



**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ATIK POLİETİLEN TEREFTALAT İÇEREN KENDİLİĞİNDEN
YERLEŞEN HAFİF GEOPOLİMER HARÇLARIN TAZE VE SERTLEŞMİŞ
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

MEHMET EMİN KIYAN

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

**Şanlıurfa
2024**

**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ATIK POLİETİLEN TEREFTALAT İÇEREN KENDİLİĞİNDEN
YERLEŞEN HAFİF GEOPOLİMER HARÇLARIN TAZE VE SERTLEŞMİŞ
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

MEHMET EMİN KİYAN

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Tez Danışmanı: Prof. Dr. KASIM MERMERDAŞ

**Şanlıurfa
2024**

TEŐEKKÖR

Bu tezin hazırlanma sürecinde akademik ve kişisel katkılarını benden esirgemeyen değerli danışman hocam sayın Prof. Dr. Kasım MERMERDAŞ'a, verdiği önemli bilgiler ve rehberliğinden dolayı Dr. Öğr. Üyesi Şevin EKMEN'e, çalışmam boyunca benden desteklerini esirgemeyen meslektaşlarım İnş. Mühendisi Adem BAĞLI, İnş. Yüksek Mühendisi Zülkif ASIGÇEL, İnş Mühendisi Mehmet MIZRAK'a ve Yüksek Şehir Plancısı Hakan AYDOĞDU'ya en içten duygularıyla şükranlarımı sunuyorum.

Son olarak tanıştığımız günden beri arkamda olduğunu bildiğim, hep yanımda hissettiğim kıymetli eşim İnşaat Mühendisi Fatma YILDIZ KIYAN'a bana gösterdiği sabır ve güven için çok teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

ÖZET	lxv
ABSTRACT	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ii
KISALTMALAR	iii
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	3
2.1. Yapı Malzemesi Alanında Geopolimer Üzerine Yapılan Çalışmalar	3
2.2. Polietilen Tereftalatın Geopolimer Harçlarda Değerlendirilmesi ile İlgili Çalışmalar	7
2.3. Hafif Beton Üretiminde Agrega Olarak Atık PET ve Plastik Kırıklarının Kullanılması ile İlgili Çalışmalar	10
3. GEREÇ VE YÖNTEM	13
3.1. Gereç	13
3.1.1. Agrega	13
3.1.2. Uçucu Kül	15
3.1.3. Alkali Aktivatörler	16
3.1.4. Atık Polietilen Tereftalat	17
3.1.5. Süper Akışkanlaştırıcı ve Su	19
3.2. Yöntem	19
3.2.1. Karışım Oranları ve Üretim Prosedürü	19
3.2.2. Kullanılan Test Yöntemleri	24
4. BULGULAR	33
4.1. Taze özelliklerle ilgili bulgular	33
4.2. Sertleşmiş Özelliklerle İlgili Bulgular	34
5. TARTIŞMA	36
5.1. Taze Özellikler	36
5.1.1. Mini Yayılma Deneyi	36
5.1.2. Mini V Hunisi Deneyi	36
5.1.3. Reoloji Sonuçları	37
5.1.4. Taze Birim Ağırlık Ölçümleri	38
5.2. Sertleşmiş Özellikler	39
5.2.1. Basınç Dayanım Sonuçları	39
5.2.2. Eğilme Dayanımı Sonuçları	40
5.2.3. Su Emme Oranı Ölçümleri	41
5.2.4. Kılcal Su Emme Değeri Ölçümleri	42
5.2.5. Sertleşmiş Birim Ağırlık Ölçümleri	44
5.2.6. Termal İletkenlik Sonuçları	47
6. SONUÇLAR	48
7. ÖNERİLER	49
KAYNAKLAR	50
ÖZGEÇMİŞ	55

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ATIK POLİETİLEN TEREFTALAT İÇEREN KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN HAFİF GEOPOLİMER HARÇLARIN TAZE VE SERTLEŞMİŞ ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

MEHMET EMİN KİYAN

HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışman: Prof. Dr. KASIM MERMERDAŞ

Yıl: 2024, Sayfa : 55

Bu çalışmada, farklı oranlarda polietilen tereftalat atıklarının kendiliğinden yerleşen hafif geopolimer harçların agregaları ile ikame edilebilirliği deneysel yöntemlerle araştırılmıştır. Deneylerin tamamında agrega/uçucu kül, alkali/uçucu kül, sodyum silikat/sodyum hidroksit, süper akışkanlaştırıcı/uçucu kül oranları sabit tutulup agraanın hacimce %0, %5, %10, %15,%20 ve %25 mertebelerinde atık polietilen tereftalat ile ikamesi sağlanmıştır. Kendiliğinden yerleşmeyi sağlayabilmek için laboratuvar ortamında çeşitli denemeler yapılmış ve agrega/uçucu kül, alkali/uçucu kül, sodyum silikat/sodyum hidoksit, extra su/uçucu kül ve süper akışkanlaştırıcı katkı/uçucu kül oranları sırasıyla 2, 0,6, 2, 0,05 ve 0,04 olarak seçilmiştir. Geopolimer harçların hafif olabilmesi için agraanın hacimce %25'i pomza agraası ve %75'i ise nehir kumu olarak tasarlanmıştır. Hazırlanan karışımlar taze haldeyken mini V hunisi, mini yayılma, reoloji ve taze birim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Taze deneylerden sonra numuneler 60 °C sıcaklık altında 24 saat etüvde kürlenip 27 gün oda şartlarında bekletildikten sonra basınç dayanımı, eğilme dayanımı, termal iletkenlik, su emme ve kılcal su emme testleri uygulanmıştır. Karışımların tamamında yayılma miktarı 24-26 cm aralığında değişirken polietilen tereftalat yüzdesi arttıkça mini V hunisi geçiş süresinin arttığı tespit edilmiştir. Atık polietilen tereftalatın sözü edilen yüzdelerde kullanılmasının hafif geopolimer harçların mekanik özellikleri üzerinde belirgin olumsuz etkiler yaratmadığı görülmüştür. Mekanik özelliklerinin en iyi sonuçları %5 polietilen tereftalat ikameli numuneler de ölçülmüştür. Çalışma neticesinde kendiliğinden yerleşen hafif geopolimer harçların üretiminde agrega olarak %25 seviyelerine kadar atık polietilen tereftalat eklenerek daha çevreci bir yapı malzemesi elde edilebileceği görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELE: Kendiliğinden yerleşen harç, Hafif geopolimer harç, Polietilen tereftalat, Taze özellikler, Sertleşmiş özellikler

ABSTRACT

MASTER THESIS

INVESTIGATION OF FRESH AND HARDENED PROPERTIES OF LIGHTWEIGHT SELF-COMPACTING GEOPOLYMER MORTARS CONTAINING WASTE POLYETHYLENE TEREPHTHALATE

MEHMET EMİN KİİYAN

**HARRAN UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
CİVİL ENGINEERING**

Thesis Supervisor: Prof. Dr. KASIM MERMERDAŞ

Year: 2024, Page : 55

In this study, the substitutability of different proportions of polyethylene terephthalate wastes with aggregates of self-compacting lightweight geopolymer mortars was investigated with experimental methods. In all experiments, the aggregate/fly ash, alkali/fly ash, sodium silicate/sodium hydroxide, super plasticizer/fly ash ratios were kept constant and the aggregate was replaced with polyethylene terephthalate at levels of 0%, 5%, 10%,15%, 20% and 25% by volume. In order to ensure self-compacting, various experiments were carried out in the laboratory and the ratios of aggregate/fly ash, alkali/fly ash, sodium silicate/sodium hydroxide, extra water/fly ash and super plasticizer/fly ash were 2, 0.6, 2, 0.05 and 0.04, respectively were selected. In order for geopolymer mortars to be light the aggregate is designed by volume 25% as pumice aggregate and 75% as river sand. While the prepared mixtures were fresh, mini V funnel, mini slump flow table, rheology and fresh unit volume weight experiments were performed. After fresh experiments, the samples were cured in an oven at 60 °C for 24 hours and kept at room conditions for 27 days, then compressive strength, flexural strength, thermal conductivity, water absorption and capillary water absorption tests were applied. The amount of slump flow in all mixtures remained within the range of 24-26 cm, but it was determined that as the percentage of polyethylene terephthalate increased, the mini-V funnel flow time increased. It has been observed that the use of waste polyethylene terephthalate in the mentioned percentages does not have significant negative effects on the mechanical properties of lightweight geopolymer mortars. The best results of mechanical properties were measured in samples with 5% PET replacement. As a result of the study, it was determined that a more environmentally friendly building material could be obtained by adding up to 25% waste polyethylene terephthalate as aggregate in the production of self-compacting lightweight geopolymer mortars.

KEYWORDS: Self compacting mortar, Lightweight geopolymer mortar, Polyethylene terephthalate, Fresh features, Hardened features

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Kendiliğinden yerleşen harç karışımları ile kendiliğinden yerleşen geopolimer harç karışımlarının içeriğinde bulunan malzemelerinin karşılaştırmalı hacimsel oranları	6
Şekil 2.2. Ekmen (2021) tarafından yapılan hafif geopolimer harçlarla ilgili bir çalışmaya ait basınç dayanım sonuçları	7
Şekil 2.3. PET Şişe yapımı	8
Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan pomza agregası	13
Şekil 3.2. Çalışmada kullanılan nehir kumu	14
Şekil 3.3. Agregaların elek analizinin grafiksel gösterimi	15
Şekil 3.4. Çalışmada kullanılan uçucu kül	16
Şekil 3.5. Kullanılan atık PET kırıntıları	18
Şekil 3.6. Polietilen tereftalat elek analizinin grafiksel gösterimi	19
Şekil 3.7. Karıştırma aşamaları a) Toz malzemelere ile alkali çözelti eklenmiş durum b) Karışma su eklenmiş durum c) Karışma süper akışkanlaştırıcı katkı eklenmiş nihai durum	21
Şekil 3.8. Karıştırma işlemlerinde kullanılan mikser	21
Şekil 3.9. Çalışmada kullanılan küp kalıplar	22
Şekil 3.10. Çalışmada kullanılan prizmatik kalıp	22
Şekil 3.11. Etüvde kürlenmeye bırakılan numuneler	23
Şekil 3.12. Oda şartlarında bekletilen numuneler	24
Şekil 3.13. Mini V hunisi boyutları	25
Şekil 3.14. Mini V hunisi deney aparatı	25
Şekil 3.15. Mini yayılma tablası yayılma ölçümü	26
Şekil 3.16. Çalışmada kullanılan standart reometre cihazı	27
Şekil 3.17. Basınç dayanımı testinde kullanılan küp numunelerden bazıları	28
Şekil 3.18. Basınç dayanımı test cihazı	28
Şekil 3.19. Eğilme dayanımı deneyinin yapıldığı Shimadzu marka cihaz	29
Şekil 3.20. Eğilme dayanımı testinden önce numunelerden bazıları	30
Şekil 3.21. Eğilme dayanımı testinden sonra kırılmış numunelerden bazıları	30
Şekil 3.22. Su emme deneyi için etüvde kurutulan numuneler	31
Şekil 3.23. Kılcal su emme deney düzeneği	32
Şekil 3.24. Termal iletkenlik deney düzeneği	32
Şekil 5.1. Mini yayılma ölçüm sonuçları	36
Şekil 5.2. Mini V hunisi akma süresi	37
Şekil 5.3. Kendiliğinden yerleşen hafif geopolimer harçların viskozite grafiği	38
Şekil 5.4. Taze birim ağırlık ölçüm sonuçları	39
Şekil 5.5. Basınç dayanım sonuçları	40
Şekil 5.6. Eğilme dayanım sonuçları	41
Şekil 5.7. Numunelerin su emme oranları	42
Şekil 5.8. Geopolimer harçların kılcal su emme değerleri	43
Şekil 5.9. Kılcal su emme ile su emme arasındaki korelasyon	44
Şekil 5.10. Kendiliğinden yerleşen hafif geopolimer harçların 1 günlük birim ağırlıkları	45
Şekil 5.11. Kendiliğinden yerleşen hafif geopolimer harçların 28 günlük birim ağırlıkları	45
Şekil 5.12. Numunelerin farklı koşullardaki birim ağırlıkları	46
Şekil 5.13. Taze birim hacim ağırlık ile 28 günlük birim ağırlık arasındaki ilişki	46
Şekil 5.14. Kendiliğinden yerleşen hafif geopolimer harçların termal iletkenlik değerleri	47

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Agregaların elek analiz değerleri	14
Çizelge 3.2. Uçucu külün kimyasal özellikleri	16
Çizelge 3.3. Alkali aktivatörlerin özellikleri	17
Çizelge 3.4. Atık PET kırıntılarının elek analiz değerleri	18
Çizelge 3.5. Karışım oranları	20
Çizelge 4.1. Kendiliğinden yerleşen hafif geopolimer harçların mini V hunisi, mini yayılma tablası ve birim ağırlık ölçüm sonuçları	33
Çizelge 4.2. Farklı açısal hızlarda görünür viskozite değerleri (mPa.s)	34
Çizelge 4.3. Geopolimer harçların basınç ve eğilme dayanım sonuçları	34
Çizelge 4.4. Kendiliğinden yerleşen hafif geopolimer harçların su emme, kılcal su emme ve termal iletkenlik değerleri	35
Çizelge 4.5. Kendiliğinden yerleşen hafif geopolimer harçların farklı yaş ve koşullardaki birim ağırlıkları	35



KISALTMALAR

AK : Akışkanlaştırıcı Katkı

KK : Kızdırma Kaybı

KYGH : Kendiliğinden Yerleşen Geopolimer Harç

KYH : Kendiliğinden Yerleşen Harç

KYTHB : Kendiliğinden Yerleşen Taşıyıcı Hafif Beton

M : Molarite

MPa : Megapaskal

PE : Poli Etilen

PET : Polietilen Tereftalat

PP : Poli Propilen

SE : Su Emme Oranı

SEM : Taramalı Elektron Mikroskobu

SH : Sodyum Hidroksit

SS : Sodyum Silikat

UK : Uçucu Kül

XRD : X-Ray Difraksiyonu

1. GİRİŞ

Dünyamızda meydana gelen gelişmelerle birlikte atık üretimi ve CO₂ salınımı her geçen gün artmaktadır. İnşaat sektörünün temel yapı malzemelerinden çimentonun üretimi sırasında toplam CO₂ salınımının yaklaşık %10'u oluşmaktadır (Guo ve ark., 2010). Çimentonun bu özelliği çimentosuz yapı malzemeleri aranmasına neden olmaktadır. Geopolimer kompozitler bu yapı malzemelerinin başında gelmektedir. Geopolimerler farklı kimyasal solüsyonlar ile uçucu kül, yüksek fırın cürufu, metekaolin gibi bağlayıcı toz malzemelerin reaksiyonu sonucu ortaya çıkan bir üründür. İlk olarak 1970'li yıllarda Joseph Dovidovits tarafından tanımlanmış ve alüminasilikat ile alkali solüsyon birlikte reaksiyonuyla sentezlenmiştir (Davidovits, 2011). Geopolimer, alumünosilikat çeşitlerinin alkali ortamda ayrışması, hidratasyon mamullerinin çökeltilmesi ve sertleşme ile kristal yapıların büyümesi olmak üzere üç ana süreçten geçerek oluşmaktadır (Ling, 2018).

İnsanlığın sağladığı ilerlemelerle ortaya çıkan bir diğer sorun da tüketim hızına paralel olarak artan atık ve geri dönüşüm problemidir. Polietilen tereftalat, Dünya'da plastik hammaddelerin tüketiminde hatırı sayılır yeri olan mamullerdendir. Nüfus artışı ile tüketim miktarı da gün geçtikçe artmaktadır. Depolama sorununa sahip olan katı atıklarda plastikler kütle olarak %5-9, hacimce ise %15-20 seviyesinde bulunmaktadır. PET atıklar, plastik atıkların yaklaşık %5'ini meydana getirmektedir ve her geçen gün miktarı artmaktadır (Tayyar ve Üstün, 2010). İnşaat sektörü, doğal kaynakları tüketen en büyük sektörlerden biri olduğu için plastik atığın bu alanda kullanılmasına yönelik alternatif çözümler araştırılmaktadır (Siddique ve ark., 2008). Plastiğin beton içinde değerlendirilmesinin, betonun mikro ve makro çatlaklarının yayılmasını önlemek veya en azından sınırlandırmak ve büzülmeyi azaltmak gibi yararlı etkileri vardır (Choi ve ark., 2009; Choi ve ark., 2005; Foti, 2011). Plastikleri agreganın yerine kısmi şekilde koyarak beton üretmek PET şişeleri yapı malzemesine dönüştürmenin yöntemlerinden biridir. Bu metot plastik geri dönüşümü için etkili bir yol olarak görünmesine rağmen çekme ve basınç dayanımı ile elastisite modülü gibi mekanik özellikleri açıkça azaltmaktadır (Ge ve ark., 2013; Saikia ve de Brito, 2012).

Geleneksel betona kıyasla çevresel faktörlere karşı oldukça dayanıklı, taze haldeyken, kendiliğinden sıkışabilen, erken yaşlarda daha az kusurlu olan yüksek performanslı betona kendiliğinden yerleşen beton (KYB) denmektedir (Okamura ve Ouchi, 2003). İşçilikte karşılaşılan problemler ve betonun dayanıklılık sorunları 80'li yıllarda KYB denemelerinin başlamasına neden olmuştur. İçeriği itibarıyla

uygun oranlarda akışkanlaştırıcı beton katkısı ilavesi ile su/çimento oranı ve yüksek oranda ince agregaya sahip olan KYB, geleneksel betonlardan ayrılmaktadır (Safiuddin, 2008). KYB karışımlarında silis dumanı, uçucu kül, pirinç kabuğu külü, ince öğütülmüş yüksek fırın cürufu, taş tozu ve metakaolin gibi malzemeler kullanılması yüksek hidrasyon ve büzülme olumsuzluklarını azaltmanın yanında maliyeti de düşürmektedir. Onarım, güçlendirme ve tamir işleri gibi geniş alanlardaki uygulamalarda uygun içerik ve agrega çapına sahip özel kendiliğinden yerleşen harçlar kullanılmaktadır (Gönen, 2009; Yaman ve Şahmaran, 2005).

Bir dezavantaj olduğu bilinen yapı ağırlığının azaltılabilmesi için farklı malzemeler ile günümüze kadar çeşitli karışım tasarım önerileri yapılmıştır. Bu karışımlarda hafiflikle birlikte dayanım, yüksek sıcaklık direnci, ısı yalıtım özellikleri gibi parametrelerinde elde edilmesi hedeflenmiştir. Bu teknolojinin gelişmesiyle birlikte bu taleplere yanıt veren daha hafif ve ısı yalıtımı özellikleri bakımından daha iyi olan malzemelerin kullanımı artmaktadır (Hızal, 2010). Günümüzde, bu özellikleri ile taşıyıcı hafif betonun, söz konusu taleplere karşılık verebilmesinden dolayı yaygınlaştığı görülmektedir. Son dönemlerde kendiliğinden yerleşen taşıyıcı hafif beton (KYTHB) literatürde yerini almaya başlamıştır. KYTHB karışımlarının deney metotları içeriğinde çok fazla parametre olduğundan dolayı daha zor olmaktadır (Jin ve Domone, 2002). Pomza gibi birim hacim ağırlığı düşük olan agregalarla üretilen hafif betonlar taşıyıcı sistemin ağırlığını azaltmakta, dolayısıyla yapısal eleman ebatlarını küçültmekte ve yapının ısı yalıtım özelliğini arttırmaktadır (Chandra ve Berntsson, 2002). Pomzanın yapısı camsı ve gözeneklidir, fiziksel ve kimyasal faktörlere karşı dayanıklıdır. Gözenekler içinde genellikle bağlantısız boşluklar olduğundan geçirimsizliği düşük, ısı ve ses yalıtımı yüksektir (Gündüz ve ark., 1998)

Bu çalışmada çevreye karşı daha duyarlı bir yapı malzemesi elde edilmesi amaçlanarak, farklı oranlarda atık polietilen tereftalat, kendiliğinden yerleşen hafif geopolimer harcın içeriğindeki agregalarla ikame edilmiştir. Böylece PET kullanılarak üretilen hafif geopolimer harçların taze ve sertleşmiş özelliklerde oluşan değişimlerinin incelenmesi ile bu malzemelerin çimentolu harçlara alternatif olup olamayacağı değerlendirilmiştir. Malzemenin mühendislik özelliklerini irdelemek amacıyla taze özellikler bakımından reoloji, mini V hunisi, mini yayılma tablası, taze birim hacim ağırlık ölçümleri yapılmış, daha sonra sertleşmiş numunelerle basınç dayanımı, eğilme dayanımı deneyleri yapılmış, su emme, kılcal su emme, termal iletkenlik ve birim ağırlık deneyleri yapılmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Yapı Malzemesi Alanında Geopolimer Üzerine Yapılan Çalışmalar

Geopolimer beton, beton üretimi esnasında çimento ve agregaların reaksiyonu sonucunda atmosfere salınan karbondioksit emisyonlarının miktarını azaltan çevre dostu bir malzemedir. Bu tür betonlar yüksek basınç dayanımı, düşük rötire ve asitlere karşı dayanıklılık gibi olumlu mekanik özelliklere de sahiptir. 1940 yılından beri yapılan araştırmalar neticesinde alkali çözeltilerin (Na, K) zamanla betonda hasara neden olduğu tespit edilmiştir. Fakat bu çözeltiler dayanım kazanma hızını etkileyen hidratasyon sürecini hızlandırması ve yeni hidratasyon ürünlerinin oluşumunu kolaylaştırdığı için önemli bir araştırma konusu olmuştur (Purdon, 1940).

Yapılan bir çalışmada, düşük kalsiyumlu ya da kalsiyum içermeyen alüminosilikat (kil) ve alkali metal çözeltisi kullanarak bağlayıcı madde üretiminin mümkün olduğu bulunmuştur (Glukhovsky, 1959). Glukhovsky (1959), bu tür bağlayıcılara “soil cements”, bu tür bağlayıcılardan elde edilen betona ise “soil silicates” ifadesini kullanmıştır. Başlangıç malzemelerin kompozisyonuna göre, bu bağlayıcıları alkali bağlayıcı sistemler ($\text{Me}_2\text{O}-\text{Me}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$) ve toprak alkali bağlayıcı sistemler ($\text{Me}_2\text{O}-\text{MeO}-\text{Me}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$) (Me: Na, K gibi alkali metaller) olmak üzere iki sınıfa ayırmıştır.

Yapılan araştırmalarda, geopolimer bağlayıcılar için kür süresi ve sıcaklık, dayanım ve dayanıklılık açısından önemli olduğundan için kürleme doğru ve yeterli bir sürede yapılmalıdır. Geopolimerlerin hidratasyonu için uygun görülen sıcaklık aralığı 50-80 °C dir. Kürleme sıcaklığının ve reaksiyon süresinin artması ilk günlerdeki dayanımı artırmasına rağmen ileriki yaşlardaki dayanımı düşürmektedir. Bunun sebebi reaksiyon ürününün başlangıçtaki ağır oluşumunda ve ardından alkalinin ilave edilmesi sonucunda malzemenin yoğunlaşmasıdır. Reaksiyon ürünü zamanla azalır, artan sıcaklıklar yalnızca matris içinde önceden oluşturulmuş alüminosilikat jellerin bozulmasına neden olur. Bunun sonucunda yapıda bir takım problemler ortaya çıkar (Petermann ve ark., 2010).

Brooks ve ark. (2010) yaptıkları araştırmada, uçucu külün bağlayıcı malzeme olarak kullanıldığı yüksek performanslı geopolimer beton ile geopolimer hafif betonun donma ve çözülme direnci üzerine çalışma yapmışlardır. Çalışmada uçucu kül, agrega, sodyum hidroksit, sodyum silikat ve ilave su kullanılmıştır. Ayrıca hafif numuneler için alüminyum tozu tercih edilmiştir. Deneysel çalışmalar için 75x100x406 mm boyutlarında prizmatik geopolimer numuneler üretilmiştir.

Dökümden 12 saat sonra kalıptan çıkarılmış ve araştırmayı yapanlar tarafından donma-çözülme davranışı incelemiştir. Araştırma sonunda geopolimer betonun çimento esaslı betona nazaran daha iyi dayanıklılığa, asit saldırılarına karşı dirence ve düşük klor geçirgenliğine sahip olduğu açıklanmıştır.

Sodyum silikat ve sodyum hidroksiti alkali aktivatör olarak kullanılan bir çalışmanın sonuçlarına göre, mol miktarı arttıkça yayılma çapının azaldığı, basınç dayanımının ise arttığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmada tüm karışımların özgül ağırlıklarının 1800 kg/m^3 'ün altında olduğu, molarite ve sıcaklık arttıkça özgül ağırlığın azaldığı bulunmuştur (Mahmut, 2015).

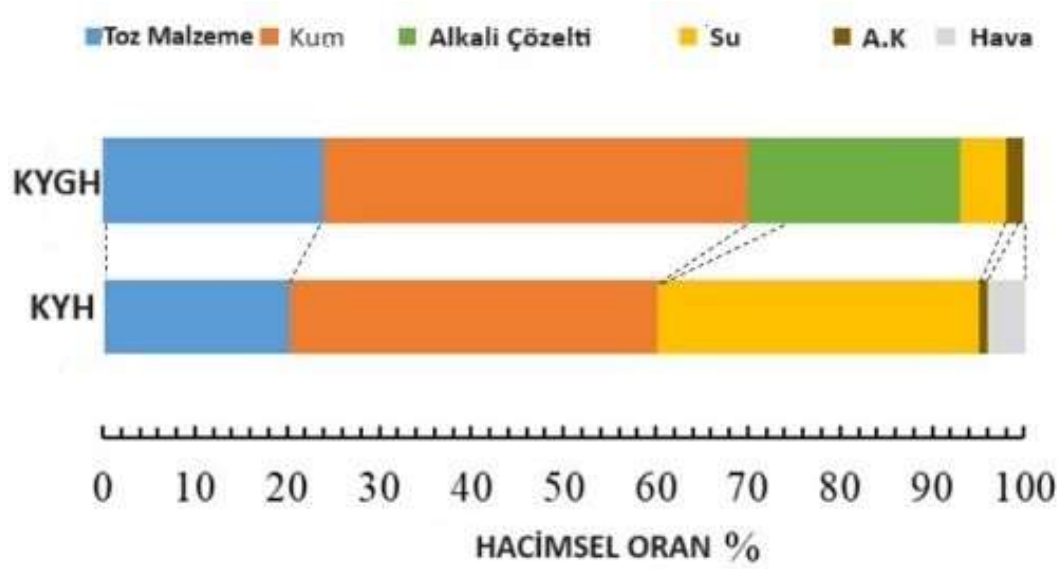
Nuaklong ve ark. (2016), yaptıkları çalışmada, çevre dostu geri dönüştürülmüş agreganın uçucu kül bazlı geopolimer betonun dayanım ve dayanıklılığını nasıl değiştirdiğini değerlendirmişlerdir. Geopolimer numunelerde, agrega olarak geri dönüştürülmüş beton agregası ve kırılmış kireçtaşı kaba agregası kullanılmıştır. Çalışma sonuçları, geri dönüştürülmüş beton agregası ile üretilen numunelerin dayanımları ile kırılmış kireçtaşı içeren geopolimer betonlarından dayanımları arasında belirgin bir fark olmadığını ve geopolimer betonlarda kaba agrega olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

Khalil ve ark. (2020), çalışmalarında kabul edilebilir işlenebilirlik ile maksimum basınç dayanımını sağlayan optimum aktivatör modülüne ulaşmayı amaçlamışlardır. Çalışmada öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve metakaolin gibi endüstriyel yan ürünler kullanılarak 9 farklı karışım hazırlanmıştır. Alüminasilikat kaynağı olarak %100 yüksek fırın cürufu ve %50-50 yüksek fırın cürufu ve metakaolin bulunan iki ana numune hazırlanmıştır. Çalışmada aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat tercih edilmiştir. Taze ve sertleşmiş özellikler, yayılma ve basınç dayanımı deneyi ile incelenmişlerdir. Sodyum silikat miktarının artmasıyla işlenebilirliğin arttığı fakat basınç dayanımının düştüğü tespit edilmiştir. Araştırmacılar optimum karışımın, 7, 28, 90 günlük su küründen sonraki basınç dayanımının sırasıyla, 19,6, 33,4, 35,6 MPa olduğunu belirtmişlerdir.

Durak ve ark. (2021), çevre dostu bir yapı malzemesi elde etmek için yaptıkları çalışmada, alüminosilikat kaynağı olarak uçucu külün tercih edilen geopolimer harç numunelerinde termal kür sürecinden önce farklı sürelerde dinlendirmenin mühendislik özellikleri ve mikroyapısal açıdan oluşturabileceği sonuçları araştırmışlardır. Bu doğrultuda, deneysel çalışmada geopolimer harç karışımlarını ısıya maruz bırakmadan önce 0, 1, 2, 3, 7, 14 ve 28 gün süresince

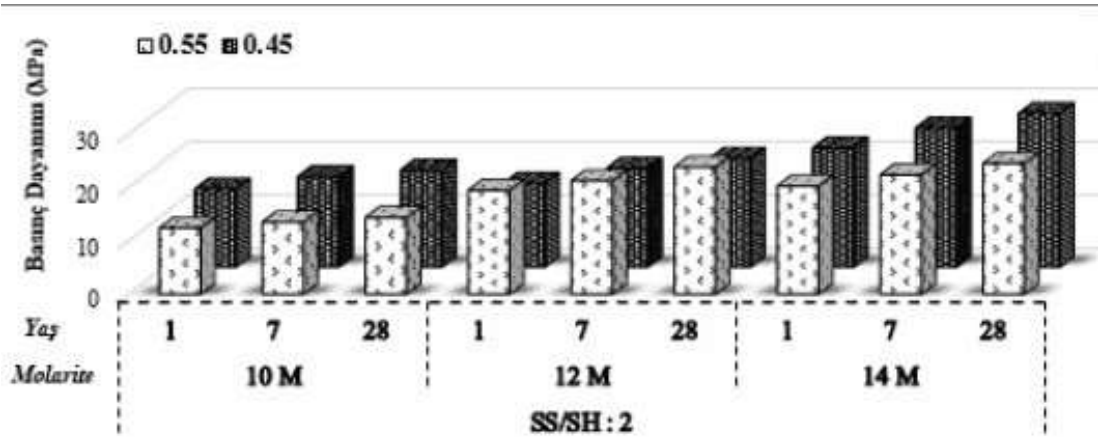
laboratuvar şartlarında hazırlamış ve bekletmişlerdir. Geopolimer numuneler dinlenmenin ardından bir fırında 75 °C sıcaklıkta 2 gün süreyle ısıtılıp küre maruz bırakılmıştır. Numuneler üzerinde mühendislik özellikleri ile ilgili bilgi sahibi olabilmek için eğilme dayanımı, basınç dayanımı, su emme, özgül ağırlık, kılcallık, ve aşınma direnci deneyleri gerçekleştirilmiştir. Geopolimer numuneler ayrıca mikroyapısal incelemeler için izotermal kalorimetre, XRD ve SEM analizlerine tabi tutulmuştur. Çalışma neticesinde ısıtılıp küre maruz bırakılmadan önce bekletilen numunelerin basınç ve eğilme dayanımlarının referans numunelere kıyasla önemli ölçüde arttığı görülmüştür. Fakat ön dinlenmeden dolayı geopolimerlerin kapilarite katsayıları ile su emme oranlarında düşüş gözlenmiş ve numuneleri dinlendirmenin dayanıklılık özelliklerini geliştirdiği tespit edilmiştir.

Ghafoor ve ark. (2021) yaptıkları çalışmada, geopolimerin yapısında bulunan sodyum silikat molaritesi, akışkanlaştırıcı/toz malzeme oranı, sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı ve ekstra su miktarı gibi parametrelerin kendiliğinden yerleşme üzerindeki etkilerini araştırmışlardır (bkz. Şekil. 2.1.). Araştırma sonuçlarına göre kendiliğinden yerleşen geopolimer harçların matrikslerinin yüksek viskozite kapasitelerinden dolayı su hacminin yayılma miktarında oldukça etkili olduğu tespit edilmiştir. Hem fiziksel hem de kimyasal olarak yapılan analizler sonucunda kendiliğinden yerleşen geopolimer harçlar için akış tahmin modelleri oluşturulmuştur. Ayrıca çalışmada akış şeması ve matematiksel ifadeleri içeren bir karma tasarım da önerilmiştir. İlginç bir şekilde bu çalışmadaki kendiliğinden yerleşen geopolimer harcın ortalama karışım oranları kendiliğinden yerleşen geleneksel karışım oranları ile nerdeyse benzer hacim dengesini ortaya koymuştur.



Şekil 2.1. Kendiliğinden yerleşen harç karışımları ile kendiliğinden yerleşen geopolimer harç karışımlarının içeriğinde bulunan malzemelerinin karşılaştırmalı hacimsel oranları

Ekmen (2021), hafif geopolimer harçların karışım parametrelerinin hem dayanım hemde dayanıklılık özellikleri üzerindeki değişimlere katkısının değerlendirilmesi için kapsamlı bir araştırma yapmıştır. Değişik sodyum hidroksit çözelti konsantrasyonları, farklı sodyum silikat/sodyum hidroksit alkali çözelti oranları ve alkali/uçucu kül oranları ile harç karışımları hazırlamıştır. Karışımlar taze halde iken, harçların viskozitesi ve kıvam özellikleri incelenmiştir. Bunlara ilaveten sertleşmiş harç numunelerinin mekanik ve dayanım özelliklerini irdelleyebilmek için birim ağırlık, eğilme dayanımı, basınç dayanımı, su emme, kılcal su emme, ultrases geçiş hızı, rötre (kuruma, otojen) ile termal iletkenlik değerleri araştırılmıştır. Deneysel çalışma sonucunda sertleşmiş numunelerin mühendislik özellikleri, oksit bileşimleri ile kuvvetli bir korelasyon sergilemiştir. Şekil 2.2.'de çalışmaya ait basınç dayanım sonuçları sunulmuştur. Mikroyapısal incelemeler neticesinde ise, harçların karışım parametrelerinin ve oksit bileşimlerinin geopolimerizasyon sırasında belirgin bir şekilde önemli olduğu tespit edilmiştir. Araştırmada ayrıca en doğru karışım parametreleri de araştırılmış ve optimum alkali/uçucu kül, sodyum silikat/sodyum hidroksit oranları ve sodyum hidroksit konsantrasyon değerinin sırasıyla 0,45, 1,586 ve 14 M olduğu kanaatine varılmıştır.

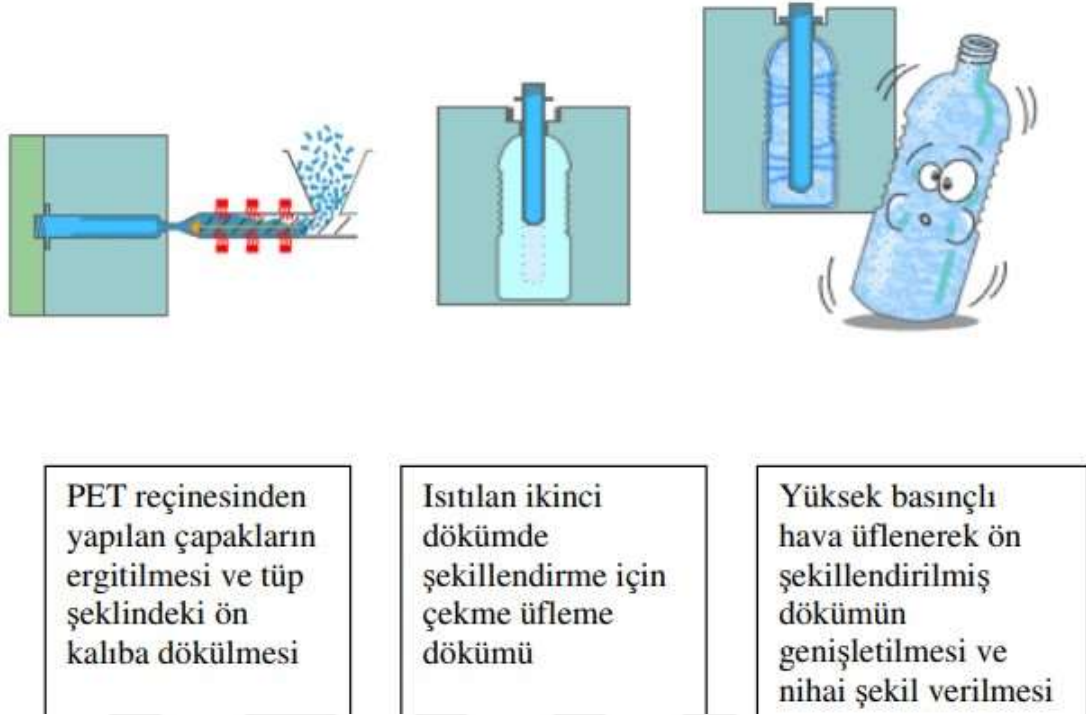


Şekil 2.2. Ekmen (2021) tarafından yapılan hafif geopolimer harçlarla ilgili bir çalışmaya ait basınç dayanım sonuçları

Taşdemir (2022) yaptığı çalışmada, erken mikrodalga kürlemesinin yüksek fırın curufu bazlı geopolimer harçların mühendislik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Hazırlanan numuneler, dökümden 1 gün sonra kalıptan çıkarılmasının hemen ardından 10-15-30-60 dakika gibi değişik kürleme süresi ile farklı mikrodalga enerji seviyelerine (300W-450W-800W) tabi tutulmuştur. Numuneler taze halde iken, işlenebilirlik ve yoğunluk gibi özellikleri ölçülmüştür. Bütün numuneler, basınç dayanım deneyi yapılana kadar laboratuvar şartlarında bekletilmiştir. Çalışma neticesinde erken aşamalarda 60 dakika süresince 300W mikrodalga radyasyonuna maruz bırakılan numunelerin mukavemetlerinin önemli derecede yükseldiği tespit edilmiştir. Ayrıca 28 günlük basınç dayanım sonuçları 800W enerjinin yapıya zarar verdiği ve uygulanmasının doğru olmadığını açıklamıştır.

2.2. Polietilen Tereftalatın Geopolimer Harçlarda Değerlendirilmesi ile İlgili Çalışmalar

Polietilen tereftalat (PET), şeffaf ve aşınmaya dayanıklı, hafif bir malzemedir. PET'in çekme ve gerilme dayanımı ile kopma direnci gibi mekanik özellikleri oldukça yüksektir. Kullanım sıcaklık aralığı -50 °C+150 °C olup bazen bu değerler -60 °C ile 180 °C arasında değişebilmektedir (Üçüncü, 2000). Şekil 2.3.'da PET imalat süreci ilgili bir görsel sunulmuştur (Kaya, 2005).



Şekil 2.3. PET Şişe yapımı

1990'lı yıllardan itibaren atık plastik ticareti hızla artmış ve 2000'li yıllarda en üst seviyelere ulaşmıştır. Çin, tek başına dünyadaki atık plastik ithalatının %45,1'ini yapmıştır (Hoornweg ve Bhada-Tata, 2012). Bu bağlamda, literatürdeki çoğu çalışma; plastik atıkların geri dönüştürülmesinin önemini göstermektedir (Hage ve ark., 2009; Duraiappah ve ark., 2002).

Rebeiz (1995), çalışmasında atık PET malzemeden üretilmiş reçine ile istenilen özellikte hazır beton elde etmiştir. Yapılan başka bir çalışmada, atık plastikler (PET şişe) beton agregası olarak kullanılmış ve harcın özellikleri incelemiştir (Choi ve ark., 2005). Elde edilen sonuçlarda plastik ilaveli numunelerin yoğunluklarının %2-6 ve basınç dayanımının da %33 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Safi ve ark. (2013), tarafından yapılan bir çalışmada ise; %20-50 atık plastik katkılı kendiliğinden yerleşen betonlar ile yapılan deneyler sonucunda, basınç dayanımının %15-33 oranında azaldığını gösterilmiştir.

Sharma ve Singh (2019), uçucu kül esaslı geopolimer betonlarda PET liflerinin farklı oranlarda kullanılması üzerine deneysel çalışma yapmışlardır. Çalışmada agrega farklı oranlarda PET lifleri ile ikame edilerek numuneler hazırlanmış ve mekanik ve dayanıklılık özellikleri incelenmiştir. PET içerikli geopolimer numuneler oda şartlarında ve 60 °C sıcaklıkta 24 saat boyunca olmak üzere iki farklı şekilde kürlenmiştir. Kullanılan PET fiberlerin boy/çap (görünüm)

oranı 45 olarak ölçülmüştür. Hazırlanan numuneler 7 ve 28 günlük iken testlere tabi tutulmuştur. Çalışmada geopolimer numuneler üzerinde taze özellikler, basınç dayanımı, çekme dayanımı, eğilme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre pet içeren numuneler basınç dayanımı bakımından referans numunelere kıyasla az bir miktar daha iyi sonuçlar verirken çekme ve eğilme dayanımı bakımından önemli gelişmeler sağlamıştır.

Lazorenko ve ark. (2022), çalışmalarında plastik kaynaklı kirliliği azaltmak amacıyla polietilen tereftalat şişe atıklarının, geopolimer harçlarda doğal kum yerine kullanılarak geri dönüştürülebilme potansiyeli üzerine araştırma yapmışlardır. Uçucu kül esaslı geopolimer harçların taze ve sertleşmiş özellikleri, kuvars kumu ile 315-125 mikron boyutlarındaki PET parçacıklarının hacimce %20, %40, %60, %80 ve %100 oranlarında yer değiştirilmesi sağlanarak değerlendirilmiştir. Deneysel çalışma, geopolimer harçlarda plastik agrega içeriği arttıkça basınç ve çekme mukavemetinin azaldığını göstermiştir. Buna karşın %40 seviyelerine kadar yapılan ikameler sonucunda yarmada çekme dayanımını az bir miktar artmıştır ve taze halde iken işlenebilirlik bakımından geleneksel harçlara yakın sonuçlar alınmıştır. Öte yandan geopolimer harçlarda doğal agrega yerine geri dönüştürülmüş atık PET kullanmak, numunelerin hafiflemesine, su emmesinin azalmasına ve termal yalıtım özelliklerinin iyileşmesine katkıda bulunmuştur.

Ahmed (2023) çalışmasında, atık kil tuğla ve atık PET şişelerinin geopolimer betonda ikame malzeme olarak geri dönüştürülmesi üzerine araştırmalar yapmıştır. Bu amaçla deneysel çalışmasında öğütülmüş PET parçacıklarının ince agrega olarak kullanımını değerlendirmek için kum yerine hacimce %10, %15 ve %20 oranlarında PET agregaların ikame edildiği üç adet karışım hazırlamıştır. PET agregalı numuneler kontrol karışımı ile kıyaslanarak taze birim hacim ağırlık, mekanik ve mikroyapısal özellikler bakımından test edilmiştir. Deney sonuçları, geopolimer harçlarda PET kullanmanın yoğunluğu azalttığı ve mekanik özellikleri geliştirdiğini göstermiştir. Kontrol harcı ile karşılaştırıldığında, PET ikameli karışımlarda, daha düşük su emme oranı tespit edilmiş olup elektron mikroskobu ile yapılan incelemelerde daha az mikro çatlak tespit edilmiştir.

Lazorenko ve ark. (2024) çalışmalarında, uçucu kül esaslı geopolimer harçların yapısında doğal agregaların yerine PET atıklarının kullanılmasına ilişkin kapsamlı bir çalışma yapmışlardır. Araştırmacılar, doğal agregaların maksimum oranda PET atıklarla yer değiştirmesi durumunda agrega hazırlamaya bağlı emisyonlar kategorisinde küresel ısınma potansiyelinin %16,7

oranında arttığını belirtmektedir. Bu artış, yıkama ve öğütme gibi faaliyetler de dahil olmak üzere PET işleme sırasında ortaya çıkan önemli emisyonlara bağlanmıştır. Enerji yoğun PET hazırlama proseslerinin optimizasyonu, maksimum PET agregası kullanımıyla geopolimer karışımının üretiminde %19,63 oranında kayda değer bir azalmaya yol açmıştır. Araştırmacılara göre bu bulgular, geopolimer karışımlarının üretiminde sürdürülebilirliğin artırılması potansiyelini göstermekte ve çevresel etkilerin azaltılmasında üretim süreçlerinin optimize edilmesinin kritik rolünü vurgulamaktadır.

2.3. Hafif Beton Üretiminde Agregası Olarak Atık PET ve Plastik Kırıklarının Kullanılması ile İlgili Çalışmalar

Koide ve ark. (2002), yaptıkları çalışmada hafif beton üretebilmek için agregası olarak Polietilen Tereftalat (PET), Polipropilen (PP) ve Polietilen (PE) oluşan atık plastik malzemeler kullanılmıştır. Hafif beton agregası, atık plastiklerin kırılmasıyla elde edilmiştir. Karışımlarda normal portland çimentosu, geleneksel agregası yerine maksimum tane boyutu 10 mm boyutunda olan atık plastik agregaları kullanılmıştır. Atık plastik agregasının %85'i PET, %15'i ise polipropilen (PP) ve polietilen (PE) oluşmaktadır. Su/ bağlacı 0,35 oranında alınmıştır ve hava sürükleyici kimyasal katkıları kullanılmıştır. Atık plastikler hafif yapıda olduklarından dolayı betonun birim hacim ağırlığı normal betonlara kıyasla daha düşüktür. 28 günlük beton numunelerin basınç dayanımları 20 MPa'dır ve doygun yüzey kuru ağırlıkları yaklaşık olarak 1,85 gr/cm³'tür. Ayrıca bu betonlar yaklaşık 60 °C civarında sıcaklığa kadar dayanıklı ve donma-çözölmeye karşı belirli bir seviyede dirence sahiptir. Atık plastikler fazla suya ihtiyaç duymadıklarından, agregaların içindeki nem kolaylıkla kontrol edilmiştir. Bu sonuçlara göre araştırmacılar, hafif agregalı betonların basınç dayanımları düşük seviyelerde olduğundan dolayı plastik atıkların kum yerine kullanılmamasını tavsiye etmişlerdir.

Gavela ve ark. (2004), PP ve PET malzemeleri kullanarak geleneksel agregaların yerine belli oranlarda ikame edip deneysel çalışmalar yapmışlardır. Çalışmada karışımların su/bağlayıcı madde oranı 0,50 ve 0,60 olarak tasarlanmış ve süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Atık plastik ve normal agregaların granülometri, birim hacim ağırlık ve su emme testleri yapılmıştır. Doğal agregayla atık plastik agregaların %20 ve %30 oranlarında ikame ettirilmesiyle elde edilen 100x100x500 mm ebatlarında beton numunelerin 28 günlük basınç dayanım sonuçları sırasıyla 35,1 ve 23,5 MPa ve eğilme dayanımları 5,03 ve 2,89 MPa'dır. Geleneksel betonlara kıyasla, atık plastik katkılı betonların basınç ve eğilme

değerlerindeki azalma oranlarının benzer olduğu görülmüştür. Araştırmacılar basınç dayanımındaki değişiminin kullanılan polimer agregası türüne değil, polimer agregasıyla doğal agreganın ikame oranına bağlı olduğunu vurgulamışlardır. Atık plastikler hafif yapıda olduklarından dolayı üretilen plastik katkılı betonların özgül ağırlıkları düşük olmuştur. 7. ve 28. günlerde ölçülen elastisite modülü değerleri, atık plastik oranlarına bağlı olarak değişmiştir.

Elzafraney ve ark. (2005), çimento harcında yüksek özkütleli PP, PE ve Polivinil Klorürden (PVC) oluşan atık plastikleri kaba agregaya olarak kullanmışlardır. Bu çalışmalarında yapıların ısısal özelliklerini iyileştirmeyi hedeflemişlerdir. Harç numunelerin bir kısmı normal betonu bir kısmı da yüksek yoğunluklu atık plastik katkılı beton şeklinde, aynı özellikte iki yapı tasarlanmıştır. Daha sonra bu yapıların ısısal ve enerji performansları karşılaştırılmıştır. Elde edilen verilere göre, normal betonlara kıyasla atık plastik katkılı betonların enerji verimliliği ve konfor açısından daha yüksek değerler çıkmıştır. Atık plastik katkılı betonların yapı tasarımında kullanılması hem yapının ısıtma ve soğutma giderleri açısından daha ekonomik oluşu hem de yapının konforunu artırması gibi olumlu katkılar sağlamıştır.

Choi ve ark. (2005), PET şişe atıklarından elde edilen hafif agreganın mikro yapısını inceleyerek, yüksek fırın cürufu ile hafif agregası ilişkisini araştırmışlardır. Çalışmada, PET şişe atıklarından elde edilen hafif agregası ve yüksek fırın cürufundan üretilen betonların çekme dayanımı, basınç dayanımı ve elastisite modülü irdelenmiş ve elde edilen hafif betonun yoğunluğu incelenmiştir. Araştırma sonuçlarına göre, yüksek fırın cürufunun, hafif agreganın özellikleri üzerinde etkisinin olup olmadığına bakılmıştır. PET şişe atıklarından elde edilen hafif agregalar eritilerek yüksek fırın cürufu ile birlikte karıştırılmış, agregası yüzeyinin cüruf ile düzgün bir şekilde kaplanması sağlanmıştır. Harçlarda atık PET agregaları doğal agregalarla %25, %50 ve %75 seviyelerinde ikame edilerek kullanılmıştır. Analizler sonucunda hafif agregalı numunelerin birim hacim ağırlıkları, doğal agregaya kıyasla %50 oranında düşük olduğu tespit edilmiştir. Hafif agregalı betonun kıvamının su/çimento oranının artırılmasıyla iyileştirilebileceği ifade edilmiştir. Ayrıca yüksek fırın cürufu ile hafif agregası yüzeyini kaplanması, agregası yüzeyinin güçlenmesine katkı sağlamıştır.

Akçaözoğlu (2008) yaptığı bir çalışmada, hafif harç üretiminde atık Polietilen Tereftalat (PET) şişe kırıklarının agregası olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. Sadece PET agregalarının kullanıldığı ve PET ve kum agreganın birlikte kullanıldığı iki grup karışım üzerinde çeşitli deneysel çalışmalar yapılmıştır. Karışımlarda kullanılan PET/bağlayıcı oranları 0,50 ve 0,60 su-bağlayıcı oranları ise 0,45 ve

0,50'dir. Karışımlar oluşturulurken 0-4 mm ve 1-2 mm olmak üzere iki çeşit PET ebatı kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda bütün numunelerin taşıyıcı hafif beton olarak sınıflandırılabilceği tespit edilmiştir. PET/bağlayıcı oranının 0,50'den 0,60 seviyesine çıkarılması, numunelerin basınç dayanımlarını azaltmamış, rötreyi ve eğilme dayanımlarını düşük bir miktar azaltmıştır. Su/bağlayıcı oranının 0,50'den 0,45'e mertebesine inmesi, harçların dayanım ve dayanıklılığını olumlu yönde etkilemiştir. Çalışma sonuçları, taşıyıcı hafif beton üretiminde atık PET şişe kırıklarının agrega olarak kullanılabileceğini göstermiştir.



3. GEREÇ VE YÖNTEM

3.1. Gereç

Bu çalışmada kendiliğinden yerleşen hafif geopolimer harç üretimi için malzeme olarak, uçucu kül, dere kumu, pomza, sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve sodyum hidroksit (NaOH) çözeltileri, şebeke suyu, süper akışkanlaştırıcı katkı ve atık PET şişe kırıntıları kullanılmıştır.

3.1.1. Agregat

Geopolimer harçların hafif olması için Şekil 3.1.'de gösterilen pomza ve Şekil 3.2.'de gösterilen nehir kumu agregat olarak tercih edilmiştir. Kumun yoğunluğu $2,7 \text{ t/m}^3$, su emme oranı %1,38 seviyesindedir. Çalışmada kullanılan hafif pomza Nevşehir yöresinden elde edilen volkanik bir kayadır. Bu kayaç agregat boyutunda öğütülmüş olarak elde edilmiştir. Yoğunluğu $1,2 \text{ t/m}^3$, su emme değeri %20 seviyesindedir. Agregaların elek analizi yapılırken ASTM C33'de tane boyutları için belirtilen limitler dikkate alınmıştır. Çizelge 3.1.'de agregaların elek analiz değerleri, Şekil 3.3.'de elek analizinin grafiksel gösterimi verilmiştir.



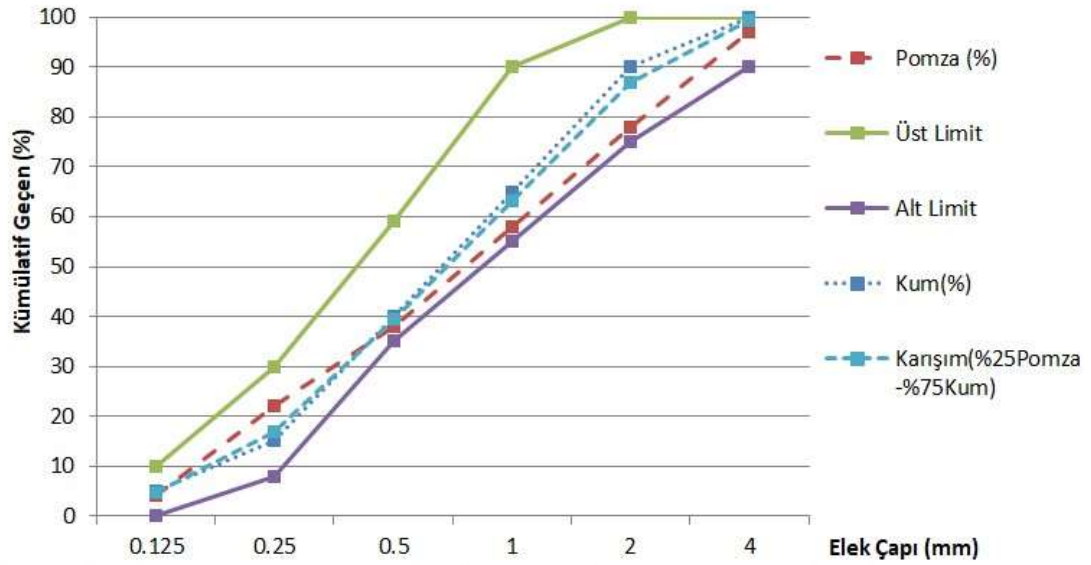
Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan pomza agregası



Şekil 3.2. Çalışmada kullanılan nehir kumu

Çizelge 3.1. Agregaların elek analiz değerleri

Elek Çapı (mm)	Elek Üstünde Kalan Pomza (%)	Elek Üstünde Kalan Kum (%)	Karışım (gr) (%25 Pomza - %75 Kum)	Kümülatif Geçen (%)
4	0.75	0	0.75	99.25
2	4.75	7.5	12.25	87
1	5	18.75	23.75	63.25
0.5	5	18.75	23.75	39.5
0.25	4	18.75	22.75	16.75
0.125	4.5	7.5	12	4.75
Elek altı	1	3.75	4.75	0
Toplam	25	75	100	



Şekil 3.3. Agregaların elek analizinin grafiksel gösterimi

3.1.2. Uçucu Kül

Görseli Şekil 3.4.'de verilen uçucu kül çalışmada kullanılmak üzere Zonguldak Çatalağzı Termik Santralinden elde edilmiştir. Geopolimer içinde alüminosilikat kaynağı olarak işlev görecektir. Uçucu külün ihtiva ettiği toplam SiO_3 , Al_2O_3 ile Fe_2O_3 oksitleri %88 seviyesindedir. Bu nedenle ASTM C-618' e göre F sınıfı uçucu kül olarak adlandırılmaktadır. Uçucu külün birim ağırlığı 2t/m^3 , özgül yüzey alanı $2,018\text{ m}^2/\text{g}$ olup kimyasal özellikleri Çizelge 3.2.'de verilmiştir.



Şekil 3.4. Çalışmada kullanılan uçucu kül

Çizelge 3.2. Uçucu külün kimyasal özellikleri

Oksit	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Cl ⁻	KK
Yüzde (%)	55.46	26.33	6.706	1.689	2.422	1.084	4.222	0.097	1.2

3.1.3. Alkali Aktivatörler

Çalışmada kullanılan sodyum silikat (SS) kimyasalı Alde Kimya Sanayi Limited Şirketi'nden sıvı halde tedarik edilmiştir. Sodyum silikat İçeriği itibariyle %61,5 sıvı %38,5 katı malzemedir oluşmaktadır. Bileşiminde %4.21 NaO ve %10,06 SiO₂ bulunmakta olup SiO₂/NaO oranı 2,5 mertebesindedir.

Deneyisel çalışmada kullanılan diğer alkali aktivatör sodyum hidroksittir (SH). Sodyum hidroksit Tekkim Kimya Sanayi Limited Şirketinden %98 saflık derecesinde ve pelet yapıda tedarik edilmiştir. Hazırlanan harçlarda sodyum hidroksit 10M konsantrasyonda oluşacağından saf su kullanılmıştır. 10M konsantrasyonlu bir litre çözelti hazırlamak için 400 gram (10 mol SH miktarı) pelet formda sodyum hidroksit

ölçekli bir kapta ve yeteri kadar saf su kullanılarak bir litre çözelti elde edilmiştir.

Sodyum hidroksit çözeltisi oluşturulurken bir miktar ısı açığa çıkmaktadır. Homojen bir karışım hazırlamak ve açığa çıkan ısıyı bertaraf etmek için alkali malzemeler harç dökümünden bir gün önce karıştırılıp dış ortamda bekletilmiştir. Çizelge 3.3.'de alkali malzemelerin özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.3. Alkali aktivatörlerin özellikleri

Malzeme	Sodyum hidroksit	Sodyum silikat
Fiziksel görünüş	katı	SIVİ
Renk	beyaz	açık sarı
Molekül ağırlığı	40.00 g/mol	122.06 g/mol
Erime	323°C	1088°C
Muhafaza sıcaklığı	5°C-30°C	-

3.1.4. Atık Polietilen Tereftalat

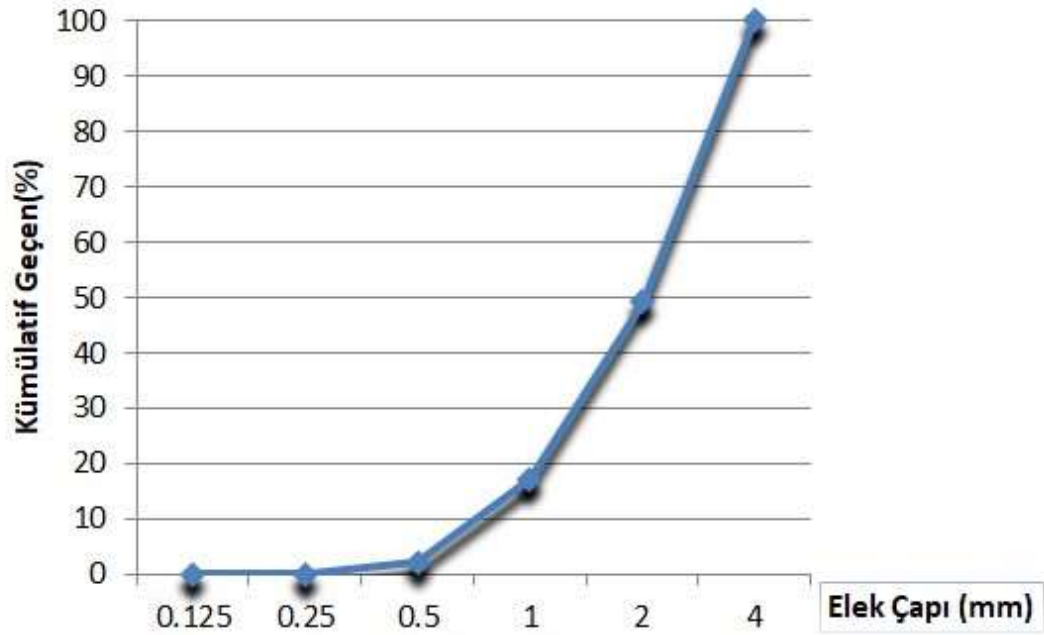
Görüntüsü Şekil 3.5.'de verilen atık polietilen tereftalat parçacıkları geri dönüşüm kaynaklı olup yoğunluğu 1,2 kg/m³ olarak tespit edilmiştir. Çalışmada kullanılan polietilen tereftalat kırıntılarının elek analizi yapılmış, tane boyut dağılımının 0-4 mm aralığında olduğu belirlenmiş Çizelge 3.4.'de elek analiz değerleri, Şekil 3.6.'da ise analizin grafiksel gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.5. Kullanılan atık PET kırıntıları

Çizelge 3.4. Atık PET kırıntılarının elek analiz değerleri

Elek çapı (mm)	Elek üstünde kalan (%)	Kümülatif geçen (%)
4	0	100
2	50.75	49.25
1	31.95	17.29
0.5	15.04	2.26
0.125	2.26	0
0.125	0	0
elek altı	0	0
toplam	100	



Şekil 3.6. Polietilen tereftalat elek analizinin grafiksel gösterimi

3.1.5. Süper Akışkanlaştırıcı ve Su

Karışımlarda süper akışkanlaştırıcı katkı olarak Master Builders Yapı Kimyasalları Sanayi ve Ticaret Limited Şirketinden tedarik edilen polikarboksilat esaslı Masterglenium 51 kullanılmıştır. Laboratuvarda yapılan denemeler sonucunda optimum karışım için uçucu külün %4'ü kadar süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Çalışmada kullanılan su, şehir şebekesinden temin edilmiştir.

3.2. Yöntem

3.2.1. Karışım Oranları ve Üretim Prosedürü

Kendiliğinden yerleşen hafif geopolimer harç üretebilmek için literatüre paralel olarak laboratuvar ortamında çok sayıda ön çalışma yapılmıştır (Akçaözoğlu, 2008; Ardhirra ve Sathyan, 2022; Ekmen, 2021; Ghafoor ve ark., 2021, 2022; Ghafoor ve Fujiyama, 2023; Rahman ve Al-Ameri, 2021). Hafif geopolimer harç üretebilmek için pomza agregası ile dere kumu arasında doğru bir oran belirlenmeye çalışılmıştır. Denemelerde mini yayılma testi, mini V hunisi, taze birim ağırlık testleri yapılmış ve sonuçta pomza agregasının toplam agreganın %25'i kadar olması gerektiğine karar verilmiştir. Polietilen tereftalat atıklarının agrega ile hacimce %0, %5, %10, %15, %20, %25 oranlarında ikame edildiği toplam 6 adet harç karışımı

hazırlanmıştır. Karışımların hepsinde EFNARC 2002’de belirtilen kendiliğinden yerleşme şartlarını sağlayabilmek için uçucu külün %4’ü kadar süper akışkanlaştırıcı katkı ve %5’i kadar ekstra su kullanılmıştır. Harçlarda SS/SH oranı 2, SH konsantrasyonu 10 M, agrega/UK 2 olarak tercih edilmiştir. 1 m³ için hazırlanan ayrıntılı karışım oranları Çizelge 3.5.’de sunulmuştur.

Çizelge 3.5. Karışım oranları

PET Oranı	Kum (kg/m ³)	Pomza (kg/m ³)	PET (kg/m ³)	Uçucu Kül (kg/m ³)	SS (kg/m ³)	SH (kg/m ³)	Ekstra Su (kg/m ³)	AK (kg/m ³)
%0 PET	919,7	136,2	0	528	211,2	105,6	26,4	21,12
%5 PET	873,72	129,39	28,85	528	211,2	105,6	26,4	21,12
%10 PET	827,73	122,58	57,7	528	211,2	105,6	26,4	21,12
%15 PET	781,72	115,77	86,55	528	211,2	105,6	26,4	21,12
%20 PET	735,76	108,96	115,4	528	211,2	105,6	26,4	21,12
%25 PET	689,78	102,15	144,25	528	211,2	105,6	26,4	21,12
SS: Sodyum Silikat SH: Sodyum Hidroksit AK: Süper Akışkanlaştırıcı Katkı								

Karıştırma işlemi Harran Üniversitesi Yapı Malzemeleri Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Bütün harç karışımları oluşturulurken öncelikle ince taneli malzemeler karıştırılmış daha sonra sırası ile alkali çözelti, su ve akışkanlaştırıcı katkı ilave edilmiştir. Her bir karışım Şekil 3.8.’de gösterilen mikser ile toplam 5 dakika süre ile yapılmıştır.



Şekil 3.7. Karıştırma aşamaları a) Toz malzemelere ile alkali çözelti eklenmiş durum b) Karışıma su eklenmiş durum c) Karışıma süper akışkanlaştırıcı katkı eklenmiş nihai durum



Şekil 3.8. Karıştırma işlemlerinde kullanılan mikser

Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra reoloji, mini V hunisi, mini yayılma tablası ve birim ağırlık testleri gerçekleştirilmiştir. Taze haldeki testler tamamlandıktan sonra harçlar ayrıtları 50 mm ayrıt uzunluğa sahip küp ve 40x40x160 mm boyutlarında prizmatik kalıplara dökülmüştür. Küp kalıpların görselleri Şekil 3.9.'da, prizmatik kalıp görseli 3.10.'da verilmiştir.



Şekil 3.9. Çalışmada kullanılan küp kalıplar



Şekil 3.10. Çalışmada kullanılan prizmatik kalıp

Geopolimerlerin ısı ile kürlendiğinde mekanik özelliklerinin iyileştiği önceki çalışmalardan bilinmektedir (Adam ve Horiato, 2014; Nuruddin ve ark., 2016; Rovnaník, 2010; Singh ve ark., 2015). Bu nedenle numuneler etüvde 60 °C sıcaklıkta 24 saat süre ile Şekil 3.11.'de gösterildiği gibi plastik torbalar içinde kürlenmeye bırakılmıştır. Plastik torbalar içinde kürlenmenin sebebi numunelerin yapısındaki suyun buharlaşmasını önlemektir. Bu sayede erken rötre çatlakları engellenmeye çalışılmış ve geopolimer reaksiyonunun sürdürülmesi amaçlanmıştır.



Şekil 3.11. Etüvde kürlenmeye bırakılan numuneler

Numuneler kürlleme işleminden sonra sertleşmiş harç deneyleri için oda şartlarında 28. güne kadar Şekil 3.12.'de gösterildiği gibi bekletilmiştir.

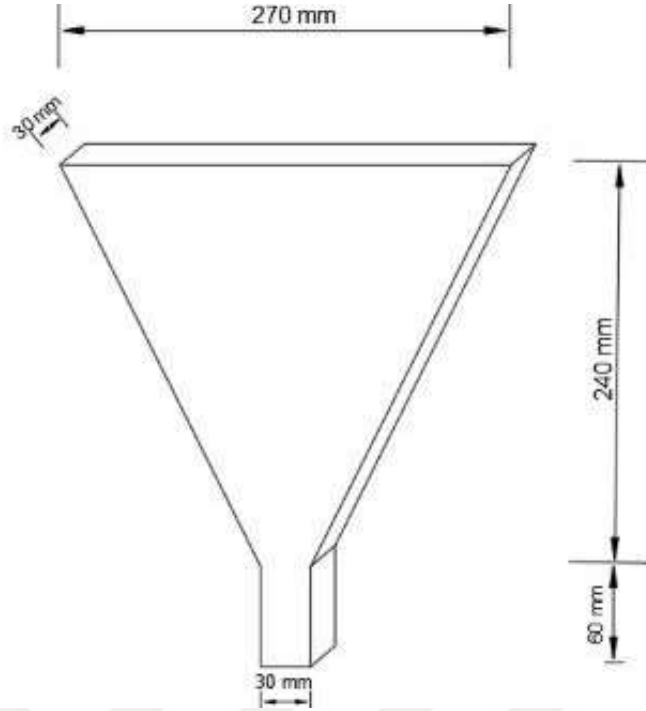


Şekil 3.12. Oda şartlarında bekletilen numuneler

3.2.2. Kullanılan Test Yöntemleri

Numunelere taze halde iken mini V hunisi, mini yayılma tablası, taze birim ağırlık ve reoloji testleri, dökümden 28 gün sonra ise basınç dayanımı, eğilme dayanımı, su emme, kılcal su emme ve termal iletkenlik deneyleri uygulanmıştır.

Mini V hunisi deneyi EFNARC 2002’de bahsedilen kriterlere göre ebatları Şekil 3.13.’da, görseli Şekil 3.14.’de verilen standart aparat ile Harran Üniversitesi Mühendislik Fakültesi yapı malzemeleri laboratuvarında yapılmıştır. Harç taze halde iken huninin alt kapağı kapatılmış ve üst seviyesine kadar doldurulmuştur. Daha sonra alt kapağı açılarak ne kadar sürede döküldüğü tespit edilmiştir.



Şekil 3.13. Mini V hunisi boyutları



Şekil 3.14. Mini V hunisi deney aparatı

Mini yayılma tablası deneyi üst çapı 70 mm, alt çapı 100 mm yüksekliği 60 mm boyutlarında bir koni kullanılarak düz bir cam zemin üzerinde gerçekleştirilmiştir. Koninin içi taze harç ile doldurulduktan sonra kaldırılmış ve harcın birbirine dik iki çapı Şekil 3.15.'de gösterildiği gibi ölçülmüştür. Daha sonra çapların ortalaması bulunarak ne kadar yayıldığı tespit edilmiştir. Yayılma değerleri EFNARC 2002 dikkate alınarak 24-26 cm arasında tutulmuştur.



Şekil 3.15. Mini yayılma tablası yayılma ölçümü

Kendiliğinden yerleşen taze hafif geopolimer harçlarda yapılan araştırmalardan biri de reolojik davranış ile ilgilidir. Bu araştırma Brookfield Digital Viskometer DV-E cihazı ile RV/HA/HB-6 tip uç kullanılarak sağlanan reolojik ölçümlerle gerçekleştirilmiştir. Bahse konu cihazda farklı hızlara karşılık gelen görünür viskozite değerlerine ulaşılabilir. Kullanılan standart reometre cihazına ait görüntü Şekil 3.16.'da verilmiştir.



Şekil 3.16. Çalışmada kullanılan standart reometre cihazı

Basınç, eğilme dayanımı, su emme, kılcal su emme ve termal iletkenlik testleri numuneler döküldükten 28 gün sonra yapılmıştır. Basınç dayanımı testi maksimum yük kapasitesi 3000 kN olan UTEST markalı bir cihaz ile yapılmıştır. Basınç dayanımı testi her bir karışım için ayrıtı 50 mm olan olan üç adet küp numuneler ile gerçekleştirilmiştir. Yüklemler 0,25 MPa/sn sabit hız ile Şekil 3.18.'de gösterildiği gibi uygulanmıştır.



Şekil 3.17. Basınç dayanımı testinde kullanılan küp numunelerden bazıları



Şekil 3.18. Basınç dayanımı test cihazı

Eğilme dayanımı testi 40x40x160 mm boyutlarında prizmatik numuneler kullanılarak yapılmıştır. Her harç karışımı için üç adet numune teste tabi tutulmuş ve ortalamaları alınmıştır. Test yapılırken Şekil 3.19.'da verilen cihaz ile 1 MPa/dakika sabit hız ile yükleme yapılmıştır. Şekil 3.20. ve Şekil 3.21.'de numunelerin testten önceki ve sonraki halleri gösterilmiştir.



Şekil 3.19. Eğilme dayanımı deneyinin yapıldığı Shimadzu marka cihaz



Şekil 3.20. Eğilme dayanımı testinden önce numunelerden bazıları



Şekil 3.21. Eğilme dayanımı testinden sonra kırılmış numunelerden bazıları

Geopolimer numunelerin su emme oranları belirlenirken ASTM C 642 standardına göre hareket edilmiştir. İlk etapta numuneler 24 saat boyunca 105 °C sıcaklık altında etüvde bekletilmiş ve soğuduktan sonra tartılmıştır. Daha sonra numuneler 48 saat boyunca yaklaşık 21°C sıcaklıkta suda bekletilmiş ve doymun

kuru yüzey ağırlıkları belirlenmiştir.

Numunelerin su emme oranları denklem 1'e göre belirlenmiştir. W_{dky} doygun kuru yüzey ağırlığını W_k etüv kurusu ağırlığı temsil etmektedir.

$$SE(\%) = \frac{W_{dky} - W_k}{W_k} \cdot 100 \quad (3.1)$$



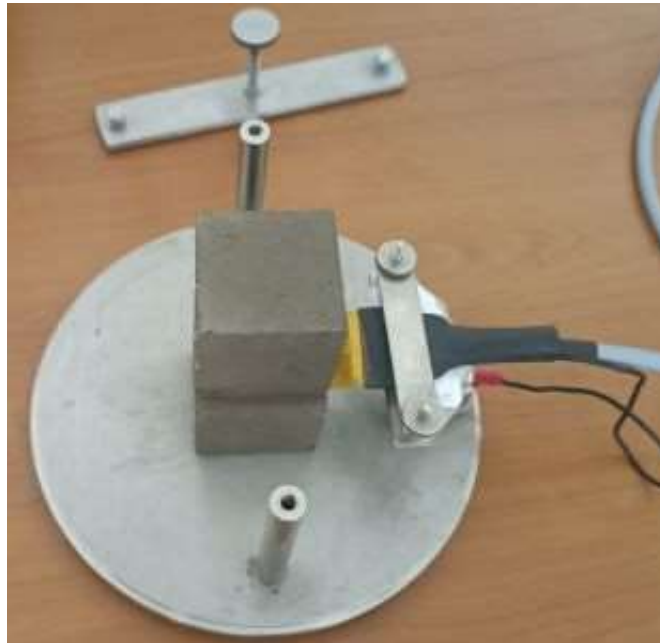
Şekil 3.22. Su emme deneyi için etüvde kurutulan numuneler

Geopolimer numunelerin boşluk yapısı ile ilgili bilgi sahibi olabilmek için kılcal su emme deneyi yapılmıştır. Numuneler öncelikle 105 °C sıcaklıkta etüvde 24 saat boyunca kurutulmuş ve soğuduktan sonra yan yüzeyleri silikon malzemesi ile kaplanmıştır. Daha sonra sadece alt yüzeylerinden su alacak şekilde, Şekil 3.23.'de gösterildiği gibi bir kaba konmuş ve yan yüzeylerinden yaklaşık 2 cm su içerisinde kalması sağlanmıştır. Deney belli aralıklarla numunelerin sudan çıkarılıp tartılması ile yapılmıştır.



Şekil 3.23. Kılcal su emme deney düzeneği

Termal iletkenlik testi yapılırken TPS 500 S Hot Disk Thermal Constants Analyzer isimli cihaz kullanılmıştır. Deney, her karışım için ayrıtları 50 mm uzunluğunda olan 3 adet küp kullanılarak yapılmıştır. Şekil 3.24.'de deney düzeneğine ait bir görsel verilmiştir.



Şekil 3.24. Termal iletkenlik deney düzeneği

4. BULGULAR

4.1. Taze özelliklerle ilgili bulgular

Kendiliğinden yerleşen hafif geopolimer harçlar taze halde iken yapılan deneylerden mini V hunisi, mini yayılma tablası ve taze birim ağırlık bulguları Çizelge 4.1.'de reoloji bulguları ise Çizelge 4.2.'de sunulmuştur.

Çizelge 4.1. Kendiliğinden yerleşen hafif geopolimer harçların mini V hunisi, mini yayılma tablası ve birim ağırlık ölçüm sonuçları

PET oranı	Mini V hunisi geçiş süresi (sn)	Yayılma çapı (cm)	Taze birim ağırlık (kg/m ³)
0%	9,4	24,8	2030
5%	11	25,2	1990
10%	12,1	25,4	1970
15%	14	24,5	1943
20%	15,1	24,3	1925
25%	16	24	1914

Çizelge 4.2. Farklı açısal hızlarda görünür viskozite değerleri (mPa.s)

Açısal Hız(Rpm)	%0 PET	%5 PET	%10 PET	%15 PET	%20 PET	%25 PET
0.3	51000	53000	60000	77000	57000	57000
0.5	42000	38000	56000	54000	34000	32500
0.6	28000	32000	45000	42000	30000	30000
1	26000	27000	35000	34000	22000	21500
1.5	23300	23300	30700	30000	19300	19200
2	20500	22000	25500	24500	17500	17350
2.5	19600	18800	24000	22400	15600	15200
3	17300	17000	22300	20300	14700	14000
4	16000	15300	19800	18800	13500	12800
5	14000	15000	18400	17200	12600	11600
6	12800	13300	17500	15700	11500	10080
10	11000	12700	15600	13400	10000	9300
12	9920	11080	13580	11920	9420	8250
20	8400	8900	10850	10200	7700	7300
30	7230	7930	9600	8630	6800	6430
50	6100	6540	8020	7400	5800	5660
60	5580	5930	7020	6930	5520	4950
100	4670	4910	6240	5530	4880	3850

4.2. Sertleşmiş Özelliklerle İlgili Bulgular

Kendiliğinden yerleşen hafif geopolimer harçlar sertleşmiş halde iken yapılan ölçümlerden basınç ve eğilme dayanım test sonuçları Çizelge 4.3.'de, su emme, kılcal su emme ve termal iletkenlik değerleri Çizelge 4.4.'de farklı yaş ve koşullardaki birim hacim ağırlık ölçümleri Çizelge 4.5.'de sunulmuştur.

Çizelge 4.3. Geopolimer harçların basınç ve eğilme dayanım sonuçları

PET Oranı	Basınç dayanımı (N/mm ²)	Eğilme dayanımı (N/mm ²)
%0 PET	2,56	0,937
%5 PET	3,25	1,191
%10 PET	2,52	0,968
%15 PET	2,71	0,921
%20 PET	2,77	0,888
%25 PET	3,02	1,1

Çizelge 4.4. Kendiliğinden yerleşen hafif geopolimer harçların su emme, kılcal su emme ve termal iletkenlik değerleri

PET oranı	Su emme oranı (%)	Kılcal su emme değeri (mm/dk ^{0.5})	Termal iletkenlik değeri (W/Mk)
%0 PET	16,143	0,604	1,094
%5 PET	15,96	0,493	1,056
%10 PET	15,843	0,412	1,026
%15 PET	15,702	0,426	1,008
%20 PET	15,573	0,435	0,94
%25 PET	15,377	0,299	0,93

Çizelge 4.5. Kendiliğinden yerleşen hafif geopolimer harçların farklı yaş ve koşullardaki birim ağırlıkları

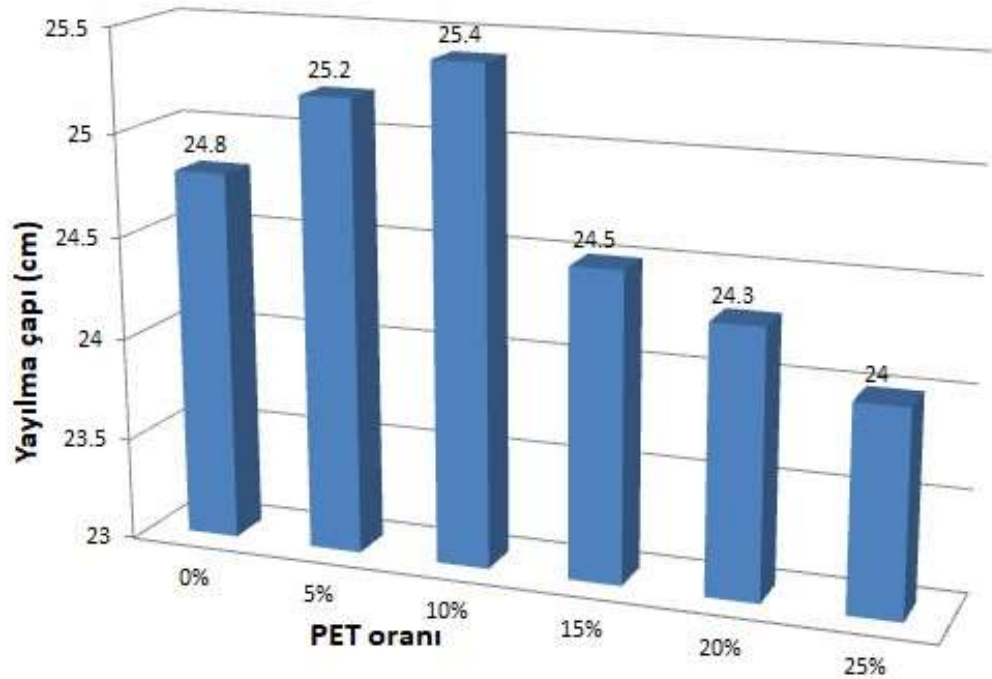
PET oranı	1 günlük birim ağırlık (kg/m ³)	28 günlük birim ağırlık (kg/m ³)	Etüv kurusu birim ağırlık (kg/m ³)
0%	1986	1940	1752
5%	1950	1870	1715
10%	1924	1820	1678
15%	1890	1760	1647
20%	1865	1690	1587
25%	1830	1670	1537

5. TARTIŞMA

5.1. Taze Özellikler

5.1.1. Mini Yayılma Deneyi

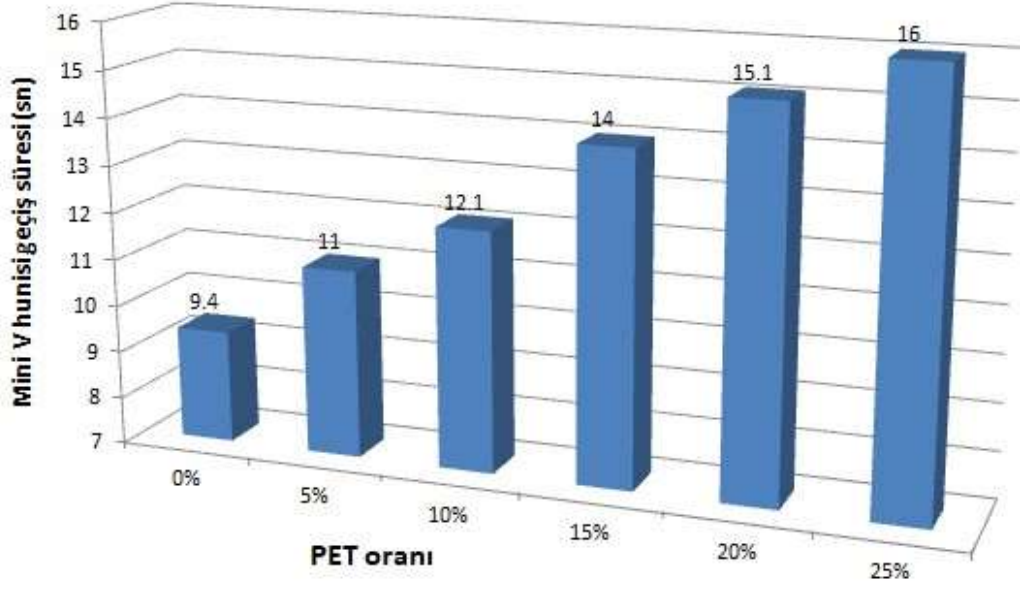
Kendiliğinden yerleşen geopolimer harçların akışkanlık özelliklerini belirlemede kullanılan deneylerden biri mini yayılma testidir. Şekil 5.1.'de geopolimer harcın içeriğindeki atık pet miktarı ile yayılma çapı arasındaki ilişki gösterilmiştir. Bütün harç karışımlarında yayılma çapı 24-26 cm aralığında kalmıştır. En yüksek yayılma miktarı %10 pet içeren karışımda en düşük yayılma miktarı ise %25 pet içeren karışımda gerçekleşmiştir. Mini yayılma deney sonuçlarına göre geopolimer harçta PET ikame seviyesinin artması belirgin değişimlere sebep olmamıştır. Ancak elde edilen yayılma değerleri tüm harçların kendiliğinden yerleşebilirlik kriterini sağladığını göstermiştir.



Şekil 5.1. Mini yayılma ölçüm sonuçları

5.1.2. Mini V Hunisi Deneyi

Harçların işlenebilirliği hakkında bilgi veren deneylerden biri de mini V hunisi deneyidir. Şekil 5.2.'de numunelerin V hunisinden akma süresi verilmiştir.



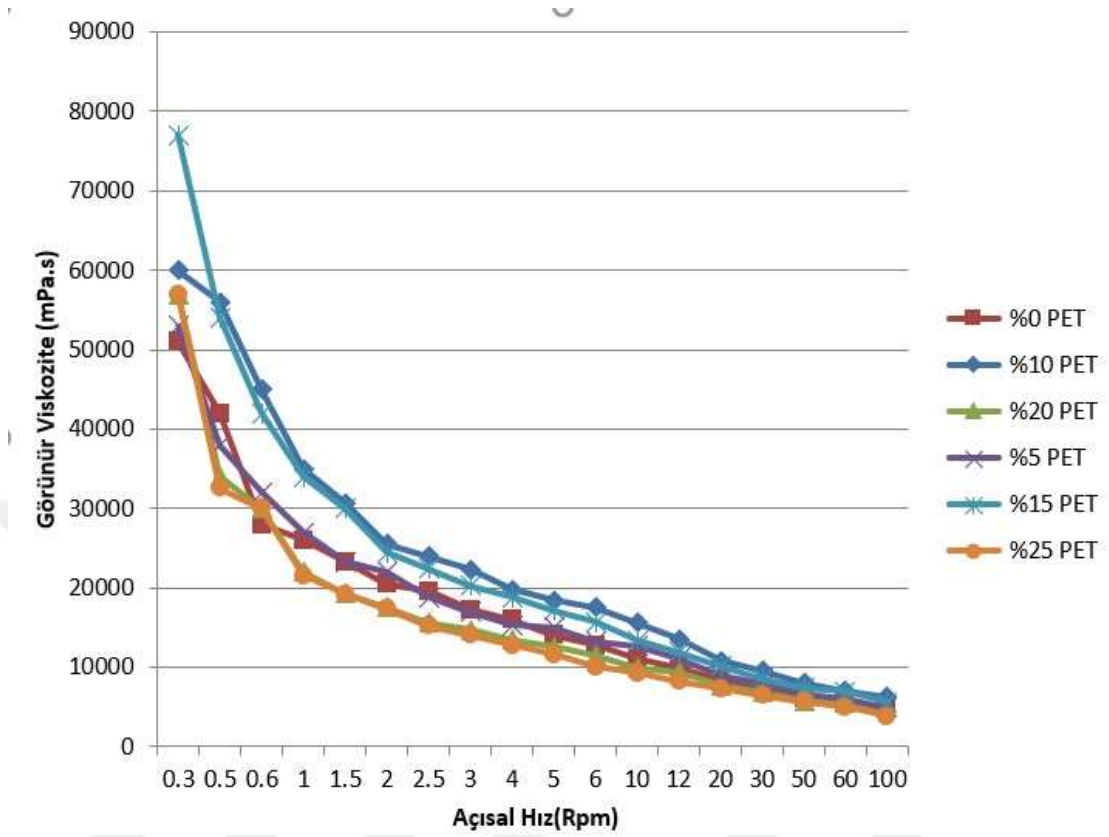
Şekil 5.2. Mini V hunisi akma süresi

Şekil 5.2.'den anlaşılacağı üzere geopolimer harçlardaki PET oranı ile akma süresi arasında doğru orantı bulunmaktadır. İçeriğinde PET bulunmayan numunelerde akma süresi 9,4 sn iken %25 PET oranına sahip numuneler 16 sn akma süresine sahiptir. Sonuçlardan PET miktarının artmasıyla işlenebilirliğin olumsuz etkilendiği sonucu çıkarılabilir. PET miktarının artmasıyla tanelerin özgül yüzey alanı arttığından dolayı işlenebilirlikte azalma gerçekleşmiştir.

5.1.3. Reoloji Sonuçları

Bütün harç karışımlarının viskozitesi reometre cihazı ile farklı devir/dakika açısız hızlarda ölçümler yapılarak elde edilmiştir. Her bir kendiliğinden yerleşen hafif geopolimer harç için farklı açısız hızlardaki viskozite-açısız hız grafiği Şekil 5.3.'de verilmiştir. PET miktarının artışı ile viskozite de artmış %10 PET yüzdesinde maksimum viskozite değerlerine ulaşılmış daha sonra PET yüzdesinin artması ile viskozitede düşüş gözlemlenmiştir. Reoloji deneyi mekanik bir etki (tork etkisi) ile gerçekleştiğinden tanelerin yüzey alanı kadar pürüzlülük/pürüzsüzlük durumları da davranışı etkilemektedir. %10'luk PET değişim seviyesine kadar özgül yüzey alanının artmış olması viskoziteyi arttırmış olsada bu değerden sonra eklenen PET taneciklerinin daha az sürtünmeli bir ortama sebep olmaları nedeniyle görünür viskozite değerlerinde azalma gerçekleşmiştir. Viskozite değerleri düşük açısız hız değerlerinde daha belirgin iken yüksek açısız hızlarda fark ciddi anlamda azalmış ve PET oranından bağımsız olarak benzer değerlere (5000-8000 mPA.s arası) sahip

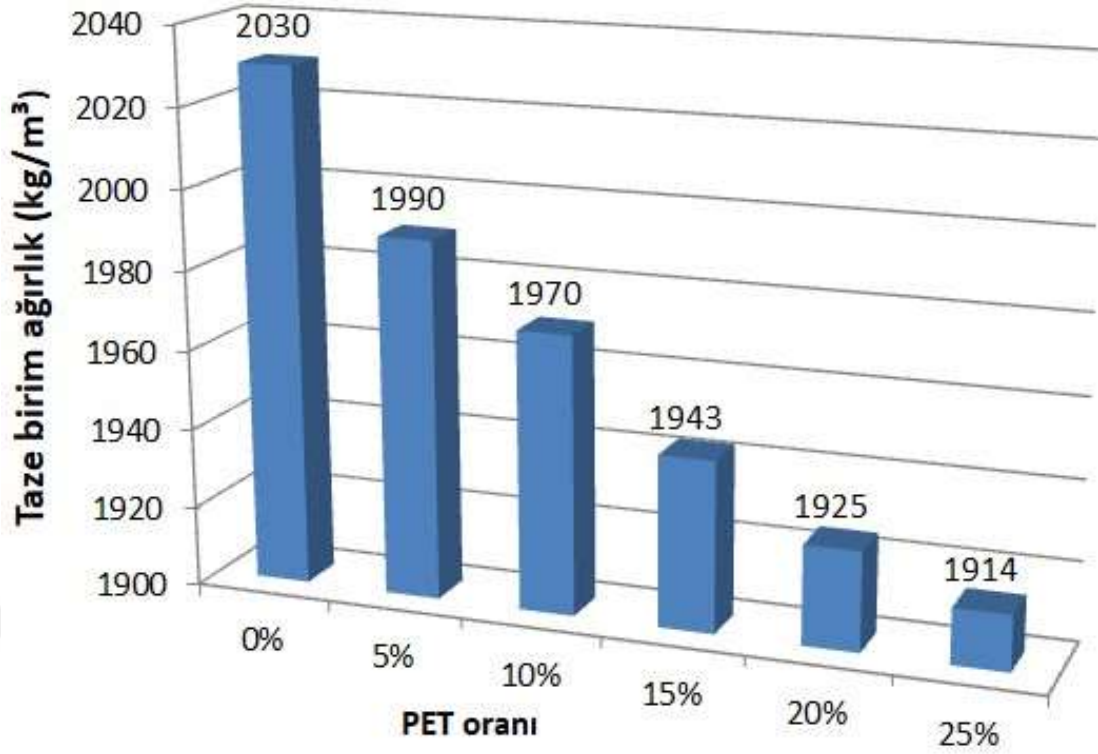
olma eğilimi oluşmuştur.



Şekil 5.3. Kendiliğinden yerleşen hafif geopolimer harçların viskozite grafiği

5.1.4. Taze Birim Ağırlık Ölçümleri

Geopolimer harçlar taze halde iken numuneler tartılmış ve birim ağırlıkları tespit edilmiştir. Numunelerin içeriğindeki PET yüzdeleri arttıkça doğal olarak numunelerin birim ağırlıkları da azalmıştır. Burada en baskın faktörün PET parçacıkların özgül ağırlıklarının çok düşük olması olarak yorumlanabilir. Ölçüm sonuçları Şekil 5.4.'te verilmiştir.

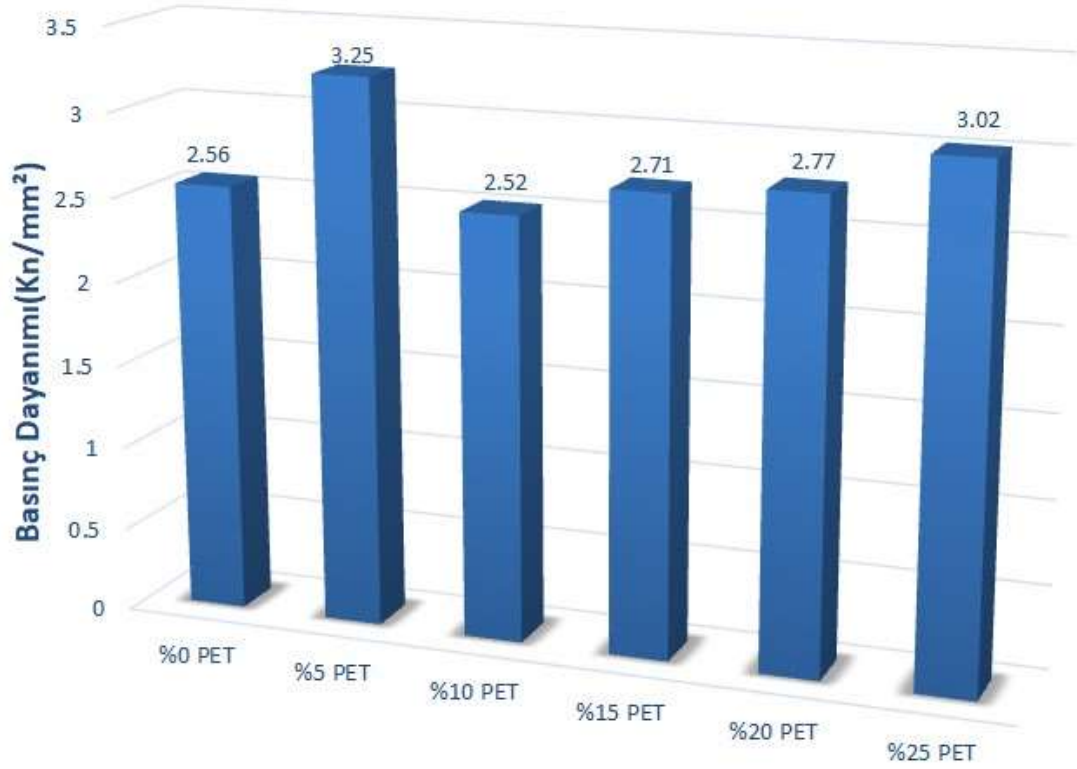


Şekil 5.4. Taze birim ağırlık ölçüm sonuçları

5.2. Sertleşmiş Özellikler

5.2.1. Basınç Dayanım Sonuçları

Kendiliğinden yerleşen hafif geopolimer harç numunelerinin 28 günlük basınç dayanım sonuçları Şekil 5.5.'de sunulmuştur.



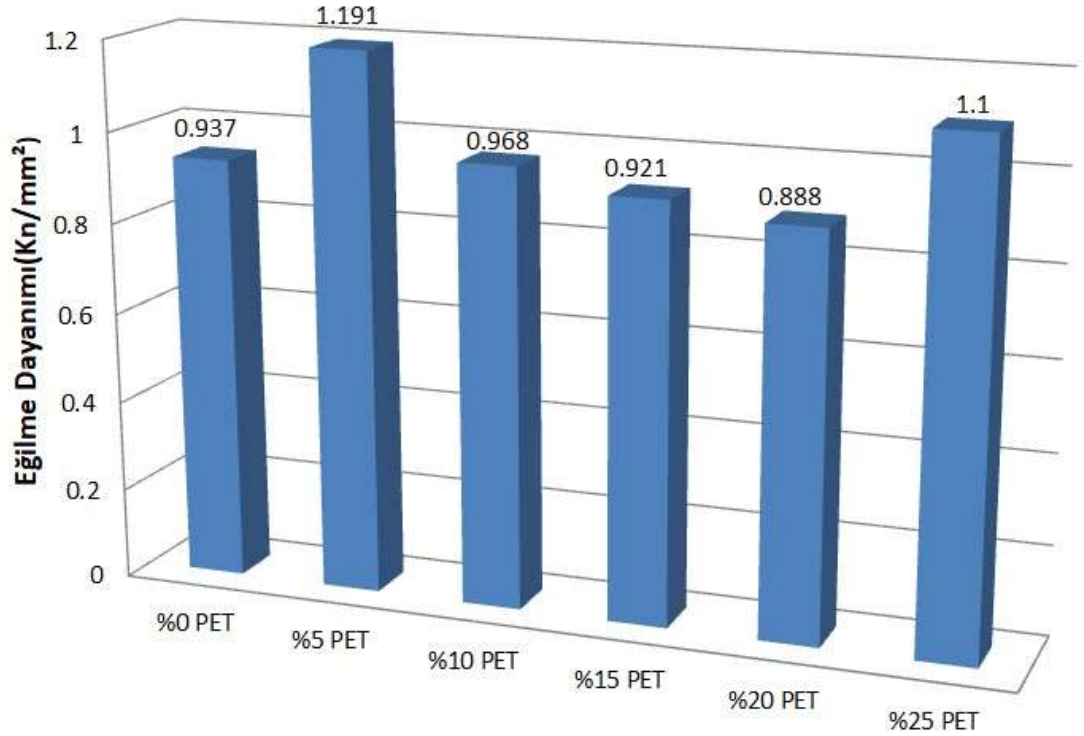
Şekil 5.5. Basınç dayanım sonuçları

Sonuçlar incelendiğinde hafif geopolimer harçların yapısına PET eklemenin basınç dayanımında olumlu etkileri olduğu gözlemlenmiştir. %0 PET karışımına kıyasla sadece %10 PET ikameli karışım çok düşük bir farkla daha az dayanım göstermiş olup diğer bütün karışımlarda basınç dayanımları daha yüksek seviyededir. En yüksek dayanım %5 PET karışımlı numunelerde 3,25 MPa olarak ölçülmüştür. Dayanım sonuçlarının diğer çalışmalara nazaran düşük olmasının sebebinin, kendiliğinden yerleşebilmeyi sağlamak için eklenen ekstra su ile ilgili olduğu düşünülmektedir (Ekmen, 2021). Önceki çalışmalarda PET kullanımının harç/beton boşluk yapısını olumsuz etkilediği belirtilmiştir. Bu sebeple basınç dayanımında düşüş gözlenmesi olası bir durumdur. Ancak, bu çalışmada PET ikamesinin dayanımda artışa sebep olmasının dayanımı çok düşük olan pomzanın azaltılması ile ilişkili olduğu söylenebilir.

5.2.2. Eğilme Dayanımı Sonuçları

Eğilme dayanım testi, boyutları 40x40x160 mm olan prizmatik numunelerle yapılmış ve sonuçlar Şekil 5.6.'da sunulmuştur. Numunelerdeki PET yüzdelerinin değişimi ile eğilme dayanımları karışık bir seyir izlemiştir. En yüksek dayanım %5 PET ikameli karışımda 1,191 MPa olarak ölçülmüştür. Bu sonuç PET atıklar kullanılarak yapılan başka bir çalışma ile paralellik göstermektedir (Mermerdaş ve

ark., 2017). En düşük dayanım ise %20 PET ikameli karışımda 0,888 MPa olarak ölçülmüştür.

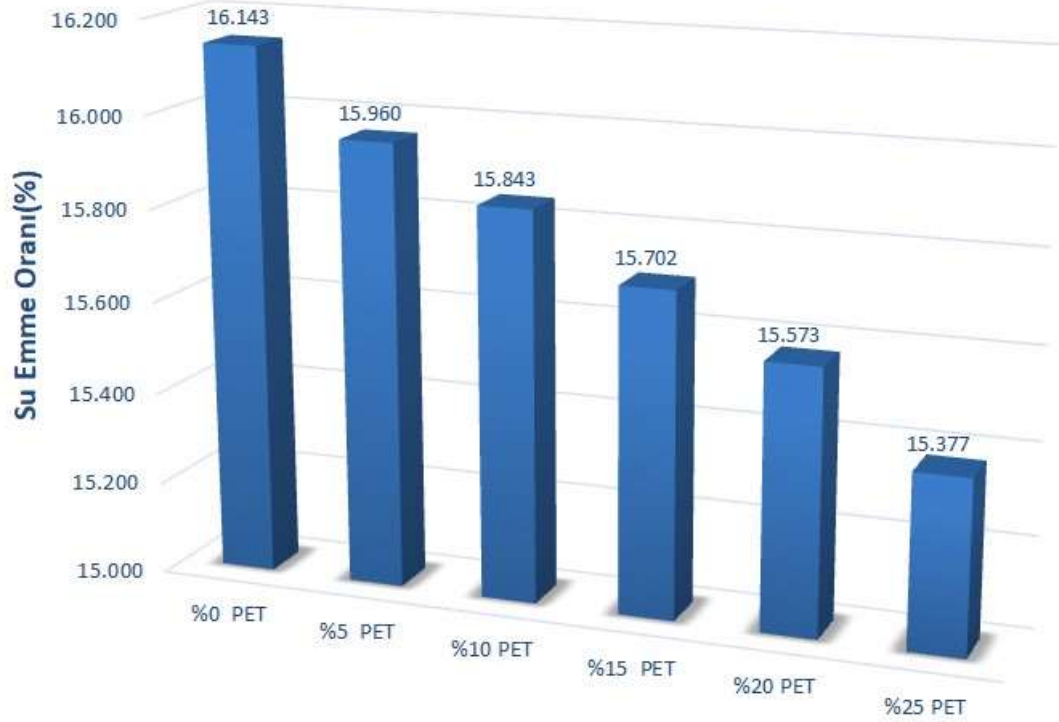


Şekil 5.6. Eğilme dayanım sonuçları

PET ikameli numunelerin mekanik özelliklerinde belirgin bir düşüş gözlenmemesinin sebebinin, pomzanın boşluklu yapısı ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Ayrıca polietilen tereftalatın, geopolimer harcların yapısında lif etkisi gösterdiği ve eğilme dayanımına katkıda bulunduğu kanaati oluşmuştur.

5.2.3. Su Emme Oranı Ölçümleri

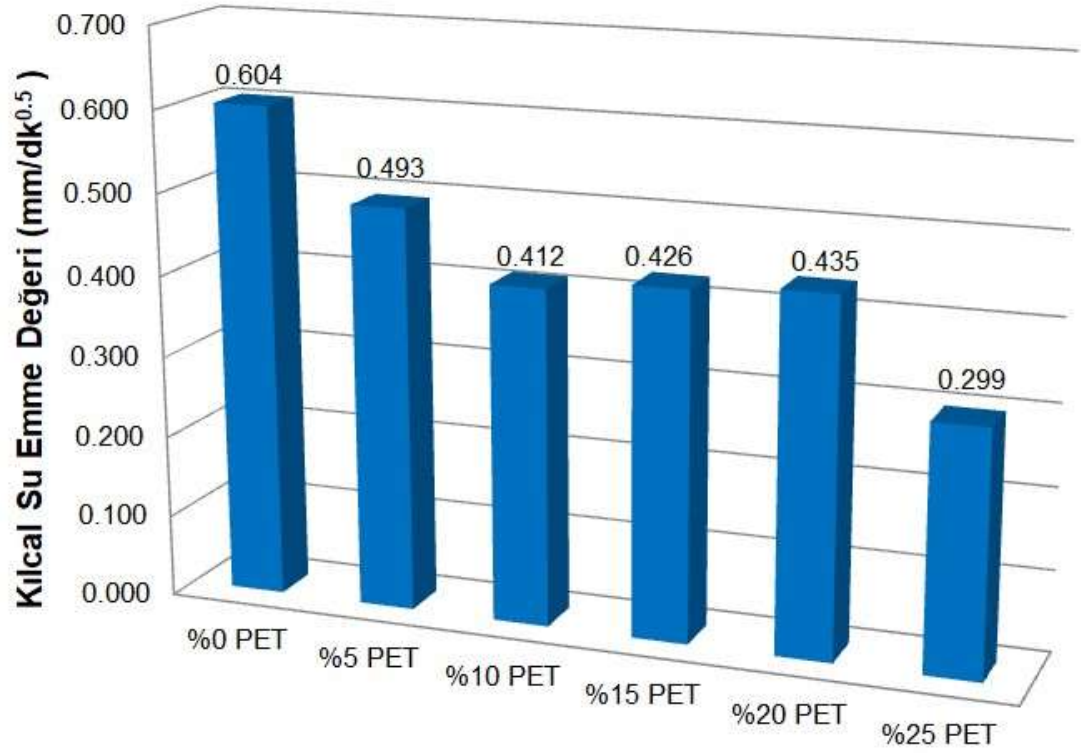
Karışımların su emme oranları Şekil 5.7.'de verilmiştir. Numunelerin yapısındaki PET oranı arttıkça su emme yüzdelerinin düştüğü görülmüştür. En yüksek su emme oranı %16,1 ile PET içermeyen karışımda, en düşük su emme oranı %15,4 ile %25 PET ikameli karışımda ölçülmüştür. Bu sonuçlar neredeyse hiç su emmeyen polietilen tereftalatın, su emme değeri oldukça yüksek olan pomza ve kum karışımı ile yer değiştirmesinden dolayı olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.7. Numunelerin su emme oranları

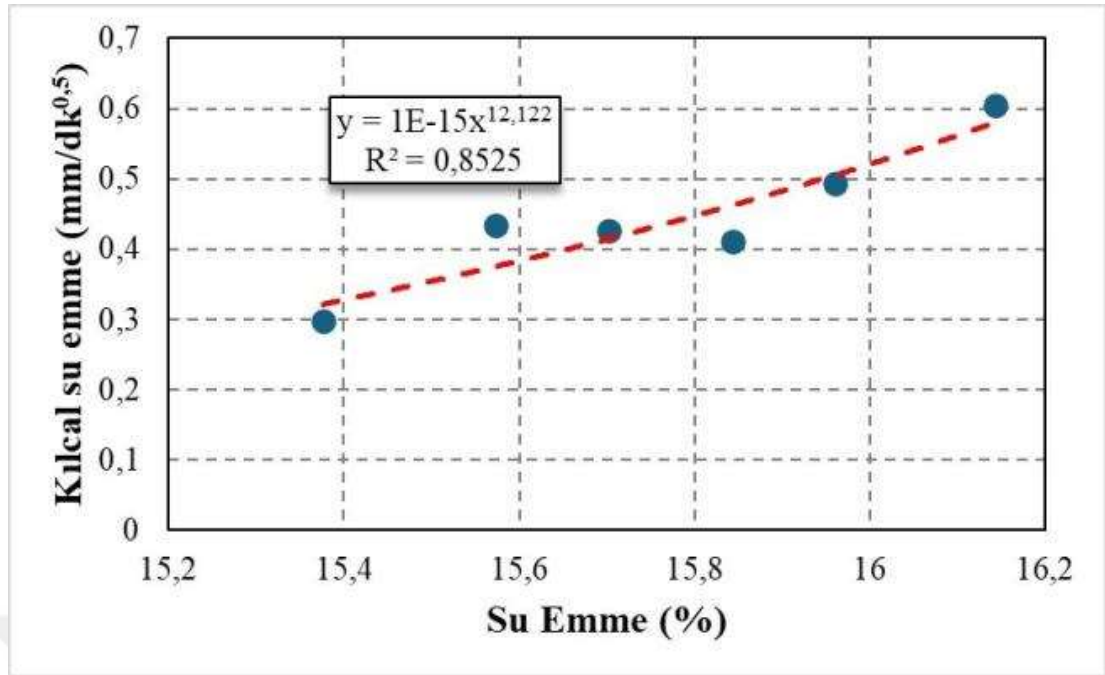
5.2.4. Kılcal Su Emme Değeri Ölçümleri

Kendiliğinden yerleşen hafif geopolimer harçların bağlantılı boşluk yapıları ile ilgili bilgi sahibi olmak için kılcal yolla su emme deneyleri yapılmıştır. Şekil 5.8.'de verilen deney sonuçlarına göre PET yüzdesi arttıkça kılcal su emme değerlerinde genel olarak düşme eğilimi tespit edilmiştir. PET kullanılmayan numunelerde kılcal su emme değeri ortalama $0,604 \text{ mm/dk}^{0.5}$ iken %25 oranında PET ikameli numunelerde ortalama $0,299 \text{ mm/dk}^{0.5}$ olarak ölçülmüştür. Ayrıca Şekil 5.9.'da su emme ile kılcal su emme arasındaki korelasyon sunulmuştur.



Şekil 5.8. Geopolimer harçların kılcal su emme değerleri

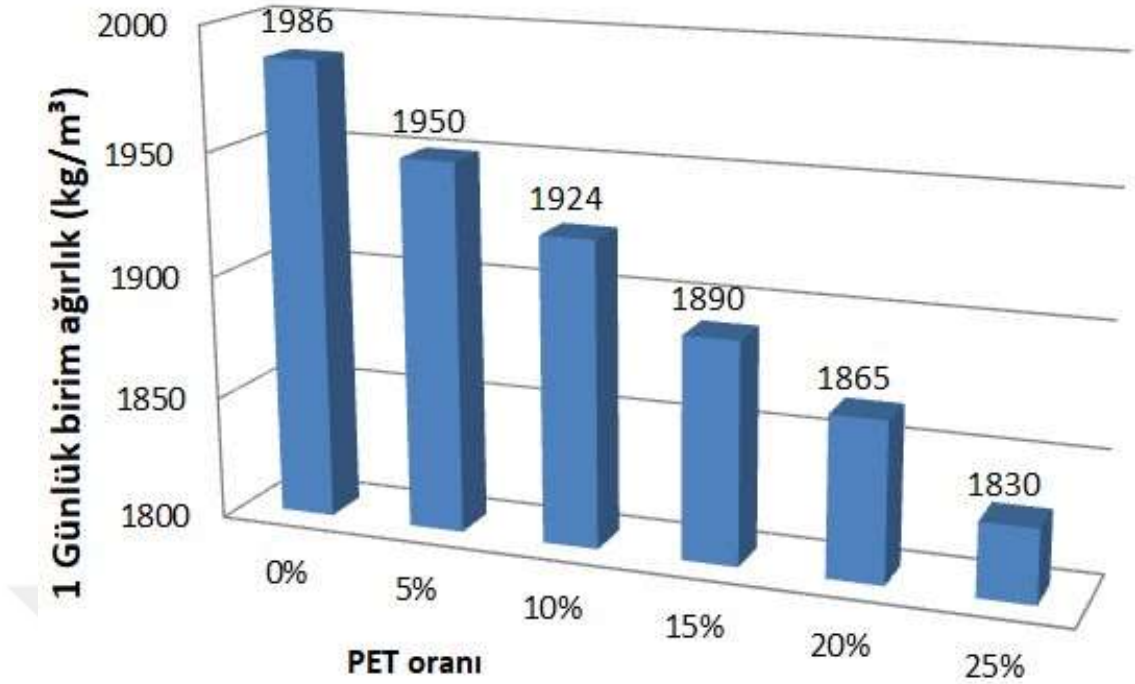
Kılcal su emme değerleri ile su emme değerleri arasındaki ilişki Şekil 5.9.'da gösterilmiştir. Burada belirleyicilik katsayısı 0.85 olarak üstel bir fonksiyon bağıntısı ile bulunmuştur. Ancak, daha iyi korelasyon sonuçları elde edebilmek için daha fazla deney sonucuna ihtiyaç duyulduğu açıktır.



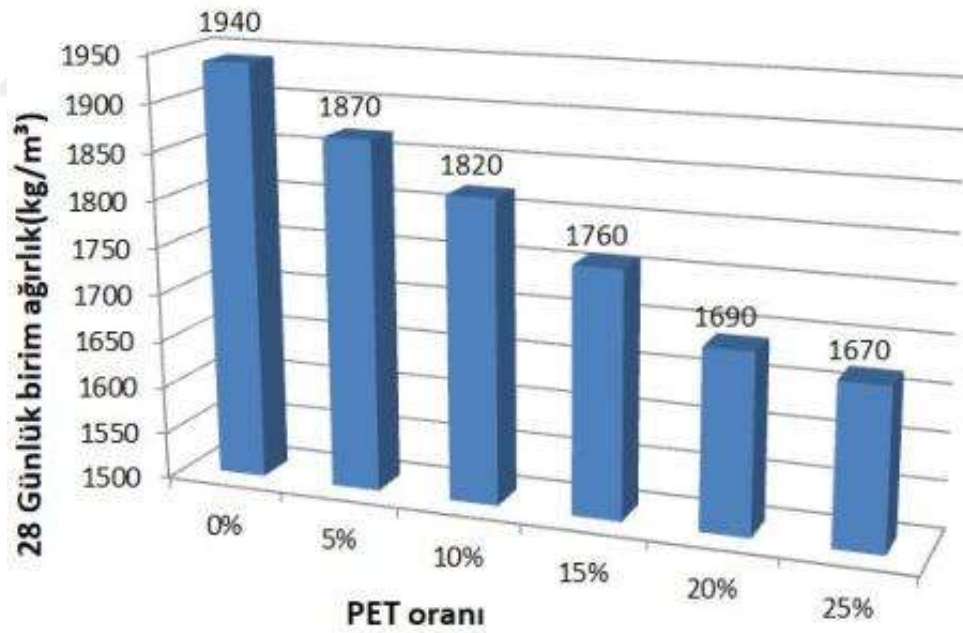
Şekil 5.9. Kılcal su emme ile su emme arasındaki korelasyon

5.2.5. Sertleşmiş Birim Ağırlık Ölçümleri

Birim ağırlığı 2000 kg/m³'den daha az olan betonlar hafif beton olarak sınıflandırılmaktadır (Taşdemir ve Şengül, 2013). Deneysel çalışmalar sonucunda bütün numunelerin sertleşmiş birim ağırlığı 2000 kg/m³'den düşük olarak ölçülmüştür. Şekil 5.10.'da geopolimer harçların 1 günlük birim ağırlığı Şekil 5.11.'de, 28 günlük birim ağırlığı verilmiştir. PET parçacıklarının yoğunluğunun agregadan daha düşük olmasından dolayı PET oranı arttıkça birim ağırlıkta düşüş görülmüştür. Şekil 5.12'de taze ile 28 günlük birim ağırlıklar arasındaki ilişki verilmiştir. Bu iki değer arasında yüksek bir korelasyon gözlenmiştir. Aralarındaki doğrusal ilişkiden faydalanılarak taze haldeki ölçümlerden 28 günlük birim ağırlık ölçümleri rahatlıkla tahmin edilebileceği anlaşılmaktadır.

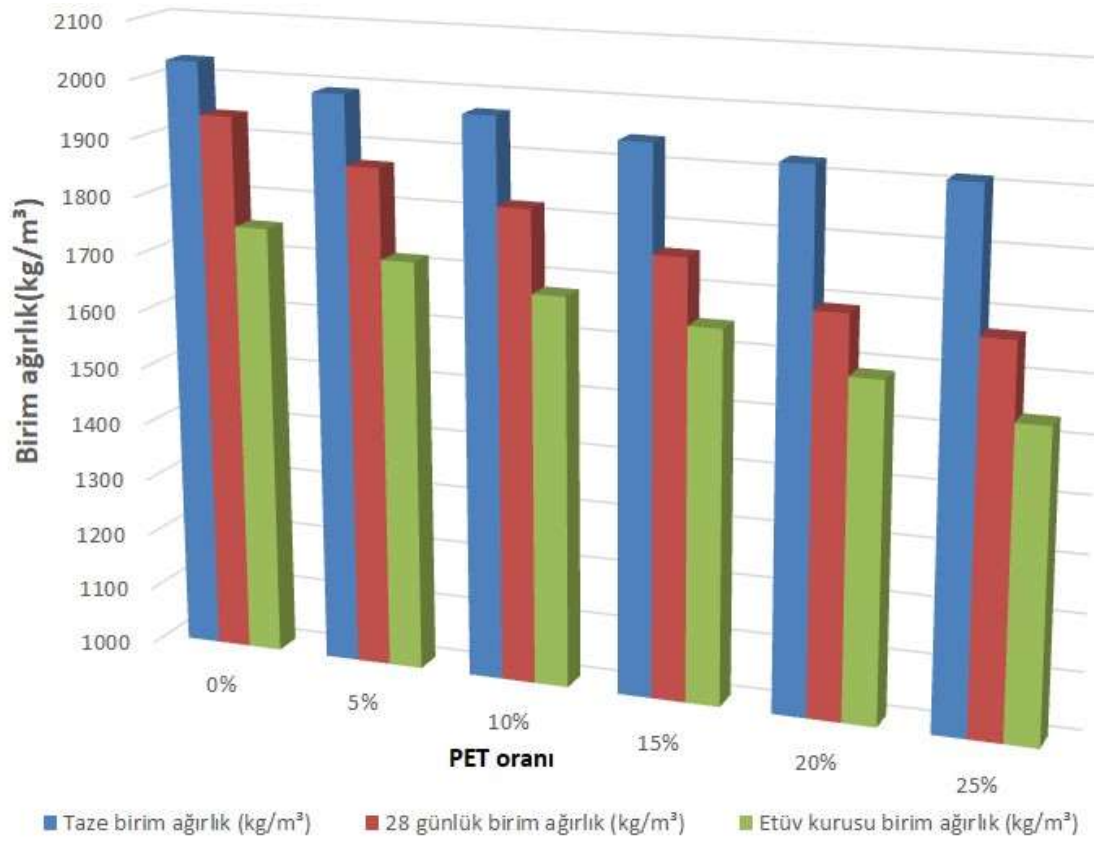


Şekil 5.10. Kendiliğinden yerleşen hafif geopolimer harçların 1 günlük birim ağırlıkları

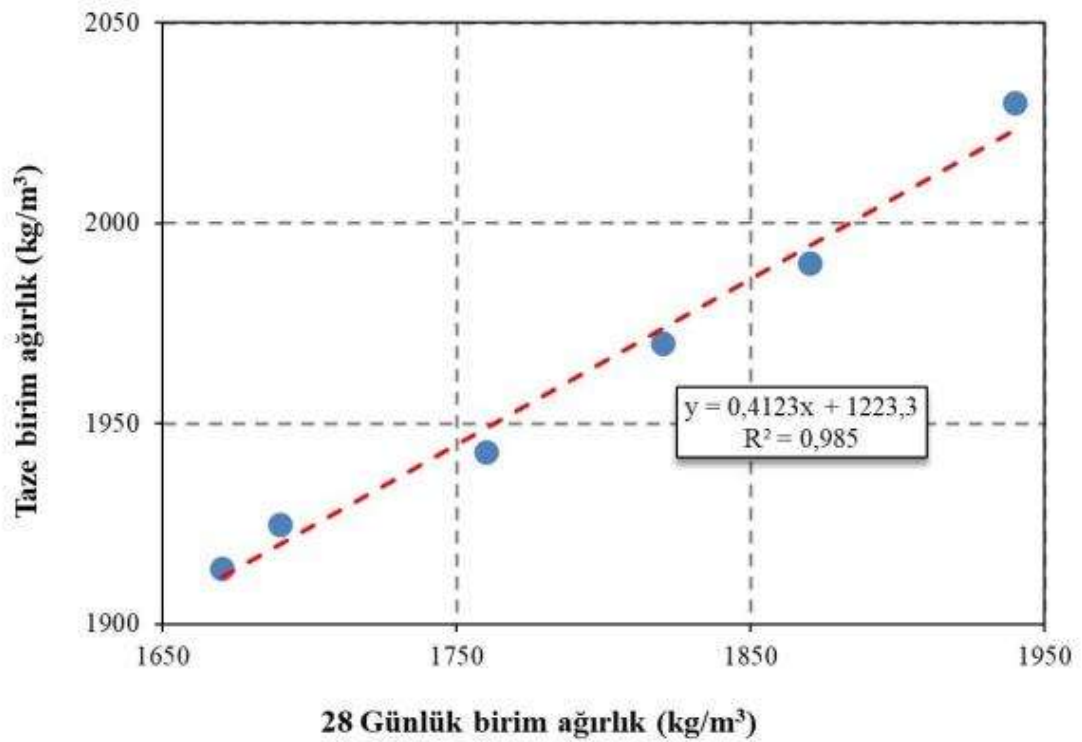


Şekil 5.11. Kendiliğinden yerleşen hafif geopolimer harçların 28 günlük birim ağırlıkları

Hafif geopolimer harç numunelerinin taze, 28 günlük ve etüv kurusu birim ağırlıkları Şekil 5.12.'de bir arada verilmiştir. Numunelerin birim ağırlıkları taze durumdaki ağırlıklarına nazaran, 28 günlük iken ortalama %8,7, etüvden çıkarıldıktan sonra ise ortalama %15,8 azalmıştır.



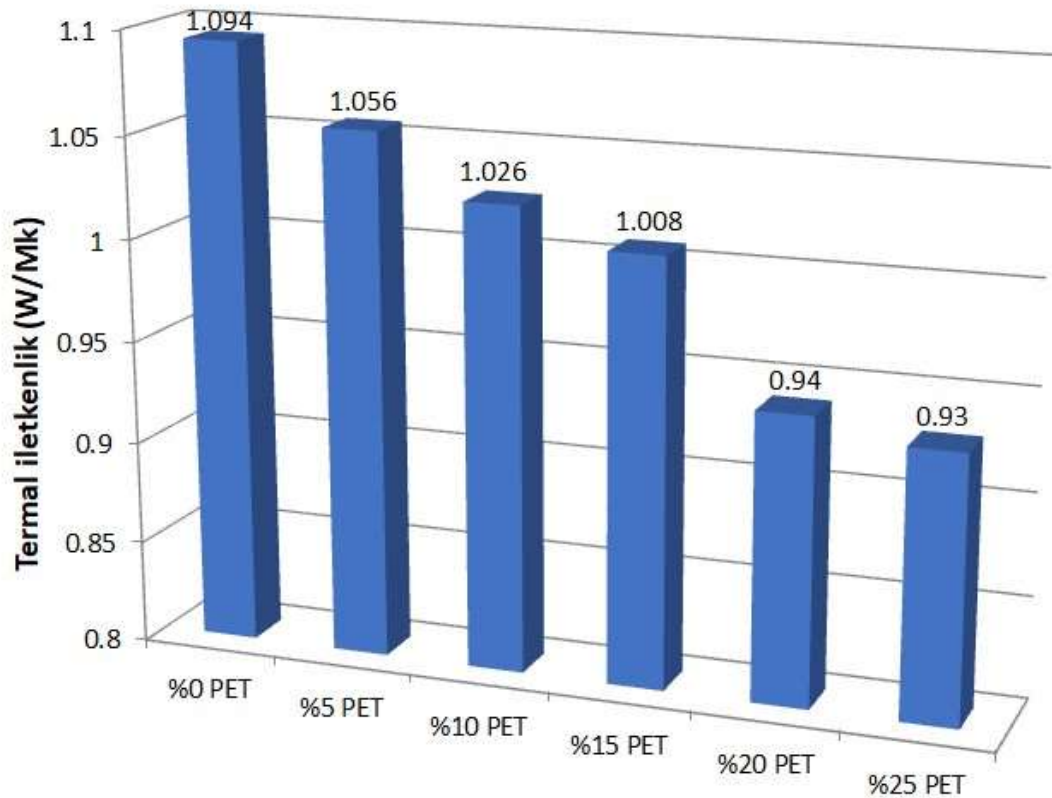
Şekil 5.12. Numunelerin farklı koşullardaki birim ağırlıkları



Şekil 5.13. Taze birim hacim ağırlık ile 28 günlük birim ağırlık arasındaki ilişki

5.2.6. Termal İletkenlik Sonuçları

Kendiliğinden yerleşen hafif geopolimer harçların termal iletkenlik değerlerini gösteren grafik Şekil 5.14.'de sunulmuştur. Grafik incelendiğinde numunelerde bulunan atık polietilen tereftalat miktarı arttıkça termal iletkenliğin azaldığı tespit edilmiştir. İçeriğinde atık polietilen tereftalat bulunmayan numunelerde ortalama termal iletkenlik 1,094 W/mK iken %25 atık polietilen tereftalat ikameli numunelerde %15 oranında azalış ile 0,93 W/mK olarak ölçülmüştür. Bunun sebebi PET'in daha düşük iletkenlik değerine sahip olması ve boşluk oranında artışa sebep olmasıdır. Ayrıca pomzanın yüksek su emme oranından dolayı harcın nemlilik durumunun termal iletkenlik değerleri üzerinde yüksek oranda değişkenliğe sebep olabileceği ancak harçta PET kullanımının artmasıyla daha üniform bir ısı iletkenlik davranışı sergileyeceği düşünülmektedir. Yüksek PET ikame oranlarında PET (%20-25) ortaya çıkan sonuçlar bu duruma kanıt olarak sunulabilmektedir.



Şekil 5.14. Kendiliğinden yerleşen hafif geopolimer harçların termal iletkenlik değerleri

6. SONUÇLAR

Bu tezden elde edilen deneysel verilere göre çıkarılan sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

1. Çökme yayılma deney sonuçlarına göre geopolimer harçta PET ikame seviyesinin artması belirgin değişikliklere sebep olmamıştır. Ancak elde edilen yayılma değerleri tüm harçların kendiliğinden yerleşebilirlik kriterini sağladığını göstermiştir.
2. Mini V hunisi deney sonuçlarına göre geopolimer harç içerisindeki polietilen tereftalat yüzdesi arttıkça işlenebilirlik açık bir şekilde azalmaktadır. Minimum akış süresi değeri PET bulunmayan numunede 9,4 sn iken en yüksek değer %25 PET içeren harçta 16 sn olarak ölçülmüştür.
3. Atık polietilen tereftalat miktarının %10 mertebelerine kadar artması ile viskozite artmış fakat %10 ile %25'e kadar yapılan PET artışlarında viskozitede düşüş eğilimi gözlemlenmiştir.
4. Atık PET kullanımı kendiliğinden yerleşen hafif geopolimer harçların basınç ve eğilme dayanımlarında belirgin bir düşüşe yol açmamıştır. En iyi dayanım sonuçları %5 PET oranına sahip numunelerde 3,25 MPa basınç, 1,191MPa eğilme dayanımı olarak ölçülmüştür. Mekanik sonuçlar, atık polietilen tereftalat içeren kendiliğinden yerleşen hafif geopolimer harçların, yapılarda taşıyıcı malzeme olarak kullanılmasının güç olacağını göstermiştir. Bu malzemenin yalıtım malzemesi, kaplama blokları, bölme duvar malzemesi vb. gibi taşıyıcı olmayan elemanlarda kullanılabileceği düşünülmektedir.
5. Hafif geopolimer harçlarda bulunan PET oranının artması ile su emme yüzdelерinde azalma meydana gelmektedir. Bu sonucun numunelerin yapısına su emme değeri çok düşük olan PET eklenmesi ve su emme değeri yüksek olan pomzanın çıkarılması ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte, su emme değerlerinde çok büyük değişimler gözlemlenmemiş olup %15-16 mertebelerinde ölçümler elde edilmiştir.
6. PET oranının artmasıyla ısı iletkenlik değerlerinde düşüşler gözlemlenmiştir. Bu durum PET'in düşük ısı iletkenlik değerine sahip olmasıyla açıklanmaktadır.

7. ÖNERİLER

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar dikkate alındığında aşağıdaki hususlar önerilmektedir.

Çalışma sonucunda kendiliğinden yerleşen hafif geopolimer harçlarda PET atıkların agrega ile %25 seviyesine kadar ikamesinin mümkün olduğu tespit edilmiştir. Bu şekilde malzeme üreterek PET'in geri dönüşümünün mümkün olduğu görülmüştür. Bundan dolayı daha yüksek hacimlerde PET ikamesiyle geri dönüşüm potansiyelinin araştırılması önerilmektedir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlarda mekanik özelliklerin yapısal beton uygulamaları için düşük seviyede olduğu görülmektedir. Bunun en önemli sebebi ekstrea su olarak değerlendirildiğinden ekstra su kullanılmadan üretilecek ve daha yüksek mekanik özelliklere sahip harç çalışmaları yapılmalıdır.

Bu çalışmada ana bağlayıcı malzeme olarak uçucu kül kullanılmış olup PET ikamesinin diğer bağlayıcı sistemlerde nasıl etki edeceğinin incelenmesi tavsiye edilmektedir.

Farklı çözelti konsantrasyonları ve alkali tipleri kullanılarak değişik karışım kombinasyonlarında PET ikame oranlarının etkisi irdelenmelidir.

KAYNAKLAR

- Adam, A. A., and Horiato, X. X. X. (2014). The effect of temperature and duration of curing on the strength of fly ash based geopolymers mortar. *Procedia engineering*, 95, 410-414.
- Ahmed, M. F. (2023). Effective use of waste plastic as sand in metakaolin/brick-powder geopolymer concrete. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 17(3), 473-485.
- Akçaözoğlu, S. (2008). *Atık pet şişe kırıklarının hafif beton agregası olarak kullanılabilirliği*. Çukurova üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi. <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/147423>
- Ardhira, P. J., and Sathyan, D. (2022). A comparative study of normal and self-compacting geopolymer mortar and its strength prediction using tensor flow approach. *Materials Today: Proceedings*, 65, 1046-1055.
- Brooks, R., Bahadory, M., Tovia, F., and Rostami, H. (2010). Properties of alkali-activated fly ash: High performance to lightweight. *International Journal of Sustainable Engineering*, 3(3), 211-218. <https://doi.org/10.1080/19397038.2010.487162>
- Chandra, S., and Berntsson, L. (2002). *Lightweight Aggregate Concrete* (3. bs). Noyes Publications.
- Choi, Y.-W., Moon, D.-J., Chung, J.-S., and Cho, S.-K. (2005). Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete. *Cement and Concrete Research*, 35(4), 776-781. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.014>
- Choi, Y. W., Moon, D. J., Kim, Y. J., and Lachemi, M. (2009). Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles. *Construction and Building Materials*, 23(8), 2829-2835. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.036>
- Davidovits J. (2020). *Geopolymer Chemistry and Applications* (5. bs). Institut 49 Géopolymère. Saint-Quentin.
- Duraiappah, A. K., Xin, Z., and Beukering, P. J. H. V. (2002). Issues in production, recycling and international trade: Analysing the Chinese plastic sector using an optimal life cycle (OLC) model. *Environment and Development Economics*, 7(1), 47-74.
- Durak, U., İlkentapar, S., Karahan, O., Uzal, B., and Atiş, C. D. (2021). A new parameter influencing the reaction kinetics and properties of fly ash based geopolymers: A pre-rest period before heat curing. *Journal of Building Engineering*, 35, 102023.
- Ekmen, Ş. (2021). *Uçucu kül esaslı hafif geopolimer harçların taze ve sertleşmiş özelliklerinin incelenmesi, modellenmesi ve optimizasyonu*. Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Elzafraney, M., Soroushian, P., and Deru, M. (2005). Development of energy-

- efficient concrete buildings using recycled plastic aggregates. *Journal of Architectural Engineering*, 11(4), 122-130.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0431\(2005\)11:4\(122\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0431(2005)11:4(122))
- Foti, D. (2011). Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers. *Construction and Building Materials*, 25(4), 1906-1915.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.066>
- Gavela, S., Karakosta, C., Nydriotis, C., Kaselouri-Rigopoulou, V., Kolias, S., Tarantili, P. A., Magoulas, C., Tassios, D., and Andreopoulos, A. (2004). A study of concretes containing thermoplastic wastes as aggregates. *Proceedings international RILEM conference on the use of recycled materials in buildings and structures. Barcelona, Spain*, 911-918.
- Ge, Z., Sun, R., Zhang, K., Gao, Z., and Li, P. (2013). Physical and mechanical properties of mortar using waste Polyethylene Terephthalate bottles. *Construction and Building Materials*, 44, 81-86.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.073>
- Ghafoor, M. T., and Fujiyama, C. (2023). Constitutive model for self-compacting geopolymer mortar based on fly ash content. *Journal of Building Engineering*, 71, 106462.
- Ghafoor, M. T., and Fujiyama, C. (2022). Performance of superplasticizers in alkaline environment of self compacting geopolymer mortar. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 20(11), 676-690.
- Ghafoor, M. T., Fujiyama, C., and Maekawa, K. (2022). Hardened mechanical properties of self compacting geopolymer mortar. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 20(4), 287-299.
- Ghafoor, M. T., Fujiyama, C., and Maekawa, K. (2021). Mix design processing for self compacting geopolymer mortar. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 19(11), 1133-1147.
- Glukhovsky, V. (1959). Soil silicates. Kiev. USSR: Gostroiizdat Publish.
- Gonen, T. (2009). Kendiliğinden yerleşen pomza ve perlit agregalı hafif harçların mekanik özellikleri. *Engineering Sciences*, 4(2), 186-194.
<https://doi.org/10.12739/nwsaes.v4i2.5000067155>
- Guo, X., Shi, H., and Dick, W. A. (2010). Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer. *Cement and Concrete Composites*, 32(2), 142-147.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.11.003>
- Gündüz, L., Sarıışık, A., Davraz, M., Uğur, İ., and Çankıran, O. (1998). *Pomza Teknolojisi Cilt-1* (C. 1).
- Hage, O., Söderholm, P., and Berglund, C. (2009). Norms and economic motivation in household recycling: Empirical evidence from Sweden. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(3), 155-165.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.11.003>

- Hızal, S. (2010). *Kendiliğinden yerleşen taşıyıcı hafif betonun tasarımı ve durabilite özellikleri* [Yüksek Lisans Tezi]. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Hoornweg, D., and Bhada-Tata, P. (2012). *What a waste: A global review of solid waste management*. 15, 98.
- Jin, J., and Domone, P. (2002). Relationships between the fresh properties of SCC and its mortar component. *First North American Conference on the Design and Use of SelfConsolidating*.
- Kaya, M. (2005). *Gıdaların Ambalajlanması*. 30, 30-56.
- Khalil, M. G., Elgabbas, F., El-Feky, M. S., and El-Shafie, H. (2020). Performance of geopolymers mortar cured under ambient temperature. *Construction and Building Materials*, 242, 118090. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118090>
- Koide, H., Tomon, M., and Sasaki, T. (2002). Investigation of the use of waste plastic as an aggregate for lightweight concrete. *Challenges of Concrete Construction*, 5, 177-185.
- Lazorenko, G., Kasprzhitskii, A., and Fini, E. H. (2022). Polyethylene terephthalate (PET) waste plastic as natural aggregate replacement in geopolymer mortar production. *Journal of Cleaner Production*, 375, 134083.
- Lazorenko, G., Kravchenko, E., Kasprzhitskii, A., and Fini, E. H. (2024). An evaluation of the environmental impact and energy efficiency of producing geopolymer mortar with plastic aggregates. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 22, 200216. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2024.200216>
- Ling, Y. (2018). *Proportion and performance evaluation of fly ash-based geopolymer and its application in engineered composites*. Iowa State University, Digital Repository, Doktora Tezi. <https://doi.org/10.31274/etd-180810-6028>
- Mahmut, O. (2015). *Geopolimer harç üretiminde Elazığ ferrokrom çürüfu kullanımının incelenmesi*. Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi. <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/84669>
- Mermerdaş, K., Nassani, D. E., and Sakin, M. (2017). Fresh, mechanical and absorption characteristics of self-consolidating concretes including low volume waste PET granules. *Civil Engineering Journal*, 3(10), 809-820.
- Nuaklong, P., Sata, V., and Chindaprasirt, P. (2016). Influence of recycled aggregate on fly ash geopolymer concrete properties. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2300-2307.
- Nuruddin, M. F., Malkawi, A. B., Fauzi, A., Mohammed, B. S., and Al-Mattarneh, H. M. (2016). Effects of alkaline solution on the microstructure of HCFA geopolymers. *Engineering Challenges for Sustainable Future-Proceedings of the 3rd International Conference on Civil, offshore and Environmental Engineering, ICCOEE, 2016*.

- Okamura, H., and Ouchi, M. (2003). Self-compacting concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(1), 5-15. <https://doi.org/10.3151/jact.1.5>
- Petermann, J. C., Saeed, A., and Hammons, M. I. (2010). Alkali-activated geopolymers: A literature review. *Air Force Research Laboratory Materials and Manufacturing Directorate Airbase Technologies Division*, 99.
- Purdon, A. (1940). *The action of alkalis on blast furnace slag*. 59, 191-202.
- Rahman, S. K., and Al-Ameri, R. (2021). A newly developed self-compacting geopolymer concrete under ambient condition. *Construction and Building Materials*, 267, 121822.
- Rebeiz, K. S. (1995). Time-temperature properties of polymer concrete using recycled PET. *Cement and Concrete Composites*, 17(2), 119-124. [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(94\)00004-I](https://doi.org/10.1016/0958-9465(94)00004-I)
- Rovnaník, P. (2010). Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. *Construction and building materials*, 24(7), 1176-1183.
- Safi, B., Saidi, M., Aboutaleb, D., and Maallem, M. (2013). The use of plastic waste as fine aggregate in the self-compacting mortars: Effect on physical and mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 43, 436-442.
- Safiuddin, M. (2008). *Development of Self-consolidating High Performance Concrete Incorporating Rice Husk Ash*. University of Waterloo, Doktora Tezi.
- Saikia, N., and de Brito, J. (2012). Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review. *Construction and Building Materials*, 34, 385-401. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.066>
- Sharma, A., and Singh, E. K. (2019). Effect of PET fiber on geopolymer concrete using fly ash and GGBS. *Int. J. Civ. Eng. Technol*, 10, 2077-2084.
- Siddique, R., Khatib, J., and Kaur, I. (2008). Use of recycled plastic in concrete: A review. *Waste Management*, 28(10), 1835-1852. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.09.011>
- Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M., and Bhattacharyya, S. K. (2015). Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Construction and building materials*, 85, 78-90.
- Taşdemir, A. (2022). *Effects of early microwave curing on physical and mechanical properties of slag based geopolymer mortars* [Yüksek Lisans Tezi]. Gazi Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü.
- Taşdemir, C., and Şengül, Ö. (2013). Hafif betonların fiziksel ve mekanik özellikleri. *Türkiye Hazır Beton Birliği Beton Bildirileri*, 21-24.
- Tayyar, A. E., and Üstün, S. (2010). Geri kazanılmış Pet'in kullanımı. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(1), 53-62.
- Üçüncü M. (2000). Gıdaların ambalajlanması (1. bs). Ege Üniversitesi. İzmir.

Yaman, İ. Ö., and Şahmaran, M. (2005). Kimyasal ve mineral katkılı kendiliğinden yerleşen harçlar. *Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu*, 137-146.

