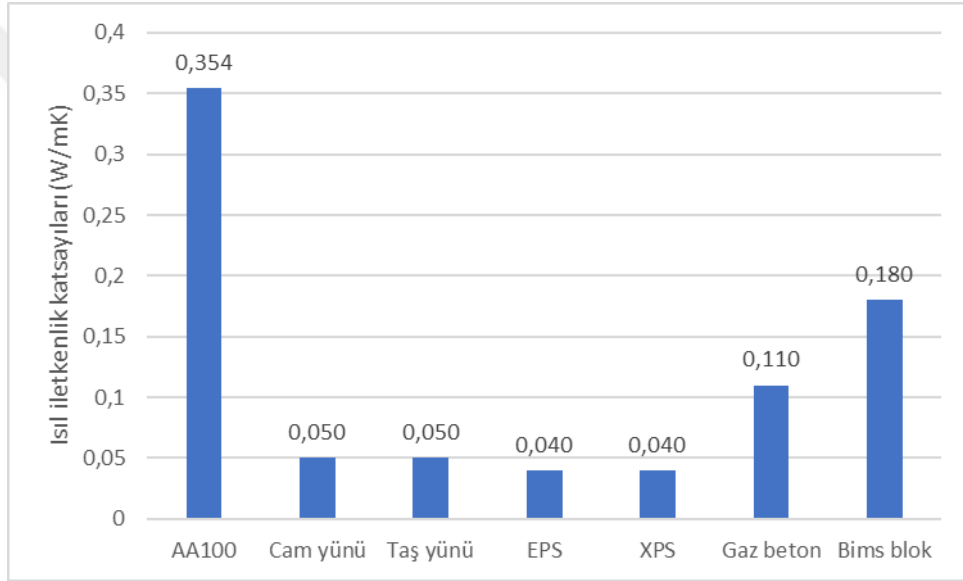
Çizelge 4.6. Isıl iletkenlik deney sonuçları

Numuneler	Isıl iletkenlik katsayıları (W/mK)
RN	0,8748
AA10	0,6869
AA40	0,8349
AA70	0,6778
AA100	0,3540
AP10	0,7332
AP40	0,7707
AP70	0,6654
AP100	0,5509



Şekil 4.6. Isıl iletkenlik deney sonuçlarının karşılaştırılması

AA100 numunesi, ısı iletkenlik katsayısı bakımında diğer kullanım oranlarına göre en düşük numune olması yönüyle pomzaya alternatif olarak hem hafif beton tasarımı hem de geopolimer hafif betonda değerlendirilebileceği kanıtı oluşmuştur. Bununla birlikte Şekil 4.7’ de uygulamada tercih edilen ve iyi bilinen yalıtım malzemeleri ile karşılaştırıldığında ısı iletkenlik katsayısının daha yüksek olduğu görülmüştür. TS825 yönetmeliğinde dış duvar elemanları için ısı iletkenlik katsayısı değeri 0,130 W/mK olarak verilmiştir. Atık lastik içeren hafif geopolimer harcın diğer yalıtım malzemeleri yerine kullanılması pek uygun görülmezse de pomza yerine kullanımı uygundur. Yalıtım malzemelerinin ısı iletkenlik katsayılarının karşılaştırılması Şekil 4.7’ de verilmiştir.



Şekil 4.7. Atık lastiğin diğer yalıtım amacıyla kullanılan malzemelerle karşılaştırılması

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışma kapsamında atık lastiğin hafif geopolimer beton üretiminde kullanılabilirliğini değerlendirmek adına, atık lastik ve pomza %10, %40, %70 ve %100 oranlarda kum ile yer değiştirilmiştir. Karışımlarda bağlayıcı malzeme olarak F sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Elde edilen numuneler 6 saat 80 °C etüvde ve 28 gün laboratuvar koşullarında küre bırakıldıktan sonra basınç dayanımı, eğilme dayanımı, su emme, mini yayılma, birim hacim ağırlık ve ısı iletkenlik katsayısı deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Basınç dayanımı deneyinde atık lastik ve pomza kullanım oranları arttıkça beklendiği gibi basınç dayanımlarında azalma gözlenmiştir. AA40 numunesine kadar pomza ve atık lastik arasındaki dayanım farkı çok fazla açılmamıştır. AP70 numunesi, AA70 numunesini basınç dayanım olarak geride bırakmıştır. Bunun nedeni atık lastiğin yüzeyi pürüzsüz olduğu için bağlayıcıya iyi tutunamaması, ancak pomzanın pürüzlü yüzeyi sayesinde bağlayıcı ile iyi yapışmasıdır. AA100 numunesinde ise hiç agrega olmadığından dayanım neredeyse yok denecek kadar azdır.
- Eğilme dayanımı deneyinde basınç dayanımı deneyinde olduğu gibi atık lastik ve pomza kullanım oranı arttıkça dayanım düşmüştür. Ancak basınç dayanımındaki sonuçlardan farklı olarak AA70 ve AP70 numunelerine kadar dayanım farkı fazla açılmamıştır. Aynı zamanda eğilme deneyine tabi tutulan atık lastik numuneleri, deney esnasında kırılma bile kopmamış veya dağılmamış, daha fazla süneklik göstermiştir.
- Pomza boşluklu yapısı sayesinde su emme oranı yüksek bir malzemedir. Ancak su emme deneylerinde atık lastik kullanılan numunelerin su emme oranı pomza kullanılan numunelere göre fazla çıkmıştır. Bu durum, atık lastik içeren numunelerde boşluk oranının daha fazla olduğunu ve/veya mevcut boşlukların dışa ortama açık olduğunu göstermektedir. Atık lastiğin pürüzsüz yüzey yapısı bağlayıcı matris ile bağlantısını zayıflatmaktadır. Atık lastik içeren kompozitlerde mekanik dayanımların düşük olması ve su emme değerlerinin daha yüksek olması bu durumun bir sonucu olarak açıklanabilir. Bununla birlikte fazlaca boşluk içeren kompozitler, yalıtımı olumlu yönde etkilemektedir.

- Mini yayılma deneyinde atık lastik kullanılan numunelerin su emme oranının fazla olmasına rağmen işlenebilirliği pomzadan yüksek çıkmıştır. Bunun nedeninin pomzanın suyu boşluklarına çekmesi ama atık lastik boşluksuz yapıda olduğundan suyu dışarı bırakmasından kaynaklandığı düşünülmüştür.
- Birim hacim ağırlık deneyinde RN numunesi hariç tüm numuneler taşıyıcı hafif beton sınıfına girmektedir. Bunun nedeni atık lastiğin ve pomzanın yoğunluğunun agregadan daha düşük olmasıdır.
- %100 atık lastik kullanılan numune ile %100 pomza kullanılan numune kıyaslandığında, atık lastik kullanılan numune, pomzaya göre neredeyse 2 kat daha iyi yalıtım sağlamıştır. Bunun nedeninin, atık lastik ile bağlayıcı matris arasında oluşan boşluklardan ve atık lastiğin kendisinin de iyi bir yalıtım malzemesi olmasından kaynaklandığı düşünülmüştür.
- Literatürden de bilindiği üzere, numunelere ait birim hacim ağırlık ve ısı iletkenlik sonuçları incelendiğinde aralarında kuvvetli bir ilişki olduğu görülmüştür. Birim hacim ağırlık değerleri düştükçe ısı iletkenlik katsayısı da düşmüştür. Yani malzeme hafifledikçe yalıtım özelliği iyileşmiştir.
- %100 atık lastik içeren numuneler her ne kadar diğer numunelere göre en iyi yalıtım özelliği gösteren numuneler olsa da standartta duvar elemanlar için verilen ısı iletkenlik değerinin üzerinde kalmıştır. Bununla birlikte tez çalışması kapsamında ilgili deneylerde 5 cm. lik numuneler kullanılmıştır. Numune kalınlıklarının arttırılmasıyla yalıtım özelliğinin olumlu yönde geliştirebileceği düşünülmektedir.
- Tez çalışması kapsamında üretilen numunelerde maksimum tane büyüklüğü 5 mm alınarak geopolimer harçlarda atık lastik kullanımı, bazı deneyler üzerinden incelenmeye çalışılmıştır. Geopolimer harç yerine geopolimer beton üretilmesi durumunda maksimum tane büyüklüğünün arttırılmasının değerlendirilmesi ise, bundan sonra yapılacak tez çalışmaları için bir öneri olarak düşünülebilir.

Yapılan deneyler ve incelemeler sonucunda atık lastiğin pomza yerine hafif beton ya da harçlarda agrega olarak kullanılabilir olduğu düşünülmektedir. Atık lastiğin %100 oranında kullanılması halinde dayanımı yükseltmek için bağlayıcı değiştirilmesi veya dayanım arttıran katkıları kullanılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Ali, I. M., Naje, A. S., and Nasr, M. S., 2020, Eco-friendly chopped tire rubber as reinforcements in fly ash based geopolymer concrete, *Global NEST Journal*, 22 (3), 342-347.
- Altındal, İ., 2020, Değişik Geopolimer Beton Numunelerin Farklı Kür Koşulları Altında Basınç Dayanımının Değişimi, Yüksek lisans tezi, İstanbul Gelişim Üniversitesi.
- Anonim, 2020, *Hafif Beton Nedir? Kullanım Alanları Nelerdir?* [online], Santiyede, <https://santiyede.com/hafif-beton-nedir-kullanim-alanlari-nerelerdir/> [Ziyaret Tarihi: 25 Aralık 2022].
- Antaki, T. S. W. A., 2020, Pomza Katkılı Normal ve Hafif Betonların Kimyasal Durabilitesinin İncelenmesi, Yüksek lisans tezi, İstanbul Gelişim Üniversitesi.
- Azmi, A. A., Abdullah, M. M. A. B., Ghazali, C. M. R., Sandu, A. V., and Hussin, K., 2016, Effect Of Crumb Rubber On Compressive Strength Of Fly Ash Based Geopolymer Concrete, *MATEC Web of Conferences, IConGDM 2016*, 1-5.
- Azmi, A. A., Abdullah, M. M. A. B., Ghazali, C. M. R., Ahmad, R., Musa, L., and Rou, L. S., 2019, The Effect of Different Crumb Rubber Loading on the Properties of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete, *Joint Conference on Green Engineering Technology & Applied Computing, IOP Publishing*, 1-10.
- Başpınar, M. ve Kurtuluş, C., 2018, Kompozisyon Değişiminin Geopolimer Köpük Beton Temel özelliklerine etkisi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Uluslararası Mühendislik Teknolojileri ve Uygulamalı Bilimler Dergisi*, 1 (1), 5-11.
- Bhavani, S., Kumar, G. N., Reddy, M. S., and Rayudu, E. S., 2021, Experimental 4tudy on (eopolymer 3ubberized concrete using natural Zeolite, *International Conference on Innovations in Mechanical Sciences*, IOP Publishing, 1-10.
- Binici, H., Eken, M. ve Aksoğan, O., 2015, Cüruf, Uçucu Kül, Silis Kumu ve Pomza Esaslı Geopolimerlerin Fiziksel, Mekanik ve Radyasyon Geçirgenlik Özellikleri, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 8 (2), 12-25.
- Çavuş, M. ve Ağaoğlu, M. N., 2019, Farklı Alkalilerle Aktifleştirilen Uçucu Kül Esaslı Harçların Bazı Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi, *Journal of New Results in Engineering and Natural Sciences*, (9), 11-19.
- Durak, U., 2021, F Sınıfı Uçucu Kül Temelli Geopolimer Harç Numunelerin Isıl Kür Sonrası Dayanım Gelişiminin İncelenmesi, *2nd INTERNATIONAL BAKU CONFERENCE ON SCIENTIFIC RESEARCH*, 455-461.
- Hardjito, D., Wallah, S., Sumajouw, D. And Rangan, B., 2004, On the Development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete, *ACI MATERIALS JOURNAL*, 101 (52), 467-472.

- İlkentapar, S., ve Eren, H., 2020, EPS ile İkame Edilmiş Uçucu Küllü Geopolimer Hafif Harcın Fiziksel, Mekanik ve Isıl Geçirimsilik Özelliklerinin İncelenmesi, *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 9 (1), 28-38.
- İpek, S., Mermerdaş, K., Ulusoy, A., ve Işıker, Y., 2022, Atık lastiklerin, beton üretiminde agrega olarak kullanımının betonun taze ve mekanik özelliklerine etkisinin araştırılması, *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12 (3), 982-999.
- İpek, S., ve Mermerdaş, K., 2016, Atık lastik agregasının geopolimer harcın taze özellikleri üzerine etkisi, *16. Mas Uluslararası Avrupa Matematik, Mühendislik, Doğal ve Tıp Bilimleri konferansı*, 500-510.
- Kalaycıklı, E., İ., 2020, Farklı Geopolimer Betonların Dayanımlarının Zamanla Değişimi ve Durabilitesi, Yüksek lisans tezi, İstanbul Gelişim Üniversitesi.
- Kaya, M., 2020, Yüksek ve Düşük Kalsiyum İçeren Uçucu Küller ile Üretilen Geopolimer Harçların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 9 (2), 96-104.
- Keklik, U., 2020, Silis Dumanı İçeren Geopolimer Betonların %5 Sülfürik Asit Etkisinde Durabilite Performanslarının İncelenmesi, Yüksek lisans tezi, İstanbul Gelişim Üniversitesi.
- Kürklü, G., 2016, Oda Sıcaklığında Kür Edilen Granüle Yüksek Fırın Cürufu Geopolimer Harçların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, (16), 356-367.
- Lloyd, N. and Rangan, B., 2010, Geopolymer Concrete with Fly Ash, *Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, 55 (1), 200-216.
- Memon, F. A., Nuruddin, M. F., Demie, S., and Shafiq, N., 2011, Effect of curing conditions on strength of fly ash-based self-compacting geopolymer concrete, *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 5 (8), 342-345.
- Muhammad, N., Baharom, S., Amirah, N., Ghazali, M., and Alias, N. A., 2019, Effect of heat curing temperatures on fly ash-based geopolymer concrete, *International Journal of Engineering & Technology*, 8 (1.2), 15-19.
- Noushini, A., and Castel, A., 2016, The effect of heat-curing on transport properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete, *Construction and Building Materials*, 112, 464-477.
- Özcan, U. ve Güngör, S., 2015, Sürdürülebilir Bir Yöntem/Betonda Puzolan Kullanımı, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (15), 176-182.
- Özen, S., 2021, Volkanik tüf esaslı geopolimerlerin basınç dayanımına kür süresi ve sıcaklığın etkileri, *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11 (2), 530-536.

- Sarkaz, A., M., H., 2020, Atık Lastik Katkılı Geopolimer Betonun Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek lisans tezi, Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Sevinç, A. H., 2021, Farklı Tane Boyutuna Sahip Afşin-Elbistan Uçucu Külünün Geopolimer Hammaddesi Olarak Kullanımı, *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 8 (2), 751-765.
- Söylemez, H., 2022, Atık Lastik ve Silis Dumanı Kullanılarak Üretilen Köpük Betonların Mekanik ve Bazı Durabilite Özellikleri, Yüksek lisans tezi, Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Topçu, İ. B. ve Sofuoğlu, T., 2020, Pres Filtre Atığı ve Uçucu Kül ile Elde Edilen Geopolimer Harçların Farklı Koşullar Altında Birim Ağırlığı ve Basınç Dayanımının Değerlendirilmesi, *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 7 (2), 806-823.
- Tuyan, M., Boyacı, O., Çakır, Ö. ve Ramyar, K., 2020, Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Betonların Mekanik Özellik ve Yüksek Sıcaklık Dirençlerinin Araştırılması, *Hazır beton kongresi, İstanbul-2009*, İstanbul, 71-76.
- Wallah, S. E., 2009, Drying shrinkage of heat-cured fly ash-based geopolymer concrete, *Modern Applied Science*, 3 (12), 14-21.
- Wallah, S. E., 2010, Creep behaviour of fly ash-based geopolymer concrete, *Civil Engineering Dimension*, 12 (2), 73-78.
- Yahya, Z., Abdullah, M. M. A. B., Ramli, S. N. H., Minciuna, M. G., and Razak, R. A., 2018, Durability of Fly Ash Based Geopolymer Concrete Infilled with Rubber Crumb in Seawater Exposure, *Euroinvent ICIR 2018*, IOP Publishing, 1-6.
- Yaprak, H., Kaplan, G. ve Demir, İ., 2015, Alkalilerle Aktive Edilmiş Taban Külü ve Yüksek Fırın Cürufu Esaslı Harçların Mekanik Özellikleri, *Uluslararası Sürdürülebilir Binalar Sempozyumu, ISBS-2015*, Ankara, 337-342.
- Yaprak, H., ve Kaplan, G., 2016, Farklı Kür Koşullarının Taban Külü Katkılı Geopolimerlerin Termal ve Mekanik Özelliklerine Etkisi, *TÜBAV Bilim Dergisi*, 9 (3), 41-51.