

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**TABAN KÜLÜ ATIĞI VE POMZA AGREGASI KULLANILARAK ÇİMENTO
ESASLI VE GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ POLİETİLEN TEREFTALAT (PET)
İÇERİKLİ KOMPOZİT ÜRETİMİ VE OPTİMİZASYONU**

Arzu ÇAKMAK

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MİMARLIK

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

TEMMUZ 2023

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**TABAN KÜLÜ ATIĞI VE POMZA AGREGASI KULLANILARAK ÇİMENTO
ESASLI VE GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ POLİETİLEN TEREFTALAT (PET)
İÇERİKLİ KOMPOZİT ÜRETİMİ VE OPTİMİZASYONU**

Arzu ÇAKMAK

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MİMARLIK

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

TEMMUZ 2023

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TABAN KÜLÜ ATIĞI VE POMZA AGREGASI KULLANILARAK ÇİMENTO
ESASLI VE GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ POLİETİLEN TEREFTALAT (PET)
İÇERİKLİ KOMPOZİT ÜRETİMİ VE OPTİMİZASYONU**

Arzu ÇAKMAK
MİMARLIK
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ

TEMMUZ 2023

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TABAN KÜLÜ ATIĞI VE POMZA AGREGASI KULLANILARAK ÇİMENTO
ESASLI VE GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ POLİETİLEN TEREFTALAT (PET)
İÇERİKLİ KOMPOZİT ÜRETİMİ VE OPTİMİZASYONU**

Arzu ÇAKMAK
MİMARLIK
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ

Bu tez 24/07/2023 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Hacer MUTLU DANACI (Danışman)
Prof. Dr. Kemal Reha KAVAS
Doç. Dr. Mehmet EMİROĞLU
Prof. Dr. İlknur AKINER
Doç. Dr. Gül YÜCEL

ÖZET

TABAN KÜLÜ ATIĞI VE POMZA AGREGASI KULLANILARAK ÇİMENTO ESASLI VE GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ POLİETİLEN TEREFTALAT (PET) İÇERİKLİ KOMPOZİT ÜRETİMİ VE OPTİMİZASYONU

Arzu ÇAKMAK

Doktora Tezi, Mimarlık Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hacer MUTLU DANACI

II. Danışman: Doç. Dr. Salih Taner YILDIRIM

Temmuz 2023; 145 sayfa

Enerji üretiminden kaynaklanan taban külü ve günlük hayatta yaygın olarak kullanılan polietilen tereftalat (PET) atıkları, çevre ve canlı sağlığı için endişe verici sorunlar oluşturmaktadır. Bu atıkların etkili bir şekilde yönetilmemesi durumunda, atık hacimlerinde önemli ölçüde bir artışın kaçınılmaz olduğu görülmektedir.

Tez çalışması kapsamında, PET ve taban külü atıklarının doğada ayrışma sürelerinin uzunluğu ile hafif ve yüksek ısı yalıtımı gibi fiziksel ve kimyasal özellikleri incelenerek, inşaat sektöründe hafif yapı malzemesi kompozit harç karışımı oluşturma potansiyeli araştırılmıştır. Çalışmada, geliştirilen kompozit harç karışımında PET, taban külü atıkları, pomza agregası, çimento ve su kullanılmıştır. Bu kompozit harç ile inşaat sektöründe kullanılan yapı bloğu ürününün prototipi üretilerek, mevcut yapı bloğu standartlarına uygunluğu incelenmiştir.

Tez çalışmasında, çimento esaslı kompozit malzeme geliştirme sürecinde kullanılan hammadde özellikleri ve yapı malzemesi geliştirme yöntemleri hakkında literatür araştırması yapılarak ön deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu ön deney sonuçları doğrultusunda çimento, pomza/tabana külü ve PET parametreleri ile farklı seviyeler kullanılarak Taguchi tasarımıyla dokuz tip kompozit harç karışımı formülasyonu elde edilmiştir. Elde edilen bu deney tasarımı ile çimento oranı (250, 275, 300 kg/m³), pomza-taban külü değişim oranı (%30-70, %40-60, %50-50) ve PET agrega yüzdesi (%0.04, %0.07, %0.1) olmak üzere üç farklı parametre ve üç seviyede dokuz tip kompozit harç karışımı hazırlanmıştır.

Özel yapı bloğu baskı makinesi kullanılarak üretilen dokuz farklı tipteki numune üzerinde basınç dayanımı, kuru birim ağırlık, su emme, boşluk oranı, kılcallık, ısı iletkenlik, yüksek sıcaklık ve ses iletim testleri yapılmıştır. Aynı zamanda, numunelere maliyet ve CO₂ eşdeğer emisyon analizleri de yapılmıştır. Numunelerin performans özellikleri istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Optimum kompozit harç karışım formülünün 3. tip numune bileşimini oluşturan çimento 250 kg/cm³, pomza/tabana külü oranı %50-%50, PET agrega % 0.1 oranı olduğu belirlenmiştir. Optimizasyon değerlerinin deney tasarımı içindeki dokuz tip numuneden biri olması nedeniyle doğrulama deneysel çalışmaları gerçekleştirilmemiştir. Taguchi tasarımı sonrası

optimizasyon tasarımı olarak kabul edilen tip üç formülasyon değerleri ile ticari prototip üretimleri gerçekleştirilmiştir.

Geliştirilen kompozit harç formülasyonunun, inşaat sektöründe yapı bloğu olarak sıklıkla kullanılan tuğla, gaz beton ve bims bloklarına muadil olarak kullanılma potansiyelleri test ve analiz sonuçlarıyla değerlendirilmiştir. Üretilen yapı bloğu prototipinin, hafif beton sınıfına giren ağırlığa sahip, basınç dayanımı olarak bölücü duvar yapı bloklarına göre çok yüksek değerde, ısı iletkenlik, su emme, yüksek sıcaklık dayanım ve ağırlık kaybı değerlerinin ise mevcut yapı bloklarının standartları aralığında olduğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda maliyet ve CO₂ eşdeğer emisyonları bakımından avantajlı bir ürün olduğu gözlemlenmiştir.

Tez çalışması kapsamında, literatürde paylaşılan bilgilerin, PET ve taban külü atıklarının inşaat sektöründe ham madde olarak kullanılmasına, atık yönetimine ve döngüsel ekonomiye katkı sağlayacağı, yeni atık kaynaklarının keşfine, kompozit harç formülasyonlarının geliştirilmesine ve inşaat sektörüne yönelik yeni ürünlerin araştırma ve geliştirme çalışmalarına olanak tanıyacağı düşünülmektedir.

ANAHTAR KELİMELEER: Atık, PET, pomza, taban külü, Taguchi Yöntemi, kompozit

JÜRİ: Prof. Dr. Hacer MUTLU DANACI

Prof. Dr. Kemal Reha KAVAS

Doç. Dr. Mehmet EMİROĞLU

Prof. Dr. İlknur AKINER

Doç. Dr. Gül YÜCEL

ABSTRACT

PRODUCTION AND OPTIMIZATION OF CEMENT BASED AND RECYCLED POLYETHYLENE TEREPHTHALATE (PET) COMPOSITE USING BOTTOM ASH WASTE AND PUMICE AGGREGATE

Arzu ÇAKMAK

PhD Thesis in Architecture

Supervisor: Prof. Dr. Hacer MUTLU DANACI

II. Supervisor: Doç. Dr. Salih Taner YILDIRIM

June 2023; 145 pages

The waste generated from energy production, such as bottom ash, and the commonly used polyethylene terephthalate (PET) waste in daily life, pose concerning issues for both the environment and living organisms' health. In the event of ineffective management of these wastes, a substantial increase in waste volume is inevitable.

Within the scope of the thesis study, the potential to create a lightweight construction material composite mortar mixture was investigated by examining the long degradation times of PET and bottom ash waste in nature, along with their physical and chemical properties such as lightweight and high thermal insulation. In the study, the composite mortar mixture was developed using PET, bottom ash waste, pumice aggregate, cement, and water. A prototype of the construction block product commonly used in the construction industry was produced using this composite mortar, and its compliance with existing construction block standards was assessed.

In the thesis study, a literature review was conducted on the raw material properties used in the development process of cement-based composite materials and the methods for developing construction materials. Preliminary experiments were carried out based on these findings. Following the results of these preliminary experiments, a Taguchi design was employed to formulate nine types of composite mortar mixtures using varying levels of cement, pumice/bottom ash, and PET parameters. With this experimental design, nine different types of composite mortar mixtures were prepared, involving three different parameters at three levels: cement content (250, 275, 300 kg/m³), pumice-bottom ash ratio (%30-70, %40-60, %50-50), and PET aggregate percentage (%0.04, %0.07, %0.1).

Using a specialized structure block printing machine, compressive strength, dry unit weight, water absorption, void ratio, capillarity, thermal conductivity, high temperature, and sound transmission tests were conducted on nine different types of specimens that were produced. Additionally, cost and CO₂ equivalent emission analyses were carried out on the specimens. The performance characteristics of the specimens were statistically evaluated. The optimal composite mortar mixture formula was determined to be the composition of the third type specimen, with a cement content of 250 kg/m³, a pumice-bottom ash ratio of 50%-50%, and a PET aggregate ratio of 0.1%. Verification

experimental studies were not conducted as the optimization values coincided with one of the nine types of specimens within the experimental design. Following the Taguchi design, commercial prototype productions were carried out using the formulation values of type three, which were considered as the optimization design.

The potential of the developed composite mortar formulation to be used as an alternative to commonly used construction blocks in the construction industry, such as bricks, autoclaved aerated concrete blocks, and lightweight concrete blocks, was evaluated through testing and analysis results. The produced prototype of the construction block was found to fall within the lightweight concrete category in terms of weight and exhibited significantly higher compressive strength compared to partition wall construction blocks. The thermal conductivity, water absorption, high-temperature resistance, and weight loss values were found to be within the standard range of existing construction blocks. Furthermore, it was observed that the product offered advantages in terms of both cost and CO₂ equivalent emissions.

Within the scope of the thesis study, it is believed that the information shared in the literature will contribute to the use of PET and bottom ash waste as raw materials in the construction sector, enhancing waste management practices and promoting circular economy principles. This is expected to lead to the discovery of new waste sources, the development of composite mortar formulations, and research and development efforts aimed at creating innovative products for the construction industry.

KEYWORDS: Waste, PET, pumice, bottom ash, Taguchi Method, composite

COMMITTEE: Prof. Dr. Hacer MUTLU DANACI

Prof. Dr. Kemal Reha KAVAS

Doç. Dr. Mehmet EMİROĞLU

Prof. Dr. İlknur AKINER

Doç. Dr. Gül YÜCEL

ÖNSÖZ

Çalışma, çevresel katkısı olabilecek ürünlerin meydana geliş formülasyonu ile alışılmışın değişimi-dönüşümü olabilme arzusuyla yola çıkılıp bir hayalin peşinde başlayıp, girişimsel serüvenle devam eden yorucu, engebeli ama bir o kadarda keyif ve heyecan veren bir sürecin ürünü olarak ortaya çıkmıştır.

İnşaat sektöründe Avrupa ülkelerinde hükümet politikalarına giren yeşil malzeme ilgisi Türkiye’de istenilen seviyeye ulaşmamıştır. Literatür boyutunda kalan bilgilerin üretime yeterince yansımamış olması bu alanda daha fazla araştırma yapma ihtiyacını ortaya koymaktadır. Bu anlamda dünya çevre sorunlarından birine, ufak da olsa katkı sağlayabileceği düşüncesiyle çalışmanın kendi bağlamında önemli olduğu düşünülmektedir.

Tezin gerçekleştirilebilirliğini kılan, zorlu yolları aşabileceğime inancıyla ümitlendiren, yol gösteren, sevecenliği ve çözüm odaklılığı ile yanımda olan danışmanım Prof. Dr. Hacer MUTLU DANACI’ya, dersleri ve sohbetleri ile entelektüel yapısıyla ufkumu açan ve bu yönde hayatımda önemli dokunuşlar bırakan, süreçteki olumlu katkılarıyla Prof. Dr. Kemal Reha KAVAS’a, tez sürecindeki yönlendirici fikirleri ve deneyimleriyle Ar-Ge çalışmalarına yaptığı önemli dokunuşlardan dolayı Doç. Dr. Mehmet EMİROĞLU’na, doktora sürecindeki eğitimimde desteği ve sevecenliği ile yanımda olan İlknur AKINER’e, özel hayatımda ablalık, akademiye hocalık yapan, yol gösteren, her zaman destek veren ve iyi ki girmiş hayatıma dediğim Doç. Dr. Gül YÜCEL’e, doktora eğitimim sürecindeki desteklerinden ve kattığı bilgilerden dolayı Akdeniz Üniversitesi Mimarlık Fakültesi hocalarıma, lisans eğitimi döneminden beri desteğini üzerimden hiç çekmeyen, her yardım talebime cevap veren, akademi ve girişimcilik yolunda yolumu aydınlatan, bilgisi, tecrübesiyle gelişmemi, disiplinler arası bağlantıyı kurabilmemi ve bu yolda devam etmemi sağlayan ikinci danışmanım Salih Taner YILDIRIM’a, hayatınıza bazen bir kişi girer ve hayatınız değişir dedikleri kişi olsa gerek diye düşünmemi sağlayan, tez sürecinde bütün durumlarda ve her zaman yanımda olan, yol gösteren, en büyük destekçim olan, her ümitsizlik kuyusundan çıkmamı sağlayan, her zor durumun karşısında çözümleriyle ümit, huzur ve güven veren, bir teşekkürün yetersizliğini hissettiren, yol arkadaşım olan Dr. İsmail Veli SEZGİN’e, laboratuvar çalışmalarını kolaylıkla sürdürmemi sağlayan bilgilerini, desteklerini ve yardımlarını esirgemeyen, yol gösteren Prof. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL, Nazlı İpek KUL GÜL ve Araş Gör. İbrahim YETİŞ’e, saha çalışmalarımı gerçekleştirmem için bütün saha imkanlarını sunan Timür ERYILMAZ’a, akademik hayatıma başlamamı sağlayan Doç. Dr. Mustafa KÜÇÜKTÜVEK ve Doç. Dr. Hilal Tuğba ÖRMECİOĞLU’na, tez çalışmasının projelendirilmesini sağlayıp girişimci serüvenime başlayabilmemi sağlayan 2020 yılı Akdeniz TTO ekibine, Dr. Cem SAKARYA ve TEYDEB 1512 BİGG (Proje No: 2211267) TÜBİTAK’a, üniversite yıllarında başlayan, her daim yanımda olan, en ufak ihtiyacımda koşan ve tez sürecinde de beni yalnız bırakmayan, her türlü desteği sağlayan manevi kardeşlerim Meltem, Can ve Yağmur ÇIRPI’ya,

Çok şanslı biri olduğumu her zaman hissettiren, hayattaki en büyük güçlerim, iyi kilerim, her türlü maddi, manevi desteklerini esirgemeyen ve her daim, her kararımdayanımda olanlarım, yaşam sevinçlerim, sevgili ailem babam Necdet, annem Süheyla, ağabeylerim Özgür, Barış, ablam Şükran ve su perilerim, yeğenlerim İlayda, Lara Çakmak’a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vi
AKADEMİK BEYAN	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xv
ÇİZELGELER DİZİNİ	xix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	7
2.1. İnşaat Sektöründe Kullanılan Atık Katkılı Malzemeler.....	7
2.1.2. Plastik Atığı ve Çevresel Etkileri	11
2.1.2.1. Polietilen tereftalat (PET) ve atıkları	16
2.1.2.2. PET atıklarının yapı malzemelerinde kullanılması.....	17
2.1.3. Termik Santral Atıkları ve Taban Külü Atıklarının Agrega Şeklinde Kullanımı	27
2.2. Pomza Malzeme Özellikleri ve Kullanımı	36
2.3. Taguchi Tasarımı Metodu ve Yapı Malzemesi Geliştirilme Araştırmalarında Kullanımı.....	40
3. MATERYAL VE METOD	45
3.1. Materyal	45
3.1.1. Pomza	45
3.1.2. Taban külü	46
3.1.3. Polietilen tereftalat (PET) tüketim atığı.....	46
3.1.4. Çimento.....	47
3.1.5. Su	48
3.2. Metod	48
3.2.1. Ön çalışma	48
3.2.2. Taguchi tasarımı metodu	55
3.2.2.1. Taguchi performans karakteristiği	55
3.2.2.2. Varyans analizi.....	56

3.2.2.3. Deneysel Taguchi tasarımı.....	57
3.2.3. Yapı bloğu baskı makinesi geliştirilmesi ve deneysel çalışmalar	58
3.2.4. Test ve analizler	63
3.2.4.1. Basınç dayanımı testi	63
3.2.4.2. Kuru birim ağırlık, su emme ve boşluk oranı testi.....	64
3.2.4.3. Kılcal su emme testi.....	66
3.2.4.4. Isıl iletkenlik testi.....	66
3.2.4.5. Yüksek sıcaklığa dayanıklılık testi	68
3.2.4.6. Maliyet analizi	69
3.2.4.7. CO ₂ eşdeğer (CO ₂ -e) emisyonu analizi.....	69
3.2.4.8. Ses iletim testi	70
4. BULGULAR.....	71
4.1. Çalışmada Kullanılan Materyallerin Literatürle Karşılaştırılması.....	71
4.2. Basınç Dayanımı Testi	74
4.3. Kuru Birim Ağırlık, Su Emme ve Boşluk Oranı Testi.....	76
4.4. Kılcal Su Emme Testi	81
4.5. Isıl İletkenlik Testi.....	84
4.6. Yüksek Sıcaklık Testi.....	86
4.7. Maliyet Analizi.....	90
4.8. CO ₂ Eşdeğer (CO ₂ -e) Emisyonu Analizi	92
4.9. Ses İletim Testi	93
4.10. Taguchi Tasarımı İstatistiksel Değerlendirmeler	95
4.10.1. Basınç dayanım değerlerinin istatistiksel incelenmesi	95
4.10.2. Kuru birim ağırlık değerlerinin istatistiksel olarak incelenmesi.....	97
4.10.3. Su emme değerlerinin istatistiksel incelenmesi.....	99
4.10.4. Kılcallık katsayı değerlerinin istatistiksel incelenmesi.....	100
4.10.5. Isıl iletkenlik değerlerinin istatistiksel olarak incelenmesi.....	102
4.10.6. Yüksek sıcaklık değerlerinin istatistiksel olarak incelenmesi	103
4.10.6.1 Yüksek sıcaklık ağırlık kaybı.....	103
4.10.6.2. Yüksek sıcaklık dayanım kaybı	105
4.10.7. Maliyet analizi değerlerinin istatistiksel incelenmesi.....	106
4.10.8. CO ₂ eşdeğer (CO ₂ -e) emisyonu değerlerinin istatistiksel incelenmesi....	108

4.10.9. Ses iletim değerlerinin istatistiksel incelenmesi	110
4.10.10. Taguchi tasarımı istatistiksel değerlendirme sonuçları.....	111
4.11. Ticari Prototip Çalışması.....	115
5. TARTIŞMA	116
6. SONUÇLAR	123
7. KAYNAKLAR	129



AKADEMİK BEYAN

Doktora Tezi olarak sunduğum “Taban külü atığı ve pomza agregası kullanılarak çimento esaslı ve geri dönüştürülmüş polietilen tereftalat (PET) içerikli kompozit üretimi ve optimizasyonu” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

24/07/2023

Arzu ÇAKMAK



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	: Numune yüzey alanı (m^2)
A_T	: Emilen kılcal su miktarı ($g/100cm^2$)
d	: Numune kalınlığı (m)
dB	: Desibel
g/cm^3	: Gram/santimetre küp
kg	: Kilogram
kg/m^3	: Kilogram/metre küp
KN	: Kilo Newton
L_1	: Numunenin test yüzeyinin 0.5 mm hassasiyetle ölçülmüş uzunluğu (mm)
L_2	: Numunenin test yüzeyinin 0.5 mm hassasiyetle ölçülmüş genişliği (mm)
lt	: Litre
m^2	: Metrekare
m^3	: Metreküp
ml	: mililitre
mm	: Milimetre
Mt	: Metrik ton
MPa	: Mega pascal
N/mm	: Newton milimetre
N/mm^2	: Newton milimetrekare
ppm	: Milyonda bir partikül
P	: Boşluk oranı (%)
T_f	: Sıcaklık farkı (K)
W/mK	: Isıl iletkenlik katsayı

W_d	: Doygun kuru yüzey ağırlık (gr)
W_k	: Kuru ağırlık (gr)
W_s	: Suda ağırlık (gr)
W_T	: Numunenin T zamanında 0.1 g hassasiyetle ölçülmüş ağırlığı (g)
W_0	: Numunenin başlangıçtaki 0.1 g hassasiyetle ölçülmüş ağırlığı (g)
W_h	: Watt saat
%	: Yüzde
$^{\circ}C$	: Santigrat
μm	: Mikrometre
λ	: Isıl iletkenlik katsayısı (W/m.K)
Q	: Uygulanan güç (W)
Δ	: Kuru birim ağırlık
V	: Numune hacmi

Bu tez çalışmasında, ondalık ayırıcı olarak “nokta (.)” kullanılmıştır.

Kısaltmalar

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ANOVA	: Varyans Analizi
Al_2O_3	: Dialüminyum trioksit
Ar-Ge	: Araştırma Geliştirme
ASAT	: Antalya Su ve Atıksu İdaresi
C_2S	: Dikarbür sülfür
C_3S	: Trikarbür sülfür
CaO	: Kalsiyum oksit
CEM	: Cement
CEM I	: Portland çimentosu

CH ₄	: Metan
Cl-	: Klorür
CO	: Karbonmonoksit
CO ₂	: Karbondioksit
CO ₂ -e	: Karbondioksit eşdeğer
CSH	: Kalsiyum Silikat Hidrat
dak.	: Dakika
F-Değeri	: Test istatığıdır
p-Değeri	: Olasılık terimi
Fe ₂ O ₃	: Demir II trioksit
g/cm ³	: Gram/santimetreküp
HDPE	: Yüksek yoğunluklu polietilen
HFCs	: Hidroklorofloro karbonlar
i	: Deney numarası
K ₂ O	: Potasyum oksit
K. O.	: Karelerin ortalamaları
KOK	: Kalıcı organik kirletici
K. T.	: Karelerin toplamı
LCA	: Life cycle assesment – yaşam döngü analizi değerlendirmesi
LDPE	: Düşük yoğunluklu polietilen
MgO	: Magnezyum oksit
min.	: Minumum
max.	: Maximum
Na ₂ O	: Sodyum oksit
NH ₃	: Amonyak
N ₂ O	: DiAzot monooksit

Ni	: i Deneyi için deneme numarası
NO _x	: Azot oksit
P ₂ O ₅	: Fosfor pentaoksit
PCPE	: Plastik kristal polimer elektrolit
PCPP	: Plastik ambalaj
PET	: Polietilen tereftalat
PFCs	: Fenilklorofloro karbonlar
PP	: Polipropilen
PP&A	: Polipropilen Akrilamid
PS	: Polistiren
PUF	: Poliüretan köpük
PVC	: Polivinil klorür
RV	: Dönme viskozitesi
TiO ₂	: Titanyum dioksit
TTM	: Taguchi tasarımı metodu
S/Ç	: Su/Çimento
S/G	: Sinyal/Gürültü
S. D	: Serbestlik derecesi
SF ₆	: Kükürt hekzaflorür
SiO ₂	: Silisyum dioksit
SO ₂	: Sülfür dioksit
SO ₃	: Kükürt trioksit
TCDD	: 2,3,7,8 tetraklorodibenzo-p-dioksin
TL	: Türk Lirası
TCLP	: Toksisite Karakteristik Liç İşlemi
TS	: Türk Standartları

TTM	: Taguchi Tasarımı Metodu
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurum
u	: Deneme numarası
UNEP	: Birleşmiş Milletler Çevre Programı
WOS	: Web of Science Collection
WOCA	: Kömür külü dünyası
y	: Her bir gözlem değeri
YÖK	: Yükseköğretim Kurumu
yu	: Gözlem ortalama değeri

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Plastik çeşitlerinin sınıflandırılması ve bunların çeşitli uygulamalarla ilişkilendirilmesi (Lamba vd. 2022).....	12
Şekil 2.2. Toplam plastik atık üretimi ve imhası (milyon metrik ton) (Geyer vd. 2017)	12
Şekil 2.3. 1950 yılından 2015 yılına kadar plastiklerin küresel üretimi, kullanımı ve akıbeti (Geyer vd. 2017)	13
Şekil 2.4. Plastiglomera parçası (Corcoran vd. 2014)	14
Şekil 2.5. Plastik atık yönetimi senaryosu (Lamba vd. 2022)	14
Şekil 2.6. Plastik atık yönetimi senaryosu (Lamba vd. 2022)	21
Şekil 2.7. Yazar tarafından yapılan akademik araştırma başlıkları kelime bulutu analizi (Anonim 3)	23
Şekil 2.8. PET atık katkılı inşaat malzemeleri avantaj ve risklerine yönelik durum değerlendirmesi (Da Silva vd. 2021)	25
Şekil 2.9. Termik Santral kömür atığı olan uçucu kül ve taban külü (Anonim 4).....	28
Şekil 2.10. Taban külü ve uçucu kül ve oluşum şeması (Tekin 2014).	28
Şekil 2.11. Asidik ve bazik pomza örnekleri	36
Şekil 2.12. Türkiye’de illere göre pomza rezerv miktarları ve işletme sayılarının dağılımları (Gönen 2009; Yazar tarafından oluşturulmuştur.).....	37
Şekil 2.13. Deney tasarım yöntemlerine bakış (Hündür 2019).....	41
Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan pomza agregaları.....	45
Şekil 3.2. Çalışmada kullanılan taban külü atıkları	46
Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan PET atıkları	47
Şekil 3.4. Ön çalışma sistematik çalışma metodolojisi akış diyagramı (Yazar tarafından oluşturulmuştur.).....	48
Şekil 3.5. Materyallerin granülometri analizi öncesi hazırlıkları	49
Şekil 3.6. Hava kurusu, etüv kurusu, doymun kuru yüzey kuru ve su emme ağırlıkları ve özgül ağırlık analizleri için kullanılan materyaller.....	50
Şekil 3.7. Ön çalışma harç hazırlama	51
Şekil 3.8. Ön çalışmada kullanılan çelik ve plastik kalıplar	52

Şekil 3.9. Ön çalışma – Harcın kalıplara dökümü ve kalıplarla kürlenme işlemi	52
Şekil 3.10. Ön çalışma – Başarısız numune görselleri.....	53
Şekil 3.11. Ön çalışma – Başarılı numuneler ve kalıptan çıkarılma işlemleri.....	53
Şekil 3.12. Deneysel çalışmalar için seçilen pomza, taban külü ve PET atıkları	54
Şekil 3.13. Materyallerin granülometri eğrisi	55
Şekil 3.14. Hipotezler ve tanımları (Yazar tarafından oluşturulmuştur)	56
Şekil 3.15. Yapı bloğu baskı makinesi tasarımı.....	58
Şekil 3.16. Yapı bloğu baskı makinesi fotoğrafları	59
Şekil 3.17. Alt kalıplar ve Ölçüleri	60
Şekil 3.18. Üst kalıplar ve Ölçüleri.....	60
Şekil 3.19. Harcın numuneye dönüşüm sistematığı.....	61
Şekil 3.20. Pomza ve taban külü kurutma ve eleme işlemlerinden kesitler.....	61
Şekil 3.21. Numune hazırlama sürecinde karışım hazırlığı	62
Şekil 3.22. Her bir tip için elde edilen numune takımı	62
Şekil 3.23. Numunelerin kürlenme aşaması	63
Şekil 3.24. Basınç dayanım testi	64
Şekil 3.25. Kür havuzu	64
Şekil 3.26. Kuru birim ağırlık, suda tartım ve su emme testinde kullanılan cihazlar	65
Şekil 3.27. Isıl iletkenlik testinde kullanılan Hot-plate cihazı	67
Şekil 3.28. Yüksek sıcaklık testinde kullanılan etüv ve kül fırını	68
Şekil 3.29. Ses ölçüm sistemi ve bileşenleri	70
Şekil 4.1. Basınç dayanım testi	74
Şekil 4.2. Numune tiplerinin 7. ve 28. gün basınç dayanımları.....	75
Şekil 4.3. 7. gün ve 28. gün basınç dayanımı test sonucu sonrası numune görselleri	75
Şekil 4.4. Kür havuzunda bekletilen numuneler	77
Şekil 4.5. Suda tartım işleminden kesitler	77

Şekil 4.6. Numunelerin suda tartım ve doymun kuru yüzey ortalama ağırlıkları.....	78
Şekil 4.7. Etüv kurusu, nem ölçüm ve etüv kurusu ağırlık tartım işlevleri.....	78
Şekil 4.8. Kuru birim ağırlık değerleri.....	79
Şekil 4.9. Su emme ve boşluk oranı değerleri	79
Şekil 4.10. Etüv kurusu numunelerin mumlama ve tartım işlemleri	81
Şekil 4.11. Kılcal su emme testi	82
Şekil 4.12. Numune tiplerinin zamana göre su emme yüzdeleri	82
Şekil 4.13. Numune tiplerinin zamana göre kılcallık katsayıları.....	84
Şekil 4.14. 300 x 300 x 50 mm boyutlarındaki numunelerin etüvde kurutma ve ısı iletkenlik cihazında uygulama işlemi.....	84
Şekil 4.15. 300 x 300 x 50 mm boyutlarındaki numunelerin ısı iletkenlik test sonuçları.....	85
Şekil 4.16. 50x50x50 mm boyutlarındaki numunelerin etüv ve kül fırını görselleri.....	87
Şekil 4.17. 50x50x50 mm boyutlarındaki numunelerin yüksek sıcaklıkta ağırlık değişimleri.....	88
Şekil 4.18. 50x50x50 mm boyutlarındaki numunelerin 600 °C sıcaklıkta dayanım kaybı değişimleri.....	89
Şekil 4.19. Numune tiplerinin 1m ³ maliyetleri	91
Şekil 4.20. Numunelerin 1 m ³ malzeme için CO ₂ -e emisyon değerleri.....	92
Şekil 4.21. Ses iletim testinden kesitler	93
Şekil 4.22. Ses dinleme cihazı ara yüzü ve verilerin incelenmesi	93
Şekil 4.23. Numune ortalama ses düzeyleri.....	94
Şekil 4.24. Numunelerin 7 günlük basınç dayanım değerlerinin performans istatistiği üzerindeki etkisi	96
Şekil 4.25. Numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin performans istatistiği üzerindeki etkisi	97
Şekil 4.26. Numunelerin kuru birim değerlerinin performans istatistiği üzerindeki etkisi	98
Şekil 4.27. Numunelerin su emme değerlerinin performans istatistiği üzerindeki etkisi	100

Şekil 4.28. Numunelerin kılcal su emme katsayısı değerlerinin performans istatistiği üzerindeki etkisi	101
Şekil 4.29. Numunelerin ısı iletkenlik katsayısı değerlerinin performans istatistiği üzerindeki etkisi	103
Şekil 4.30. Numunelerin yüksek sıcaklık ağırlık kaybı değerlerinin performans istatistiği üzerindeki etkisi	104
Şekil 4.31. Numunelerin yüksek sıcaklık dayanım kaybı değerlerinin performans istatistiği üzerindeki etkisi	106
Şekil 4.32. Numunelerin maliyet değerlerinin performans istatistiği üzerindeki etkisi	107
Şekil 4.33. Numunelerin CO ₂ -e emisyon değerlerinin performans istatistiği üzerindeki etkisi	109
Şekil 4.34. Numunelerin ses iletim değerlerinin performans istatistiği üzerindeki etkisi	110
Şekil 4.35. Numunelerin eşit oranlarda etki yüzdeli malzeme senaryo sonucu değerlerinin performans istatistiği üzerindeki etkisi	112
Şekil 4.36. Numunelerin farklı oranlarda etki yüzdeli malzeme senaryo sonucu değerlerinin performans istatistiği üzerindeki etkisi	113
Şekil 4.37. Ticari prototip görselleri	115
Şekil 5.1. Numunelerin ve TS406 standartların basınç grafiği	121

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Farklı endüstriyel yan ürünleri kullanılarak elde edilen betonun, kontrol betonuna göre mukavemet ve dayanıklılık özellikleri üzerindeki etkileri (Tiwari vd. 2016)	9
Çizelge 2.2. Beton/yol yapımı için kauçuk ile plastik atık karışımlarına yönelik akademik çalışma derleme örneği (Lamba vd. 2022)	19
Çizelge 2.3. Thorneycroft vd. (2018)'nin yaptığı çalışma karışımında kullanılan farklı boyuttaki PET karışımlarının test sonuçları	22
Çizelge 2.4. Da Silva vd. (2021)'nin literatürden derlediği inşaat malzemelerinde PET içeren çalışmalar	24
Çizelge 2.5. Da Silva vd. (2021)'nin literatürden derlediği inşaat malzemelerine yönelik LCA çalışmalarına genel bakış	26
Çizelge 2.6. TS 406 standartlarındaki briket basınç dayanımları (Yüksel vd. 2006)	32
Çizelge 2.7. Taban külü oranına göre fiyat ve birim ağırlık değişimi (Yüksel vd. 2006)	32
Çizelge 2.8. Bazık ve asidik pomza kimyasalları (Dikici 2010).....	37
Çizelge 2.9. Endüstri alanlarında pomza tüketimi ve Türkiye'nin yeri (Pekdemir 2011).	38
Çizelge 3.1. Pomza agregalarının kimyasal özellikleri.....	45
Çizelge 3.2. Taban külü atıklarının kimyasal özellikleri	46
Çizelge 3.3. PET atıklarının fiziksel özellikleri.....	47
Çizelge 3.4. Çimento kimyasal özellikleri.....	47
Çizelge 3.5. Çimento fiziksel ve mekanik özellikler	48
Çizelge 3.6. Numunelerin elekten geçen yığılımlı yüzdelik oranları.....	49
Çizelge 3.7. Hava kurusu, etüv kurusu, doygun kuru yüzey ve su emme ağırlıkları ve özgül ağırlık analiz sonuçları	50
Çizelge 3.8. Ön çalışma karışım formülasyon senaryoları	51
Çizelge 3.9. Başarılı numune örnekleri test ve analiz sonuçları	54
Çizelge 3.10. Seçilen malzemelerin granülometri hesapları.....	54
Çizelge 3.11. Taguchi performans karakteristiği formülleri.....	55

Çizelge 3.12 Tek yönlü varyans analizi tablosu örneği	56
Çizelge 3.13. Varyans analizi tablosu kısaltmaları	56
Çizelge 3.14. Taguchi tasarımında kullanılan parametreler ve seviyeleri	57
Çizelge 3.15. Taguchi deney tasarımı	57
Çizelge 3.16. Taguchi deney tasarımına dayalı parametre seviyeleri.....	57
Çizelge 3.17. Taguchi Performas özelliği ve test-analiz yol haritası.....	58
Çizelge 4.1. Pomza kimyasal özelliklerinin literatürdeki benzer çalışmalar ile karşılaştırılması	71
Çizelge 4.2. Taban külü kimyasal özelliklerinin literatürdeki benzer çalışmalar ile karşılaştırılması	72
Çizelge 4.3. Taban külü kimyasal özelliklerinin kömür kaynaklı taban külü kimyasal özellikleri ile karşılaştırılması (Jayaranjan vd. 2014).....	73
Çizelge 4.4. PET fiziksel özelliklerinin, endüstriyel PET fiziksel örnekleriyle karşılaştırılması	73
Çizelge 4.5. Numune tiplerin basınç dayanımları.....	74
Çizelge 4.6. Beton malzemelerin basınç dayanımlarının literatür karşılaştırması.....	76
Çizelge 4.7. Numunelerin su içinde ve doygun kuru yüzey ortalama ağırlıkları	77
Çizelge 4.8. Kuru birim ağırlık, su emme ve boşluk oranı verileri	79
Çizelge 4.9. Kuru birim ağırlık, su emme ve boşluk oranı literatür karşılaştırması	80
Çizelge 4.9.' un devamı	81
Çizelge 4.10. Etüv kurusu numune tiplerinin mumladıktan sonraki tartım ağırlıkları ...	81
Çizelge 4.11. Numune tiplerinin zamana göre su emme ağırlıkları	83
Çizelge 4.12. Numune tiplerinin zamana göre kılcalık katsayıları.....	83
Çizelge 4.13. Numune tiplerinin ısı iletkenlik test sonuçları.....	85
Çizelge 4.14. Beton malzemelerin ısı iletkenlik literatür karşılaştırması	86
Çizelge 4.15. Numunelerin yüksek sıcaklıkta ağırlık kaybı yüzdeleri	87
Çizelge 4.16. Numunelerin 600 °C sıcaklıkta dayanım kaybı yüzdeleri	88

Çizelge 4.17. Beton malzemelerin yüksek sıcaklıkta ağırlık ve dayanım kaybı yüzdeleri literatür karşılaştırması	89
Çizelge 4.17.’ in devamı	90
Çizelge 4.18. Numune tiplerinin 1m ³ hammadde maliyetleri (TL)	91
Çizelge 4.19. 1 m ³ kompozit harç ile piyasadaki yapı bloklarının 1 m ³ satış fiyatı ile karşılaştırılması	91
Çizelge 4.20. 1 m ³ kompozit harç malzemesi için CO ₂ -e emisyon değerleri	92
Çizelge 4.21. Ses iletim test sonuçları	94
Çizelge 4.22. Numunelerin 7. ve 28. gün basınç dayanımı S/G değerleri	95
Çizelge 4.23. Numunelerin 7. gün basınç değerleri için anova analiz sonuçları	96
Çizelge 4.24. Numunelerin 28. gün basınç değerleri için anova analiz sonuçları	97
Çizelge 4.25. Numunelerin kuru birim ağırlık S/G değerleri	98
Çizelge 4.26. Numunelerin kuru birim ağırlık değerleri için anova analiz sonuçları	99
Çizelge 4.27. Numunelerin su emme S/G değerleri	99
Çizelge 4.28. Numunelerin su emme değerleri için anova analiz sonuçları	100
Çizelge 4.29. Numunelerin su emme ve kılcallık katsayısı S/G değerleri	101
Çizelge 4.30. Numunelerin kılcal su emme katsayısı değerleri için anova analiz sonuçları	102
Çizelge 4.31. Numunelerin ısı iletkenlik S/G değerleri	102
Çizelge 4.32. Numunelerin ısı iletkenlik katsayısı değerleri için anova analiz sonuçları	103
Çizelge 4.33. Numunelerin yüksek sıcaklık ağırlık kaybı S/G değerleri	104
Çizelge 4.34. Numunelerin yüksek sıcaklık ağırlık kaybı değerleri için anova analiz sonuçları	105
Çizelge 4.35. Numunelerin yüksek sıcaklık dayanım kaybı S/G değerleri	105
Çizelge 4.36. Numunelerin 600 °C’deki yüksek sıcaklık dayanım kaybı değerleri için anova analiz sonuçları	106
Çizelge 4.37. Numunelerin 1m ³ hammadde maliyet S/G değerleri	107
Çizelge 4.38. Numunelerin maliyet değerleri için anova analiz sonuçları	108

Çizelge 4.39. Numunelerin 1 m ³ malzeme için CO ₂ -e emisyon S/G değerleri	108
Çizelge 4.40. Numunelerin CO ₂ -e emisyon değerleri için anova analiz sonuçları.....	109
Çizelge 4.41. Numunelerin ses iletim S/G değerleri	110
Çizelge 4.42. Numunelerin ses iletim değerleri için anova analiz sonuçları	111
Çizelge 4.43. Numunelerde eşit oranlarda etki yüzdeli malzeme senaryo sonucu S/G değerleri ortalaması.....	111
Çizelge 4.44. Numunelerde farklı oranlarda etki yüzdeli malzeme senaryo sonucu S/G değerleri ortalaması.....	112
Çizelge 5.1. Anova analiz verilerinin genel değerlendirmesine göre malzemelerin istatistiksel anlamlılık ve varyansa katkı değerleri (Yazar tarafından oluşturulmuştur.)	117
Çizelge 5.2. Yatay delikli tuğla sınıfına göre brüt kuru hacim kütleleri (Anonim10).....	118
Çizelge 5.3. Yatay delikli tuğla sınıfına göre basınç dayanımları (Anonim 10)	118
Çizelge 5.4. Düşey delikli hafif tuğlaların (W sınıfı) brüt kuru birim hacim kütleleri ve basınç dayanımları (Anonim 10).....	118
Çizelge 5.5. Düşey delikli ve pres (yüksek yoğunluklu) kil tuğlaların birim hacim kütleleri ve basınç dayanımları (Anonim 10).....	119
Çizelge 5.6. Harman tuğlası dayanımları (Anonim 10).....	119
Çizelge 5.7. Beton briket en düşük basınç dayanımları (Anonim 9)	120
Çizelge 5.8. Beton blokların en düşük basınç dayanımları (Anonim 9).....	120
Çizelge 5.9. Gaz beton sınıflarına göre mekanik özellikler (Anonim 11; Anonim 13)	120
Çizelge 5.10. Gaz beton duvarlarının ses yalıtım dirençleri (RW) (Anonim 13).....	121
Çizelge 6.1. Standartlara göre blokların, ticari geleneksel blokların ve optimum numune tip-3'ün karşılaştırılması (Yazar tarafından oluşturulmuştur).....	125
Çizelge 6.1. 'in devamı	126
Çizelge 6.2. Dayanım sınıfları bazında 1 m ³ hazır betonun karbon ayak izi (Anonim 18, Yazar tarafından oluşturulmuştur).....	126

1. GİRİŞ

Sera gazı kaynaklı küresel ısınmanın etkileri, iklim üzerinde istenmeyen etkiler oluşturmaktadır. Sera gazları olarak CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs ve SF₆ tanımlanmıştır. CO₂ gazı emisyonunun, sera gazı emisyonu içerisindeki yoğunluğunun fazla olması sera gazı emisyonunda CO₂ gazının ana bileşen olarak kabul edilmesine neden olmuştur. Küresel çerçevede birçok organizasyonun içinde olduğu yapıların CO₂ salınımı izlenmekte ve azaltılmasına yönelik faaliyetler ve düzenlemeler konusunda çalışmalar yürütülmektedir. İnşaat sektöründe ürün geliştirmenin ana aktörleri olan çimento, cam, seramik, alüminyum, demir, yalıtım gibi malzemelerin üretimleri yüksek CO₂ salımı kaynağı olarak gösterilmektedir. Özellikle çimento, endüstriyel üretim kaynaklı CO₂ emisyonların %25' inden ve küresel CO₂ emisyon üretiminin ise %7-8'ine neden olmaktadır (Anonim 1). Bu sebeple çimento üretimi ve çimento kaynaklı ürün geliştirme sürecindeki faaliyetlerde CO₂ azaltılmasına yönelik çalışmalar hem akademide hem de özel sektörde araştırılan önemli konular arasındadır. Günümüzde özellikle inşaat sektöründe yapı malzemeleri alanında, CO₂ salınımını azaltan, ekolojik ve enerji verimliliği gibi kavramlar öne çıkmaktadır.

Tarih boyunca, doğal kaynakların ve enerji tüketimi sürekli olarak artmıştır. İnşaat sektörü diğer tüm endüstriyel faaliyetlerden daha fazla kaynak ve enerji tüketmektedir. Doğrudan ve dolaylı eylemlerle üretilen enerjinin %50'den fazlası inşaat sektöründe tüketilmektedir. İnşaat sektörü CO₂ emisyonlarının yaklaşık %30'unu oluşturmaktadır. (Cobrerros vd. 2013). Bu bağlamda inşaat yapı sektöründe CO₂ emisyonlarına büyük oranda neden olan çimento kullanım oranı azaltılarak yerine atıkların kullanımıyla kaynakların ve enerjinin daha az kullanılacağı yeni yapı malzemeleri oluşturma çabaları süregelmektedir.

Gelişmiş ülkelerin dışındaki ülkelerin çoğunda, atıklar için özel bir atık yönetimi bulunmaması nedeniyle atıklar dönüştürülmeden çöp sahalarına gönderilmektedir (Sayara 2016; Tunc 2019; Srivastava ve Singh 2020). Araziye bırakılan atıklar, yağmur suyu akışının engellenmesine, toza, bitki örtüsünün kaybına, tehlikeli gaz emisyonuna, toksik madde birikimine, yangına, geniş arazi alanlarının israfına, sızıntı ve akıntıya bağlı yeraltı ve yüzey suyu kirliliğine, nefes darlığı, astım, cilt benzeri sağlık sorunlarına neden olmaktadır (Sayara 2016; Tunc 2019; Srivastava ve Singh 2020).

Atıkların çok az bir kısmı geri dönüştürülerek farklı sektörlerde kullanımı sağlanabilmektedir. İnşaat yapı sektöründe de özellikle atıklar ile ilgili çalışmaların son zamanlarda arttığı gözlemlenmektedir. Literatürde atıkların geri dönüştürülerek yapı malzemeleri halinde kullanılabilirliğinin yanında beton içerisinde de katkı malzemesi olarak kullanılabildiği çalışmalar bulunmaktadır. Literatürdeki bilgiler ışığında atıkların en verimli geri dönüşümünün, dönüşüm prosesine çok enerji harcanmadan beton içerisinde agrega ya da bağlayıcı olarak kullanıldığı gözlemlenmiştir.

Sudan sonra, dünyada en yaygın kullanılan yapı malzemesi betondur. Ancak hızla artan sanayileşme ve kentleşme, çakıl ve nehir kumu gibi doğal kaynakların aşırı kullanımına yol açarak sürdürülebilirlik sorunlarına neden olmaktadır (Bhardwaj ve Kumar 2017). Bu nedenle, betonun bileşenlerine alternatif arayışı kaçınılmaz hale gelmiştir. Kentleşme ve sanayileşmeyle birlikte yoğun beton kullanımından kaynaklı ve betonun ham maddesinin de doğal kum ve çakıl olmasından dolayı doğada ciddi zararlar

oluşmaktadır. Bunlar nehir yatak derinliğinin artması, su tablasının alçalması, köprü alt yapılarının açığa çıkması, kıyı, delta, nehir ve deniz ekosisteminde büyük zararlı etki, kıyı veya nehir erozyonu nedeniyle arazi kaybı ve miktarında azalma gibi birçok doğa zararları olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu zararların azaltılması için nehirlerden kum çıkarma kısıtlamaları uygulanmıştır. Bu kısıtlama ile kum fiyatlarında yaşanan artış, inşaat sektörünün maliyetlerinde de artış göstermiştir (Dolage vd. 2013). Nehirlerden kum çıkarma kısıtlamaları ile Çin hükümeti 1988’de ve küresel anlamda birçok ülke düzenlemeler getirse de tam anlamıyla yeterli olamamıştır. Bu sebeple yönetim stratejileri geliştirilmelidir (Xiao vd. 2023). Geliştirilen stratejilerle birlikte beton içerisinde kum yerine kullanılabilir alternatif malzeme arayışı zorunlu hale gelmektedir. Beton içerisinde kullanılan kum yerine alternatif malzeme olarak atık malzemelerin kullanımı hem çevresel hem de ekonomik etkenler göz önüne alındığında en makul çözüm olarak kabul edilebilir.

Betonarme binalarda Portland çimentosu en sık kullanılan yapı malzemesidir. Her ne kadar inşaat sektöründe teknolojik yenilikler artsa da çimento, yapıları güçlendiren güçlü bir bağlayıcı olarak beton bileşeni olmaya devam etmektedir. İnşaat endüstrisindeki yaşanan küresel büyümeden dolayı beton bileşenlerinde bağlayıcı ya da agrega olarak atık malzemeler kullanılmaktadır (Osial vd. 2022). Bu sayede, atık kullanımıyla beton elemanlarında çimento kullanımı azaltılmıştır. Bu durum, doğal kaynakların tüketiminin azaltılmasını ve atıkların değerlendirilmesini sağlamaktadır. Aynı zamanda çevre vergilerindeki artıştan dolayı sürekli artan çimento fiyatından etkilenmeyi azaltarak ekonomiye girdi olurken çevresel yükün azaltılmasında da büyük kazançlara neden olmaktadır.

Düşük maliyeti sebebiyle beton, dünya genelinde yaygın bir şekilde üretilen ve kullanılan bir yapı malzemesidir. Yüksek öz ağırlık, geleneksel betonun önemli dezavantajlarından biridir. Betonun ağır öz ağırlığı, ekonomik olmayan yapısal malzemeye dönüşmesine neden olmaktadır. Betonun öz ağırlığını azaltmak için kaba agrega kısmen hafif agrega ile değiştirilir. Bu durum düşük yoğunluğa sahip hafif beton, ölü yükün azaltılması ve ısı yalıtımının artırılması gibi avantajlı durumlar oluşturur. Hafif agregalar iki türdür. Bunlar doğal hafif agrega ve yapay hafif agregadır (Karthika vd. 2021). Yapay hafif agregalar genellikle atıklarla elde edilmektedir. Özellikle son zamanlarda atıkların çevresel yükünü de azaltmak için plastik ve termik santral atıkları ile ilgili çalışmalar artarken aynı zamanda da kaba agrega yerini, doğal hafif agrega ile değiştirmeyi sağlayan pomza agregası üzerine çalışmaların arttığı gözlemlenmektedir.

F Sınıfı uçucu külün, portland çimentosu yerine, atık plastiğin (polietilen), doğal agregalar yerine kısmen değiştirilmesiyle elde edilen hafif betonun çevresel etkilerini araştıran bir çalışma incelenmiştir. Çalışmadaki LCA yaklaşımına göre pomza agregasının %30’u yerine plastik atık, çimentonun %20’si yerine uçucu kül kullanılarak elde edilen ürün, normal agrega ile elde edilen ürüne göre sera emisyonlarında yaklaşık %13 düşüşe neden olduğu gözlemlenmiştir (Ersan vd. 2020).

Plastik atıklar, doğada biyolojik olarak parçalanamaması, çevreye zararlı etkisinin tehlikeli boyutlara ulaşması ve canlı sağlığına zararlarından dolayı tüm dünyada endişe kaynağı oluşturmıştır (Haque 2019). Plastik atık, bölgesel değişkenlik gösteren küresel bir sorundur (Verma vd. 2016). Gelişmekte olan ekonomide, gelecekteki plastik uygulamalar ve kullanımlar sürekli artmaktadır (Analysts 2011). Evsel, gıda, ambalaj,

endüstri vb. olmak üzere hemen hemen her sektörde plastikler kullanılmaktadır. Dünyanın toplam atık üretiminin yaklaşık %5-12 (ağırlıkça %20-30) oranını, dünya bankası raporuna göre plastikler oluşturmaktadır (Awasthi vd. 2017; Kaza ve Bhada-Tata 2018; Kibria vd. 2023). Üretilen plastiklerin yaklaşık %60 oranı, plastik atık olarak çevre ekosistemine geri girmektedir (F. Zhang vd. 2021). Üretimle birlikte artan plastik atık, uygun atık yönetimi olmadığından dolayı birikmiş atıklara eklenmeye devam edecektir. Aynı zamanda plastiğin bozulması için varılan sayısal bir veri olmamasından dolayı da yüzlerce veya binlerce yıl atık olarak kalabileceği öngörülmektedir (Unep 2011). Plastiğin uzun ömürlü olma özelliği, malzeme olarak kullanılması bakımından en önemli özellik olurken güvenli bertaraf için en zararlı özellik haline gelmektedir. Plastik, bozulmadan, daha küçük parçalara ayrılarak yüzlerce yıl içerisinde kirliliği daha tehlikeli boyutlara ulaştırmaya devam edecektir. Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP)'nin sunduğu rapor verilerine göre, dünyada her yıl 300 milyon ton plastik atık olurken bunların geri dönüştürülen oranı yaklaşık %9'dur. UNEP İcra Direktörü Inger Andersen tarafından yapılan açıklamaya göre de 2050 yılına kadar bir değişiklik yapılmazsa çöplüklerimizde yaklaşık bir milyar ton plastik atık olacaktır (Lamba vd. 2022). Plastikler Türkiye'de hacimce %15-20, ağırlıkça %5-9 oranında çöplüklerde atık olarak bulunmaktadır (Sevençan ve Vaizoğlu 2007). Plastik atıklardan olan PET esaslı katı atıklar, hacimsel olarak en fazla yer kaplayan atıklardır. Dünyadaki katı atık miktarının hacimce % 12'sini ve ağırlıkça % 8'ini oluşturmaktadır (Tayyar ve Üstün 2010)

Dünyada yaşanan bir diğer büyük atık sorunu da termik santral atıklarıdır. Enerji üretiminde kullanılan fosil yakıt tüketiminde her yıl bir artış olmaktadır. Esas olarak kömür, endüstriyel işletmelerde ve elektrik üretimleri için buhar üretmekte kullanılır. Kömür külü, çevre dostu bir biçimde atılması gereken bir atık olarak karşımıza çıkar. Kömürün yakılması sonucu ortaya çıkan uçucu kül ve taban külü gibi çoğu kül türü kömür kullanımının fazlalığı ile orantılı olarak çöp sahalarında atık olarak birikmektedir. Bu bertaraf işlemi büyük çevresel sorunlarına neden olmaktadır (Chindaprasirt vd. 2009). Kül kullanımı, dünya genelinde üretim toplamının %15'ini oluşturur (Hui vd. 2009). Bu oran, mevcut kül üretim hızına (günde 1.65-2.20 milyon ton) kıyasla hala oldukça düşüktür (Jayaranjan vd. 2014). 2008 yılında ülkemizde 25,62 milyon ton termik santral atığı oluşmuştur. Bu atıkların yaklaşık %79 oranı kül dağı/kül barajına atılmıştır. %16 oranı maden sahasında depolanmış ya da gömülmüştür. %3 oranı ise geri kazanım için başka firmalara satılmıştır (Topal vd. 2011). Bu sebeple çimentolarda agrega olarak termik santral atıklarından uçucu kül ve taban külünün kullanılması hem çevresel anlamda hem ekonomik anlamda fayda sağlamaktadır. Uçucu kül, çimentoya benzer özelliklere sahiptir ve betonda ek bir çimentolu madde olarak benimsenmiştir. Ancak taban külü, genellikle kullanılmamaktadır (Singh ve Siddique 2016).

Yapı malzemeleri ve binaların sürdürülebilirliğinin değerlendirilmesinde bütüncül yaşam döngüsü yaklaşımlarının teşvik edilmesi Avrupa Birliği stratejisinde öne çıkmaktadır. Bu tür bir yaklaşım, enerji ve maliyet tasarrufu fırsatlarının değerlendirilmesinde, bir binanın yaşam döngüsü boyunca üretilen atıklarının tespitinde, doğal kaynakların daha verimli kullanılmasında etkili olduğunu göstermiştir (Kylili ve Fokaides 2017).

İnşaat sektöründe soğutma ve ısıtma amaçlı harcanan enerji neredeyse toplam harcanan enerjinin yarısıdır (Koçkal 2016). Dünyadaki enerji kaynaklarının azalması ve ekolojik dengenin bozulmasından dolayı mevcut kaynakların verimli kullanılması ve

korunması çok tartışılan konulardan biridir. Bu sebeple silika dumanı, taban külü, pomza benzeri çok sayıda malzemenin termal özelliklerinin varyasyonları üzerine çalışmalar yapılmıştır (Koçkal 2016). Bunlardan biri de özellikle ülkemizde oldukça zengin kaynağı olan pomzanın hafif agregalar olarak yapı malzeme üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması olmuştur.

Yapıya etkiyen deprem kuvvetleri yapının kütlesiyle doğru orantılı olduğundan hafif agregalar, betonun birim ağırlığının azaltılmasında önemli katkı sağlamakta ve dolayısıyla depreme dayanıklı yapı üretiminde önemli bir malzemedir (Kılıç vd. 2003). Hafif agregalar birim ağırlığı $2,00 \text{ kg/dm}^3$ olan agregalardır. Genellikle gözenekli yapıları olan hafif agregalar, yapıya ses ve ısı yalıtımı özellikleri de sağlamaktadır (Anonim 2). Bu agregalar doğal yada yapay olabilmektedir. Bu agregalar türlerine pomza, volkan tüfleri, perlit, kil, uçucu kül, taban külü, PET atıklar vb. verilebilir. Özellikle inşaat sektöründe bu tür agregaların kullanıldığı birçok çalışma mevcuttur. Günümüzde de hafifliğinden dolayı tercih edilen bims yapı bloğunda pomza agregasından olması sebebiyle tercih edilmektedir. Ekonomik ve işçilik bakımından dezavantajlı olan ağır agregalar yerine, hafif agregaların seçimi, yapının temele iletilen yükünü azaltmakta da oldukça etkindir. Hafif agregaların seçiminin de yaşama tehdit oluşturabilecek ve çevre yükü oluşturacak atıkların seçiminden yapılması hem yapı ve çevre yükü için hem de ekonomik sebeplerden dolayı iyi bir alternatif olarak gösterilebilmektedir. Aynı zamanda atık agregaların, doğal agregalar yerine kısmen veya tamamen değiştirilmesiyle elde edilen kompozit, yalnızca doğal agreganın etkisini dengelemekle kalmayıp aynı zamanda da yeni oluşacak malzemeye yeni değerler katabilir.

Hafif beton üretiminde, hafif agregalar olarak kullanılan pomza çok önemlidir. Aynı zamanda pomza, inşaat mühendisliği alanında, dolgu maddesi olarak veya bölme duvar, panel gibi ses ve ısı yalıtım elemanları olarak kullanılabilir. Aynı zamanda taşıyıcı yapı elemanlarının imalatında da kullanılmaktadır (Gündüz 2008). Yapı malzemesi olarak hafif betonun tercih edilmesi, enerji tasarrufu sağlanabilmesine ve doğal kaynakların tüketiminin azaltılarak yerine atık malzemelerin kullanımına imkan sağlaması nedeniyle inşaat sektöründe önemlidir. Örneğin, pomza gibi malzemelerin ısı direnci azalan yoğunlukla birlikte artar ve buda önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlanmasına neden olmaktadır (Newman ve Bremner 1980; Gündüz ve Uğur 2005). Aynı zamanda hafif beton, kolay taşıma avantajına sahip, düşük yoğunluklu, hafifliğinden dolayı yapıda daha az donatı kullanılmasını sağlar. İşçilikten dolayı daha ekonomik ve termal olarak verimli bir malzemedir (Brown ve Skinner 1990).

Üretilen pomzanın yaklaşık %80'i inşaat sektöründe tamamlayıcı olarak çimentoda agregalar malzemesi ve hafif yapı elemanı olarak kullanılmaktadır (Akkurt vd. 2009). Pomza, antik Roma'da 2000 yıldan fazla bir süre önce kullanılmıştır ve pomzayla yapılmış önemli birçok yapı bugün hala ayakta durmaktadır (Grasser ve Minke 1990). Avrupa'da, toplam hafif beton tüketiminin yaklaşık %3'ünü pomza betonu oluştururken, Almanya'da ise toplam tüketimin %70'ini temsil etmektedir (Litvan 1985).

Teknolojinin ilerlemesiyle tuğla ve beton malzemelerinin kullanımının yanı sıra, daha düşük ısı iletkenlik katsayısına sahip, daha düşük kütle yoğunluğu olan, fakat daha yüksek mukavemet değeri olan ve deprem hareketlerine karşı daha dirençli olan hafif yapı malzemelerinin kullanılması araştırılmaktadır. Yapı sektöründe hafif yapı malzemesi kullanımının sağlanması, enerji tasarrufu sağlayabilir ve çevre kirliliğini önleyebilir

(Yaşar ve Erdoğan 2008). Hafif yapı malzemeleri kullanan binaların, soğutma ve ısıtma maliyetlerinde %50'ye yakın enerji tasarrufu sağlanabildiği gözlemlenmiştir (Doğan-Sağlamtimur vd. 2018)

Çalışmanın amacı; beton endüstrisindeki sorunlara çözüm önerisi geliştirebilmek amacıyla, dünyada büyük tehlikelere neden olan ve hızlı bir şekilde atık olarak çevrede artmaya devam eden, plastik atıkların içerisinde hacimce çok yer kaplayan PET ve termik santral atıklarından çok fazla kullanım alanı olmayan taban külünün yapı malzemesi olarak kullanımlarının sağlanabileceği yolların açılmasını sağlamaktır. Aynı zamanda çimento kullanımının azaltılmasıyla CO₂ emisyonlarında azalmanın sağlanması, çevreci ve ekonomik yarar sağlayabilecek yeni bir yapı malzemesini inşaat sektörüne kazandırabilmektir. Böylece elde edilen ürünle geleneksel duvar yapı bloklarından olan tuğla, bims ve gazbeton malzemelerinin yerine atık katkılı olması sebebiyle daha çevreci ve muadil ürünlere benzer mekanik ve fiziksel özelliklere sahip kompozit duvar yapı bloğu kullanılabileceği algısının oluşturulması amaçlanmaktadır. İnşaat sektörüne yönelik malzeme geliştirme sürecinde farklı tekniklerle optimizasyon çalışmalarına literatürde rastlanmaktadır. Taguchi tasarımı yanında yapay sinir ağları, cevap yüzey metodu gibi yöntemler de sıklıkla kullanılmaktadır. Akademik çalışmaların tarandığı önemli bir veri tabanı alan Web of Science (WOS) da ve Yükseköğretim Kurumu (YÖK) Ulusal Tez Merkezi veri tabanında yapılan taramalarda inşaat sektörü alanında farklı materyallerin geliştirilmesinde Taguchi tasarım yönteminin kullanıldığı araştırmalara rastlanılmıştır. Optimizasyonu sağlanan, elde edilen kompozit harç ile yapı bloğu malzemesine imkan sunmakla birlikte bir çok yapı elemanına dönüşebilecek tasarımlara da ışık olunması hedeflenmektedir. Atık katkılı yapı malzeme üretimi akademik çalışmalarına da altlık olabilmek amaçlanmıştır.

Çalışmanın kapsamı taban külü atığı ve pomza agregası kullanılarak çimento esaslı geri dönüştürülmüş polietilen tereftalat (PET) içerikli optimizasyonu sağlanmış kompozit harç ile inşaat sektöründe yapı malzemesi kullanımına uyumlu yapı bloğu geliştirilmesidir. Çalışma elde edilen kompozit harç malzemesinin geleneksel duvar yapı bloklarından tuğla, bims ve gaz beton bloklarının özellikleri ve standartları ile uyumlu, inşaat sektöründe yapı bloğu malzemesi için gerekli şartları sağlayabilecek kompozit harç karışımının optimizasyonu ile sınırlandırılmıştır. Çalışmanın kapsamı bağlamında çalışma iki bölümden oluşmaktadır.

1. Bölüm: Literatür Taraması – İnşaat sektöründe kullanılan atıkların tespiti ile PET, termik santral atıkları ve taban külü atıklarının çevresel etkisi ve yapı malzemelerinde kullanım özelliklerinin araştırılması, hafif beton üretimlerinde çok fazla kullanım alanı olan doğal malzeme pomzanın özelliklerinin ve yapı malzemelerinde kullanımının araştırılması yapılmıştır. Aynı zamanda inşaat sektöründe malzeme geliştirme çalışmalarında çok önemli yeri olan Taguchi tasarımı metodu ve literatürde gerçekleştirilen örneklerin araştırılması yapılmıştır.

2. Bölüm: Deneysel Çalışma - Literatür taraması sonucunda PET, taban külü atıkları, pomza, çimento ve sudan oluşan ham maddeler ile yapı bloğu oluşturulabilecek harç içeriği, Taguchi Metodu ile geliştirilmiş ve çeşitli numuneler elde edilmiştir. Yapı bloğunda olması gereken test ve analizlerin Akdeniz Üniversitesi ve Kocaeli Üniversitesi yapı malzemeleri laboratuvarlarından elde edilen analiz sonuçlarının istatistiksel değerlendirilmesiyle optimum harç formülasyonu tespit edilmiştir.

Çalışma çıktıları :

- Ana Çıktı: Yapı sektöründe kullanılmak üzere PET, taban külü atıkları, pomza, çimento ve suyun karışımı ile blok ürünü için harç formülasyonu oluşturulmuştur. Bu harç ile duvar yapı bloğu ticari prototipi oluşturulmuştur.
- Ara Çıktı: Atık malzemeler ile geliştirilen çimentolu kompozit harç formülasyonu ve test analiz raporlarıdır. Yapı malzemelerinde kullanılan atık literatürüdür.

2. KAYNAK TARAMASI

2.1. İnşaat Sektöründe Kullanılan Atık Katkılı Malzemeler

Küresel çevre sorunlarını mimarlık tek başına çözemese de önemli ölçüde katkıda bulunabilmektedir. Atıkların yönetimiyle veya yenilebilir doğal malzemelerin kullanımı ile yüksek geri dönüşüm elde edilmektedir (Cobrerros vd. 2013). 2010'lu yıllarda, farklı endüstriyel atıkların betonun ince agrega bileşeni olarak kullanılması konusu detaylı bir şekilde araştırılmaktadır. Betonda alternatif malzemelerin kullanılmasıyla betonun dayanıklılık gibi mekanik özelliklerinin iyileştiği gözlemlenmiştir. Bu tür uygulamaların benimsenmesiyle, sürdürülebilir beton gelişimine katkı sağlanacağı ifade edilebilir. (Bhardwaj ve Kumar 2017).

Kum, inşaat sektöründe en zor temin edilen kaynaktır. Doğal agrega eksikliği, hızlı kentleşmenin bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır. Nehir kumu örgütsüz bir sektör tarafından çıkarılmaktadır. Bundan dolayı doğal kaynaklar, nehirler ve nehir sistemleri tahrip olmaktadır. Bu durum kıtlığa ve malzeme fiyatlarının artmasına neden olmaktadır (Banerjee vd. 2016). 2010 yıllarında dünyanın 630 milyon ton kum ihtiyacı varken, 2020 yıllarında tahmini olarak 1.4 milyar ton kuma ihtiyacı olacaktır (Patil ve Sathe 2021).

Betonun ana malzemelerinden olan çimentonun kullanımı da hızlı kentleşme ile her geçen gün artmaktadır. Çimento kullanımının artmasıyla birlikte çevreye verilen zarar da doğru orantılı olarak artmaktadır. Bir ton çimentonun üretilmesi yaklaşık olarak bir ton CO₂ emisyonuna neden olmaktadır. Günümüzde çimento üretimi, dünya çapında 2018 ve 2019 yılları arasında 337.32 milyon tona ulaşarak var olan CO₂ emisyonunun %7–8 oranında artmasına neden olmuştur. Bu veriler, artan küresel ısınmanın, kaynak taleplerinin ve çevresel sıkıntının ciddiyetini göstermektedir (Patil ve Sathe 2021). Bu sebeple bir an önce çimento ve doğal malzeme kullanımını azaltacak, aynı mekaniksel ve fiziksel özellikleri sağlayabilecek, atıklardan oluşan malzemelerin elde edilmesi zorunlu hale gelmiştir.

Literatürde atıklardan elde edilen birçok yapı malzemelerine ve mimari yapılarda uygulamalarına rastlanılmıştır. Tamamen atıklardan oluşan yapı malzemelerinde; agrega olarak kumun, bağlayıcı olarak çimentonun kullanılmadığı çalışmalar da gözlemlenmiştir. Örneğin, Aneke ve Shabangu'nun (2021) çalışmasında görüldüğü gibi %70:30 ve %60:40 dökümhane kumu/hurda plastik karışım oranına sahip kilden yapılan tuğlaların, yük taşıyan bir duvar elemanı olarak tatmin edici bir performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca bu tuğlaların, pişmiş kil tuğlalardan 2.5 ve 3 kat daha yüksek basınç dayanımı ve zaman tasarrufu sağladığı, kimyasal saldırılara karşı nispeten daha dirençli, çekme gerilimi altında daha az deforme olduğu ve üretiminde daha az ısı enerjisi gerektirdiği de gözlemlendiğinden dolayı yeşil ve verimli bir inşaat malzemesine hizmet edebileceği anlaşılmıştır (Aneke ve Shabangu 2021). Bir başka çalışmada da kiremit, yer karosu gibi bina inşaat girdilerinin üretiminde erimiş plastik atığının tamamen çimento yerine, kırık camların agrega olarak ince nehir kumu yerine kullanılmasıyla elde edilen içi boş plastik blokların özellikleri, standart malzeme özellikleri ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada, boş plastik blok, optimum basınç dayanımını yakalamış, iyi ve kaliteli kiremit değerini sağlamış olup aynı zamanda düşük su emilimi nedeniyle de soğuğa ve dona karşı dayanıklı olabileceğini gösterdiğinden dolayı plastik kiremit kullanılmasının tercih

edilebileceği sonucuna varılmıştır. Aynı zamanda aynı malzemelerle (erimiş plastik atığı ve kırık cam) hafif trafik (aks yükü 27MPa'dan az) yükü için yeterli dayanımda yer karosu elde edilmiştir. Her ne kadar malzeme ve ekipman kısıtlılığından dolayı gerekli çalışmalar yapılamasa da gerekli şartlar sağlanabildiğinde geleneksel malzemelere göre elde edilen malzemenin daha iyi bir performans sağlanabileceğini öngörülmüştür (Behera vd. 2018). Bunun gibi çalışma örnekleri artırılabilir gibi çalışma kapsamında kullanılan malzemeler dikkate alındığında araştırma, daha çok atık katkılı, çimento bağlayıcısı olan çalışmalar üzerinde sınırlandırılmıştır.

Çimento ile elde edilen kompozit çalışmaların, mimari tasarımlarda işlevine bağlı kolay şekillendirilebilmesi, çeşitli yapı malzemelerinin üretim esnekliğini sağlaması, uygun maliyetli olması ve uygulama kolaylığı ile hız kazandırmasından dolayı her geçen gün literatürdeki sayıları artmaktadır. Küresel ısınma, doğal kaynak talebindeki artışla doğaya verilen zarar, her geçen gün artan atıkların çevreye oluşturduğu yük ve canlı sağlığına oluşturduğu büyük tehlikelerden dolayı çimento ve doğal kaynak tüketimini azaltacak aynı zamanda atıkların geri dönüşümünü sağlayacak, işçilik bakımından da hafif bir malzeme olmasını sağlayan çevreci, sürdürülebilir, ekonomik, uygulanabilirliği kolay, malzeme performansı standart malzemelerle aynı yada daha iyi olan çözümler ön plana geçmektedir ve devlet politikaları tarafından da teşvik edilmektedir.

Beton endüstrisi yirminci yüzyılın sonunda birtakım sorunlarla karşı karşıya kalmıştır. Bu sorunlardan başlıcaları; hızla kentleşen dünyanın altyapı ihtiyaçları, beton yapıların erken bozulması, beton dayanıklılığının uygun maliyetli iyileştirilme ihtiyacı ve milyonlarca ton endüstriyel yan ürünün güvenli bir şekilde bertaraf edilmesi için ekolojik çözümler bulma konusundaki kamu ilgisi olarak gösterilebilir (Mehta 1998).

Tiwari vd. (2016)'nın bulgularına göre küresel yıllık beton tüketimi ortalama yaklaşık 25 milyar tondur. Agregalar, beton matrisinin en esaslı bileşenleridir ve tüm beton hacminin yaklaşık %70'ini oluştururlar. Agregalardan ince agregalar, beton matrisinin toplam hacminin yaklaşık 1/4'ünü oluşturmaktadır. Bu sebeple bu kadar büyük ölçekli bir beton tüketimi, son yıllarda doğal hammadde tedarik kaynaklarını tehlikeye sokmaktadır (Tiwari vd. 2016).

Çimento endüstrisinde, CO₂ emisyonu, fosil yakıtların kalsinasyonu ve kullanılan hammadde üretimindeki klinker üretiminden kaynaklanarak oluşmaktadır. Bu durum çevre üzerindeki en olumsuz etkinin oluşmasına neden olmaktadır. Dünyada tüm CO₂ emisyonlarının yaklaşık %7'si çimento endüstrisindedir (Uzal vd. 2007; Madloul vd. 2011). Çimentonun yapı malzemesi olarak kullanılabilirliğinin korunarak çimentoya katkı maddelerinin ikamesi, CO₂ emisyonunun azaltılmasında başlıca yöntemlerdendir. Katkı maddeleri klinker/çimento oranının azalmasını sağlayarak CO₂ emisyonunda azalmaya neden olur ve böylece daha çevreci bir çimento üretimi sağlanabilmektedir (Şengül 2020).

Özellikle 2013 yıllarından sonra inşaat endüstrisinde uçucu kül, taban külü ve PET atıklarının agrega olarak kullanıldığı ve bağlayıcısının çimento olduğu deneysel, bilimsel çalışma belgelerine 1996 -2023 yılları aralığında Web of Science Core Collection (WOS) veri tabanından erişim sağlandığında oldukça fazla olduğu gözlenmiştir. Bu durum çevresel riskin ciddiyetini göstermekle birlikte gelecekte atık katkılı malzeme üretimlerinin artacağı yönünde de ümitlendirici olmuştur.

Her geçen gün doğal kaynakları ve çevre sağlığını korumak için artan bir talep vardır. Bu sebeple sürdürülebilir beton finişer bloklarında çimento, kum ve doğal agrega gibi benzer maddelerin yerine kullanılabilecek atık malzemelerle oldukça fazla çalışmanın yapıldığı bilinmektedir. Bunlar atık dökümhane kumu, uçucu kül, ahlat taşı tozu, öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu, mermer tozu ve atıkları, geri dönüştürülmüş kaba agrega, seramik karo atıkları, hindistan cevizi kabuğu külü, beton atıklar, pirinç kabuğu külü, mineral atıklar, kauçuk lastikler, geri dönüştürülmüş asfalt kaplama agregaları gibi çeşitli atıklar olarak karşımıza çıkmaktadır (Patil ve Sathe 2021).

Tiwari vd. (2016), taban külü, atık dökümhane kumu, bakır cürufu, plastik atık, geri dönüştürülmüş lastik atık ve ince toz gibi çeşitli endüstriyel atık ürünlerinin yerine kırılmış cam agregası gibi malzemelerin kullanımını değerlendiren bir çalışma sunmuştur. İnce agrega kullanmadan yerine çeşitli endüstriyel yan ürünlerini kullanarak elde ettiği numuneleri, ince agrega ile elde edilmiş kontrol betonu ile kıyasladığında betonun mukavemet özelliklerinin arttığını gözlemlemiştir. Bazı malzemeler dayanım ve durabilite parametrelerini arttırmada etkisiz gibi görünse de bu parametrelerin gözlenen değerleri, bu tür betonların yapısal olmayan elemanlarda, mimari ve düşük dayanımlı betonlarda, kaldırımlarda, hafif beton vb. uygulamalarda kullanılmasında uygun ve teşvik edici olduğu gözlemlenmiştir. Bu atıklar arasında çeşitli pirinç kabuğu külleri, kauçuk atıkları, çamur külü, cam atıkları, ezilmiş inek kemikleri ve kırılmış deniz salyangozu kabuğu gibi çeşitli malzemeler bulunmaktadır. Tiwari vd. (2016)'nin yaptığı çalışmada kullanılan atık materyaline göre numunenin kontrol betonuyla kıyaslama verileri Türkçeleştirilerek Çizelge 2.1'de verilmiştir (Tiwari vd. 2016).

Çizelge 2.1. Farklı endüstriyel yan ürünleri kullanılarak elde edilen betonun, kontrol betonuna göre mukavemet ve dayanıklılık özellikleri üzerindeki etkileri (Tiwari vd. 2016)

Sıra	Atık Materyal	İşlenebilirlik	Basınç Dayanımı	Bükülme Dayanımı	Çekme Dayanımı	Esneklik Modülü	Kararlılık	Olası Uygulamalar
1	Atık cam	Genellikle azalır	Genellikle azalır	Genellikle azalır	Genellikle azalır	Genellikle azalır	-	Daha az önemli yapısal olmayan uygulamalar
2	Çelik cüruf	-	Genellikle artar	Genellikle artar	Genellikle artar	Genellikle artar	-	Aşırı neme maruz kalmayan yerlerde
3	Bakır cüruf	Genellikle artar	Genellikle artar	Benzer	Benzer		Biraz iyileştirir	Konut ve ticari binalarda
4	ISF cüruf	-	Genellikle biraz artar	Genellikle biraz artar	Genellikle biraz artar	-	Benzer	Aşırı neme maruz kalmayan yerlerde
5	Atık demir	Biraz azalır	Biraz iyileştirir	Biraz iyileştirir	-	-	-	
6	Kömür taban külü	Genellikle azalır	Biraz iyileştirir	Biraz iyileştirir	Biraz iyileştirir	Genellikle azalır	Biraz azalır	Geçici yapılarda
7	Çamur külü		Genellikle azalır	Genellikle azalır	Genellikle azalır	Genellikle azalır	Genellikle azalır	Mimari elemanlarında
8	Sınıf F uçucu kül	Genellikle azalır	Genellikle artar	Genellikle artar	Genellikle artar	Genellikle artar	Genellikle artar	Konut inşaatlarında
9	Yapay kum		Biraz artar	Biraz artar	Benzer	-	-	Prefabrik süslerde

(Devamı Arkada)

Çizelge 2.1.'in devamı

10	Atık döküm kumu	Biraz iyileştirir	Genellikle artar		Genellikle artar	-	-	Kaldırım bloklarında
11	Gölet kumu	Biraz azalır	-	Genellikle artar	Genellikle artar	-	-	Konut inşaatlarında
12	Kauçuk Atığı	Genellikle azalır	Genellikle azalır	Genellikle azalır	Genellikle azalır	Genellikle azalır	Genellikle azalır	Daha az önemli yapısal olmayan uygulamalarda
13	Plastik	Biraz azalır		Biraz azalır	Biraz azalır	-	-	
14	Makinede ezilmiş inek kemikleri	-	Benzer	-	-	-	-	Düşük ağırlıklı beton uygulamalarında
15	Ezilmiş deniz salyangozu kabuğu	Biraz azalır	Benzer	Benzer	Benzer	Benzer	-	Yapısal olmayan alanlarda
16	Atık Beton		Biraz iyileştirir	Biraz iyileştirir	Biraz iyileştirir	-	Biraz iyileştirir	Konut ve ticari binalarda
17	Talaş külü		Biraz azalır	Biraz azalır	Biraz azalır	-	Biraz azalır	Yapısal olmayan alanlarda
18	Çin kil endüstrisi nden kaynaklanan atıklar	-	Biraz iyileştirir	Biraz iyileştirir	Biraz iyileştirir	-	-	Mimari elemanlarda
19	Pirinç kabuğu külü	Biraz azalır	Biraz azalır	-	-	-	-	Geçici yapılarda
20	Granit atığı	Genellikle azalır	Genellikle artar	Genellikle artar	Genellikle artar	Genellikle artar	Genellikle artar	Konut ve ticari binalarda
21	Kireç taşı	Biraz azalır	Biraz artar	-	-	-	Biraz artar	Konut ve ticari binalarda
22	Mermer tozu	Benzer	Biraz artar	-	-	-	-	Yapısal olmayan alanlarda

Yapılan çalışmalarda demir ve demir dışı metal döküm endüstrilerinde elde edilen atık kum ve uçucu kül atık katkılarıyla yapılan beton karışımlarından elde edilen mimari prekast beton üretiminin yüksek kaliteli ve yüksek dayanımlı olduğu gözlemlenmiştir (Naik vd. 2012).

Betonda çeşitli plastik atıkların kullanıldığı çalışmalarda son zamanlarda arttığı bilinmektedir. Plastikler genelde agrega şeklinde ya da elyaf şeklinde kullanılmaktadır. Bazı çalışmalarda ise plastiğin eritilerek kullanıldığı gözlemlenmiştir. Agregası olarak kullanımları henüz çok ticarileşemese de elyaf şeklinde kullanımları yaygındır. Geleneksel betonun mekanik ve dayanıklılık özelliklerini artırmak amacıyla, plastik elyafların betona entegre edilmesinin yanı sıra çevresel faydaların da sağlanması hedeflenmektedir. Plastik elyaflar, elyaf takviyeli betonda, çelik elyafların yerini alarak takviye görevi görebilir. Çünkü çelik elyaf nispeten daha yüksek bir fiyata sahip ve daha yüksek enerji tüketen bir malzemedir. Eş zamanlı olarak, korozyona karşı duyarlılık

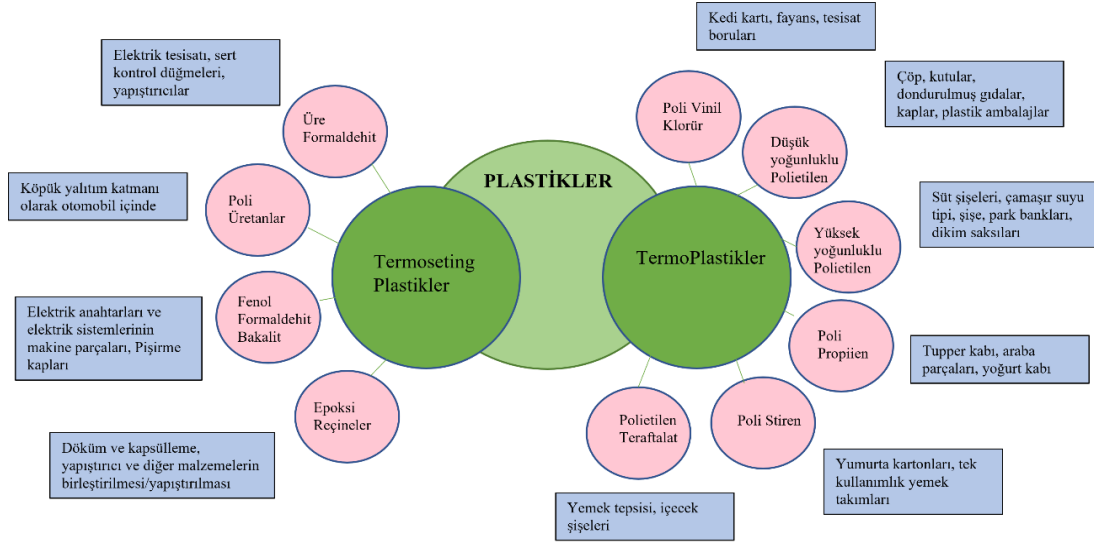
gösterir. Plastik elyaflar ise daha uygun maliyetlidir ve daha düşük karbon ayak izine sahiptir. Korozyona da dayanıklıdır (Gu ve Ozbakkaloglu 2016). Ayrıca plastik elyaflar, çelik elyaflarla karşılaştırıldığında genellikle daha iyi mukavemet-ağırlık oranı ve uzama sağlamaktadır (çelik elyaflar: 192 kN m/kg'lık mukavemet/ağırlık oranı ve %3.2'lik uzama, polipropilen lifler: 889 kN m/kg'lık mukavemet / ağırlık oranı ve %9.1'lik uzama) (Yao vd. 2003). Sentetik hafif agrega kullanımı, betonda CO₂ emisyonlarını düşürecek, çünkü daha hafif malzemeler sonuç olarak daha az çimento gerektiren ve daha küçük bileşenlerin oluşmasına yol açar (Choi vd. 2009).

CO₂ azaltılmasında beton bileşimlerinin geliştirilmesi çok önemlidir. Bu durumda beton ve bileşenlerinin, atık katkı maddeleriyle değiştirme ihtiyacını artırmıştır. Atık katkılı beton, mekanik özellikleri iyileştirerek, üretim maliyetlerini düşürerek ve atık yönetimi için sürdürülebilir yollar açarak gelecekteki beton taleplerine sürdürülebilir bir akış sunmaktadır (Osial vd. 2022). Beton, çok büyük miktarlarda üretilebilen, endüstriyel yan ürünleri soğurma potansiyeline sahip çok yönlü bir malzemedir. Böylece daha temiz üretim ihtiyacını etkili bir şekilde karşılayabilme potansiyeli sunmaktadır (Tiwari vd. 2016). Bu potansiyelinden dolayı günümüzün büyük sorunu haline gelen plastik atık, termik santral atıkları ve taban külü atıklarının beton içerisinde agrega şeklinde kullanımının yarattığı avantajlı durumlarından ve betonun esnek mimari tasarımlara imkân sağlamasından dolayı deneysel çalışmalar son yıllarda hızlı bir şekilde artmaktadır.

2.1.2. Plastik Atığı ve Çevresel Etkileri

Plastik, doğalgazın hammadde olarak kullanılmasıyla petrol esaslı ürün ya da ürünlerin kimyasal dönüşümleriyle sağlanan önemli bir maddedir. Plastik, dünyada üretilen petrolün %4'ünü kullanmaktadır. Bu plastiklerin %20-25'i ambalaj sektöründe kullanılmaktadır (Pehlivan vd. 2004; Akçaözoğlu 2008).

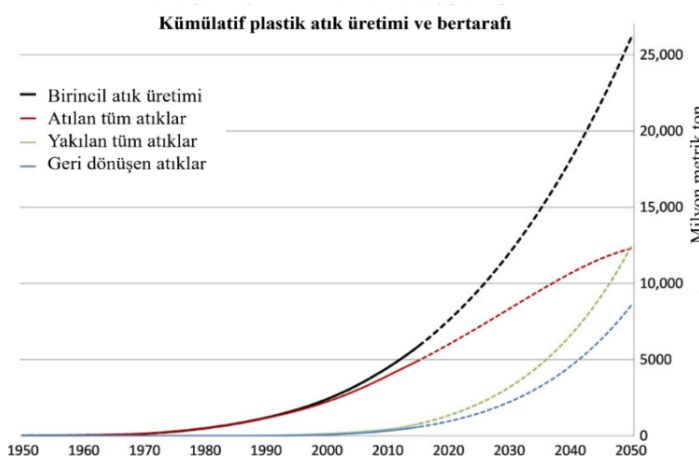
Piyasada çeşitli plastik türleri, farklı uygulamalar için bulunmaktadır. Bununla birlikte, polietilen tereftalat (PET), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), polivinil klorür (PVC), polistiren (PS) ve polipropilen (PP) gibi termoplastik plastikler geri dönüştürülebilirken; sertleşmeyle şekil alan plastikler, sentetik lifler, çok katmanlı ve lamine plastikler, poliüretan köpük (PUF), bakiye, melamin, polikarbonat ve naylon gibi malzemeler geri dönüştürülemez kategorisinde yer almaktadır. Şekil 2.1'de görüldüğü gibi farklı plastikler sınıflandırılır ve uygun uygulamalar yapılmaktadır (Lamba vd. 2022)



Şekil 2.1. Plastik çeşitlerinin sınıflandırılması ve bunların çeşitli uygulamalarla ilişkilendirilmesi (Lamba vd. 2022)

Plastik kolay şekil verilebilen malzemedir. Aynı zamanda ekonomiktir, elektrik ve ısı yalıtkanlığı sağlar, darbelere karşı dayanımlıdır (Sevencan ve Vaizoğlu 2007). Uzun ömürlü, hafif, yüksek elastikiyeti, su geçirmez, mukavemetli, korozyona karşı dirençli, dayanıklı, ekonomik ve kolay nakliye edilebilme gibi özelliklerinden dolayı oldukça kullanışlı malzemelerdir (Lamba vd. 2022). Çeşitli kullanım alanlarının imkan sağlaması, üretiminin pratik olması gibi malzemenin sahip olduğu avantajlardan dolayı üretimi giderek artmaktadır (Sevencan ve Vaizoğlu 2007).

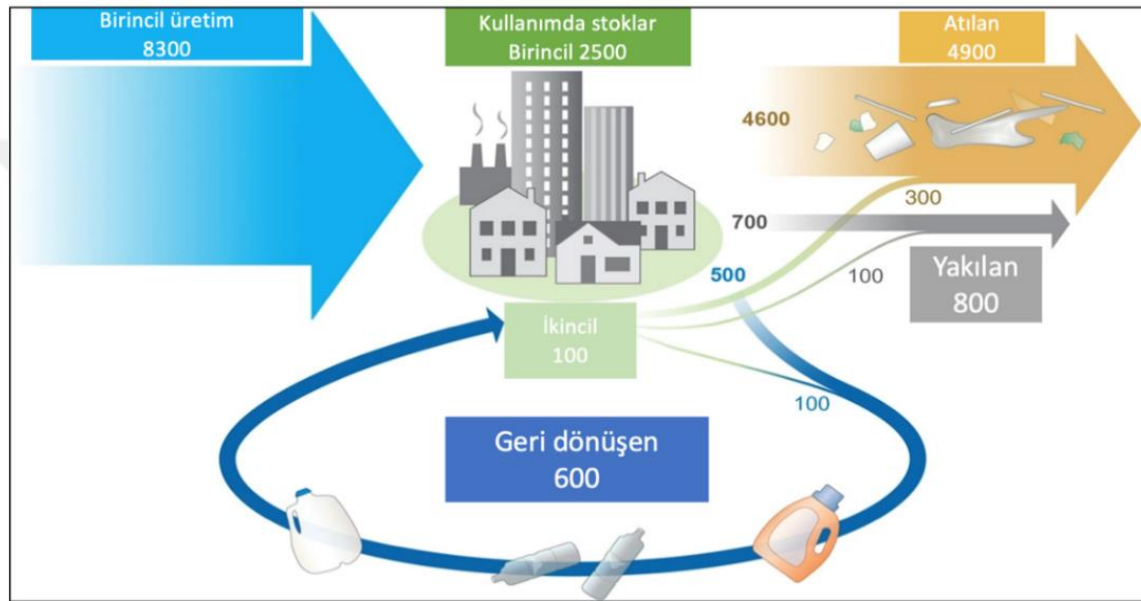
Plastik üretim verileri incelendiğinde tarih boyunca güçlü bir artış eğilimi içerisinde. Şekil 2.2'deki görünümde sürekli çizgiler, 1950'den 2015'e kadar olan plastik üretimine ait geçmiş verileri temsil ederken, kesikli çizgiler, 2050'ye kadar olan tarihsel eğilimlerin tahmini projeksiyonlarını ifade etmektedir. Üretim bu şekilde devam ederse 2050 yılının sonuna kadar 26.000 Mt reçine, 6000 Mt PP&A elyafı ve 2000 Mt katkı maddesi üretilicek, 9000 Mt plastik atık geri dönüştürülecek, 12.000 Mt yakılacak ve 12.000 Mt çöp sahalarına veya doğal ortama atılacaktır (Geyer vd. 2017).



Şekil 2.2. Toplam plastik atık üretimi ve imhası (milyon metrik ton) (Geyer vd. 2017)

Türkiye’de gelişmiş ülkelerdeki plastik kullanımındaki artış oranına göre daha az artış oranı olsa da bir artış söz konusudur. Kişi başına plastik oranları 1960’da 0.6 kg, 1977’de 5.25 kg, 1987’de 9.05 kg, 1986’da 9.65 kg ve 1992’de 13,54 kg olmak üzere her yıl giderek artmaktadır (Sevencan ve Vaizoglu 2007).

1950-2015 yılları arasında birincil ve ikincil (geri dönüştürülmüş) plastik atıkların kümülatif atık üretimi dünya istatistiği 6300 Mt’dur. Şekil 2.3’te gösterildiği üzere bu atıkların yaklaşık 800 Mt’si yakıldı (%12), 600 Mt (%9)’si geri dönüştürüldü, sadece %10’u ise bir kereden fazla geri dönüştürülmüştür. Şimdiye kadar üretilen tüm plastiğin %60’ı, yaklaşık 4900 Mt’si atık olarak çöplüklerde veya doğal ortamlarda birikmektedir (Geyer vd. 2017).

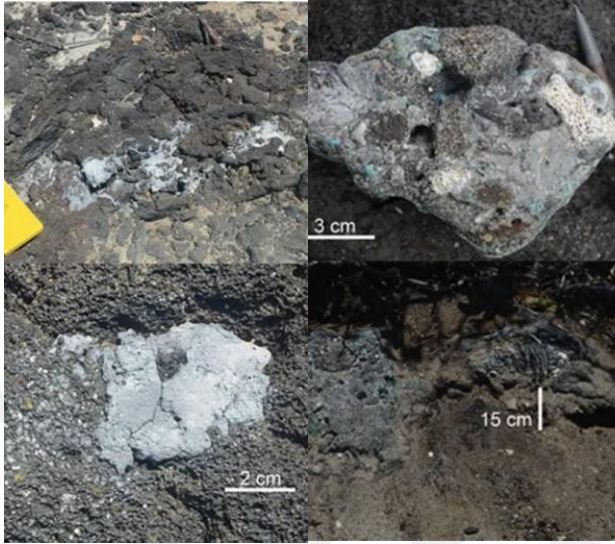


Şekil 2.3. 1950 ile 2015 arasındaki dönemde plastiklerin dünya genelindeki üretimi, kullanımı ve sonuçları (Geyer vd. 2017)

Plastiklerin birikmesi ve parçalanması, dünyadaki en yaygın ve uzun vadeli değişikliklerden biridir. 1950'lerde başlayan kitlesel plastik üretimi süreciyle geçen birkaç on yıl içerisinde, plastik atıklar karasal bölgelerden açık okyanuslara, en uzak adaların kıyılarından derin denizlere kadar geniş alanlarda birikmiştir. Birçok kıtadaki ülkede düzenlenen yıllık temizlik işlemleri ekonomik olarak da önemli boyuttadır (Barnes vd. 2009).

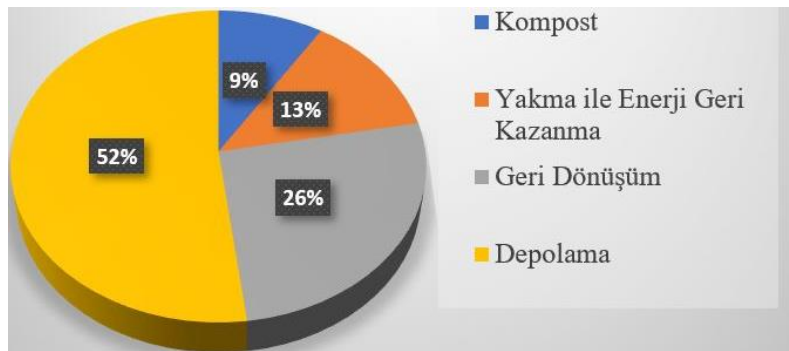
Yaygın olarak kullanılan plastikler biyolojik olarak parçalanamaz. Plastik malzemelerin ömrünün binlerce yıl sürebileceği düşünülmektedir. Ancak derin denizler ve yüzeyde olmayan kutup bölgeleri gibi alanlarda, plastiklerin ömrünün daha da uzun olması olasıdır. Plastik atıklar, doğal olmayan ve potansiyel olarak zararlı organizmaları dağıtarak, toksik kimyasalları emerek ve daha sonra yutulabilecek mikro-plastiklere indirgenerek önemli bir tehdit oluşturmaktadır (Barnes vd. 2009). Okyanustaki plastik atıkların büyük bir oranı kayıptır. Bilim insanları, deniz canlılarının mikro ölçekteki plastik parçacıklarını yediğini düşünüyor. Bu sebepten dolayı plastik atıklarının besin zincirine dahil olduğu düşünülmektedir. Şekil 2.4’te gösterildiği gibi Hawaii adasındaki

Kamilo Plajı'nda erimiş plastiğin, plaj tortusunun, bazaltik lav parçalarının ve organik molozların karışmasıyla oluşan yeni bir “taş” türü ortaya çıkmıştır. Bu tür “plastiglomerat” olarak adlandırılır ve plajın tüm bölgesine yayılmıştır (Corcoran vd. 2014).



Şekil 2.4. Plastiglomera parçası (Corcoran vd. 2014)

Plastik atıkların yıllar içerisinde birikmesi ve uygun bertaraf tekniklerinin bulunamayışından dolayı su kaynakları ve su yolları tıkanmakta, çöplüklerde büyük hacimsel alanlar oluşmakta, toprağa sızmakta ve hava yoluyla çevreye aktarılmaktadır. Plastik atıklar çok önemli ve kendine özgü bir krize yol açarak çevredeki her doğal kaynağın kirlenmesine neden olmaktadır (Lamba vd. 2022). Plastiklerin geri dönüşümü çok önemli olmasına rağmen, plastik katı atıkların sadece dörtte biri geri dönüştürülmekte ve geri kalanı çöp sahalarına atılmaktadır (Bajracharya vd. 2016). Plastik atıkların yarısından çoğu depolama alanlarına gitmektedir (Şekil 2.5). Söz konusu tablodaki oran, plastik atığın çevrede oluşturduğu yükü de doğru orantılı olarak göstermektedir.



Şekil 2.5. Plastik atık yönetimi senaryosu (Lamba vd. 2022)

Plastik atıklar, çöp alanlarından veya doğal çevreden ayrışmak yerine birikirler. Plastik atıklarını tamamen ortadan kaldırmanın yıkıcı termal işlemler gibi yöntemlerle mümkün olduğu bilinmektedir, bu da yanma veya piroliz gibi işlemleri içerebilir (Barnes vd. 2009). Plastik depolama, mevcut arazi alanlarının büyük bir kısmını kullanmayı

gerektirmektedir ve çok ciddi bir toprak kirliliğine yol açmaktadır. Plastik atıkların yakılması ise yanma sırasında açığa zehirli gazların çıkmasına yol açacaktır. Bu olay dioksin ve bazı toksik maddelerin oluşumunu sağlar. Plastik atıkların atılmasında geri dönüşümü sağlayan çevre dostu yöntemler bulunması önemlidir. Geri dönüşüm, petrol kullanım verimliliğinin artırılmasına da yardımcı olabilir (Wei 2017).

Plastik atıkların açık havada yakılması, hava kirliliğinin önemli bir kaynağını oluşturmaktadır. (Verma vd. 2016). Atık plastik içeren malzemelerin büyük ölçüde yakılmasının etkisiyle, 2016 yılında Yeni Delhi, Hindistan'da dünyanın en kirli şehri unvanını kazanmıştır (Rajput ve Arora 2017). Verma vd. (2016)'nın araştırmalarına göre yakılan atıklar atmosfere cıva, dioksinler, poliklorlu bifeniller ve furanlar gibi zehirli gazların atmosfere salınmasına neden olmaktadır. Ayrıca Poli Vinil Klorür'ün yanma etkisiyle iklim değişikliği nedeni olan en tehlikeli halojenlerin serbest bırakılması sağlanarak hava kirliliği oluşmaktadır. Açığa çıkan bu zehirli maddeler çevre, bitki örtüsü, insan ve hayvan sağlığı için bir bütün olarak büyük tehlike oluşturmaktadır. Örneğin, polistiren maddesi merkezi sinir sistemine zarar verebilen bir etkiye sahiptir. Tehlikeli bromlu bileşikler, kanserojen ve mutajen etkiler gösterebilir. Dioksinler çevreye yayılır ve bu maddeler tarım ürünlerine ve su kaynaklarına bulaşarak sonunda gıda zinciri yoluyla vücut sistemimize geçerler. Bu Dioksinler, ölümcül kalıcı organik kirleticilerdir (KOK) ve onun en kötü bileşeni olan 2,3, 7,8 tetraklorodibenzo-p-dioksin (TCDD), halk arasında ajanturuncu olarak bilinen, kansere ve nörolojik hasara neden olan, üreme tiroidi ve solunum sistemlerini bozan toksik bir bileşiktir. Bu durum, plastik atıkların yakılmasının astım ve amfizem gibi solunum yolu rahatsızlıklarını şiddetlendirdiği, kalp hastalığı riskini artırdığı, ayrıca mide bulantısı, kızarıklık veya baş ağrısı gibi semptomlara yol açarak sinir sistemi üzerinde zararlı etkiler bıraktığı anlamına gelmektedir (Verma vd. 2016). Dünya genelinde artan bir endişeyle birlikte, bu tehdidin boyutunu gösteren veriler ve maliyetlerin yükselmesiyle birlikte, azalan çöp sahalarıyla birlikte plastik katı atıkların bertarafının yakın gelecekte büyük bir sorun haline gelmesi beklenmektedir. Plastik katı atıkların yönetimi için en etkili seçeneklerden biri, atık hacmini azaltmayı ve çevresel sorunları minimize etmeyi hedefleyen geri dönüşümdür (Rajendran vd. 2012).

Yıldırım ve Duygun (2017)'a göre, katı atıklar tüm dünyada önemli bir çevre sorunudur. Plastik katı atık tüketimi, toplam katı atık içinde büyük bir paya sahiptir. Çok sayıda plastik malzeme geri dönüşüm işlemine tabi tutulsa da doğada giderek artan atık plastiğin doğa tarafından yok edilmesi kolay değildir. Plastik atık birikimini engellemenin önerilen yöntemlerinden biri, agrega olarak çimento esaslı malzemelerde kullanılmasıdır (Yıldırım ve Duygun 2017). Literatürde gittikçe artan araştırmalarda plastiklerin özellikleri ve inşaat yapı sektöründe kullanım avantajlı malzeme oluşturabilme potansiyelinden dolayı özellikle betonda plastik atıkların geri dönüştürülmesi savunulmaktadır (Bajracharya vd. 2016). Yıldırım ve Erman (2018)'a göre hafif beton, sıva, duvar bloğu ve şap gibi bağlayıcısı çimento olan birçok yalıtımlı ve hafif kompozit ürün elde edilmesinde hafif agregalar kullanılır (Yıldırım ve Erman 2018). Ayrıca hacimce %10 kumun geri dönüştürülmüş plastikle değiştirilmesi, her yıl 820 milyon ton kum tasarrufu sağlama potansiyeline sahiptir (Van Oss ve Padovani 2003). Bu bilgi, dünya genelinde yıllık kum tüketiminin yaklaşık %5'ine denk gelmektedir. Doğru karışım tasarımıyla, betonun plastik atıklarla yapısal performansı da muhafaza edilebilmektedir (Thorncroft vd. 2018).

Literatür taramalarından elde edilen bilgiler doğrultusunda beton içerisinde agrega olarak plastik atıklar içerisinde çok kullanılan PET atıklar hacimsel olarak arazilerde çok alan kaplamasından dolayı önemlidir. Bu atıkların yönetimi için yakma, depolama ve geri dönüşüm gibi üç seçenek sunulmaktadır. Ancak ilk iki seçenek, çevre için büyük tehlikeler barındırmaktadır. Plastik atıklar çöpe atıldığında, su ve toprak kirliliği meydana gelir. Plastik atıkların yakılması sonucunda, atmosfer önemli ölçüde zararlı maddelerle kirlenir. Üçüncü yöntem olan geri dönüşüm yönteminde de PET şişelerin parçalanması, eritilmesi ve yeni ürün oluşturulması dahil olmak üzere atık geri dönüşüm sistemlerinin tüm aşamalarında elektrik kullanılmaktadır (Da Silva vd. 2021). PET şişeler için uygulanan üç yöntem içerisinde de en az çevresel yük oluşturan yöntem geri dönüşümdür.

2.1.2.1. Polietilen tereftalat (PET) ve atıkları

PET, plastik grubundan bir ambalaj malzemesidir. PET yani Polietilen tereftalat, etilen glikol ile tereftalik asit veya dimetil tereftalat ile etilen glikolün birleşimiyle oluşan bir polyester reçinesi olarak ifade edilir (Shahidan vd. 2018). Dahası, dünya genelinde üretilen tüm polimerlerin yaklaşık %18'ini temsil eder. Üretiminin %60'ından fazlası, sentetik elyaf ve şişeler gibi küresel PET talebinin yaklaşık %30'unu karşılamak üzere kullanılabilir (Sulyman vd. 2016; Foti ve Lerna 2020). Her yıl ortalama bireysel olarak 168 plastik şişe kullanılmaktadır. Bu şişelerin çoğu ya toprak altındadır ya da okyanuslardadır. Araştırmalar, yılda 65 milyon kadar boş plastik su şişesinin, tamamen bozulmadan önce bin yıl süren bir çöp depolama sahasında çöp haline geldiğini ortaya koymaktadır. PET şişeler parçalanmaz ve yaklaşık 1.650 yıl boyunca bozulmadan kalmaktadır (Anonymous 1).

Bir PET şişe ortalama 1.2 kg ham petrolden üretilmektedir. Ham petrolün çıkarılma sürecindeki su tüketimi, kuyuya bağlı olduğundan tam olarak belirlenemese de en az 65 litre su kullanıldığı tahmin edilmektedir. Ham petrol çıkarma ve arama işlemleri için harcanan elektrik miktarı tam olarak bilinmemekle birlikte, en az 200 Wh elektrik enerjisi harcandığı hesaplanmıştır. Bu belirtilen değerler, üretim prosesindeki temel kaynak tüketimlerini yansıtmakta olup atıksu arıtma, atıkların bertarafı, taşıma, transfer gibi diğer işlemlerdeki tüketimleri içermemektedir. (Küçükgül ve Doğan 2007).

Dünya genelinde toplanan PET atıklarının önemli bir bölümü Çin'de bulunmaktadır. Çin atıkları ısı ya da enerji geri dönüşümü adı altında yakmaktadır. Bu yanma işlemi sonucunda çıkan zehirli toksinler duman yoluyla atmosfere karışmaktadır. Oradan da yağışlar aracılığı ile denizlere, göllere, akarsulara, yer altı sularına ve toprağa karışmaktadır. Bu şekilde besin zincirine de dahil olmaktadır (Kahraman 2015).

Her yıl Türkiye'de yaklaşık 165 bin ton PET şişe üretimi gerçekleşmektedir ve bunun yalnızca 40 bin tonu geri dönüştürülebilmektedir. Geride kalan ve doğaya karışan PET şişelerin maddi değeri ise 70 milyon dolar civarındadır (Kar ve Bicer 2018). Akçaözoğlu (2008)'nin çalışmasına göre atık PET'lerin geri dönüşüm yöntemlerinden olan eritme yöntemiyle tekrar kullanma işleminin maliyeti çok yüksektir. Fakat PET atıkların renk değiştirme ve temizleme işlemlerine de gerek olmadığından dolayı parçalama işlemiyle hafif agrega olarak kullanma yöntemi maliyeti düşürdüğünden dolayı eritme, sınıflandırma gibi geri dönüşüm yöntemleri içerisinde en avantajlı olan yöntemdir. PET atıkları, hafif agrega olarak geri dönüşüm yöntemiyle beton üretiminde,

miktar olarak çok kullanılan doğal agregaların yerini alabilmektedir. Böylece doğal agrega üretiminde doğaya verilen zararın azaltılması ve atıkların en güvenli şekilde yok edilmesi de sağlanabilmektedir (Akçaözoğlu 2008). Çevreye verilen zararın azaltılmasıyla birlikte ekonomik kazanç da sağlanmaktadır.

Şu anki durumda, PET şişelerin geri dönüşüm oranı, PET üretim satışına kıyasla önemli ölçüde daha düşüktür. Bu oran önemli ölçüde artmaktadır. Bu soruna çözüm bulmak için ve daha yüksek PET geri dönüşümünün sağlanması için zamanla çalışmalar artmaktadır (Foti ve Lerna 2020).

PET atıkları, yapı malzemelerinde mükemmel gerilme ve darbe dayanımı, kimyasal direnci, termal kararlılığı ve işlenebilirliği nedeniyle genellikle kalıplar, elyaflar ve levhalar gibi çeşitli uygulamalar için kullanılır. Doğal polimerlerden farklı olarak PET'in doğal ortamda bozulmayan bir polimer olması ve kullanımından sonra atıldığında kirletici bir madde haline geldiği konusunda genel kabul vardır. Bu nedenle, atılan PET polimerin geri dönüştürülmesinin, çevreyi korumak ve aynı zamanda kaynak tüketimini azaltmak için en önemli yaklaşımlardan biri olduğu fark edilmiştir (Park ve Kim 2014; Foti ve Lerna 2020).

2.1.2.2. PET atıklarının yapı malzemelerinde kullanılması

PET atıkları ile elde edilen yapı malzeme çalışmalarının literatürde çok fazla olduğu gözlemlenmiştir. Birçok çalışma, farklı kullanım alanlarıyla ilgili olarak PET atıklarının betonda nasıl kullanılabileceğini incelemiştir. Beton üretiminde agrega olarak kullanımlarının yanı sıra lifli beton üretiminde, polimer beton üretiminde, eritilmesiyle betonda bağlayıcı veya sentetik agrega olarak kullanımları ve asfalt betonunun üretiminde yapılan çalışmalar da bulunmaktadır. Bunların yanı sıra beton dışında kil ile birleşimleriyle tuğla yapımında, eritilerek yeni bir malzeme oluşumunda ve farklı atıkların kombinasyonlarıyla elde edilen çalışmaların fazlaca olduğu bilinmektedir. Mevcut PET kap formunun bozulmadan içerisine farklı malzemelerin doldurularak bir bağlayıcı ile yapı formu oluşturduğu ya da içerisindeki boşluğun kullanılarak bir bağlayıcıyla yapı duvar malzemesi yapıldığı çalışmalar da mevcuttur. Plastik atık yönetimi, geri dönüşüm sürecinin çok etkili olmadığı yerlerde ve özellikle düşük gelirli toplumlarda, PET şişelere kum ve inorganik malzemelerin doldurulmasıyla elde edilen malzemenin ısı transferini engellemesi, deprem, rüzgar yüklerine karşı direnci ve yapı yapım maliyetini, çevresel atık miktarını düşürmesi gibi sebeplerden dolayı yararlı bir yapı malzemesi olacağı gözlemlenmiştir (Haque 2019).

Betonla plastik karıştırılması, çevre dostu bir atık yönetim yöntemini temsil eder. Aynı zamanda betonda, doğal kum ile elde edilebilecek, arzu edilen özellikleri uygun ve ekonomik yol ile çözme yöntemidir. Örnek olarak, PET parçacıklarının kullanımı ince agrega ihtiyacını azaltarak, özellikle sülfürik aside karşı korozyon direncini artırırken aynı zamanda betonun daha hafif olmasını sağlar (Araghi vd. 2015). Parçalanmış atık PET şişelerin beton veya harç üretiminde doğrudan agrega olarak kullanılması, atık PET şişelerinin beton içinde ekonomik ve verimli bir şekilde değerlendirilmesi için en etkili yol olarak kabul edilmektedir. Bu şekilde, betonun içinde PET atıklarının agrega olarak kullanılması, atıkların etkili bir şekilde bertaraf edilmesine katkı sağlayarak doğal mineral agrega kaynaklarının kullanımından kaynaklanan çevresel zararları azaltacaktır. (Akçaözoğlu vd. 2010). Her ne kadar farklı şekillerde PET atıkları kullanılsa da genelde

başka plastiklerle karıştırılarak ya da kimyasal veya ısı işlem uygulanarak kullanıldığı gözlemlenmiştir. Fakat maliyet açısından da düşünüldüğünde en iyi yöntemin belli boyutlarda parçalanarak betonda hafif agregası olarak değerlendirilebileceği gözlemlenmiştir (Akçaözöğlü 2008).

Yapı malzemesi olarak PET atıklarının farklı şekillerde beton içerisinde kullanımlarının sonuçları tez kapsamında bazı deney verileriyle açıklanmıştır. Fakat maliyet, geri dönüşümün hızlı gerçekleşebilmesi, doğal agregası ihtiyacını azaltması ve PET atık geri dönüşümünde en az enerji harcanan yöntem ve çevreci bir yaklaşım olması sebebiyle çalışma, beton içerisinde PET agregalarının kullanımı yönünden sınırlandırılmıştır.

Beton harç karışımlarında agregası olarak kum yerine su şişesi atıklarının kesilerek küçük parçalara ayrılmasıyla geri dönüştürülmüş PET nanoparçacıkları kullanılan ve kimyasal depolimerizasyon işlemi ile işlenen bir çalışmanın mekanik testlerinin sonuçları incelendiğinde, PET nanopartikül miktarının artışıyla eğilme ve basınç dayanımında azalma olduğu tespit edilmiştir. Termal iletkenlik testleri sonucunda, plastik atıklardan elde edilen kimyasal olarak depolimerize edilmiş PET nanopartiküllerin harcin ısı iletim kapasitesini düşürdüğü tespit edilmiştir. Bu nedenle, burada test edilen yenilikçi harçlar, atık PET' in geri dönüştürülmesi avantajı ile inşaat alanındaki ısı yalıtımı uygulamaları için düşünülebileceğini göstermiştir (Foti ve Lerna 2020). PET lifleri ve çimento ile yapılan başka bir çalışma sonuçlarında da bu tarz malzemeler ile binaların dış duvarlarında, perde duvarlarında, kaba sıvada, briket ve tuğla gibi yapı malzemesi olarak yapıda kullanımlarıyla enerji tasarrufu sağlanabileceği sonucuna varılmıştır. Aynı zamanda su ile doğrudan temas halindeki alanlarda donma riskini oluşturmadığından dolayı kullanılabileceği sonuçlarına da varılmıştır (Kar ve Bicer 2018).

Taaffe vd. (2014) PET şişeleri içine plastik torbalar yerleştirerek çevre dostu tuğla alternatifleri üretmiştir. Elde edilen numuneler, beton küplerle karşılaştırıldıklarında iyi bir basınç dayanımına sahip, ağırlığının kırılma anındaki yük ve özgül dayanım ile neredeyse bir ilişki içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. Çevre dostu tuğlalar (eko-tuğlalar), hafif olmalarına rağmen taşıdıkları yük açısından sağlam bir yapıya sahip olmuştur. Tuğlanın hafif olması inşaat sektöründe avantaj yaratmaktadır. Eko-tuğlalar, çok daha yoğun bir malzeme olan normal bir beton blokla karşılaştırıldığında bile nispeten yüksek bir ses azaltma indeksine sahip olduğu, çıplak gözle görülebilen ışığın ekolojik tuğlalardan geçmiyor gibi görüldüğü, beton blokların aksine kırılma eğilimi olmadığı gözlemlenmiştir. Bu yaklaşım, basit bir geri dönüşüm yöntemi olarak, önemli çevresel faydaları beraberinde getirir. Böylece çöp ödeneğinden ve depolama alanından tasarruf sağlanabilmektedir. Elde edilen tuğlanın plastik yapısından dolayı yangına dayanıklılığının olmaması olumsuz bir özellik gibi gözükse de çimento/kum karışımı veya çamurla kaplanabilirse bu olumsuz özelliği de yok edilebilir (Taaffe vd. 2014).

Çimento ve tuğla üretim sürecinin yüksek karbondioksit (CO₂) emisyonuna katkıda bulunmasından dolayı küresel ısınmaya yol açabileceği endişesi ile bu çevre sorununu azaltmak için alternatif bir çözüm bulmaya çalışan bir çalışmada bina yapımında tuğla kullanımının yerine plastik şişeleri kumla doldurmuşlardır. Sonuç olarak, 1.5 lt ve 250 ml şişelerin kumla doldurulmasıyla elde edilen tuğlaların mukavemeti, normal kil tuğlaya kıyasla sırasıyla 3 ve 4 kat daha güçlüdür. Plastik şişe normal kil tuğla ile karşılaştırıldığında, gün içindeki iç ve dış sıcaklık değişimleri

açısından standart tuğla ile benzer eğilimdedir. İç mekân sıcaklığını belirlemek ve karşılaştırmak için, bir binanın ısıl konforunu etkileyen faktörlerle ilgili bir dizi veri ölçüldüğünde her ikisinin de benzer sıcaklık aralığında olduğu gözlemlenmiştir. PET şişelerin duvar inşaat malzemesi olarak duvar ömrü açısından da potansiyel taşıdığı gözlemlenmiştir (Mardiha Mokhtar ve Xin 2016).

PET katkı maddelerinin kauçukla birlikte beton/yol yapımında kullanılarak yapılan çalışmaları ve test sonuçları Lamba vd. (2022)'nin derlemesinden alınarak Çizelge 2.2'de gösterilmiştir. Test sonuçları incelendiğinde atık katkılarının ilavesiyle beton/yol yapımlarında olumlu sonuçlar alınabileceği gözlemlenmiştir.

Çizelge 2.2. Beton/yol yapımı için kauçuk ile plastik atık karışımlarına yönelik akademik çalışma derleme örneği (Lamba vd. 2022)

Sıra	Kauçuk/plastik uygulamaları	Kauçuk/plastik tipleri	Kauçuk %	Yapılan testler	Test sonuçları
1	Modifiye edici, bağlayıcı, katkı maddesi	Kırıntı/ufalanmış kauçuk, PET	-	Penetrasyon değeri, depolama kararlılığı, rutting, yorulma direnci ve inflated dönme viskozitesi (RV)	Depolama kararlılığı, rutting, yorulma direnci ve inflated dönme viskozitesi (RV)
2	Modifiye edici	Kırıntı/ufalanmış kauçuk, Düşük yoğunluklu polietilen, yüksek yoğunluklu polietilen	2-4-8 ve 10%	Rutting ve çatlama parametreleri	Çatlama ve rutting duyarlılığında azalma
3	Modifiye edici	Kırıntı/ufalanmış kauçuk, Düşük yoğunluklu polietilen	1-2-3-4 ve 5%	Marshall stabilite değeri, viskozite, yumuşama noktası ve sertlik	Marshall stabilite değeri %30'dan fazla, viskozite, sertlik ve yumuşama noktasında artış
4	Modifiye edici	Atık plastik ve Kırıntı/ufalanmış kauçuk	2% atık plastik 2% Kırıntı/ufalanmış kauçuk	Marshall katsayısı testi, Stabilite testi	Stabilitede artış ve Marshall katsayısında %52'lik artış
5	Modifiye edici	Atık plastik ve lastikler	-	Yumuşama noktası, penetrasyon değeri, hava boşluğu ve süneklik testi	Yumuşama noktasında artış ve penetrasyon değeri ve hava boşluğunda azalma
6	Modifiye edici	Atık plastik ve Kırıntı/ufalanmış kauçuk	atık plastik 4-6-8-10% Kırıntı/ufalanmış kauçuk 5-10-15%	Marshall stabilite değeri, Penetrasyon değeri, süneklik testi, Yumuşama noktası testi	Plastik ile modifiye edilmiş bitümün mukavemeti %16 artmış ancak kırıntı/ufalanmış kauçuk ile geleneksel betona kıyasla %50 artmıştır

PET şişelerin beton blokta kullanılma olasılığını inceleyen bir çalışmada, piyasadan satın alınan 200×200×400 mm boyutlarındaki geleneksel boşluklu beton bloklar ile aynı boyuttaki plastik şişelerin gömülü olduğu beton bloklar karşılaştırmıştır. Bu çalışmanın sonucunda, yerel beton bloklara kıyasla plastik şişelerin kullanıldığı

bloklar %57 daha yüksek basınç mukavemeti göstermiştir. Bu üretim yöntemi, uygun karışım tasarımının ve fizibilitesinin belirlenmesi amacıyla beton karışımı, çimento miktarı, yerel beton bloklarının özellikleri ve diğer teknik ve teknik olmayan faktörler hakkında daha fazla araştırma yapılması gerektiğini göstermektedir (Safinia ve Alkalbani 2016).

PET şişelerin önce parçalanıp sonra eritilmesi ve uçucu külün de karıştırılması ile yapılan bir çalışmada elde edilen numunelerin basınç dayanımı, yapı malzemeleri için standartların çok üzerinde bulunmuştur. Uçucu kül ilavesinin etkisiyle basınç dayanımı %31 ila %53 arasında artmıştır. Tüm numuneler için su emme ihmal edilebilir düzeyde saptanmıştır (Li vd. 1998).

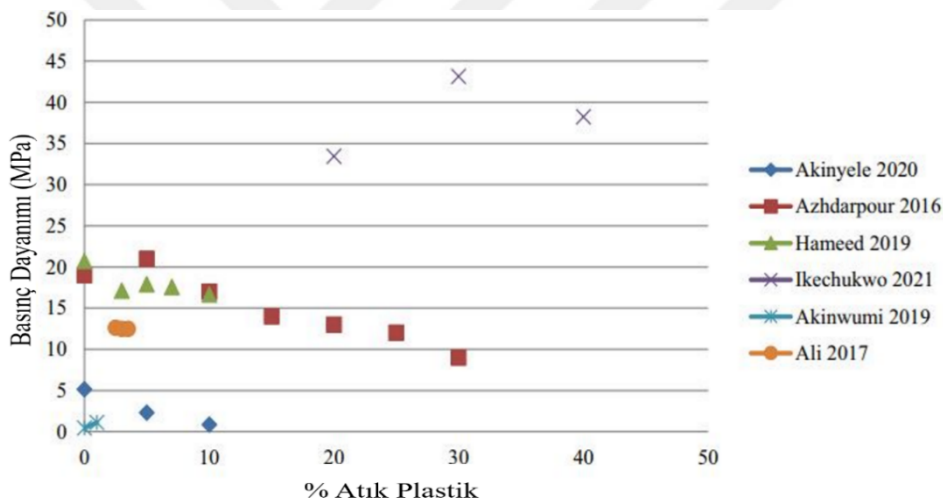
Atık termoplastiklerin (ağırlıkça % 0-10), kum (ağırlıkça % 60-70), uçucu kül ve Portland çimentosu yüzdeleri her birinde %15'te (ağırlıkça) sabit tutarak oluşturulan tuğlalar üzerinde yapılan deney sonuçlarına göre tuğlaların düşük ısı iletkenliğine ve yeterli yüksek basınç dayanımına sahip olduğu gözlenmiştir. Bu tuğlaların basınç dayanımı, 1992 MPa olarak belirtilen IS 17: 1077 standardındaki tuğlalar için öngörülen mukavemet aralığının üst yarısının üzerindedir. Plastik atıklı tuğlalar, tuğla üreticilerine ekonomik avantaj sağlayabilir ve aynı zamanda her türlü atık termoplastiğin toplanması ve kullanılması için gereken lojistik yapının oluşturulmasına teşvik eden bir çaba olarak görülmektedir (Mondal vd. 2019).

Akinyele vd. (2020), kil ile yapılan tuğlalarda 1mm–8 mm arasında değişen PET parçalarını ağırlıkça %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında kullanarak yaptığı çalışma sonuçlarında %15 ve %20 tuğla numunelerinin yüksek sıcaklıkta parçalandığını, düşük yüzdeli PET parça ilaveli numunelerin ise kenarlarında deforme olduğunu ortaya koydu. %0, %5 ve %10'luk numunelerde ise 5.15 N/mm, 2.30 N/mm ve 0.85 N/mm basınç dayanımı sonuçlarını gözlemlemiştir. Su emme sonuçları üç numune için sırasıyla %10.29, %9.43 ve %6.57 olarak elde edilmiştir ve bu sonuçlar kabul edilebilir sınırlar içerisindedir. PET malzemelerinin, tuğla matrisinde su için kullanılan boş alanları işgal ettikleri için su itici oldukları da gözlemlenmiştir. Su itici özellik tuğlalar için önemli bir özelliktir. Bu çalışma ile kontrollü koşullar altında ateşlenmiş tuğlalarda %5'ten daha az PET' in kullanılabileceği sonucuna varılmıştır (Akinyele vd. 2020).

Azhdarpour vd. (2016), ince agregaların önceden tanımlanmış ağırlığa dayalı miktarlarının eşdeğer PET atık parçaları ile değiştirdiği bir beton karışımı tasarımı benimsemiştir. Su-çimento oranı ve kaba agregası (çakıl) miktarı tüm karışımlar boyunca sabit tutulmuştur. Laboratuvar testlerinin sonuçlarına göre eklenen plastik parçalarının yeni üretilen betonların hem fiziksel hem de mukavemet gibi özelliklerini değiştirdiği gözlemlenmiştir. Daha ayrıntılı bir şekilde ifade edecek olursak, fiziksel özellikler (örneğin ultrasonik hız ve yoğunluk), plastik parça oranlarının artmasıyla kademeli olarak azalmıştır. Öte yandan, numunelerin basınç, çekme ve eğilme mukavemeti, beton ince agregaların %5 ve %10 oranında polietilen tereftalat (PET) ile değiştirilmesiyle artmıştır. Ayrıca sonuçlar, %10'dan daha büyük oranda PET ile takviye edilmiş betonların, mukavemetle ilgili tüm parametrelerinde önemli ölçüde azalmaya neden olduğunu ortaya koymuştur. Bu yüzden, ince parçacıkların PET parçalarıyla değiştirilmesi durumunda, bu değişimin %10'un altında olduğu sürece, beton numunelerinin mukavemet değerlerini olumlu yönde etkileyebileceği konusu üzerinde tartışmalar yapılmaktadır. Betondaki kum agregası plastik parçalarla değiştirildiğinde, taze ve kuru beton yoğunluğu azalır ve bu da

üretileen betonun ağırlığının azalmasına neden olur. PET atığının eklenmesi, betonun elastikiyet modülünü azaltmıştır ve deformasyon direncini artırmıştır. Betondaki PET oranının artmasıyla birlikte ses hızı iletimi de azalmıştır. Bu durum, mühendislerin ses iletimini azaltan malzemelerin (ses yalıtkanı) üretimini de gerçekleştirme imkanını sağlamaktadır. (Azhdarpour vd. 2016).

Farklı PET içeriklerine sahip beş numune (%1, %3, %5, %7, %10) portland çimentosunun ağırlığına göre üretilmiş bir çalışmada, bu numunelerin eğilme dayanımı, basınç dayanımı, sertleşmiş yoğunluğu üzerindeki etkileri ve ayrılma çekme dayanımı araştırılmıştır. Sonuçlar %1 PET kullanılan numunenin basınç dayanımının, atıksız yapılmış numuneye göre %58 oranında artış gösterdiği tespit edilmiştir. Eğilme dayanımı sonuçlarına göre de PET atıklarının %1 ve %3 oranında kullanılmasıyla eğilme dayanım değerlerinin %23.11 ve %25.59 oranında arttığı gözlenmiştir. Ayrıca, PET atıklarının % 1 oranı, % 130'luk artış oranıyla çekme mukavemetinin optimum değerini vermektedir (Hameed ve Ahmed 2019). Şekil 2.6'da gösterildiği gibi beton içerisinde düşük ile orta seviyede atık plastik olan PET' in kullanıldığı çalışmalar incelendiğinde basınç dayanımında bir artış gözlemlenirken, yüksek seviyede PET kullanılmasının basıncı düşürdüğü gözlemlenmektedir (Lamba vd. 2022).



Şekil 2.6. Plastik atık yönetimi senaryosu (Lamba vd. 2022)

Gu ve Özbakkaloğlu (2016), plastik agrega içeren 49 adet beton çalışmaları incelediğinde vardığı sonuçlara göre hafif beton üretimi için PET' in agrega olarak kullanımının uygun olduğu kanısına varmıştır. Tüm plastik agrega türlerinin özgül ağırlığının, betonda yaygın olarak kullanılan doğal agregalarınkinden çok daha düşük olduğunu, plastik agrega özgül ağırlığının 0.9 g/cm³ ve 1.4 g/cm³ aralığında olduğunu gözlemlemiştir. Ayrıca, plastik agrega parçacıkları arasındaki içi boş bölümler nedeniyle plastik agreganın kütle yoğunluğunun, özgül ağırlığından çok daha düşük olduğu söylenebilmektedir (Gu ve Ozbakkaloglu 2016).

Marzouk vd. (2006), PET şişeleri, beton kompozitlerde, kumun kısmi ve tam ikamesi olarak kullanmıştır. %2 ile % 100 arasında değişen çeşitli hacimlerde kum, aynı hacimli granül plastik ile değiştirilmiştir ve çeşitli boyutlarda PET agregaları ile kullanılmıştır. Sonuçlara göre hacimce %50'nin altında bir seviyedeki kumun üst granüler

sınırı 5 mm' ye eşit olan granül PET ile değiştirilmesinin, kompozitlerin ne basınç dayanımını ne de eğilme mukavemetini etkilemediği sonucuna varılmıştır. Bu çalışma, küçük PET partikülleri şeklinde parçalanmış plastik şişelerin, çimentolu beton kompozitlerde, kum ikame agregaları olarak başarıyla kullanılabileceğini göstermektedir. Bu yeni kompozitler, istikrarlı özelliklere sahip olmanın yanı sıra düşük maliyetli malzeme seçeneği sunar. Bunun yanı sıra, plastik üretiminin yol açtığı katı atık sorunlarının kısmi çözümüne ve enerji tasarrufuna da katkı sağlayacaktır. (Marzouk vd. 2007).

Akçaözoğlu vd. (2010), yaptığı çalışmaya göre PET ve kum agregası içeren harçların yapısal olarak hafif beton sınıfına girdiğini ve harçların su emme değerlerinin, hafif beton emme değeri sınırları içerisinde olduğunu tespit etmiştir. Kum ve PET içeren harçların birim ağırlıkları ile basınç ve esnek çekme dayanım değerleri ile karbonasyon derinlikleri, sadece PET agregası içeren harçlardan daha yüksek, harçların büzülme değerleri ve su emme oranları, kum içermeyen harçlara göre daha düşük olduğunu gözlemlemiştir. Bu bağlamda, harç içindeki parçalanmış atık PET granüllerinin kullanımının, betonun kütlesini azalttığı gözlemlenmiştir (Akçaözoğlu vd. 2010).

Thorneycroft vd. (2018), plastik agrega ikamesinin beton basınç dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmak üzere yaptığı çalışmada, kum agrega yerine farklı boyutlarda PET atığı kullanmıştır. Çalışma sonucunda Çizelge 2.3'te gösterildi gibi farklı boyuttaki PET atıklarının betonda farklı yoğunluklarda basınç ve çekme dayanımı değerleri oluşturduğu gözlemlenmiştir (Thorneycroft vd. 2018).

Çizelge 2.3. Thorneycroft vd. (2018)'nin yaptığı çalışma karışımında kullanılan farklı boyuttaki PET karışımlarının test sonuçları

Karışımlar ve Test Sonuçları	Karışım kodu- Temel karışım tasarımı					
	Ref	PET1- S1 Serisi	PET2- P1 Serisi	PET3- P1 Serisi	PET4- P1 Serisi	PET5- P1 Serisi
Karışım açıklaması	Referans karışımı	Değiştirilen kum ile eşleşecek şekilde derecelendirilmiş PET parçaları	Boyut 0.5-2 mm arasındaki PET parçaları	2-4 mm boyutlarındaki PET parçaları	2-4 mm boyutlarındaki PET parçaları ve sodyum hidroksit ve sodyum hipoklorit ile muamele edilmiş	2-4 mm boyutlarındaki PET parçaları ve sodyum hidroksit ve sodyum hipoklorit ile muamele edilmiş
Ortalama Yoğunluk (kg/m³)	2300	2273	2272	2282	1861	2269
Ortalama Basınç Dayanımı (N/mm²)	53.8	54.4	51.8	51.6	11.8	52.7
Basınç Dayanımındaki Değişim	-	+1.2	-3.7	-4.1	-78.1	-1.9
Ortalama Çekme Dayanımı (N/mm²)	3.26	4.07	3.70	3.31	1.55	2.88
Çekme Dayanımındaki % Değişim	.-	+25.0	+13.7	+1.5	-52.4	11.5

PET partikülleri ve puzolanik malzemelerin bir arada kullanımının, kendiliğinden yerleşen betonun mekanik, reolojik ve dayanıklılık özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. İnce agregalar, ağırlıkça %5, 10 ve 15 atık PET agregaları ile değiştirilmiştir. Aynı zamanda çimento, ağırlıkça %10 ve 30 oranında silika dumanı ve uçucu kül ile değiştirilmiştir. Yapılan çalışma sonuçlarına göre atık PET parçacıklarının kendiliğinden yerleşen betonda agrega olarak yeniden kullanılabilceği kanısına varılmıştır. Kendiliğinden yerleşen betonda, atık PET kullanımıyla basınç, çekme ve eğilme mukavemetleri azalır. Ancak, puzolanik malzemeler (silika dumanı ve uçucu kül), PET eklemesinin yol açtığı mukavemet kaybını dengeleme özelliğine sahiptir. Atık PET kullanımının farklı avantajları da bulunmaktadır. Atık PET' in elektriksel dirence herhangi bir etkisi olmadığı gibi, aynı zamanda betonun kırılgenliğini de azaltmaktadır (Sadrmomtazi vd. 2016).

Da Silva vd. (2021) gerçekleştirdiği literatür çalışması kapsamında incelediği araştırmaların başlıklarını kelime bulutu analizi ile incelemiştir. Araştırma başlıklarında en çok tekrarlanan 30 kelime ile oluşturulan kelime bulutu analizi Şekil 2.7' de verilmiştir (Da Silva vd. 2021). Şekil 2.7 incelediğinde PET kaynaklı akademik çalışma başlıklarında atık, geri dönüşüm, beton, harç, malzeme, agrega, mekanik, dayanım ve analiz gibi kelimelerin daha fazla kullanıldığı belirlenmiştir.

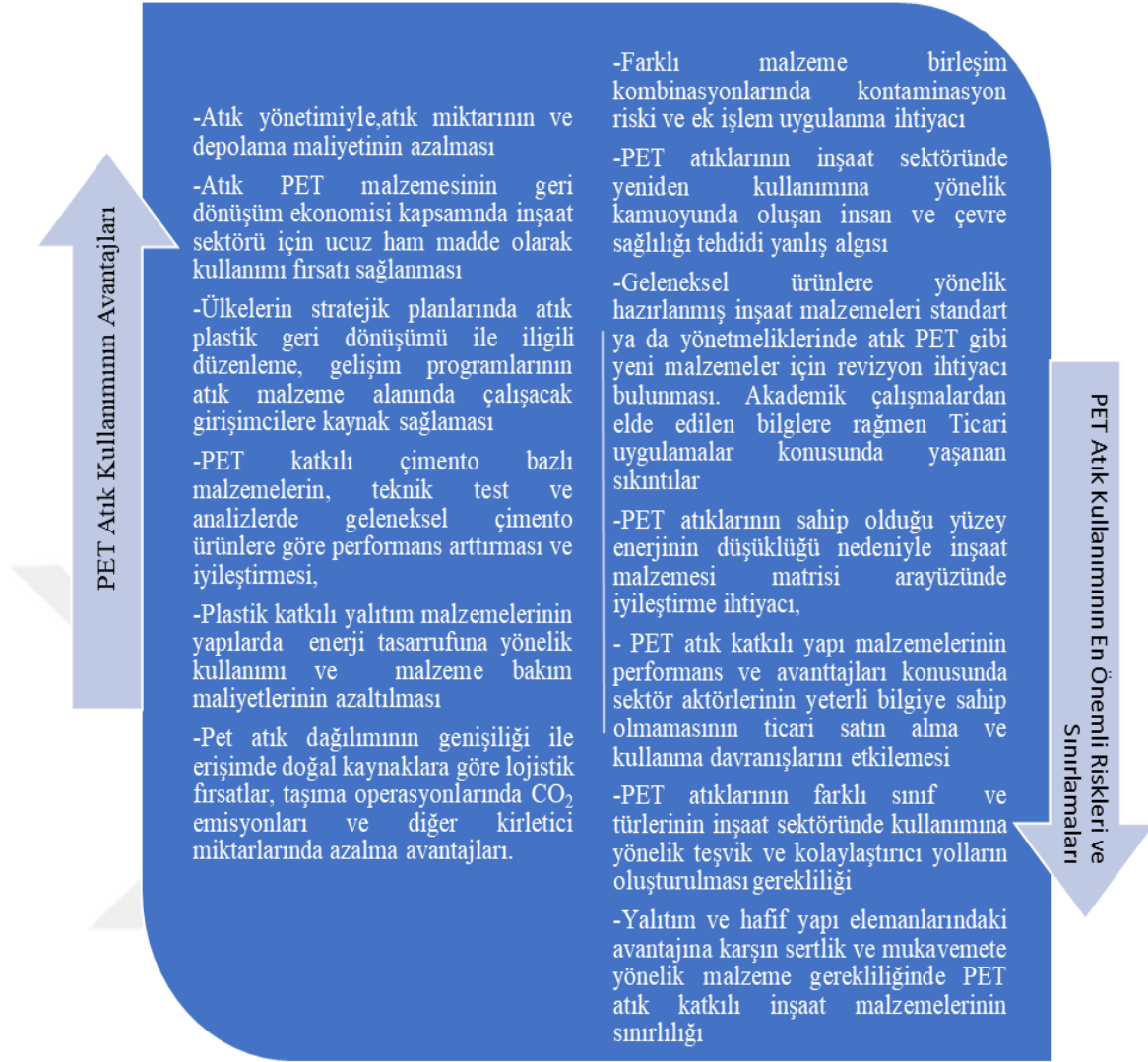


Şekil 2.7. Yazar tarafından yapılan akademik araştırma başlıkları kelime bulutu analizi (Anonim 3)

Çizelge 2.4' de gösterildiği üzere literatürde PET atığı ile yapılan çalışmalarda, PET farklı şekillerde ve farklı materyallerin yapımında kullanılmıştır. Şekil 2.8'de gösterildiği gibi PET atık kullanımının bazı avantajları ve riskleri bulunmaktadır.

Çizelge 2.4. Da Silva vd. (2021)' nin literatürden derlediği inşaat malzemelerinde PET içeren çalışmalar

Sıra	İncelenen Materyal	Atık çeşitleri	Kaynaklar
1	Beton	PET şişe lifleri	(Shahidan vd. 2018)
		PET şişe lifleri	(Bui vd. 2018)
		Basit parçalanma işlemi ile elde edilen PET lifleri	(Alani vd. 2019)
		Uçucu Kül Ezilmiş PET şişe (içme suyu şişesi)	(Alfandawi vd. 2019)
		Süt torbası Polietilen torba Su şişesi	(Al-Fakih vd. 2020)
		Geri dönüştürülmüş PET	(Barreto vd. 2019)
		Ezilmiş PET şişe (içme suyu şişesi)	(A. A. Mohammed ve Rahim 2020)
		PET parçaları	(Nematzadeh vd. 2020)
2	Harç	PET atık glikozatları	(Debska ve Licholai 2015)
		Yüzey işleme tabi PET elyafları	(Yu vd. 2018)
		Geri dönüştürülmüş PET ambalaj parçaları	(Gorak vd. 2021)
		PET granül	(Skibicki vd. 2021)
		Topraklanmış PET atıkları	(Garcia vd. 2021)
3	Kaldırım	İnşaat atıkları PET şişe Gıda Ambalajları	(Perera vd. 2019)
		Geri dönüştürülmüş PET	(Arulrajah vd. 2020)
		Granül PET	(Esfandabad vd. 2020)
4	Toprak-Çimento blok	Ezilmiş PET şişe (içme suyu şişesi)	(Paschoalin Filho vd. 2016)
5	Pişmemiş kil tuğla	Farklı boyutlarda PET pulları	(Limami vd. 2020)
6	Asfalt-Beton karşımı	Parçalanmış PET şişe	(Irianto vd. 2021)



Şekil 2.8. PET atık katkılı inşaat malzemeleri avantaj ve risklerine yönelik durum değerlendirmesi (Da Silva vd. 2021)

Ürünlerin ve süreçlerin sürdürülebilirliğini geliştirmeye yönelik olarak yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA), önemli bir rol oynamaktadır. Çizelge 2.5'te gösterildiği üzere inşaat malzemelerinde, PET atık kullanımının yaşam döngüsü değerlendirmesinde son zamanlarda literatürde PET atığı oldukça fazla çalışılmaktadır. Yapılan çalışmalarla PET atık ürününün çevresel etki değerlendirmesi daha nicel bir şekilde verilebilmiştir.

Çizelge 2.5. Da Silva vd. (2021)' nin literatürden derlediği inşaat malzemelerine yönelik LCA çalışmalarına genel bakış

Sıra	Araştırma Başlığı	Analize Konu Ürün	Analiz Yaklaşımı	Çevresel Etki Kategorileri	Kaynak
1	Binalarda geri dönüşüm: Tüketici sonrası PET şişelerden geri dönüştürülmüş polyester elyaftan yapılmış bir ısı yalıtım panelinin LCA vaka çalışması	Isı yalıtımı üretimi için geri dönüştürülmüş PET şişe kullanımının eko-profil, enerji tasarrufu ve çevresel faydaları	Beşikten kapiya	Küresel ısınma potansiyeli, ozon tabakasının incelenmesi, fotokimyasal oksidasyon, asitleşme, Ötrofikasyon	(Intini ve Kuhtz 2011)
2	Batı Maharashtra, Hindistan'da geleneksel tuğlaların çevresel yaşam döngüsü değerlendirmesi	Geleneksel kil tuğla üretiminde kirlenici emisyonları	Beşikten kapiya	Kanserojenler, organik, inorganik, iklim değişikliği, radyasyon, ozon tabakası, ekotoksitesite, asitleşme, arazi kullanımı ve mineraller	(Kumbhar vd. 2014)
3	Yaşam döngüsü değerlendirmesindeki zorluklar kil bazlı inşaat malzemeleri	Kil bazlı ve kil içermeyen yapıların çevresel etkileri kil bazlı ve kil içermeyen yapı malzemelerinin malzeme etkileri	Beşikten kapiya	Küresel ısınma (CO ₂ , CO ve CH ₄ emisyonu), asitleşme, ötrofikasyon (SO ₂ emisyonu, NH ₃ ve NO _x) ve ozon tabakasının incelenmesi	(Marcelino-Sadaba vd. 2017)
4	Beton kaplama tuğlası ve geçirirli tuğla üretim sürecinin çevresel ve ekonomik etkilerin değerlendirilmesi	Geleneksel ve geçirirli beton bloklar	Beşikten kapiya	Hammadde girdileri, enerji tüketimi, nakliye, atık ve atık su deşarjı, geçirirlik, su, kum, çimento, dizel, elektrik	(Yuan vd. 2018)
5	PET atıklarının geleneksel ve yenilenebilir enerji kaynakları ile geri dönüşümünün çevresel ve ekonomik etkilerinin değerlendirilmesi	PET geri dönüşüm süreçleri için yenilenebilir (güneş) enerji kullanımı	Beşikten mezara Mezardan mezara	Ekosistem kalitesi, sağlık, insan kaynakları, iklim değişikliği, fosil tükenmesi, insan toksisitesi, ozon tabakasının incelenmesi, karasal asitleşme ve su azalması	(Choudhary vd. 2019)
6	Döngüsel bina alternatiflerinin sürdürülebilirlik değerlendirmesi: Belçika bağlamında bir vaka çalışması olarak iç duvar montajları için sonuçsal LCA ve LCC	Belçika pazarına yönelik bina, iç duvar montajları için döngüsel tasarım alternatiflerinin potansiyel çevresel ve mali fayda ve yüklerinin niceliksel değerlendirmesi	Mezardan mezara	Yerinde ayırma, taşıma, ön arıtma, düzenli depolama, yakma ve geri dönüşüm arasında dağıtım	(Buyle vd. 2019)
7	Uçucu kül ve atık cam PET içeren kendiliğinden yerleşen harçların (SCM'ler) yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) yönleri ve mukavemet özellikleri	Uçucu kül yerine %80 Portland çimentosu, %20 uçucu kül ve %3, %6 ve %9 cam PET atığı içeren kendiliğinden yerleşen harçlar	Beşikten kapiya	İklim değişikliği, ozon tabakasının incelenmesi, karasal asitleşme, tatlı su ötrofikasyonu, deniz ötrofikasyon, insan toksisitesi	(Demirel vd. 2019)
8	Geri Dönüştürülmüş PET Agregaların Betona Dahil Edilmesinin Karşılaştırmalı Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi.	İnce agrega olarak %0, %14, %47 ve %58 oranında geri dönüştürülmüş PET agregası içeren beton	Beşikten kapiya	İklim değişikliği, ozon tabakasının incelenmesi, insan toksisitesi-kanser etkileri, insan toksisitesi-kanser dışı etkiler, partikül madde, asitleşme, karasal ötrofikasyon, arazi kullanımı, su kaynakları	(Tahanpour Javadabadi 2019)

Mohammadiahmadabad (2014), PET agrega, çakıl, kum, çimento ve sudan oluşan bir çalışma gerçekleştirmiştir. Doğal agrega ile hacimce yer değişen PET atıkları kullanılan çalışma sonuçlarına göre artan PET agrega ile birim ağırlığın azaldığı, çökmeyi azalttığı, ultra ses geçiş hızının azaldığı, basınç dayanımının azaldığı fakat %1 PET atıkta %6.96 ve %1.5 PET atıkta %1.17 basınç dayanımının arttığı, %1 PET atıkta eğilme dayanımının %11.22 arttığı tespit edilmiştir. Bu çalışma ile PET agregalar ve çimento arasındaki yapışmanın daha iyi sağlanabilmesi için uçucu kül gibi farklı atıkların kullanılmasıyla bu özelliğin iyileştirilebileceği, beton kalitesinin de içerisindeki madde oranlarının sağlanmasıyla elde edilebileceği öngörülmektedir (Mohammadiahmadabad 2014).

Belser (2019), PET agrega, çimento, kum agrega, kimyasal katkı ve sudan oluşan çalışmadaki sonuçlara göre 235- 265 °C düşük sıcaklıklarda numunelerin ağırlık kaybının çok olmadığı fakat 400 °C sıcaklık etkisiyle numunelerin ağırlık kaybının olduğunu tespit etmiştir. 100 °C sıcaklıkta numunenin eğilme dayanımında artış olurken artan sıcaklıklarda azalma tespit edilmiştir. Genelde sıcaklığın artmasıyla numunelerde basınç dayanımının azaldığı gözlemlenmiştir (Belser 2019).

Ulu (2016), PET agrega, yüksek fırın cürufu, metakaolin, alkali aktivatör, öğütülmemiş cüruf agrega ve su ile yaptığı numune çalışma sonuçlarına göre basınç değerleri ile eğilme dayanımları ve ultra ses geçiş hız değerleri arasında doğrusal bir ilişki olduğunu gözlemlemiştir. Yüksek fırın cürufu ve alkali aktive edilen numunelerde yüksek sıcaklıkta dağılma meydana gelmediği, 800 °C sıcaklık etkisiyle sadece küçük çatlakların meydana geldiği fakat 1000 °C sıcaklık etkisiyle ise basınç ve eğilme dayanımlarında artış olduğu saptanmıştır (Ulu 2016).

Öner (2013), PET agrega, PET lif, yüksek fırın cürufu, çimento, silis dumanı, uçucu kül, agrega, kimyasal katkı ile yaptığı çalışma sonuçlarına göre donma-çözünme kabiniinde numunelerin cüruf içerenlerinde bozulma olmazken diğerlerinde kırılma ve ufalanma meydana gelmiştir. PET içeren numunelerde de dayanım kaybı kontrol numunesine göre azdır. Asit etkisinde PET dayanıklı olsa da çimentodan dolayı dayanıksız hale gelen numune fırın cürufu ile asite dayanıklı hale gelmiştir. Kontrol numunelerde yüksek alkalide büzülme olurken, PET agregaların olduğu numunelerde çok değişiklik olmamıştır (Öner 2013).

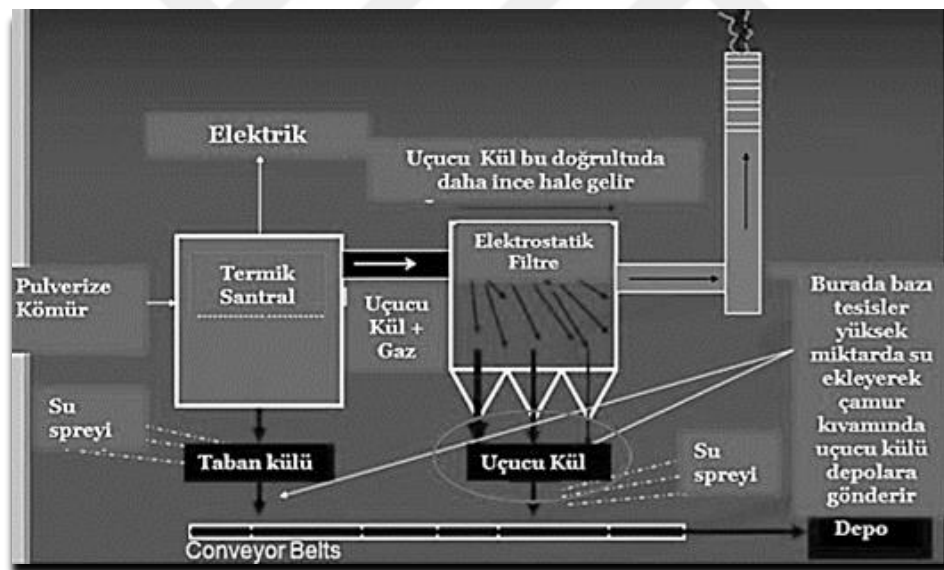
2.1.3. Termik Santral Atıkları ve Taban Külü Atıklarının Agrega Şeklinde Kullanımı

Kömür yakıtlı enerji santralleri, fırınlarda kömür yakarak enerji elde etmektedir. Söz konusu enerji santralleri genellikle toz haline getirilmiş kömür yakıtlı fırınları veya siklon fırınları kullanılmaktadır. Toz haline getirilmiş kömür yakıtlı fırınlardan elde edilen kül, taban külü ve uçucu kül olarak adlandırılır (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Termik Santral kömür atığı olan uçucu kül ve taban külü (Anonim 4)

Uçucu kül ana bir bileşen (% 70-90) olmakta ve taban külü bileşeni % 10-30 arasındadır (Siddique 2010). Şekil 2.10'da gösterildiği gibi linyit kömürünün yakıldığı termik santrallerde, elektrik üretimi için kömürün yanması sonucu oluşan, bacalardaki elektrostatik filtreler tarafından tutularak atmosfere yayılması önlenemeyen mikron boyutundaki kül parçacıklarına "uçucu kül" adı verilmektedir. Bu işlemde dolaylı baca gazlarında sürüklenemeyip kazan tabanına düşen, uçucu küle göre iri taneli olanlara da taban külü denilmektedir (Yılmaz 2010)



Şekil 2.10. Taban külü ve uçucu kül ve oluşum şeması (Tekin 2014).

Enerji, ekonomik büyüme ve kalkınmanın önemli bir bileşeni olarak ülkeler için stratejik bir konumdadır. Enerji üretiminde fosil kaynaklı ve yenilenebilir enerji kaynakları kullanılmaktadır. Enerji ihtiyacının giderek arttığı ve mevcut teknoloji altyapısının yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik gelişime açık olduğu günümüzde kömür kullanılarak enerji üreten santrallerin sayısı oldukça fazladır. Kömürle çalışan termik santral sayısı dünya genelinde 1500'ü aşmaktadır. (Anonymous 2).

Kömür Külü Dünyası (WOCA) verilerine göre, dünya genelindeki kömür termik santrallerinin 780 milyon metrik ton kömür taban külü ürettiği ve bu üretimin %66'sının Asya ülkeleri tarafından gerçekleştirildiği, sırasıyla Avrupa ve ABD'nin bu üretimde ikinci ve üçüncü sırayı aldığı tahmin edilmektedir. Kömür, dünya çapında kömürle çalışan elektrik santrallerinde enerji ve buhar üretimi için önemli bir yakıttır. Şu an itibarıyla kömür, dünya genelinde birincil enerjinin yaklaşık %30'unu ve küresel elektrik üretiminin %41'ini temin etmektedir. Kömür kullanımının 2030 yılına kadar %50'nin üzerinde artmasının beklendiği öngörülmekte ve bu artışın %97'si, gelişmekte olan ülkelerin artan elektrifikasyon gereksinimlerini karşılamak amacıyla gerçekleşecektir (Heidrich 2013). Çin, 395 milyon metrik ton (Mt) kömür külü üretimiyle en yüksek miktarı sağlarken, bu sıralamayı ABD (118 Mt), Hindistan (105 Mt), Avrupa (52,6 Mt) ve Afrika (31.1 Mt) izlemektedir. Öte yandan, Ortadoğu ve diğer bölgeler, küresel kömür külü üretimine sınırlı miktarlarda katkıda bulunmaktadır (Sutcu vd. 2019).

Termik santrallerde yanan kömürün yaklaşık %25 ile %20 arası kül olarak çıkmakta olup belirli bir kullanım alanı olmadığından dolayı arazilerde depolanmakta ya da bulamaç kıvamına getirilip denizlere dökülmektedir. En büyük kömür külü üreten yerlerden biri olan ABD'de bile bu külün 1/4' ü kullanılmaktadır. Örneğin ondan fazla termik santral bulunan Türkiye de Çatalağzı'nda yaklaşık yılda 57400 ton taban külü çıktığı düşünülürse her yıl çok fazla atık çevreye zarar vermekte ve aynı zamanda depolama maliyeti de oluşturmaktadır (Yüksel vd. 2006).

Artan elektrik talebi nedeniyle, kömür tüketimindeki büyüme eğilimi devam edecektir. Kömür, gazdan sonra elektrik üretmek için kullanılan iyi bir enerji kaynağıdır ve hızla kullanımı artmaktadır (Abubakar ve Baharudin 2013). Kömürün yanmasıyla meydana gelen bileşikler, insan sağlığına, çevreye ve endüstriye yönelik ciddi zararlı etkileri olan küresel bir problem oluşturmaktadır. İnsan sağlığı ve çevre için, yanma sonucu çıkan ürünlerdeki elementler topraktan yeraltı suyuna sızar, karasal ve sucul ekosistemler üzerinde olumsuz bir etkiye neden olmaktadır. Sanayi alanında, depolama, taşıma ve bertaraf gibi yüksek maliyetlerin karşılanması, tesis işletmecileri ve atık yönetim firmaları tarafından sağlanmalıdır. Günümüzde endüstri, ürün kalitesini ve süreç istikrarını korurken, özellikle maliyet tasarrufu sağlayan nedenlerden dolayı uçucu kül ve taban külü atıklarının geri dönüşümü ile çok ilgilenilmemektedir (Gonzalez vd. 2009; Arenas vd. 2011).

Taban külü, uçucu külle aynı gelişmiş işlenebilirliğe sahip değildir. Aynı zamanda, bu iki malzemenin kimyasal bileşenleri oldukça benzerdir; temel fark, parçacık şekli ve boyutudur. Taban külü, daha büyük boyutta ve içerisinde gözenekler ve boşluklar bulunduran oldukça düzensiz bir yapıya sahiptir. İnceliği uygun olan taban külü, puzolan olarak kullanıldığında nispeten yüksek mukavemetli beton üretimine katkı sağlayabilir (Jaturapitakkul ve Cheerarot 2003). Taban külünün büyük bir kısmı % 50-90 civarı ince parçacıklardan oluşmaktadır (Mohammed vd. 2021). Mineral katkıların özgül yüzey alanındaki değişikliğini sağlayan dane boyutları, harçların reolojik, mekanik ve fiziksel özelliklerinden dolayı önemli farklılıklar yaratmaktadır. Aynı yapıda ama farklı firmalardan temin edilen küllerden elde edilen harç ve hamur davranışları benzer gibi olsa da farklı etkiler oluşturmuştur. Çimentoda taban ve uçucu kül arttıkça priz ve kıvam süreleri de artmaktadır. Bu sebeple 28 gün kürlemeden sonra kıyaslanabilecek sonuçlar alınabilmektedir. Portland çimentosunun mineral katkıları ile değiştirilmesiyle çimento

hamur hacim genişlemesi değişikliği olmamıştır. Çimento yüzey alanının artmasından dolayı da katkılı çimentoda basınç dayanımı artmaktadır (Tekin 2014).

Kömür taban külü genellikle iyi bir sınıflandırmaya sahip bir malzemedir ve partikül boyut dağılımı nehir kumuna benzerlik gösterir. Parçacıklar, birbirine sıkıca bağlanabilme özelliğine sahiptir. Kömür taban külü, doğal nehir kumuna göre daha kırılğan ve hafif bir yapıya sahiptir. Düşük özgül ağırlığa sahip kömür taban külü, yükleme veya sıkıştırma altında kolayca bozulabilen gözenekli bir dokuya sahiptir. Yüksek kükürtlü ve düşük kaliteli kömürlerden elde edilen kömür taban külü, genellikle yoğun bir yapıya sahiptir ve büyük ölçüde gözeneksizdir. Kömürün toz haline gelme derecesi, fırındaki ateşleme sıcaklığı ve fırın tipine bağlıdır. Bu değişkenlikte kömür taban külünün özelliklerini etkilemektedir (Singh ve Siddique 2016).

Çalışma kapsamında, endüstride geri kazanım kullanımı çok az olan, arazilerde büyük yığılmalara neden olan ve nehir kumuna benzerliği ile agrega olarak uygun kullanımı sağlanabileceği düşünülen taban külü araştırmaları üzerinde yoğunlaşmıştır. Taban külünün kullanımının da uçucu külün kullanımı gibi artırılmasıyla ekonomi ve çevreye de ciddi bir girdi olacağı düşünülmektedir.

İnşaat sektöründe artan maliyeti en aza indirmenin etkili bir yöntemi, kömür taban külü atıklarının ikame malzeme olarak kullanılmasıdır (S. A. Mohammed vd. 2021). Her yıl dünya çapında önemli miktarlarda kömürden uçucu kül ve taban külü üretilmektedir. Kömür külü, içerdiği ağır metaller nedeniyle potansiyel çevresel riskler taşıyan bir malzemedir. Dünya genelinde üretilen uçucu külün yalnızca %30'u tekrar kullanılmaktadır. Uçucu kül, özellikle inşaat mühendisliği uygulamalarında yoğun bir şekilde geri kazanılmaktadır. Bu uygulamalar arasında setler, yol yapımı, inşaat projeleri, çimento üretimi, jeopolimer uygulamaları vb. yer almaktadır. Ayrıca, uçucu kül, su ve atık su arıtma, cam-seramik üretimi, tarım ve yüksek değerli ürünler gibi diğer alanlarda da geri dönüşüme dahil edilmektedir. Taban külü ve uçucu külün üretiminin sadece küçük bir bölümünün geri kazanıldığı düşünüldüğünde, ticari uygulamalar için alternatif kullanım seçeneklerinin incelenmesi önemlidir (Jayaranjan vd. 2014). Avrupa ülkeleri, kömürle çalışan enerji santrallerinin yan ürünleri olan taban külünün yaklaşık 5.7 milyon tonunu (%10.4) üretmekte ve bunun 2.5 milyon tonunu inşaat sektöründe kullanmaktadır (Meij ve Berg 2001; Hall ve Livingston 2002). Taban külünün kullanımı genellikle beton blok üretimi (%52.1) ve yol inşaatı (%36.5) gibi alanlarda gerçekleşmektedir. Bu kullanımların yalnızca %3.2'si hafif agregalar olarak uygulanmaktadır. Bazı çalışmalar, taban külünün düşük parçacık yoğunlukları nedeniyle harç ve betonda hafif agrega olarak kullanma potansiyelini ele almış ve bu alanda yavaşça ilerlemiştir. Avrupa'da taban külünün ince ve kaba hafif agrega olarak seksen bin ton uygulaması yapılmıştır (Pera vd. 1997; Meij ve Berg 2001; Bai vd. 2005; Lin vd. 2008; Lee vd. 2010). Taban külünün kullanımı uçucu küle göre çok daha azdır. Özellikle Türkiye de Avrupa'ya göre kullanımı çok kısıtlı olduğundan dolayı çalışmaların bu yönde artırılması gerekmektedir.

Taban külü özellikleri ana kömürün türüne, öğütme sürecine, ateşleme durumuna ve yangına maruz kalma süresine bağlıdır. Volkanik bir malzeme gibi görünüme sahip olan kömür taban külü parçacıkları, ana kömürün özelliklerinden dolayı genelde siyah renkte bulunmaktadır (Oz vd. 2009; Siddique 2013).

Kum gibi doğal ve kaba agrega malzemeleri inşaat uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Başlangıçta, araştırmacılar kömür taban külünün inşaat uygulamalarında doğal agregaların yerine geçebileceğini önermişlerdir (Moulton vd. 1973). Doğal kum malzemeleri ile karşılaştırıldığında, kömür taban külü benzer jeolojik özelliklere sahiptir (Kumar ve Stewart 2003). Genellikle koyu gri renkli, 0.1–10 mm boyutunda ve küresel olmayan bir formda olan taban külü, karakteristik özelliklere sahiptir (Siddique 2010). Çoğunlukla karbonat, silikat, demir, alüminat ve çeşitli metaller ve metaloidlerden oluşur. Taban külünün tam bileşimi, kömürün kaynağına, boyutuna, kömürün yanma yöntemine ve yanma koşullarına bağlı olarak değişebilir. (Jayaranjan vd. 2014; Doğan-Sağlamtimur vd. 2018). Wei (1992) tarafından yapılan çalışmada, büyük boyutlu taban külünün (6 mm'den büyük) kaba agrega olarak, küçük boyutlu taban külünün ise ince agrega olarak kullanılabileceği belirtilmiştir. Ayrıca, duvar ürünlerinin imalatında taban külünün kaba ve ince agregaların kısmi bir ikamesi olarak kullanılmasının fizibilitesini de gösterdiler. Kullanılan taban külü ve kazan cürufu dolgusu ile malzemenin yalıtım kabiliyetini artırabileceğini de öne sürmüşlerdir (Wei 1992; Siddique 2010). Ölmez (2010), yaptığı çalışmada toksisite karakteristik liç işlemi (TCLP) deney sonuçlarına göre de betonda taban külü karıştırılmasını, çevre ve insan sağlığına bir zararı olmadığını tespit etmiştir. Bunun yanında 2010 enflasyonuna göre 1 ton atık termik santral külünün 1 ton agrega yerine kullanılmasıyla 523.8 TL, 1 m³ betonda 54.56 TL kar elde edildiğini tespit etmiştir. Külün agrega halinde beton karışımında kullanılmasıyla da sıcaklık, dayanım, çökme ve basınç deneylerinde olumsuz bir durum olmadığını gözlemlemiştir (Ölmez 2010).

Kömür külünün en yaygın kullanımı, beton içinde agrega olarak kullanılmasıdır. Bakoshi ve ark. (1998), taban külü betonunun, basınç ve çekme mukavemetlerinin, ince agreganın değiştirme oranındaki artışla arttığını göstermiştir. Taban külü ile üretilen betonun, standart betona göre donma ve çözülme direnci daha düşük olmasına rağmen, aşınma direncinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir (Bakoshi vd. 1998; Siddique 2010). Bai vd. (2005), doğal kumu %30 ile %100 aralığında taban külü ile değiştirerek çalışma yapmıştır. Çalışma sonuçlarına göre işlenebilirliğin arttığını, erken dönem basınç dayanımı yüksek olsa da uzun dönemde normal olduğunu, su emmenin arttığını ve karbonatlaşmanın arttığını, klorür geçirgenliğinin azaldığını, %30 oranında taban külünün betonun dayanım ve büzülme özelliklerine olumsuz etki etmediğini gözlemleyerek betonda ince agrega şeklinde kullanılabileceği sonucuna varmışlardır (Bai vd. 2005). Konak (2018), beton içerisinde taban külünün ince agrega olarak kullanım oranının artmasıyla gözeneklilik yapısının arttığını ve bu sebepten dolayı betonun elastisite modülü ve dayanımının azaldığını gözlemlemiştir (Konak 2018).

Taban külü, yüksek fırın cürufu ve uçucu küllerin kimyasallarında bulunan SiO₂, çimentodaki SiO₂ miktarından fazla olduğundan dolayı silikat miktarında artışa neden olmakta ve çimentonun basınç dayanımına neden olan C₂S miktarının artmasına neden olmaktadır. Aynı zamanda bu atıklarda CaO miktarının da düşük olmasından dolayı betonun erken yaşlarda yüksek dayanımını sağlayan C₃S miktarının azalmasına neden olmaktadır (Güzelküçük 2014).

Yüksel vd. (2006), taban külünü ince kumla farklı oranlarda değiştirerek briket üretimi gerçekleştirmişlerdir. Numune sonuçlarına bakıldığında taban külü ve kum oranı artışıyla birlikte taban külünün yapısından kaynaklı briket birim hacim ağırlığında doğrusal bir azalma olmuştur. Aynı zamanda basınç dayanımının düştüğü, fakat %20

değiştirmeye Çizelge 2.6'da gösterilen TS 406 standarttaki basınç dayanımlarından BB4 orta basınç sınıfına girdiği, %30'luk değiştirmeye BB2 sınıfı en düşük sınıfa girdiği tespit edilmiştir. Fakat %40 ve %50 taban külü değiştirmesiyle BB2 en düşük sınıfa giremediği tespit edilerek briket elde edilmesinde taban külü ve kum oranının %30'u aşmaması gerektiği sonucuna varmışlardır. Donma- çözülme bakımından %50 değişim sağlanabilse de %30 oranı birim hacim ağırlığının azalması yönünden de daha sağlıklı görülmektedir. %30'luk değişim ile %21'lik birim hacim ağırlığında azalma sağlanırken aynı zamanda doğal kum kullanımından %23.5 oranında tasarruf sağlanarak kullanımı olmayan atığın da değerlendirilmesi sağlanmış olacaktır (Yüksel vd. 2006).

Çizelge 2.6. TS 406 standartlarındaki briket basınç dayanımları (Yüksel vd. 2006)

Türler	Basınç dayanımı (MPa)	
	En küçük ortalama değer	En küçük tekil değer
BB2	2.5	2.0
BB4	5.0	4.0
BB6	7.5	6.0
BB12	15.0	12.0

Ayrıca Yüksel ve ark. 2005 enflasyon oranına göre briket yapımında taban külü kullanımının oranı ile doğru orantılı olarak birim fiyatının ve ağırlıklarının atık miktarı oranına göre değişeceğini Çizelge 2.7'de gösterildiği şekilde analiz etmiştir. Taban külü kullanımının doğal kuma göre birim fiyat ve ağırlık bakımından daima avantajlı olduğunu tespit etmiştir. Örneğin 100 m² tek katlı bir yapı için yaklaşık 2500 briket kullanıldığını ve doğal kuma yerine taban külü kullanımının yapının birim ağırlığını %40 düşürdüğünü gözlemlemiştir. Böylece yapı yükünün çok azaltılabileceğini söyleyebilmektedir (Yüksel vd. 2006).

Çizelge 2.7. Taban külü oranına göre fiyat ve birim ağırlık değişimi (Yüksel vd. 2006)

Taban Külü yer değişim oranı	Briketin Birim Fiyatı (TL)	100 m2 yapıdaki briketin		
		Toplam Fiyat (TL)	Bağlı fiyat (TL)	Bağlı birim ağırlık (gr/cm ³)
%0 (Ref.)	0.458	1.145	1.000	1.000
% 20	0.448	1.120	0.978	0.871
% 30	0.443	1.108	0.967	0.788
% 40	0.438	1.095	0.956	0.750
% 50	0.433	1.083	0.945	0.705

Yılmaz (2010), taban külü ve uçucu külün birleşimini kullanarak kitre ve portland çimentosuyla bir karışım oluşturmuştur. Karışım sonuçlarına göre su emme değerinin %30'un üzerine çıkmasından dolayı su ile direk bağlantılı olan yerlerde kullanılmadan sandviç duvar ara dolgusu, iç sıva malzemesi, çatı kaplama sıva malzemesi, ara dolgu malzemesi halinde kullanılabileceğini gözlemlemiştir. Oluşturulan numunelerde tesisat için kanal açılma, testere ile kesilme, matkapla delinebilme, vidalanma gibi fiziksel işlemlere uygun olduğu ve boya tutma özelliğinin çok iyi olduğu sonucuna da varılmıştır (Yılmaz 2010).

Jaturapitakkul ve Cheerarot (2003), çalışmasında, taban külü malzemesinin puzolanik bir malzeme olarak kullanma potansiyellerini araştırmıştır. Çimento ikamesi olarak taban külünün %20-30' unu içeren harcın basınç dayanımlarının belli zaman periyotlarında bile çimento harcındakinden çok daha az, ancak öğütülmüş taban külünün kullanılması ile 60 gün sonra çimento harcından daha yüksek basınç dayanımlı olduğu gözlemlenmiştir. Beton yapmak için %20'lik bir çimento değişiminde öğütülmüş taban külü kullanıldığında, daha yüksek çimento içeriğine sahip betondan daha yüksek bir basınç dayanımı üretilmiştir. Elde edilen basınç dayanımı verileri, öğütülmüş taban külünün değerli bir puzolanik malzeme olarak kullanım potansiyeline işaret etmektedir. (Jaturapitakkul ve Cheerarot 2003).

Taban külleri, yüksek bir geri dönüşüm oranına sahip olmalarıyla dikkat çeker. Kendine özgü kaba, kaynaşmış ve camsı dokusu, doğal agregaların yerine geçebilecek ideal bir alternatif olarak taban külünü öne çıkarır. Çeşitli araştırmalar, taban külünün düşük parçacık yoğunluğuna sahip olmasından kaynaklı olarak harç ve betonda hafif agrega olarak kullanılma potansiyeline işaret etmektedir. Avrupa'da taban külü, betonda ince ve kaba hafif agrega olarak yılda seksen bin tona yakın oranda kullanılmaktadır (Lee vd. 2010; Arenas vd. 2011).

Taban külü ile elde edilen yapı ürünlerinin bir diğer önemli özelliği de yangına dayanıklı olmalarıdır. Modern yapılarda yangın, önde gelen tehditlerden biri olarak kabul edilmekte ve son zamanlarda sıklığı artmıştır. Harçlarda uçucu kül ve taban külü ilavelerinin kullanılması, yangın anındaki malzemenin davranışını olumlu yönde etkilemektedir (Xu vd. 2001).

Kaya (2010), uçucu kül ve taban külünü kıyaslamak amacıyla Portland çimentosu ile ayrı ayrı beton numuneler üretmiştir. Numune sonuçlarına göre, katkılı çimentoların su gereksinimleri katkısız göre çok daha yüksek çıkmıştır. Bu olgu, yanmamış karbonunun büyük miktarına ve gözenekli, pürüzlü yapıda olan kömür küllerinin parçacıklarına bağlanabilir. Aynı ikame oranlarına sahip katkılı çimentolar değerlendirildiğinde, katkılı uçucu kül ve katkılı taban külü çimentoların normal kıvamları hemen hemen birbirine eşittir. Portland çimentosuna göre, katkılı çimentoların erken dönem basınç dayanımı daha düşük seviyede gözlenmiştir. Ayrıca mineral katkı miktarının artması ile basınç dayanımı değerlerindeki azalmalar da belirgin hale gelmiştir. Kütleye göre %10 ve %20 oranlarında ikame edilen karıştırılmış çimentoların, 28 günlük kürlenme yaşındaki mukavemetine benzer sonuçlar göstermiştir. (Kaya 2010).

Arenas vd. (2011), yüksek yangın direncine sahip geri dönüştürülmüş bloklar için kömür yakma santrallerinden uçucu kül (toplam ağırlığın % 50' sine kadar), taban külü (toplam ağırlığın %30' una kadar), Portland çimentosu tip II, kum, kaba agrega kullanarak yaptığı çalışma sonuçlarında, uçucu kül ve taban külünün maruz kaldığı geniş buharlaşma platosundan kaynaklı blokların yangına karşı direncinin arttığını gözlemlemiştir. Ayrıca elde edilen malzeme özelliklerinin, piyasadaki malzemelerin mekanik özelliklerine benzer olduğunu, böylece cepheler ve iç bölümler gibi yapısal olmayan uygulamalar için kullanımının uygun olduğunu tespit etmişlerdir. Gözlemler, yeni malzemenin katkısız bloklara kıyasla daha üstün yangın yalıtımı ve daha düşük ısı iletkenliği sağladığını göstermektedir. Bu iki özellik de belirli uygulamalarda blok kalitesini artırmaktadır. Böylece atık kullanımı ile katma değerli ürünlerin üretilebileceği söylenebilir. Bu çalışmada geliştirilen atık katkılı blokların kullanımından kaynaklı

herhangi bir çevre için dezavantajlı bir durum beklenmediği aksine çevre için avantajlı bir durum oluşturulduğu sonuçlarına da varılmıştır (Arenas vd. 2011).

Lee vd. (2010), fiber takviyeli beton içerisinde, 0–2, 2–8, 8–11 mm büyüklüğünde taban külünü agrega olarak kullanarak çalışma yapmışlardır. Araştırmanın sonuçlarına göre, sadece taban külü agregalarının kullanılmasıyla (ek lifler olmadan), basınç dayanımının 47 ile 49 MPa arasında değiştiği ve yoğunluğun 2000 kg/m³'ten düşük olduğu, yüksek mukavemetli ve hafif beton üretiminin mümkün olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, taban külünün sadece fiber takviyeli betonun basınç dayanımını önemli ölçüde artırmakla kalmayıp aynı zamanda taban külü atıklarının kullanılmasıyla, çevresel sorunları da azaltabilecek bir yapı malzemesi elde edilebileceğini göstermiştir (Lee vd. 2010).

Torkittikul vd. (2017), harç ve betonda ince agrega yerine kömür taban külünün kullanılma olasılığını araştırmıştır. Kumun kısmi ve tam olarak kömür taban külü ile değiştirilmesiyle elde edilen harç ve betonun işlenebilirlik, yoğunluk, su emilimi, basınç dayanımı ve ısı iletkenlik gibi kimyasal bileşimi, mikroyapısı ve mekanik özellikleri araştırılmış ve sonuçlar geleneksel harç ve beton verileriyle karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, kömür taban külü içeriğinin artmasıyla birlikte harç ve beton yoğunluğunun belirgin bir şekilde azaldığını ortaya koymaktadır. Kömür taban külü seviyelerinin artmasıyla elde edilen harç ve betonların geçirgen gözenek alanının artmasına rağmen betonun basınç dayanımını önemli ölçüde etkilemediği görülmüştür. Buna ek olarak, kömür taban külü içeren betonlar ve harçlar iyi ısı yalıtım özellikli malzeme olarak gözlemlenmiştir. Isıl iletkenlik değerleri, kömür taban külü içeriğinin artmasıyla önemli ölçüde azalmıştır. Kömür taban külü ile ince agreganın değiştirilmesiyle betonun basınç dayanımının olumsuz etkilenmediği görülmüştür. Çünkü %100 kömür taban külü içeren betonun basınç dayanımı kontrol numuneninkine çok benzer çıkmıştır. Kömür taban külü ile %50' ye kadar kumun değiştirilmesi, harcın basınç dayanımını güçlü bir şekilde etkilememiştir. 50. günün sonunda, %28 oranında kömür taban külü katkılı harcın dayanımı yalnızca %17.86 oranında azalmıştır. (Ahmaruzzaman 2010; Torkittikul vd. 2017).

Srivastana ve Sing'in (2020) taban külü ile yapılan çalışmaları incelediğinde kömür taban külünün dahil edilmesi, harcın yoğunluğunu ve termal iletkenliği azaltmıştır. Bu nedenle hafif yapı ve enerji tasarruflu bina oluşturmada taban külü kullanımı avantaj sağlamaktadır. Kömür taban külünün %40'a kadar kumla değiştirilmesinde harcın mekanik mukavemeti üzerinde önemli bir etkisi olmadığı sonuçlarına varılmıştır (Srivastava ve Singh 2020).

Singh vd. (2016), taban küllü beton karışımlarıyla, kontrol beton karışımlarını kıyasladığında daha düşük elastikiyete modülü ve aşınma direnci gösterdiğini tespit etmiştir. Taban külü ile yapılan beton karışımlarının aşınma direnci, zamanla belirgin şekilde artış göstermektedir. Ayrıca, kömür taban külü kullanımının, her iki kum türünün yerine, daha yüksek kalitede beton elde edilmesine olanak sağladığı darbe dayanımı testleriyle ortaya konulmuştur. Kum yerine agrega olarak kullanılan %100 kömür taban külü ile elde edilen beton numunenin kaldırım, içi boş blok gibi diğer beton uygulamalarında da kullanılabileceğini gözlemlemişlerdir. Taban küllü betonların 28 günlük basınç dayanımı, incelik modülü 1.97 seviyelerinde taban külü ve incelik modülü 50.2 olan kumun %58' ye kadar değiştirme seviyelerinde kontrol betonunkiyile

karşılaştırıldığında incelik modülü 50.2 olan kumun %50'den daha yüksek taban külü ilaveleri için 28 günlük basınç dayanımı önemli ölçüde azalmıştır. 28 gün kürlenmeden sonra kömür taban külünün gecikmiş hidrasyonu ve puzolanik aktivitesi, taban küllü beton karışımlarının basınç dayanımında önemli bir artışa neden olmuştur. Serbest su-çimento oranının azalması, taban külü katkılı beton karışımlarının basınç dayanımlarındaki gelişimine olumlu etki etmiştir. Aynı zamanda, darbe testlerinin sonuçları da kömür taban külünün ince agreganın yerine kullanılmasıyla yüksek kalitede beton üretilebileceğini göstermiştir. Darbe hızı sonuçları basınç dayanımı sonuçları ile uyumlu olmuştur (Singh ve Siddique 2016). Kömür taban külünün öğütülerek ince bir şekilde betonda kullanılması beton kalitesini artırır ve yüksek mukavemetli beton olması için kullanılabilir. Ayrıca bu tür bir işlem, taban külü içeren taze betonun çökme kaybını da azaltır (Khongpermgonson vd. 2020).

Mangi vd. (2019), yaptığı çalışma sonuçlarına göre taban külünün çimentoda kullanılmasının iyi bir kaynak olabileceğini düşünmüşlerdir. Beton özelliklerini etkileyen faktörlerden biri olarak taban külü tane büyüklüğünü inceleyen bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Araştırma, öğütme işleminin taban külünün kimyasal bileşimini etkilemediğini, ancak fiziksel özellikler olan parçacık boyutu ve özgül ağırlığın üzerinde daha belirgin bir etkiye sahip olduğunu gözlemlemiştir. Araştırmanın sonuçları, daha uzun öğütme süresinin, daha fazla inceliğin ve yüksek özgül ağırlığın daha elverişli olduğunu ortaya koymaktadır. Betonun işlenebilirliği ise, taban külü miktarındaki çimento değişimi artışıyla azaldığı şeklinde bulunmuştur. Taban külü parçacıklarının inceliğindeki artışın karışımda daha fazla su emdiği fark edilmiştir. 10 µm'lik bir elek içinden geçen %65 ila %75 civarında bir parçacık inceliğine sahip %63'lük taban külünün, betonun yeterli basınç ve çekme mukavemetini elde edebileceği gözlemlenmiştir (Mangi vd. 2019).

Khongpermgonson vd. (2020), portland çimentosunda puzolan yerine öğütülmüş kömür taban külü kullanımının yüksek mukavemetli betonun özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmeyi amaçlayan bir çalışma yapmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, kömür taban külü ile yüksek mukavemetli beton yapmak için taban külünü kullanmadan önce yüksek inceliğe sahip olması gerektiğini, çünkü kömür taban külünün inceliğinin az olması, betonun düşük basınç dayanımına neden olduğunu gözlemlemiştir. Kömür taban külünün yüksek inceliğe sahip olacak şekilde öğütüldüğünde (No. 325 elek üzerindeki tutulan parçacıklar ağırlıkça %3'ten fazla değildir), yüksek mukavemetli beton üretmek için Portland çimentosu ile çimentolu bir malzeme olarak kullanılabilirliği hatta geleneksel betonunkinden daha iyi taze beton işlenebilirliğine sahip olduğunu gözlemlemiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, öğütülmüş kömür taban külü, betonun elastikiyet modülü ile yapısal tasarım için yüksek mukavemetli betonun basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi değiştirme konusunda önemli bir etkiye sahip değildir. Ayrıca, öğütülmüş kömür taban külünün, uygun mekanik mukavemeti sağlayarak aynı zamanda yüksek mukavemetli betonun sıcaklık kontrolü için çimento ikame malzemesi olarak kullanılabilirliği sonucuna da ulaşılmıştır. Bu tür bir kullanım aynı zamanda atık malzemenin yüksek değerli, yararlı bir yapı malzemesi olarak yeniden kullanımı için bir yol sağlamaktadır (Khongpermgonson vd. 2020).

Mohammed vd. (2021), inşaat sektöründe kömür taban külünün mevcut fiziksel ve kimyasal kullanımına yönelik bir derleme çalışması gerçekleştirmişlerdir. Bu derleme sonuçlarına göre; taban külünün gözenekli dokusu, kaldırım ve beton karışımlarının

yoğunluğunu azaltarak, kaldırım ve beton üretiminde uygun bir hafif agrega olabilirliğini göstermiştir. Taban külünün gözenekliliği sayesinde taban külünün kullanımıyla gürültü bariyeri oluşturarak geleneksel duvardan daha fazla ses emme yeteneğine katkıda bulunur. Partiküllerinin büyük su emme kapasitesi, uygun bağlayıcı içeriğini ve beton üretiminde çimento-su oranını artırma eğilimindedir. Taban külü karışımli betonun özellikleri kürlenme süresi ile iyileşmiştir. Belirli bir sertleşme süresinin ardından, taban külü içeren betonun özellikleri geleneksel betona göre daha üstündür. Taban külünün çimento yerine kullanılması, çevresel açıdan faydalıdır çünkü CO₂ salınımını azaltır (Mohammed vd. 2021).

Akkaya (2021), taban külünün inceliğine göre çimento üretiminde puzolanik aktivite deneylerine baktığında; inceliğin artmasıyla puzolanik özelliklerinin arttığını, çimento inceliğinin standartlara göre yeterli olduğunu daha fazla inceliğin ve yüksek karıştırmanın çimentoya katılmasında ekonomik olmayacağı sonucuna varmıştır. Fakat yüksek dayanımlı betonlar için taban külünün inceliğinin artırılması olumlu sonuçlar verecektir (Akkaya 2021).

2.2. Pomza Malzeme Özellikleri ve Kullanımı

Pomza, kristal su içermeyen, gözenekli bir yapıya sahip kayadır. Erimiş lavın havaya püskürtüldüğü volkanik patlamalarla oluşur ve soğudukça katılaşıp pomzaya dönüşür. Pomza, içindeki birçok hava kabarcığı nedeniyle sıra dışı ve hafif bir kaya türüdür. Kabarcıklar arasındaki katı malzemenin kalınlığına göre yoğunluğu değişir (Ismail vd. 2013). Pomza gözenekleri birbirlerinden bağımsızdır. İçerisindeki gözenekler ise gözle görülebilecek boyuttan mikroskopla görülecek boyutlara kadar sayısızdır ve birbiriyle camsı bir zarla ayrılmıştır. Bu sebeple suda uzun süre yüzen, hafif, izolasyonlu bir kaya türüdür. Mohs skalasına göre sertliği 5-6'dır. İçerisinde de %75'e yakın silis bulunmaktadır (Dikici 2010). Pomzanın gözenekli yapısı onu hafif hale getirir ve ısı ile ses yalıtımı sağlamak için avantaj sunar (Kilincarslan vd. 2018).

Pomza, temel olarak SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ gibi bileşenlerden oluşur (Ersoy vd. 2010). Pomza, çevre dostu bir malzeme olarak öne çıkan yüksek gözeneklilik (%85'e varan gözenek hacimleri), geniş özgül yüzey alanı, düşük yoğunluk gibi çeşitli özelliklere sahiptir (Veliev vd. 2006). Şekil 2.11'de gösterildiği gibi volkanik faaliyetlerle asidik ve bazik olmak üzere iki tür pomza oluşmaktadır.



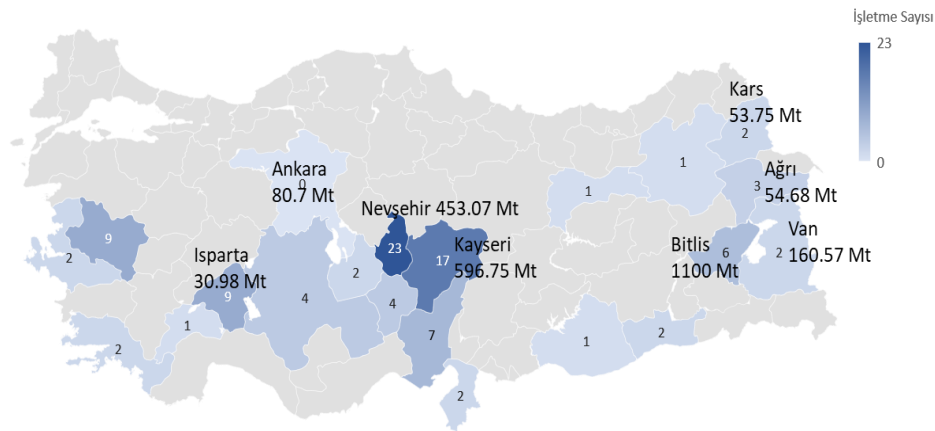
Şekil 2.11. Asidik ve bazik pomza örnekleri

Asidik ve bazik pomzalar Çizelge 2.8’de gösterildiği üzere farklı kimyasallardadır (Dikici 2010). Yeryüzünde en yaygın bulunan ve en çok kullanılan tür olan asidik pomza, beyaz ve kirli renktedir. Bazik pomza genellikle kahverengi-siyah renkte olup, asidik karakterdeki pomza ise yüksek silika içeriği sayesinde inşaat sektöründe yaygın olarak tercih edilmektedir. Bazik pomza içeriğinde, demir, alüminyum, magnezyum ve kalsiyum bileşenlerinin yüksek olmasından dolayı endüstriyel alanlarda kullanılmaktadır. İki pomza da oluşumlarında ani soğuma ve gazların bünyesini ani terk etmesinden dolayı oldukça gözenekli yapıdadırlar (Demir vd. 2011). Bu özelliklerinden dolayı çeşitli endüstriyel uygulamalarda dolgu maddesi, aşındırıcı, filtrasyon ortamı, emici, kimyasal taşıyıcı ve beton güçlendirici olarak kullanılır.

Çizelge 2.8. Bazik ve asidik pomza kimyasalları (Dikici 2010)

Bileşim	Bazik Pomza	Asidik Pomza
SiO ₂	45	70
Al ₂ O ₃	21	14
Fe ₂ O ₃	7	2.5
CaO	11	0.9
MgO	7	0.6
Na ₂ O+K ₂ O	8	9

Dünyadaki pomza rezervlerinin % 45’i Türkiye’de bulunmaktadır (Karaipekli ve Sari 2016). Küresel olarak, her yıl 19.6 Mt volkanik pomza çıkarılmakta ve Türkiye yılda 4.2 Mt üretim ile baskın üretici olmaya devam etmektedir (Perez 2012). Bu sebeple de ülkemiz pomza kaynağı bakımından zengin ve düşük maliyetli bir malzemeye sahiptir (Karaipekli ve Sari 2016). Gönen (2009) çalışmasında illere göre ülkemizdeki pomza rezervlerini ve pomza işletme sayılarını incelemiştir. Ülkemizdeki pomza rezervleri açısından Doğu Anadolu ve İç anadolu Bölgesi önemli bir potansiyele sahiptir. Doğu Anadolu’da Bitlis, İç Anadolu da ise Kayseri ve Nevşehir önemli rezerv kaynaklarına sahiptir. Pomza işleme tesisleri açısından Marmara ve Karadeniz Bölgesi dışında tüm bölgelerde tesisleri bulunmaktadır. En yoğun tesis sayısı İç Anadolu Bölgesi’nde Nevşehir ve Kayseri illerinde kümelenmiştir (Gönen 2009). Şekil 2.12’de en büyük rezerve sahip iller rezerv miktarları ile ve illerde bulunan tesis sayılarıyla verilmiştir.



Şekil 2.12. Türkiye’de illere göre pomza rezerv miktarları ve işletme sayılarının dağılımları (Gönen 2009; Yazar tarafından oluşturulmuştur.)

Pomza, Çizelge 2.9.'da gösterildiği gibi tekstil, kimya, tarım, kimya ve inşaat sektörü gibi birçok endüstri alanlarında kullanılmaktadır. Pomza kullanımındaki artışın her geçen gün hızlanacağı düşünülmektedir (Pekdemir 2011). Pomza kullanımının büyük bir kısmının inşaat sektöründe olduğu görülmektedir.

Çizelge 2.9. Endüstri alanlarında pomza tüketimi ve Türkiye'nin yeri (Pekdemir 2011).

	İnşaat Sektörü	Kimya Sektörü	Ziraat Sektörü	Tekstil Sektörü	Diğer Sektörler
Dünyada pomza tüketimi (%)	74	6	5	5	10
Türkiye'nin dünyada payı (%)	9	5	6	61	19

Zamana karşı direnen Roma ve Antik Yunan dönemlerindeki hamamlar, amfi tiyatrolar, mahzenler, su kemerleri pomza kullanılarak yapılmıştır. Pomza, yapı malzemeleri arasında en eski olanlarından biridir. Hafif yapı malzemesi olan pomzanın yalıtımlı özelliği antik çağlarda keşfedilmiştir. Dilimizde köpük taşı, sünger taş, hışır taşı, tapuk taşı, bims, ponza ve pomza olarak adlandırılmaktadır. Dünyanın kabul ettiği bilimsel terminolojide pümis (pumice) ve pümisit (pumicite) olarak adlandırılmaktadır (Gönen 2009).

Pomza, düşük birim hacim ağırlığına, etkili ısı ve ses yalıtımına, yüksek enerji emme kapasitesine ve maliyet açısından diğer seçeneklere göre daha ekonomik olması gibi üstün özelliklerine sahip olmasıyla öne çıkar. Bu sebeplerden dolayı pomzanın inşaat ve yapı sektöründe geniş bir kullanım alanı vardır (Akkurt vd. 2012; Sahin vd. 2014; Davraz vd. 2015; Kilincarslan vd. 2018). En çok inşaat sektöründe tüketimi olan pomzanın %80'i iç piyasada hafif beton agregası olarak kullanılmaktadır (Pekdemir 2011). Pomza, dekoratif kaplama ve çatı elemanı üretiminde, harç ve hazır sıva üretiminde, izolasyonlu döşeme ve çatı dolgu malzemesi, hafif yapı elemanları ve prefabrik yapı elemanları gibi birçok eleman üretiminde kullanılmaktadır (Pekdemir 2011). Hossain ve ark. (2011) çalışmalarında, hafif beton üretiminde pomza kullanımı ile düşük maliyetli inşaatlar elde edilebileceğini doğrulamıştır (Hossain vd. 2011).

Pomzanın katkı maddesi olarak kullanımıyla temele iletilen yükün %17 civarında hafifletildiği, çimento macunlarının, harcın ve betonun donmasına ve çözülmesine karşı mükemmel direnç sağlandığı tespit edilmiştir (Litvan 1985). Pomza ile yapılan betonarme çalışmalar üzerindeki incelemelerde, çelik korozyonuna/tuz saldırısına karşı tatmin edici dirençte olduğu ve yük taşıyıcı özelliğinin olduğu tespit edilerek yapılarda kullanılmasının uygun olduğu ortaya konulmuştur (Stepanova 1991).

Pomza, yüksek gözenekliliği, etkili ısı yalıtımı ve deprem direnci gibi özelliklerinden dolayı hafif yapı malzemeleri üretimi için tuğla ve beton gibi malzemelerde kullanılabilir. Bu hafif malzemelerin yoğunluğu, ısı iletkenliği, basınç ve gerilme dayanıklılığı ile Young'ın elastik modülü, deprem riski taşıyan bölgelerde yapı malzemesi olarak önemli avantajlara sahip olduklarını göstermektedir (Yaşar ve Erdoğan 2008).

Okday ve ark. (2015), çalışmalarında pomza agregası ilavesinin malzeme yığın yoğunluğunu, basınç dayanımını azalttığını ve kompozit betonların yalıtım özelliklerini geliştirdiğini ortaya koymuştur (Okday vd. 2015). Gündüz (2008), pomzayı agregası olarak kullandığı çalışma sonuçlarına göre 2.5 MPa ile 15.0 MPa arasında basınç dayanımının elde edilebileceğini, ısı iletkenliği ve maliyeti düşürebileceğini gözlemlemiştir (Gündüz 2008). Gündüz ve Uğur'un (2005) yaptığı çalışmaya göre pomza agregası betonunun ısı iletkenliğinin, eşdeğer normal ağırlıklı betonlara göre 2.5-4 kat daha düşük olduğunu gözlemlemiştir (Gündüz ve Uğur 2005). Koçkal (2016), yaptığı çalışmaya göre asidik pomza agregalı harcın, bazik pomza agregası harcından daha düşük ısı iletkenliğinin ve daha yüksek kapiler emmeye sahip olduğunu gözlemlemiştir (Koçkal 2016). Nevruz (2016) yaptığı çalışmada asidik pomzaların, bazik pomzalara göre basınç dayanımının daha fazla olduğunu tespit etmiştir (Nevruz 2016). Demirel ve Keleştemur (2011) çalışmasında ise pomzanın erken kür yaşında betonun dayanımını düşürdüğünü fakat ilerleyen kür yaşında dayanımın arttığını gözlemlemiştir (Demirel ve Keleştemur 2011).

Mboya vd. (2019), doğal scoria ve pomza agregasını %10 kullanarak oluşturduğu Portland çimentolu betonunun özelliklerini incelediklerinde 600 °C sıcaklığa maruz kalan ürünün basınç dayanımının normal Portland çimentolu ürüne göre daha fazla olduğunu tespit etmiştir. Böylece ürün yangın riski yapılarında kullanılabilecektir. Ayrıca klinkerleme işlemi sırasında tüketilen enerji ve CO₂' yu azaltmada pomza kullanımının büyük potansiyele sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle bu malzemeler iklim değişikliğine neden olan faktörlerin azaltılması için kullanılabilir (Mboya vd. 2019).

Samimi vd. (2018), yaptığı çalışmada pomza içeren betonun asidik ortamlara karşı dayanıklılık yönlerini incelemiştir. Pomza ile çimentonun kısmen değiştirilmesinin, puzolanik etkinin bir sonucu olarak portlandit tüketiminin artması nedeniyle sülfürik asit saldırılarına karşı daha yüksek direnç sağladığı gözlemlenmiştir (Samimi vd. 2018). Pomzanın gözenekliliğinin, donatıya karşı dayanıklılık üzerine etkilerini Özcan ve M. Emin çalışmalarında incelemiştir. Araştırma sonuçlarına göre, pomza kullanımının kontrol grubuna göre donatıya karşı daha yüksek direnç ve daha düşük gözeneklilik sergilediği görülmüştür (Özcan ve Koç 2018; Rahman vd. 2022).

Rahman vd. (2022), yaptığı çalışmaya göre pomza kullanımıyla kontrol örneğinden daha düşük basınç dayanımı elde etmiştir. Aynı zamanda pomza içeren numunelerin basınç dayanımı, devam eden puzolanik reaksiyonun bir sonucu olarak zamanla iyileşmiştir. Pomzanın dahil edilmesi, numunelerin asit saldırısına dayanma yeteneğini de artırmıştır. Bunun nedeni, kalsiyum hidroksit, puzolanik etki sırasında, pomza tarafından, asidin aşındırıcı etkisine direnen kararlı ürünler (CSH, CAH) oluşturmada tüketilmesidir (Rahman vd. 2022).

Akkaş (2011), Isparta pomzası ve Isparta normal agregasını belirli oranlarda değiştirerek hafif beton serileri ve betonarme kirişler üretmiştir. Çalışma sonucuna göre pomza agregasının taşıyıcı elemanlarda kullanılabileceğini ve taşıyıcı özelliğinin standart ölçütlerine göre uygunluğunu tespit etmiştir (Akkaş 2011).

Uysal vd. (2004), farklı oranlarda pomza agregası, farklı çimento miktarı ve farklı kıvamla oluşturulan betonların ısı iletkenlik ve hacim ağırlıkları üzerine çalışma yapmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, pomza agregasının kullanım oranının artırılmasıyla betonun birim ağırlığının ve ısı iletkenliği azalmıştır. Çimento oranının artmasıyla,

betonun ısı iletkenliği ve birim hacim ağırlığı artmıştır. Fakat kıvamın ısı iletkenliğine ve birim hacim ağırlığına bir etkisinin olmamıştır (Uysal vd. 2004; Nayır 2021)

Agrega ikamesiyle elde edilen pomza agregalı taşıyıcı hafif betonun yapı elemanlarında kullanılmasıyla yapı zati yükte önemli azalma sağlanmaktadır. Taşıyıcı hafif beton üretiminde çimento ihtiyacındaki artış dezavantaj gibi görülse de birim hacim ağırlıkta azalma uzun zamanda bir avantajdır. Akkaş (2011), çalışmada pomzanın taşıyıcı yapı elemanlarında kullanılmasıyla standartlarda verilen ölçütlere uygun olduğunu tespit ederek taşıyıcı elemanlarda da kullanılabileceğini tespit etmiştir (Akkaş 2011; Nayır 2021). Oğuz (1989), çalışmada betonda pomzanın artmasıyla su/çimento oranının azalması sağlanarak basınç dayanımının arttığı ama üretilen hafif ve yarı hafif betonların yük taşıma elemanı olarak kullanılamayacağı sonuçlarına varmıştır (Oğuz 1989). Serin ve ark. (2007), yaptığı çalışmada diyatomitli ve pomzalı betonların yalıtım bloğu ve bölme duvar elemanı olarak kullanılabileceğini gözlemlemiştir (Serin vd. 2007).

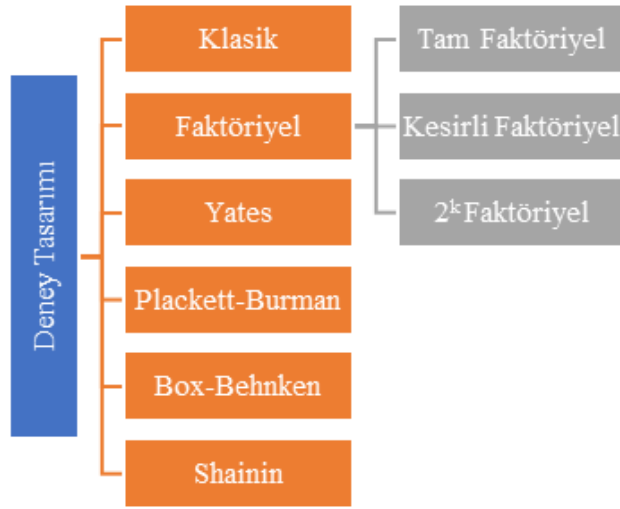
Türkel ve Kadiroğlu (2007), çalışmada, pomza, CEM I 42.5 çimento, silis dumanı ve uçucu kül kullanarak hafif betonlar üretmiştir. Test sonuçlarına göre taşıyıcı betonlar için belirtilen ACI 213R-87'ye göre 17.2 MPa dayanımın oldukça üzerinde dayanım değerinde betonlar üretilebileceğini ve TS EN 206-1 standardındaki hafif betonlar için dayanım sınıflarını da sağladığını gözlemlemiştir (Türkel ve Kadiroğlu 2007).

2.3. Taguchi Tasarımı Metodu ve Yapı Malzemesi Geliştirilme Araştırmalarında Kullanımı

Taguchi Tasarımı Metodu (TTM)'nin temel amacı yüksek kalite ve düşük maliyete erişimdir. Uzun yıllardır ürünlerin kalite ve maliyet iyileştirilmesi araştırılmalarında kullanılmaktadır. Japonya'da başlayan başarılı uygulamaları ile dikkat çeken TTM, 1980'den bu yana ABD'de farklı endüstri kollarında kullanılmaktadır (Hamzaçebı ve Kutay 2003).

Ürün üretiminde kalite ve verimlilik rekabet ürünlerden farklılaşabilmek için önemli kavramlardır. Kalitesi yüksek ve maliyeti düşük olan ürün ve süreçler, ekonomik başarı için talep edilmektedir (Risberg Ellekjær ve Bisgaard 1998). Bahsedilen kalite, ürünlerde talep edilen niteliklerin asgari olarak üründe yer alması ve sürekli gelişmeye açık olması olarak ifade edilebilir (Hamzaçebı ve Kutay 2003). TTM yöntemi, kalite hedeflerinin ve hedeflerden sapmalar çerçevesinde oluşturulacak iyileştirmeler ile kalitenin korunabileceğine ve bu süreçte tasarımın önemine vurgu yapmaktadır. TTM kalite ve maliyet iyileştirmelerini sistem, parametre ve tolerans tasarımı olarak adlandırılan üç kalite yöntemi çerçevesinde yapmaktadır (Hamzaçebı ve Kutay 2003). Üretim öncesi incelenecek verilerin istatistiksel analiziyle elde edilen deney tasarımları, hedeflenen kalite ölçütlerine yönelik önemli bilgiler vermektedir (Gökçe ve Taşgetiren 2009).

Geleneksel araştırmalardaki kaynak ve zaman tüketimi nedeniyle istatistiki yöntemlerle deney tasarım modellerinin gelişme zorunluluğu doğmuştur. Deney tasarımına yönelik literatürde kullanılan yöntemler Şekil 2.13' te verilmiştir.



Şekil 2.13. Deney tasarım yöntemlerine bakış (Hündür 2019)

Taguchi Metodu da Şekil 2.13'te gösterilen tam faktöriyel, kesirli faktöriyel deney tasarımlarından biri olarak ifade edilmektedir (Gökçe ve Taşgetiren 2009). Deney tasarımı ve Taguchi tasarımı Şekil 2.14' te gösterildiği şekilde işlem adımlarına sahiptir. Bu akışla deney tasarımı yöntemleri, hata minimizasyonunu ve kalitenin gelişimine katkı sağlamaktadır. Taguchi Metodu da bu akış ile maliyetlerin düşük ve en az deney yaparak bilgi elde etmeyi hedeflemektedir. Elde edilen bilgiler ile ürün tasarımı ve kalitesini iyileştirme açısından maliyet ve kalite avantajı sunan çözümler elde edilmektedir.



Şekil 2.14. Deney tasarımı ve Taguchi tasarımı işlem adımları (Hündür 2019)

Web of Science (WOS) da ve Yükseköğretim Kurumu (YÖK) Ulusal Tez Merkezi veri tabanında yapılan taramalarda inşaat sektörü alanında Taguchi tasarım yönteminin kullanıldığı yapı malzemesi geliştirme araştırmalarındaki örnekler aşağıda yer verilmiştir.

Zhang vd. (2019) çalışmasında geri dönüştürülmüş ince ve iri agregalardan oluşan karışımın, inşaat uygulamalarında kullanımını Taguchi-Cevap yüzey metodu optimizasyon yaklaşımı ile araştırmıştır. Çevre için önemli bir farkındalık ile ön işleme tabi tutulmuş geri dönüştürülmüş agreganın inşaat uygulamalarında özellikle toprak üstü potansiyeline yönelik literatüre katkılar sunmuştur (L. W. Zhang vd. 2019).

Royas vd. (2019) araştırmasında atık katkılı blok tipi malzeme geliştirilmesinde Taguchi yöntemini kullanmıştır. Araştırmada atık olarak buğday samanı ve mısır kabuğu lifleri kullanılmıştır. Taguchi tasarımında lif uzunluğu, kaynama süresi, NaOH konsantrasyonu ve harmanlanma süreleri kapsamında kontrol faktörleri dikkate alınarak termal iletkenlik ve yoğunluk değerleri incelenmiştir. Eğilme, basınç gerilmeleri ve farklı aletli analiz yöntem sonuçları değerlendirilmiştir (Rojas vd. 2019).

Ahmedi vd. (2018) araştırmasında tuğla ürününde termal özellikleri geliştirilmesi konusunda kil yerine perlit, doğal zeolit, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu malzemelerinin kullanımının tuğla malzemedeki etkisini incelemiştir. Taguchi yöntemi kullanılarak perlit, doğal zeolit, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu karışım oranlarının etkisi analiz edilmiştir. Hazırlanan tasarımların sonucunda elde edilen tuğla numunelerinin yoğunluk, ağırlık kaybı, büzülme, görünür gözeneklilik, su emme, donma ve çözölmeye karşı direnç, basınç dayanımı, termal iletkenlik ve pişmiş tuğlaların mikroyapısal analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları mevcut tuğlalar ile karşılaştırılmış kullanılan malzemelerin ısı iletkenliğine verdiği olumlu katkılar raporlanmıştır (Ahmadi vd. 2018).

Manjunath vd. (2018) çalışmasında kendiliğinden yerleşen betonlarda ince agrega ve kaba agrega olarak çelik cüruf kumu ve Elektrik Ark Ocağı cürufu, bağlayıcı olarak öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanmıştır. Taguchi'nin deney tasarımı ile oluşturulan karışımlardan elde edilen bilgilere göre karışımların mukavemet özellikleri araştırılmıştır (Manjunath vd. 2019).

Nayak vd. (2020) çalışmasında aşınma gibi fiziksel etkileşimlere dayanıklı hibrit kompozit tasarımında dolgu malzemesi olarak atık mermer tozunun kullanımını araştırmıştır. Taguchi deney tasarımı kullanılarak yapılan karışımlar kapsamında spesifik aşınma oranlarına etki eden kontrol faktörlerine yönelik optimizasyona olanak sağlayacak bilgiler elde edilmiştir (Nayak vd. 2020).

Wang vd. (2020) çalışmasında atık cam tozu ve kumun farklı karışım oranlarını, atık cama göre ikamesini, basınç dayanımını, su bağlayıcı oranını, çimento dozajını ve renk faktör deneylerin etkisini Taguchi tasarımı ile araştırmıştır. Çalışma ile atık camın inşaat sektöründe, yapı malzemelerine yönelik, sürdürülebilir malzeme geliştirme bilgi kümesine katkı sağladığını raporlamıştır (Wang vd. 2020).

Prusty vd. (2015) çalışmasında su-çimento oranının, geri dönüştürülmüş kaba agrega (%) oranının, maksimum çimento içeriğinin ve nano-silika (%) faktörlerinin beton

özelliklerine etkisini araştırmıştır. Taguchi tasarım metodu ile 9 tip beton numunesinin basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilmede çekme dayanımı, elastisite modülü ve tahribatsızlık sonuçları test edilerek incelenmiştir. Elde edilen sonuçlarla faktörlerin etki sıralamasında ve beton karışım oranlarında bileşen etkilerine yönelik bilgi edinmede Taguchi tasarım metodunun önemli bir araç olduğu vurgulanmıştır (Prusty vd. 2015).

Rai vd. (2013) çalışmasında çevre için ciddi sorunların kaynağı olan alümina üretim atığı olan kırmızı çamur veya boksit kalıntılarının yapı ve inşaat sektöründe kullanılabilirliği araştırmıştır. Yüksek alkali özelliğine sahip bu atıkların, uçucu kül ile sinterlenerek kil ikamesi olarak tuğla üretimine entegresine yönelik Taguchi tasarım metodolojisi ile deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Alkali alümina üretim atıklarının uçucu kül ile farklı oran ve sıcaklıklarda sinterlenmesine yönelik bilgiler raporlanmıştır (Rai vd. 2013).

Devi (2018) çalışmasında birçok araştırmacının odağındaki beton içindeki doğal agreganın azaltılması kapsamında çelik çürufu ve seramik atıklarının kullanıldığı atık katkılı beton üretimine yönelik deneysel çalışmalar gerçekleştirmiştir. Çalışma ile atık katkılı agrega katkılı betonların dayanıklılık özellikleri araştırılmıştır. Taguchi tasarım metodu ile elde edilen karışımların asit direnci, su emme, donatı korozyonu ve su emiciliği gibi testlere verdiği yanıtlar incelenerek dayanıklılık konusunda optimizasyon değerlerine yönelik bilgiler raporlanmıştır (Devi 2018).

Bagheri vd. (2020) çalışmasında uçucu kül ve çimento fırın tozu atıklarının beton uygulamalarında, iyileştirme ve CO₂ emisyonunun azaltılmasındaki etkisini araştırmıştır. Uçucu kül ve çimento fırın tozunun tekli ve hibrit olarak farklı oranlarda karışımları Taguchi tasarımı metodu ile incelenmiştir. Taguchi tasarımında su-bağlayıcı oranlarının ve çimento ikame oranlarına yönelik optimizasyonun belirlenmesi için deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Deney sonuçları kapsamında dayanım-fiyat, CO₂ emisyon faktörü açısından elde edilen bilgiler literatür ile paylaşılmıştır (Bagheri vd. 2020).

Bayrak (2002) yüksek lisans tez çalışmasında çimento yerine uçucu kül ve silis dumanı kullanarak yol betonu karışımlarının mekanik özelliklerini araştırmıştır. Çalışmadaki karışımlara yönelik Taguchi tasarım metodu kullanılmıştır. Uçucu kül ve silis dumanının, yol betonu karışımına, çimento yerine kullanılmasıyla elde edilen deney karışımlarından basınç mukavemeti, kırılma modülü ve elastisite modülü test değerlerinde artış olduğu raporlanmıştır. Aynı zamanda Taguchi tasarım metodunun da inşaat yapı malzemeleri karışım optimizasyonunda kullanılabilirliğine yönelik literatüre katkı sağlanmıştır (Bayrak 2002).

Keskin (2016) yüksek lisans tez çalışmasında perlit ve taban külü içeren harçların özelliklerini araştırmıştır. Deneysel çalışmalarda Taguchi tasarım metodu kullanılmıştır. Araştırmada perlit / taban külü oranı, çimento ve su/çimento oranı olmak üzere üç adet kontrol faktörü ile harç karışımlarına yönelik deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen harç karışımlarıyla elde edilen numunelere basınç dayanımı, eğilme dayanımı, kıvam-yayılma, kuru ağırlık, su emme, kılcal su emme ve ısı yalıtım değerine yönelik test ve analizler yapılarak harç karışımlarının performansları raporlanmıştır (Keskin 2016).

Fidan (2018) yüksek lisans çalışmasında hafif kompozit malzeme üretimine yönelik perlit ve taban külü atıklarının kullanımını araştırmıştır. Çimento yerine kullanılan bu atıklara yönelik geliştirilen harç kompozisyonlarının belirlenmesinde Taguchi tasarım metodu kullanılmıştır. Taguchi tasarımları kapsamında elde edilen hafif kompozit malzemelerin eğilme, basınç, dayanım, kuru birim ağırlık, maliyet, su emme, kılcallık ve yalıtım deneyleri ile performansları raporlanmıştır (Fidan 2018).

Liban (2022) doktora tezinde uçucu kül, kalker ve zeolit içeren geopolimer harçların tasarlanmasına yönelik deneysel çalışmalar yürütmüştür. İnşaat sektöründe özellikle çimento kaynaklı CO₂ emisyon yüklerinin artmasından dolayı araştırmacılar, bu alanda çevreci, alternatif ürünlerin geliştirilmesine yönlendirilmektedir. Çalışmada bağlayıcı görevinde doğal zeolit, uçucu kül ve toz kalker; alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat içeren geopolimer harçlar incelenmiştir. Çalışmada Taguchi tasarım metodu ile bağlayıcı miktarı, aktivatör/bağlayıcı oranı, sodyum hidroksit/ sodyum silikat oranı ve sodyum hidroksitin polaritesine yönelik optimizasyon çalışmaları yürütülmüştür. Deneysel çalışmalar kapsamında elde edilen harçların basınç ve eğilme dayanımları, donma-çözülme, ıslanma-kuruma, sülfat, asit dirençleri ve mikroyapı özellikleri incelenmiştir (Liban 2022).

Uran (2022) yüksek lisans tez çalışmasında agrega üretiminde yoğun şekilde kullanılan kilin genleşmesine yönelik parametrelerin optimizasyon çalışmalarını incelemiştir. Optimum koşulların belirlenmesi için Taguchi tasarım yöntemi optimizasyonunu gerçekleştirmiştir. Çalışmada parametre olarak organik madde yüzdesi, ön ısıtma sıcaklığı ve süresi ile sinterleme sıcaklığı ve süresi alınarak kilin genleşme oranı, pişme anındaki kaybı, su emme oranı ve tane yoğunluğu performans değerleri incelenmiştir (Uran 2022).

3. MATERYAL VE METOD

3.1. Materyal

Taban külü atığı ve pomza agregası kullanılarak çimento esaslı ve geri dönüştürülmüş polietilen tereftalat (PET) içerikli kompozit üretimi ve optimizasyonuna yönelik hazırlanan bu tez çalışmasında materyal olarak asidik pomza, taban külü, polietilen tereftalat (PET) atığı, CEM I 42.5 R çimento ve şebeke suyu kullanılmıştır. Tezin deneysel çalışmalarında kullanılan materyallerin özelliklerine yönelik genel bilgilendirmeler aşağıda verilmiştir. Tez çalışmasının üçüncü ve dördüncü bölümlerinde kullanılan tüm fotoğraflar yazara aittir.

3.1.1. Pomza

Çalışmada kullanılan farklı elek büyüklüklerindeki pomza agregaları 2022 yılında Nevşehir ve Isparta'da ticari faaliyet gösteren iki farklı işletmenin ürün stoğundan bedelsiz olarak tedarik edilmiştir. Deney çalışmalarında iki tür pomza kullanılmıştır. Çalışmada P-1 ve P-2 olarak adlandırılmıştır. P-2 türünün iki farklı boyutu da çalışmada kullanılmıştır. Farklı büyüklükteki pomzalar Şekil 3.1'de verilmiştir. Pomza örneklerine ait kimyasal analiz sonuçları, Çizelge 3.1'de sunulmuştur.



Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan pomza agregaları

Çizelge 3.1. Pomza agregalarının kimyasal özellikleri

Kimyasal Bileşimleri	P-1	P-2
	% Ağırlık	% Ağırlık
SiO ₂	65.76	58.88
Al ₂ O ₃	13.81	18.74
Fe ₂ O ₃	3.92	5.93
K ₂ O	3.77	3.66
MgO	1.55	2.95
Na ₂ O	4.07	4.25
TiO ₂	0.39	0.45
CaO	1.96	2.16

3.1.2. Taban külü

Çalışmada kullanılan taban külleri, Denizli ve Kütahya illerindeki farklı iki termik santralden 2022 yılında bedelsiz olarak atık depolama sahalarından tedarik edilmiştir. Kullanılan taban külleri, T-1 ve T-2 olarak sınıflandırılmıştır. T-2'ye ait olan taban külü sınıfında ince ve iri taneli yapıda iki tür taban külü bulunmaktadır. Bu çalışmada kullanılan taban külleri görselleri Şekil 3.2'de ve kimyasal analiz bilgileri de Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Şekil 3.2. Çalışmada kullanılan taban külü atıkları



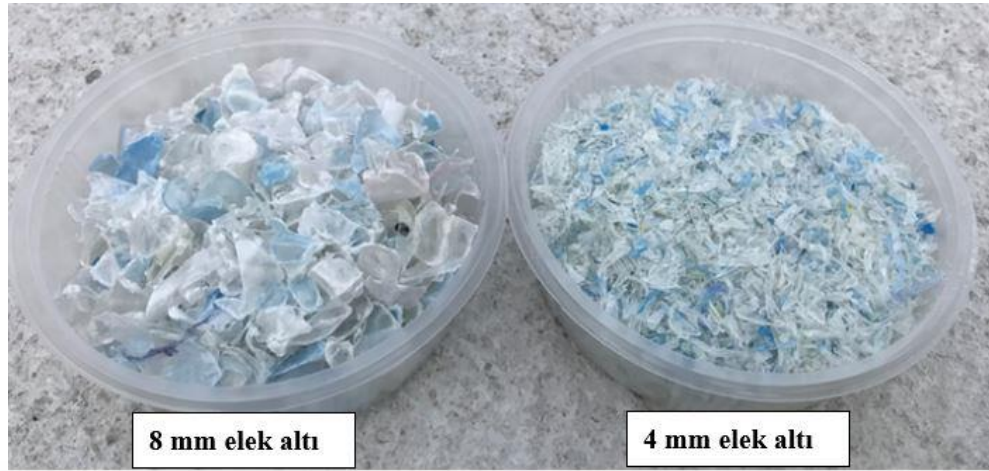
Çizelge 3.2. Taban külü atıklarının kimyasal özellikleri

Kimyasal Bileşimleri	T-1	T-2
	% Ağırlık	% Ağırlık
SiO ₂	53.72	48.62
Al ₂ O ₃	23.91	16.05
Fe ₂ O ₃	7.91	5.82
K ₂ O	1.50	1.09
MgO	2.00	2.82
Na ₂ O	0.95	0.49
CaO	4.81	16.98
P ₂ O ₅	-	2.286
SO ₃	0.58	2.02
Kızdırma Kaybı	3.09	0.87
Reaktif CaO	2.18	9.51
Reaktif SiO ₂	33.19	22.46
Serbest CaO	0.08	<0.01
Cl-	-	0.006

3.1.3. Polietilen tereftalat (PET) tüketim atığı

Çalışmada kullanılan PET atıkları İstanbul'da ticari faaliyetlerini sürdüren KT Kale firmasından tedarik edilmiştir. Tane boyutu açısından 8 mm ve 4 mm altında olan

PET örnekleri Şekil 3.3’de verilmiştir. PET atıklarına yönelik fiziksel özellikler Çizelge 3.3’ de verilmiştir.



Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan PET atıkları

Çizelge 3.3. PET atıklarının fiziksel özellikleri

Özellikler	Birim	En az-En Fazla
Renk/mavi	%	10-30
Renk/beyaz	%	70-90
Nem	%	0.5-1.5
Kağıt	ppm	0-30
Polietilen	ppm	0-30
Polipropilen	ppm	0-30
Etiket	ppm	0-30
Metal	ppm	0-30
Polivinilklorür	ppm	0-30
Renkli PET	ppm	400
pH	ppm	6-8
Viskozite	dL g	>0.7

3.1.4. Çimento

Bu çalışmada yer alan bütün deneylerde Adoçim Çimento Beton San. ve Tic. A.Ş tarafından TS EN 197-1:2002 standardına uygun üretilen CEM I 42.5 R çimento kullanılmıştır. Çimentoya yönelik kimyasal özellikler Çizelge 3.4’te, fiziksel ve mekanik özellikler Çizelge 3.5’te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Çimento kimyasal özellikleri

Kimyasal Özellikler	%	TS EN 197-1 Sınırları
SO ₃	2.20	Azami 3.5
Klor(Cl-)	0.015	Azami 0.1
Toplam Katkı	4.80	Azami 5

Çizelge 3.5. Çimento fiziksel ve mekanik özellikler

Fiziksel Özellikler	Değer/Birim	TS EN 197-1 Sınırları
Özgül yüzey	3461 cm ² /g	Asgari 2800
Özgül ağırlık	3.11 gr/cm ³	-
Kalıntı (45 mikron)	5.5	-
Priz başlama periyodu	140 dakika	Asgari 75
Priz bitiş periyodu	240 dakika	Azami 600
Sağlamlık	1 mm	Azami 10
S/Ç su ihtiyacı	30.1 %	
Mekanik Özellikler		
2 gün	23.4 N/mm ²	Asgari 75
7 gün	41.5 N/mm ²	-
28 gün	50.6 N/mm ²	Asgari 42.5-Azami 62.5

3.1.5. Su

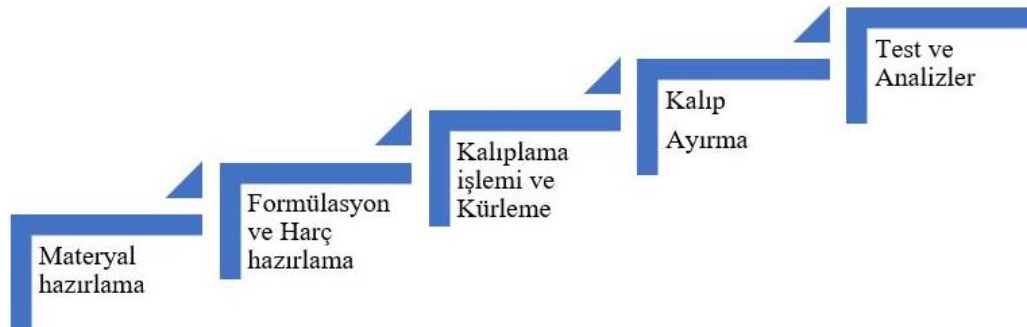
Çalışmalardaki harç karışımlarında Antalya şehir merkezi şebeke suyu kullanılmıştır. Çalışmaların gerçekleştirildiği tarihler içinde Antalya şebeke suyuna yönelik ASAT tarafından yapılan su kalite analizleri incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan suyun insani tüketim amaçlı sular hakkında yönetmeliğe uygun olduğu ASAT tarafından beyan edilmiştir (Anonim 5).

3.2. Metod

Tez kapsamında deneysel çalışmalar dört temel bölümde gerçekleştirilmiştir. Bu bölümler sırasıyla ön çalışma, Taguchi tasarımı, yapı bloğu baskı makinesi geliştirilmesi ve deneysel çalışmalar, test ve analizler şeklindedir.

3.2.1. Ön çalışma

Ön çalışma bölümünde, Taguchi tasarımının hazırlanmasına yönelik parametreler ve kullanılan materyal miktarlarının seviye bilgilerini elde etmek için yapılan ön deney çalışmaları mevcuttur. Ön çalışma aşamasında eş zamanlı olarak, farklı kaynaklardan elde edilen materyallerin deneysel çalışmalar için uygunluğu tespit edilmiştir. Bu süreçte uygulanan sistematik çalışma metodolojisi Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Ön çalışma sistematik çalışma metodolojisi akış diyagramı (Yazar tarafından oluşturulmuştur.)

Bu materyal hazırlığı sürecinde malzemelerin granülometreleri, elek analizleri, hava kuru ağırlıkları, etüv kuru ağırlıkları, doymun kuru yüzey ağırlıkları, su emme ağırlıkları ve özgül ağırlıkları tespit edilmiştir. Analizler, Akdeniz Üniversitesi ve Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Yapı Malzemeleri Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Yapı malzemeleri laboratuvarları sahip olduğu makine, teçhizat altyapısı ile inşaat sektörü yapı malzemeleri çerçevesinde lisans ve lisansüstü öğrencilerin eğitim ve araştırma uygulamaları ile sanayiden gelen test ve analiz taleplerine yönelik hizmet sağlayan araştırma laboratuvarlarıdır. Tez çalışması kapsamındaki iki yapı malzemesi laboratuvarında gerçekleştirilen test ve analizlerde kullanılan makine ve teçhizatların TSE kalibrasyonları periyodik olarak yapılmaktadır.

Ön çalışma kapsamında granülometri analizi için kullanılan cihazlar, materyaller ve hazırlıklara yönelik laboratuvar çalışmalarından kesitler Şekil 3.5’ te verilmiştir. Materyal hazırlığı sürecindeki ön analiz sonuçları kapsamında elekten geçen yığışımli yüzdelik oranları Çizelge 3.6’ da verilmiştir.



Şekil 3.5. Materyallerin granülometri analizi öncesi hazırlıkları

Çizelge 3.6. Numunelerin elekten geçen yığışımli yüzdelik oranları

Elek aralığı (mm)	P-1	P-2 iri taneli	P-2 8 mm altı (gr)	T-1	T-2 Santral çıkışlı	T-2 8 mm altı (gr)	PET 8 mm altı (gr)
31.5	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
16	99.59	92.44	100.00	100.00	83.23	100.00	100.00
8	69.63	8.07	100.00	98.02	89.08	100.00	100.00
4	55.69	100.00	99.46	95.29	91.81	88.67	53.55
2	82.29	99.93	78.41	95.17	90.56	75.62	6.40
1	95.40	99.96	57.25	94.91	86.93	57.54	0.28
0.5	99.20	99.98	41.16	92.15	79.72	29.50	0.00
0.25	99.54	99.95	28.08	76.37	88.37	13.42	0.00
T. Kabı	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Malzemelerin hava kuru, etüv kuru, doymun kuru yüzey, su emme ağırlıkları ve özgül ağırlık analizleri için kullanılan cihazlar, materyaller ve hazırlıklara yönelik

laboratuvar çalışmaları Akdeniz Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Yapı Malzemeleri Laboratuvarında yazar tarafından yapılmış olup görselleri Şekil 3.6’da verilmiştir. Materyal hazırlığı sürecindeki ön analiz sonuçları kapsamında deney sonuçları Çizelge 3.7’ de verilmiştir.



Şekil 3.6. Hava kurusu, etüv kurusu, doymun kuru yüzey kuru ve su emme ağırlıkları ve özgül ağırlık analizleri için kullanılan materyaller

Çizelge 3.7. Hava kurusu, etüv kurusu, doymun kuru yüzey ve su emme ağırlıkları ve özgül ağırlık analiz sonuçları

Deneyler	P-1	P-2 / 4 mm altı	P-2/ 8 mm altı (gr)	T-1	T-2 / 4 mm altı	T-2 / 8 mm altı (gr)	PET
Hava kurusu ağırlık	550.08	550.08	200	200	550.05	200	-
Etüv kurusu ağırlık	483.19	483.19	176.39	183.29	545.23	151.07	-
Doymun kuru yüzey ağırlık	581.54	581.54	201.16	305.69	671.89	189.24	-
Su emme ağırlık	17.88	17.88	24.77	122.4	23.03	38.17	-
Özgül ağırlık	1.2	0.7	0.7	1.87	0.9	0.9	0.91

Farklı materyallerin analizleri sonucu iki farklı kaynaktan elde edilen pomza ve taban külünün değişken oranlarda kullanılarak 3 farklı harç karışım senaryo denemesi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan karışım formülasyonlarına yönelik oluşturulan senaryolar ve içerikleri Çizelge 3.8’ de verilmiştir.

Çizelge 3.8. Ön çalışma karışım formülasyon senaryoları

Malzemeler	Senaryolar		
	1	2	3
	Ağırlık (kg)%	Ağırlık (kg)%	Ağırlık (kg)%
Çimento	22-28	18-25	14-18
Su	10-16	10-15	10-14
Pomza	24-32	27-35	35-45
Taban Külü	30-39	32-41	25-34
PET	1-5	1-5	2-7

Çizelge 3.8’de verilen senaryolara yönelik hazırlanan karışımlar laboratuvar ortamında temel olarak Şekil 3.7’de gösterilen şekilde karıştırılarak hazırlanmıştır. Karışım hazırlanırken öncelikle etüv kurusu şeklinde temin edilen malzemeler formüllerden çıkan sonuçlara göre tartılmıştır. Daha sonra sırasıyla taban külü, çimento, pomza ilave edilerek hazırlanan karışıma bir miktar su ilavesi ile karıştırma işlemi yapıldıktan sonra PET atığı ve geri kalan su ilavesiyle karışım homojen hale getirilmiştir.

**Şekil 3.7.** Ön çalışma harç hazırlama

Ön çalışmalar laboratuvar ortamında beton test ve analizleri için standart kullanılan kalıplardan 100 x 100 x100 mm çelik ve plastik kalıplarda ve 40 x 40 x 160 mm çelik kalıplarda gerçekleştirilmiştir. Ön çalışmada kullanılan çelik ve plastik kalıplar Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.8. Ön çalışmada kullanılan çelik ve plastik kalıplar

Ön çalışmaların sonucunda elde edilen harç karışımları, yapı bloğu numuneleri elde etmek amacıyla Şekil 3.9'da gösterilen şekillerde hazırlanmıştır. İlk olarak 100 x 100 x 100 mm boyutlu çelik-plastik kalıplar ve 40 x 40 x 160 mm boyutlu çelik kalıplar uygun yağlama işlemi uygulanarak hazırlanmıştır. Yağlanan kalıplara öncelikle harcın yarısı dökülmüştür. 25 kez şişleme işlemi yapıp, vibrasyon işlemi de uygulandıktan sonra kalıbın diğer yarısı doldurulmuştur. Son kez vibrasyon işlemi uygulandıktan sonra kalıp üzerine gelecek kadar harç karışımından eklenmiş ve yüzeyi mala yardımıyla düzeltilmiştir. Beton kürlenmesi için kalıplar hava almayacak şekilde poşetlerle kaplanmıştır.



Şekil 3.9. Ön çalışma – Harcın kalıplara dökümü ve kalıplarla kürleme işlemi

Şekil 3.10’da gösterildiği şekilde kalıptan çıkan numunelerin bazıları kürlenme işlemleri için 3 gün poşette bekletildi ve 4 gün kür havuzunda bekletilirken bazı numuneler 1 gün poşette bekletildi ve 6 gün kür havuzunda bekletildi. Ön çalışmalar sonucunda elde edilen numunelerde bazıları Şekil 3.10’da gösterildiği şekilde olumsuz sonuçlar verirken bazıları olumlu sonuçlar vermiştir. Plastik kalıplarda 1 gün bekletilen numuneler Şekil 3.11’de gösterildiği şekilde kompresör yardımı ile çıkarılırken, 3 gün kalıpta bekleyen numuneler kalıptan çıkarılamamıştır. Kalıptan çıkan bazı numunelerin ise karışım oranları, döküm teknikleri ve malzeme özelliklerinden kaynaklı dağılma gösterdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 3.10. Ön çalışma – Başarısız numune görselleri



Şekil 3.11. Ön çalışma – Başarılı numuneler ve kalıptan çıkarılma işlemleri

Kürlenme süresi sonrası kalıptan çıkarılan ve fiziksel olarak dayanıklı olarak tespit edilen 100 x 100 x 100 mm boyutlarındaki numunelere kuru birim ağırlık, su emme, kılcallık katsayısı ve 7 ile 28 gün basınç dayanımı testleri yapılmıştır. En iyi sonucu veren numune analiz sonuçları Çizelge 3.9’da verilmiştir.

Çizelge 3.9. Başarılı numune örnekleri test ve analiz sonuçları

Test ve Analiz Sonuçları	Örnek-1
Kuru Birim ağırlık (g/cm ³)	1.6
Su emme (%)	18.9
Kılcalık katsayısı. (g/cm ² .dk0.5)	7.3
Basınç. Dayanıklılık (MPa) 7gün	2.42
Basınç. Dayanıklılık (MPa) 28gün	2.6

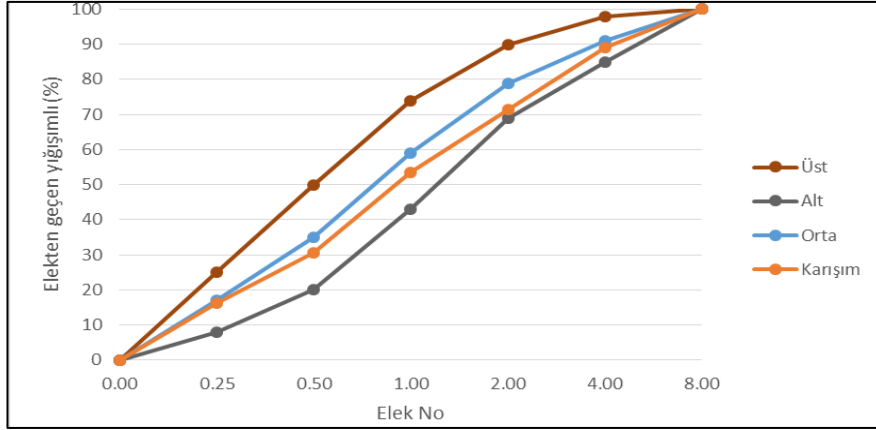
Ön çalışma deneyleri sonucunda elde edilen bilgiler ile materyal seçimi ve uygulanması gereken yöntemlerin belirlenmesi sağlanmıştır. Elde edilen bilgilerden sonra kullanılan materyaller Şekil 3.12’ de verilmiştir.

**Şekil 3.12.** Deneyisel çalışmalar için seçilen pomza, taban külü ve PET atıkları

Ön çalışma sonrası deneyisel çalışmalara yönelik tasarım kurgusunun oluşturulacağı ikinci bölüm olan Taguchi tasarımına geçilmiştir. Taguchi tasarımına geçilmeden önce seçilen malzemelerin karışım oranlarının hesaplanması için granülometri hesabı Çizelge 3.10’da gösterildiği şekilde yapılarak Şekil 3.13’te gösterildiği şekilde granülometri eğri grafiği oluşturulmuştur.

Çizelge 3.10. Seçilen malzemelerin granülometri hesapları

Elek aralığı (mm)	Üst	Orta	Alt	Fuller	Karışım
31.5	100	100	100	100	100.00
16	100	100	100	100	100.00
8	100	100	100	100	100.00
4	98	91	85	73.20	89.07
2	90	79	69	53.58	71.51
1	74	59	43	39.22	53.46
0.5	50	35	20	28.71	30.53
0.25	25	17	8	21.02	16.37
T. Kabı	0	0	0	0	0



Şekil 3.13. Materyallerin granülometri eğrisi

3.2.2. Taguchi tasarımı metodu

Tez çalışmasında, deney tasarımı yöntemlerinden biri olan Taguchi Tasarımı Metodu (TTM) kullanılmıştır. Ön çalışma deneylerinde kullanılan materyallere yönelik elde edilen bilgiler, optimizasyon deney tasarımının belirlenmesi için kullanılmıştır. TTM deneysel tasarım yöntemi sistematığı ile atık katkılı yapı bloğu harç karışımı girdi bileşenleri ile standartların belirlediği değerler arasında, maliyet avantajlı girdi bileşen oranlarının belirlenmesi amacıyla harç bileşimleri oluşturulmuştur. TTM optimizasyonu kapsamında kullanılan performans karakteristiği, varyans analizi ve deneysel tasarım bölümlerine yönelik bilgiler aşağıda verilmiştir.

3.2.2.1. Taguchi performans karakteristiği

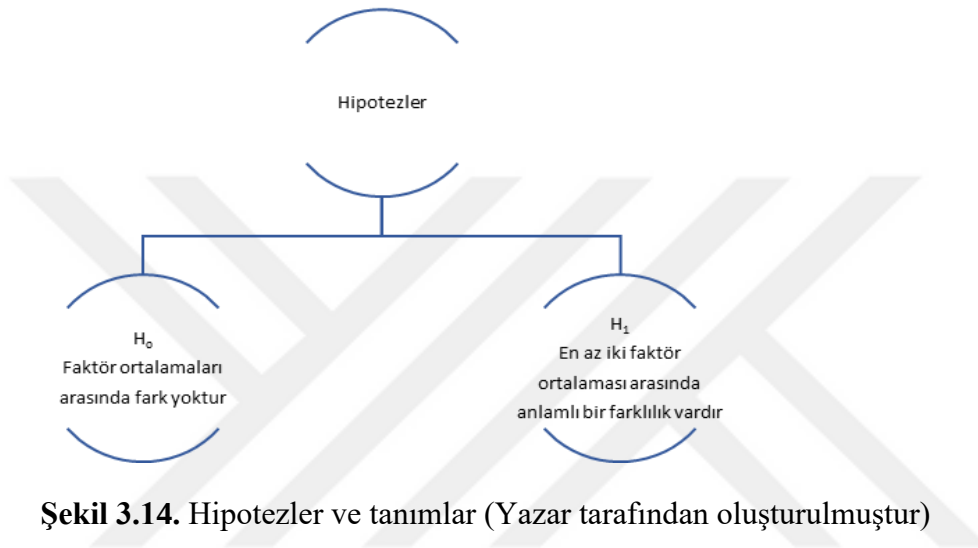
TTM ile oluşturulan deney tasarımındaki deneysel çalışmaların sonuçlarının analizinde Taguchi yöntemi ile parametrelerin performans karakteristiği ve sinyal gürültü oranı belirlenmektedir. Bu kapsamda kullanılan formüller ve performans karakteristiği bilgileri Çizelge 3.11’de verilmiştir (Fraleley vd. 2006).

Çizelge 3.11. Taguchi performans karakteristiği formülleri

Sıra	Performans karakteristiği	Formül	Detaylar
1	“Daha büyük daha iyidir”	$\frac{S}{N_i} = -10 \log x \left[\frac{1}{N_i} \sum_{u=1}^{N_i} \frac{1}{Y_u^2} \right]$	i: Deney numarası u: Deneme numarası
2	“Daha küçük daha iyidir”	$\frac{S}{N_i} = -10 \log x \left[\sum_{u=1}^{N_i} \frac{Y_u^2}{N_i} \right]$	Ni: i Deneyi için deneme numarası
3	“Nominal daha iyidir”	$\frac{S}{N_i} = -10 \log x \left[\sum_{u=1}^{N_i} \frac{(y_u - y^-)^2}{N_i - 1} \right]$	y: Her bir gözlem değeri yu: Gözlem ortalama değeri

3.2.2.2. Varyans analizi

TT metodu ile oluşturulan deney tasarımı kapsamındaki deney çalışmalardan elde edilen veriler istatistiksel olarak incelenmektedir. İstatistiksel inceleme ile deney tasarımındaki faktörlerin etkisinin olup olmaması ile ilgili bilgiler elde edilmektedir. Bu çerçevede ANOVA analizi olarak bilinen varyans analizi kullanılmaktadır. Varyansları karşılaştırmak için kullanılan F testi, tasarımda ikiden fazla ortalamayı karşılaştırmak için de kullanılarak sonuçlar elde edilir. Analiz sürecinde öncelikle H_0 ve H_1 hipotezleri tanımlanır (Şekil 3.14) ve test için tahmini güven aralığı önemlilik düzeyi yüzdesi belirlenmektedir.



Şekil 3.14. Hipotezler ve tanımlar (Yazar tarafından oluşturulmuştur)

%95 güven aralığında tanımlanan H_0 ve H_1 hipotezlerin test edildiği ve varyans (ANOVA) analizine yönelik oluşturulan Çizelge 3.12’de verilmiştir. Varyans (ANOVA) analizi çizelgesinde yer alan kısaltmalar ve tanımları Çizelge.3.13’te verilmiştir (Armstrong vd. 2002).

Çizelge 3.12 Tek yönlü varyans analizi tablosu örneği

Kontrol Faktörleri	S.D	K.T.	Katkı%	K.O	F-Değeri	p-Değeri
Faktör 1	-	-	-	-	-	-
Faktör 2	-	-	-	-	-	-
Faktör n	-	-	-	-	-	-
Hata	-	-	-	-	-	-
Toplam	-	-	-	-	-	-

Çizelge 3.13. Varyans analizi tablosu kısaltmaları

Kısaltmalar	Tanımlar
S. D	Serbestlik derecesi
K. T	Kareler toplamı
Katkı %	Faktörlerin varyansa katkılarının % ile gösterimi
K. O	Kareler ortalaması
F değeri	Gruplar arası ve gruplar içi kareler ortalamasının bölümü ile elde edilen test istatistiği
p değeri	İstatistiksel anlamlılık düzeyi

3.2.2.3. Deneysel Taguchi tasarımı

Ön çalışma sonrası elde edilen bilgiler ile materyallere yönelik kontrol faktörlerin alt ve üst seviyeleri belirlenmiştir. Materyallere yönelik parametreler ve seviye bilgileri Çizelge 3.14’te verilmiştir.

Çizelge 3.14. Taguchi tasarımında kullanılan parametreler ve seviyeleri

Taguchi Tasarımı Parametreleri	Seviyeler		
	1	2	3
Çimento (kg/m ³)	250	275	300
Pomza/Taban Külü %	30/70	40/60	50/50
PET (%)	4	7	10

Çizelge 3.14’te verilen seviyelerle, deneysel çalışma tasarımı belirlenmiştir. Çimento miktarı, pomza/tabak külü % oranı ve PET % oranı olmak üzere 3 parametre ve 3 seviyeli L9 Taguchi ortogonal dizisi çerçevesinde oluşturulan deney tasarımı Çizelge 3.15’ de verilmiştir.

Çizelge 3.15. Taguchi deney tasarımı

Tip Sayısı	P1	P2	P3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	3	3
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Tabloda verilen deney tasarım deseninde 9 tip harç karışımı için farklı miktar ve yüzdelerde materyaller kullanılarak atık katkılı yapı bloğu geliştirilmesine yönelik araştırma çalışmaları yürütülmüştür. Çizelge 3.16’da düzenlenmiş deney tasarım içerik bilgileri verilmiştir. Elde edilen içerikler kapsamında Taguchi tasarımı metodu ile atık katkılı yapı bloğunun optimizasyona yönelik deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.16. Taguchi deney tasarımına dayalı parametre seviyeleri

Tipler	Çimento (kg/m ³)	Pomza/ Taban külü %	PET %
1	250	30/70	4
2	250	40/60	7
3	250	50/50	10
4	275	30/70	7
5	275	40/60	10
6	275	50/50	4
7	300	30/70	10
8	300	40/60	4
9	300	50/50	7

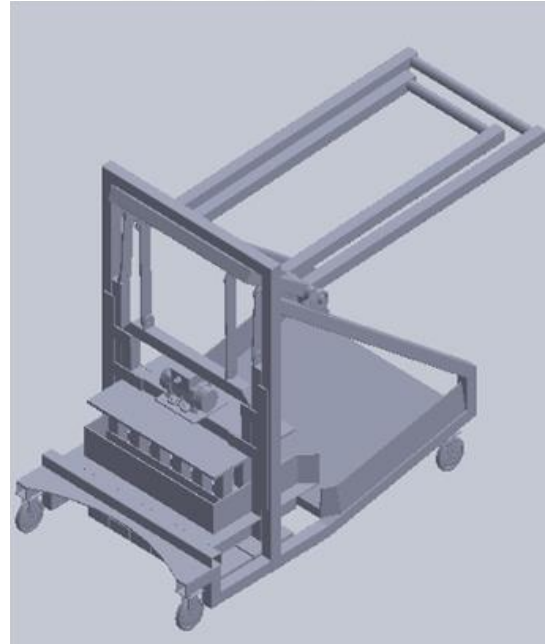
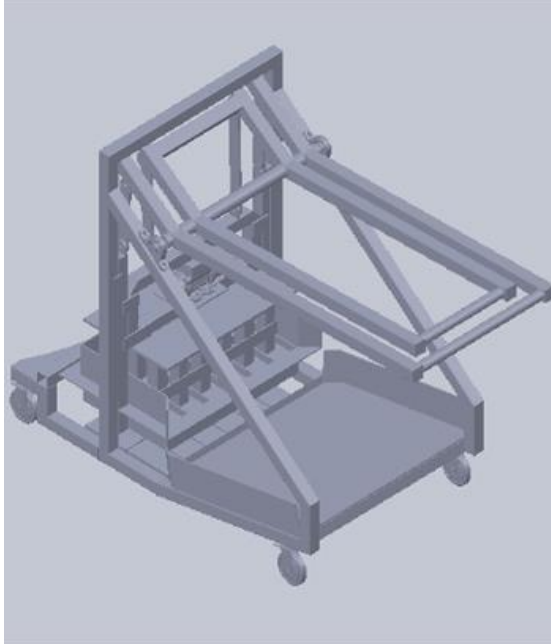
Deney tasarımı çerçevesinde, deneysel çalışmalar tamamlandıktan sonra analiz ve test işlemleri gerçekleştirilmiştir. Tez çalışması kapsamında optimizasyon değerlerine ulaşabilmek için Taguchi performans özelliği ve test sonuçları Çizelge 3.17’de gösterildiği şekilde analiz edilmiştir. Deney tasarımıındaki 9 tip numuneden istenilen performans özelliğine göre Sinyal/Gürültü oranları tespit edilerek optimum değerlerin belirlenmesine yönelik istatistiksel analizler gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.17. Taguchi performans özelliği ve test-analiz yol haritası

Sıra	Performans özelliği	Test ve Analizler
1	“Daha büyük daha iyidir”	Basınç dayanımı
2	“Daha küçük daha iyidir”	Kuru birim ağırlık, su emme, kılcal su emme, ısı iletkenlik, yüksek sıcaklık, maliyet ve CO ₂ emisyonu

3.2.3. Yapı bloğu baskı makinesi geliştirilmesi ve deneysel çalışmalar

Deneysel çalışmalarda kullanılan materyaller ile oluşturulan harç karışımı ile elde edilen yapı blok üretiminde özel tasarım makine kullanılmıştır. Kullanılan materyallerin özellikleri nedeniyle üretimde basınç ve vibrasyon etkisi ile kalıplama ihtiyacı bulunmaktadır. Bu ihtiyaç çerçevesinde çalışmada kullanılacak yapı bloğu baskı makinesi üretimi için Qualitürk firması ile çalışılarak Ar-Ge makinesi elde edilmiştir. Şekil 3.15’te yapı bloğu baskı makinesinin bilgisayar ortamındaki üç boyutlu çizimleri ve üretilen cihazın fotoğrafları Şekil 3.16’da gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Yapı bloğu baskı makinesi tasarımı



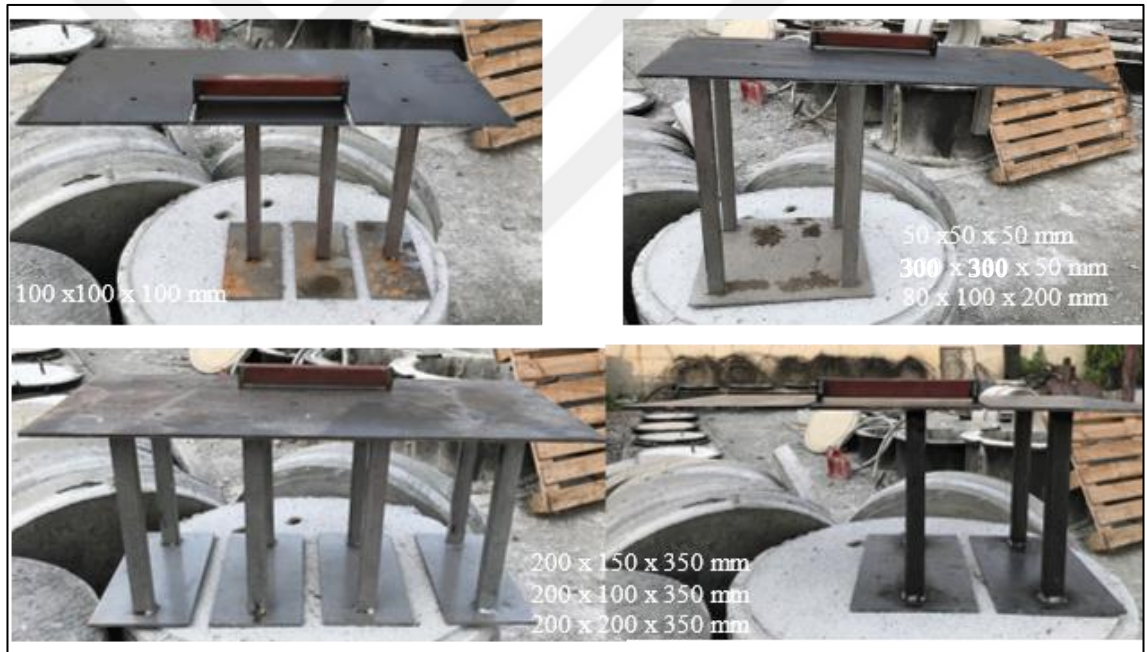
Şekil 3.16. Yapı bloğu baskı makinesi fotoğrafları

Yapı bloğu baskı makinesi temelde alt kalıp, üst kalıp, harç besleme yatağı, kalıp baskı mekanizması ve elektrik panosu olarak beş bölümden oluşmaktadır. Alt kalıp bölümünde bir adet vibrasyon sağlayan elektrik motoru ve kalıp hazneleri yer almaktadır. Üst kalıp bölümde alt kalıplar ile etkileşimli kalıp sistemi ve bir adet vibrasyon sağlayan elektrik motoru bulunmaktadır. Kalıplara harç doldurulmasında kullanılan bölümde eğimli bir harç besleme yatağı bulunmaktadır. Harç karışımı bu bölümde manuel olarak kalıplara doldurulmaktadır. Kalıp baskı mekanizmasında harç dolumu sonrası manuel kullanım ile basınç altında blok üretiminin sıkıştırılmasını ve kalıpların makineden alınmasını sağlayan analog iki kol yer almaktadır. Elektrik panosunda ise vibrasyon sağlayan elektrik motorlarının elektrik bağlantı sistemleri yer almaktadır. Baskı cihazının baskı kolu ve elektrik motoru ile kalıplara basınç uygulanmaktadır. Bu basınç ve elektrik motorlarının verdiği vibrasyon ile numunenin kalıp içine yerleşmesine sağlanan etki ile endüstriyel ölçekte bir üretimin pilot ölçekte bir simülasyonu gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Baskı cihazı üzerinde kalıpların üzerine düşen basınç yükü teorik olarak 20 kg olarak hesaplanmıştır. Makinede alt ve üst kalıpta kullanılan elektrik motorlarının ürettiği vibrasyon tek makine için $FC_{max} = 1.96$ KN titreşimdir.

Taguchi tasarımı ile belirlenmiş farklı içerik yüzdelerine sahip 9 tipin deneysel çalışma sürecinde 100 x 100 x 100 mm plastik, 50 x 50 x 50 mm ve 300 x 300 x 50 mm boyutlarında çelik kalıplar kullanılmıştır. Taguchi tasarımı sonrası elde edilen bilgiler doğrultusunda belirlenmiş optimizasyon değerleri ile 200 x 150 x 350 mm, 200 x 100 x 350 mm, 200 x 200 x 350 mm ve 80 x 100 x 200 mm boyutlarındaki çelik kalıplar kullanılarak ticari prototip üretimleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan kalıplar Şekil 3.17 ve Şekil 3.18’de verilmiştir. Şekil 3.16’da verilen baskı cihazının alt bölümüne Şekil 3.17’de gösterilen kalıplar, üst bölümüne ise Şekil 3.18’de verilen kalıplar monte edilerek farklı kalıp ölçülerinde 9 tip için farklı numuneler elde edilmiştir.



Şekil 3.17. Alt kalıplar ve Ölçüleri



Şekil 3.18. Üst kalıplar ve Ölçüleri

Yapı bloğu baskı makinesindeki deneysel çalışmalar için her tipte uygulanacak bir akış sistemi oluşturulmuştur. 9 tip ve farklı kalıp ölçülerinde numune hazırlama bu sisteme göre gerçekleştirilmiştir. Çalışma sistemi Şekil 3.19’da sıra ile verilmiştir.

Numune Hazırlama Sistematigi

Tip numunelerine göre harç içeriğinin hazırlanması
Harç karışımının yaklaşık 5 dakika boyunca karıştırıcı ile karıştırılması
Kalıpların yağlanması ve baskı makinesi için hazırlanması
Kalıplara harç numunelerinin doldurulması ve makineye yerleştirilmesi
Kalıplara baskı makinesi üst bölgeden 3 defa basınç uygulanması,
Elektrik motoru ile 20 saniye alt ve üst kalıp bölgesine vibrasyon-titreşim uygulanması
Kalıplardaki numune seviyesi kontrolü, eksilen bölümlerin tamamlanması ve numune üst yüzeyinin düzleştirilmesi
Kalıpların baskı makinesinden alınması
Numunelerin kürlenme için hazırlanması

Şekil 3.19. Harcın numuneye dönüşüm sistematigi

Numune hazırlama ön çalışması olarak 9 tip ve farklı kalıp ölçülerindeki numuneler için gerekli çimento, su, pomza, taban külü ve PET miktarları belirlenmiştir. Harç hazırlamaya yönelik pomza, taban külü materyalleri gerçek üretim simülasyonu gibi dış ortamda, güneşli havada kurutulmuştur. Kurutma sonrası pomza ve taban külü elenerek harç karışımlarında kullanılmaya hazır hale getirilmiştir. Pomza ve taban külüne yönelik kurutma ve eleme işlemlerine yönelik görseller Şekil 3.20’de verilmiştir.



Şekil 3.20. Pomza ve taban külü kurutma ve eleme işlemlerinden kesitler

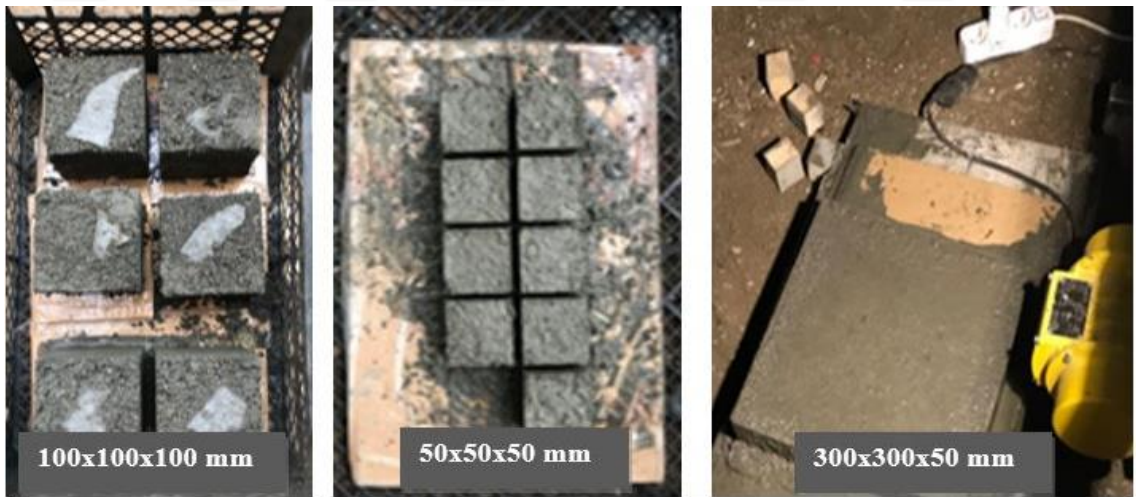
Taguchi deney tasarımı belirlenen 9 tipin her bir tipi için 100x100x100 mm kalıplarda 7 günlük ve 28 günlük basınç deneyleri için 6’şar set, su emme ve kılcalık testleri için her tip için 3’er set, 50 x 50 x 50 mm kalıplarda her tip sıcaklık testi için 9’er set ve ısı testi için 300 x 300 x 50 mm kalıplarda her tip için 1’er set olacak şekilde yeterli harç miktarı için malzemeler formülasyonlara göre tartılarak karışımlar hazırlanmıştır. Karışımlar hazırlanırken en ince partikül boyutu olandan en iri olana doğru teker teker karıştırıcıya eklenmiştir. Karışıma su, en son aşamada ve azar azar mala yardımı ile harç karıştırılarak dökülmüştür. El ile hafif karıştırmadan sonra karıştırma işlemi dikey bir

karıştırıcı ile gerçekleştirilmiştir. Karışımın hazırlanma sürecine yönelik çalışmalardan kesitler Şekil 3.21’ de verilmiştir.



Şekil 3.21. Numune hazırlama sürecinde karışım hazırlığı

Çizelge 3.16’da verilen oranlarda hazırlanan 9 tip deney tasarımının her biri için 100 x100 x 100 mm, 50 x 50 x 50 mm ve 300 x 300 x 50 mm boyutundaki kalıplar baskı makinesinde kullanılarak dökümler gerçekleştirilmiştir. Döküm yapılacak kalıpların altlarında kullanabilmek ve numuneye düz bir zemin oluşturabilmek amacıyla uygun boyutlarda kartonlar kesilmiştir. Numune suyunu kartonun emmesi önlenmesi açısından kartonlar koli bantları ve streçlerle kaplanmıştır. Hazırlanan kartonların mukavemeti sağlanması açısından ahşap tahtalar üzerine yerleştirildikten sonra kalıplar yerleştirilmiştir. Hazırlanan kalıplar makine alt bölümüne kalıp yüzeyleri WD-40 ile yağlanarak yerleştirilmiştir. Makine üst bölümünden kalıplara harçlar dökülmüştür. Harçlara vibrasyon ve sıkıştırma işlemleri uygulandıktan hemen sonra elde edilen numuneler kalıplardan ayrılmış ve kartonun üzerinde numuneler kürlenmesi için numaralandırılıp hazırlanmıştır. Elde edilen numuneler Şekil 3.22’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.22. Her bir tip için elde edilen numune takımı

Numune örneklerine uygulanacak test ve analizler kapsamında farklı zamanlar için kürlenme planı oluşturulmuştur. Çalışma kapsamında 100 x100 x 100 mm boyutundaki numuneler 7 ve 28 gün, 50 x50 x 50 mm ve 300 x 300 x 50 mm boyutundaki numuneler için 28 gün kürlenme zaman planı uygulanmıştır. Kürlenme, literatürde sıklıkla kullanılan bir yöntem olan numunelerin nemlerini kaybetmeden ve hava almadan Şekil 3.23’ te gösterildiği şekilde kapatılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.23. Numunelerin kürlenme aşaması

3.2.4. Test ve analizler

Kürlenme sonrası test ve analize hazır hale gelen, yapı bloğu baskı makinesinde üretilen numunelere Akdeniz Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Yapı Malzemeleri Laboratuvarında basınç dayanımı, kuru birim ağırlık, su emme, boşluk oranı, kılcal su emme, ses iletimi testleri ve Kocaeli Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Yapı Malzemeleri Laboratuvarında ise ısı iletkenlik ve yüksek sıcaklığa dayanıklılık testleri yapılmıştır. Aynı zamanda numunelerin maliyet ve CO₂ eşdeğer (CO₂-e) emisyonu analizleri yapılmıştır. Test ve analizlerden elde edilen sonuçlar Taguchi deney tasarımı kapsamında istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Numunelere yönelik gerçekleştirilen test ve analizlerle ilgili bilgiler aşağıda verilmiştir.

3.2.4.1. Basınç dayanımı testi

Briket ve beton blokların deney, muayene ve sınıflandırmaları Türkiye’de TS406’ya göre uygulanmaktadır. Bu standartlara göre briketler basınç dayanımına göre 4, birim hacim ağırlığına göre ise 12 sınıfa ayrılmaktadır. En düşük türün (BB2) ortalama basınç dayanımı 2.5 MPa iken en yüksek türün (BB12) ortalama basınç dayanımı 15 MPa’dır (Yüksel vd. 2006).

9 tip, 100x100x100 mm boyutlarındaki küp yapı bloğu numunelerinin TS EN 1015-11 standardına göre 7 ve 28 günlük basınç dayanımları her bir tip için her bir basınç dayanım testi 3’er set olacak şekilde Şekil 3.24’ de verilen otomatik cihazda test edilmiştir. İki plaka arasına alınan numuneler, otomatik olarak cihazla MPa/sn yükleme hızı verilmiş olup numunenin kırıldığı andaki yükleri tespit edilmiştir. Her tip için alınan 3 numuneden elde edilen verilerin ortalaması o tipin basınç dayanımını vermiştir. Bu yöntem 7 ve 28 günlük olmak üzere ayrı periyotlarda yapılmıştır.



Şekil 3.24. Basınç dayanım testi

3.2.4.2. Kuru birim ağırlık, su emme ve boşluk oranı testi

Yapı bloğu numunelerinin ASTM C 67-08 standartları esas alınarak kuru birim ağırlık ve su emme analizleri, ASTM C1754/C1754M-12 A standardı ile boşluk oranı analizleri birlikte yapılmıştır. 9 tip 3'er set 100 x 100 x 100 mm boyutlarındaki numuneler Şekil 3.25' te verilen kür havuzunda 72 saat suda bekletilmiştir.



Şekil 3.25. Kür havuzu

Kür havuzunda bekletilen numuneler bekleme süresi sonunda havuzdan alınmıştır ve suda tartım işlemi gerçekleştirilmiştir. Tartım işleminde Akdeniz Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Yapı Malzemeleri Laboratuvarlarındaki hassas terazi kullanılmıştır. Hassas terazi aynı zamanda teraziye bağlanabilen bir sistem ile numunelerin suda tartımını gerçekleştirebilecek şekilde kullanılmaktadır. Suda tartım işlemi için her tip numuneye

ait örneklerin yüzeyleri bezle kurulanmıştır. Kurulanan numuneler hassas terazide tartılarak kuru yüzey ağırlıkları belirlenmiştir. Suda tartım ve yüzey kurulama sonrası tartım işlemlerinden sonra numuneler etüve alınmıştır. Numuneler etüvde 72 saat 60 ± 5 °C’de ayarlanmış bir ortamda kurumaya bırakılmıştır. 72 saat sonra etüv içindeki numune parçalarının nem oranı nem cihazı ile ölçülmüştür. Suda tartım işlemi, etüv ve nem ölçme cihazları Şekil 3.26’ da verilmiştir.



Şekil 3.26. Kuru birim ağırlık, suda tartım ve su emme testinde kullanılan cihazlar

Bu işlemler sonrası yapı bloğu numuneleri için kuru birim ağırlık (3.2), su emme (3.3) ve boşluk oranı hesaplamaları (3.4)’de verilen formüller kullanılarak yapılmıştır.

Kuru birim ağırlık;

$$\Delta = \frac{W_k}{V} \quad (3.2)$$

Δ = Kuru birim ağırlık (gr/cm³)

W_k = Kuru ağırlık, (gr)

V = Numune hacmi (cm³)

Ağırlıkça yüzde su emme oranı;

$$s_a = \frac{W_d - W_k}{W_k} \times 100 \quad (3.3)$$

S_a = Ağırlıkça yüzde su emme, (%)

W_d = Doygun kuru yüzey ağırlık (gr)

W_k = Kuru ağırlık (gr)

Boşluk oranı;

(3.4)

$$P = [(W_d - W_k) / (W_d - W_s)] 100$$

P= Boşluk oranı (%)

W_s= Suda ağırlık (gr)W_k= Kuru ağırlık (gr)W_d= Doygun kuru yüzey ağırlık (gr)**3.2.4.3. Kılcal su emme testi**

Kılcal su emme testi, numunelerin su ile temas eden yüzeylerinin zamanla emdiği su miktarının belirlenmesine yönelik yapılan testtir. Etüvde 60±5 °C’de 72 saat kurutulan numuneler mumlama işlemine hazırlanmıştır. 100 x 100 x 100 mm boyutlarındaki numunelerin su ile temas eden alt yüzeyinin 4 kenarı, yüksekliği yaklaşık 3-4 cm olacak şekilde fırça yardımıyla mumla kaplanmıştır. Böylece su emmenin kenar yüzeylerden ilerlemesi durdurulmuştur. Mumlama işlemi sonrası numunelerin mumlu ağırlıkları tartılmıştır. Numuneler alt yüzeyi havada kalacak şekilde şişler üzerine oturtulmuştur. Numunelerin alt yüzeyi tamamen suda kalacak şekilde ve su yüksekliğinin de mumlu yüzey alanını geçmeyecek şekilde yaklaşık 2-3 cm yüksekliğinde kap su ile doldurulmuştur. Numuneler suda 15, 60, 240 ve 1440 dakika bekletildikten sonra tanımlanan 4 zaman aralığında da numune ıslak yüzeyleri bir bezle kurularak hassas terazide ağırlıkları ölçülmüştür. Numunelerin kılcal su emme katsayıları (3.5)’de verilen formüller ile hesaplanmıştır.

$$A_T = (W_T - W_0) \times 10000 / (L_1 \times L_2) \quad (3.5)$$

A_T = Emilen kılcal su miktarı (g/100cm²)W_T = Numunenin T zamanında 0.1 g hassasiyetle ölçülmüş ağırlığı (g)W₀ = Numunenin başlangıçtaki 0.1 g hassasiyetle ölçülmüş ağırlığı (g)L₁ = Numunenin test yüzeyinin 0.5 mm hassasiyetle ölçülmüş uzunluğu (mm)L₂ = Numunenin test yüzeyinin 0.5 mm hassasiyetle ölçülmüş genişliği (mm)**3.2.4.4. Isıl iletkenlik testi**

Deney tasarımı kapsamında her tip için 1 adet 300 x 300 x 50 mm ölçülerinde hazırlanan numuneler 28 günlük kürlenme sonrasında 24 saat 105 °C’ sıcaklığında etüvde kurutulmuştur. Deneyler Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Yapı Malzemeleri Laboratuvarlarındaki ısı iletkenlik Hot-plate cihazında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar ısı iletkenlik katsayısı (λ) olarak verilmiştir. Numunelerin analiz cihazı temel olarak hücre olarak adlandırılan bölümlerden meydana gelmiştir. Bu bölümler; sıcak, soğuk ve numune hücresi olarak tanımlanmıştır. Hot-plate cihazı Şekil 3.27’de verilmiştir.



Şekil 3.27. Isıl iletkenlik testinde kullanılan Hot-plate cihazı

Cihaz içerisinde hücreler ve numune sıcaklık ölçümü termocouple'lar ile sağlanmaktadır. Numunenin konulduğu hücre, sıcak ve soğuk hücrelerin ortasında yer almaktadır. Test aşamasında, orta hücrede bulunan numunenin ısı geçirgenliği en aza indirilerek minimize edilir. Test kapsamında hücreler sıra ile çalıştırılır ve ölçüm kararlılığı ulaşana kadar beklenir. Ölçüm kararlılığı sağlandıktan sonra elde edilen veriler kapsamında ısı iletkenlik katsayısı (3.6)'da verilen formüller ile belirlenir.

$$\lambda = \frac{Qd}{AT_f} \quad (3.6)$$

λ = Isıl iletkenlik katsayısı (W/m.K)

Q = Uygulanan güç (W)

d = Numune kalınlığı (m)

A = numune yüzey alanı (m²)

T_f = Sıcaklık farkı (K)

3.2.4.5. Yüksek sıcaklığa dayanıklılık testi

Yüksek sıcaklığa dayanıklılık testleri için deney tasarımı kapsamında her tip için 9'ar set 50 x 50 x 50 mm ölçülerinde hazırlanan numuneler 28 günlük kürlenme sonrasında 24 saat 105 °C' sıcaklığında etüvde kurutulmuştur. Deneyler Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Yapı Malzemeleri Laboratuvarlarındaki kül fırınında gerçekleştirilmiştir. Her tipten 3'er set numune kül fırınında sıcaklıkları yarım saatte bir 200 °C artış yapılarak; 600 °C'ye 1.5, 800 °C'ye 2, 1000 °C'ye 2.5 saatte çıkılarak, numuneler 3 saat daha fırın içinde bekletilmiş ve süre sonunda fırın kapağı açılarak oda ısısına gelmeleri sağlanmıştır. Sonuçlar ağırlık ve sıcaklık kaybı olarak verilmiştir. Test sürecinde kullanılan etüv ve kül fırını Şekil 3.28'de verilmiştir.



Şekil 3.28. Yüksek sıcaklık testinde kullanılan etüv ve kül fırını

Numuneler kül fırınına girmeden önce ve fırında sıcaklık etkisinden sonra tartılmıştır. Bu çalışma ile deney tasarımı kapsamında hazırlanmış 9 tip numunenin yüksek sıcaklık etkisi sonucundaki ağırlık kaybı (3.7)'de ve basınç kaybı (3.8)'de verilen formüller ile belirlenmiştir.

$$\text{Ağırlık kaybı} = ((A-B)/A) \times 100 \quad (3.7)$$

A: Yüksek sıcaklık öncesi etüv kurusu numune ağırlığı

B: Yüksek sıcaklık sonrası numune ağırlığı

$$\text{Basınç kaybı} = ((C-D)/C) \times 100 \quad (3.8)$$

C: Yüksek sıcaklık öncesi etüv kurusu numune basıncı

D: Yüksek sıcaklık sonrası numune basıncı

3.2.4.6. Maliyet analizi

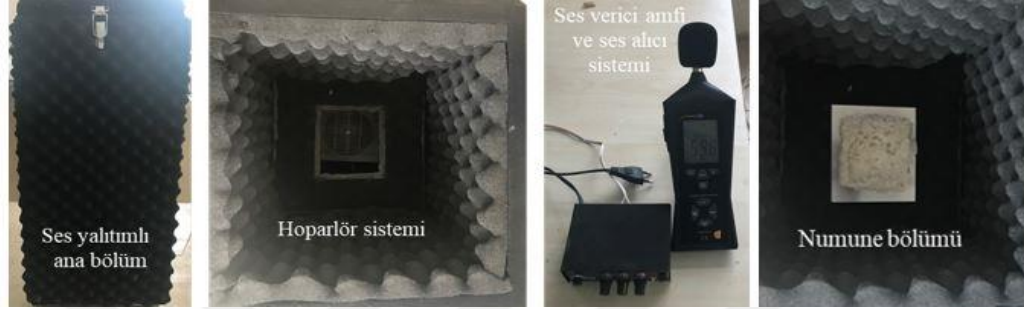
Yapı elemanlarının seçiminde teknik özellikler yanında maliyette önemli bir değerlendirme parametresi olarak kullanılmaktadır. Bu kapsamda deneysel çalışmalarda incelenen 9 tip numunenin maliyet hesaplama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Maliyet hesaplaması yöntemi olarak 1 m³'lük kompozit firesiz harç karışımı için lojistik, makine ve teçhizat kullanımı ve işçilik maliyetleri gibi maliyetler toplam maliyete dahil edilmeden, sadece ürün hammadde (taban külü, PET, pomza agregası, çimento ve su) maliyetleri kullanılarak hesaplanmıştır. Hammadde fiyatlarının tespitinde güncel endüstri dinamikleri göz önüne alınmıştır. Hammaddenin temin edildiği firmalar ziyaret edilerek hammaddelerin Haziran 2023 tarihindeki güncel birim fiyatları alınarak 9 tip numune için maliyet hesaplaması yapılmıştır.

3.2.4.7. CO₂ eşdeğer (CO₂-e) emisyonu analizi

İnşaat sektörü, dünyadaki CO₂ emisyonunun salımına kaynak sektörlerden biri olarak gösterilmektedir. Özellikle çimento kaynaklı ürünlere alternatif ürünler ya da çimento oranı azaltılmış CO₂ ayak izi düşük ürünlerin geliştirilmesi çevre merkezli sürdürülebilirlik politikalarca desteklenmektedir. Bu kapsamda deneysel çalışmalarda incelenen 9 tip numunenin CO₂ eşdeğer hesaplama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. CO₂ eşdeğer hesaplama yöntemi olarak 1 m³ kompozit firesiz harç karışımı için üretim ve lojistik süreçlerindeki CO₂ emisyonu toplam CO₂ eşdeğer hesabına dahil edilmeden sadece harç karışımını oluşturan çimento, su, taban külü, pomza, r-PET CO₂-e emisyon değerleri hesaba katılarak CO₂ eşdeğer (CO₂ -e) emisyonu hesaplanmıştır. CO₂ eşdeğer (CO₂ -e) emisyonu hesabında literatürdeki veriler referans alınmıştır. Literatürden erişilen kompozit harç bileşen CO₂-e verileri; çimento CEM-1 tipi için İngiltere'de 930 kg-CO₂/ton, Türkiye'de ise 1165 kg-CO₂/ton olarak referans alınmıştır (Gürsel ve Meral 2012). Taban külü için e CO₂ değeri 4 kg- CO₂ /ton, pomza agregası için genel e CO₂ değeri İngiltere'de 4 kg- CO₂ /ton, İngiltere'nin beton için gerekli su için e CO₂ değeri 0.3 kg-CO₂/ton kabulü referans alınmıştır (Orhon ve Altın 2012). Literatürde geri dönüştürülmüş r-PET ve yeni PET için 1.76, 2.15 kg-CO₂/kg değerleri bulunmaktadır. (Anonim 6; Anonim 7). Literatürde inşaat sektöründe harç geliştirme çalışmalarında atık PET'in doğrudan kompozit karışıma eklendiği CO₂ emisyon hesaplamalarında atık PET şişe için geri dönüşüm enerjisinden kazanç elde edildiğinden ve parçalama işlemi için harcanan enerjinin ihmal edilecek kadar küçük olmasından dolayı eksi değer ile -3.38 kg-CO₂/kg değerleri referans alınarak CO₂ emisyon analizi gerçekleştirilerek çalışmaların yapıldığı bilinmektedir (Usahanunth ve Pochanart 2017; Nikbin vd. 2022). Bunun yanında PET geri dönüşüme yönelik yeni teknoloji tabanlı geri dönüşüm çalışmaları incelendiğinde ALPLA PET Geri Dönüşüm Ekibi tarafından geliştirilen yöntem ile %79'luk bir iyileştirme ile r-PET 0.45 kg-CO₂/kg olarak beyan edilmiştir. (Anonymous 3). Bu kapsamda çalışmadaki hesaplamada temel referans değerleri geri dönüşümden kazanç sağlanmasından dolayı ve en güncel kaynaktan elde edilen bilgiler doğrultusunda -0.45 kg-CO₂/kg olarak alınmıştır. Literatürden alınan referans e CO₂ verileri ile 9 tip numune için teorik CO₂ eşdeğer (CO₂-e) emisyonu hesaplaması yapılmıştır.

3.2.4.8. Ses iletim testi

Yapı elemanlarında ısı ve sıcaklık gibi ses yalıtımı da önemli bir parametredir. Gürültü ve oluşan gürültünün oluşturacağı kirliliğe yönelik yalıtımı güçlü inşaat malzemeleri, kullanılacak alanlara göre tercih edilmektedir. 9 tip numuneye yönelik ses iletim testleri Akdeniz Üniversitesi Yapı Malzemeleri Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Test sistemi, özel yalıtımlı dikdörtgen prizma kutunun içerisine ses verici hoparlör, numune boşluğu ve ses ölçer olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Test sistemi ve bileşenleri Şekil 3.29’da verilmiştir.



Şekil 3.29. Ses ölçüm sistemi ve bileşenleri

Etüvde kurutulmuş numuneler 100 x 100 x100 mm ölçülerindeki ses analiz kutusundaki numune bölümüne yerleştirildikten sonra 85 dB birimindeki ses şiddeti, sisteme kutu içi hoparlör ile verilmiştir. Numune üzerinde yer alan ses alıcıdan 2’şer set 9 tip numune için ölçüm alınmıştır

4. BULGULAR

Bu bölümde; deneysel çalışmalarda kullanılan materyaller, Taguchi tasarımı ile belirlenmiş farklı içeriğe sahip ve farklı kalıp boyutlarındaki 9 tip yapı bloğu numunesinin test ve analiz değerleri, literatür karşılaştırma değerleri, Taguchi tasarımı ve istatistiksel sonuçları incelenmiştir.

4.1. Çalışmada Kullanılan Materyallerin Literatürle Karşılaştırılması

Deneysel çalışmalarda kullanılan pomzanın kimyasal özelliklerinin literatürdeki benzer çalışmalarla kıyaslanması Çizelge 4.1’de, taban külünün kimyasal özelliklerinin literatürdeki benzer çalışmalarla kıyaslanması Çizelge 4.2’de, taban külü kimyasal özelliklerinin kömür kaynaklı taban külü kimyasal özellikleri ile karşılaştırılması Çizelge 4.3’te ve PET’ in fiziksel özelliklerinin, endüstriyel PET fiziksel örnekleri ile karşılaştırılması Çizelge 4.4’te verilmiştir.

Çizelge 4.1. Pomza kimyasal özelliklerinin literatürdeki benzer çalışmalar ile karşılaştırılması

Kimyasal Bileşim	Tez Çalışması	(Tapan vd. 2013)		(Ulus vd. 2016)	(Hossain 2003)	(Rahman vd. 2022)	(H. Binici vd. 2007)	(Ayhan vd. 2011)	(Dikici 2010)
	% Ağırlık								
SiO ₂	58.88	71.49	77.49	58.44	60.82	74.61	51.8	45.06	70
Al ₂ O ₃	18.74	12.68	13.99	15.96	16.71	16.96	22.1	13.34	14
Fe ₂ O ₃	5.93	5.50	1.66	4.69	7.04	2.93	7.3	12.80	2.5
K ₂ O	3.66	4.02	4.71	2.64	2.25	-	-	1.32	-
MgO	2.95	0.64	0.00	6.30	1.94	-	8.3	7.41	0.6
Na ₂ O	4.25	2.60	1.24	-	5.42	-	-	2.88	-
TiO ₂	0.45	0.50	0.10	-	-	0.12	-	-	-
CaO	2.16	2.01	0.52	5.20	4.44	0.91	6.2	12.05	0.9
Menşei	-	Van, Ağrı, Bitlis		Erzincan	Volkanik pomza	Bilgi yok	Osmaniye	Bilgi yok	-

Volkanik bir kayaç olan pomza asidik ve bazik karakteriyle birçok sektörde ham madde olarak kullanılmaktadır. Bu sektörlerden biri de inşaat sektörüdür. Çalışma da kullanılan pomzanın kimyasal özellikleri Çizelge 4.1 de gösterildiği üzere literatürde inşaat sektörüne yönelik yapılan araştırmalarda kullanılan pomzalar ile uyumludur. SiO₂ miktarı açısından Tapan vd. 2013, Rahman vd. 2022 ve Dikici 2010 örneklerine göre düşüktür. Al₂O₃ ve Fe₂O₃ oranları ile benzer kimyasal analiz sonuçlarına ulaşılmıştır. Türkiye’nin pomza rezervlerinin büyüklüğü, pomzanın kimyasal ve fiziksel özellikleri çerçevesinde pomzanın farklı sektörlerde kullanılabilme fırsatlarını oluşturmaktadır. Çalışma kapsamında kullanılan pomzanın, atık ham maddeler ile inşaat sektörüne yönelik malzeme geliştirilmesinde kullanılabilirliğine yönelik literatürde uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan taban külünün literatürde benzer çalışmalarda kullanılan taban külü örnekleri ile kimyasal özellikleri Çizelge 4.2.’de karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.2 incelendiğinde çalışmada kullanılan taban külünün SiO₂ oranı, literatürde benzer inşaat malzemesi geliştirme süreçlerinde kullanılan kömür kaynaklı taban külleri ortalamasına

görece daha yüksektir. Al_2O_3 ve Fe_2O_3 oranları ile ortalama üstü değerlere sahip kimyasal analiz sonuçlarına ulaşılmıştır.

Çizelge 4.2. Taban külü kimyasal özelliklerinin literatürdeki benzer çalışmalar ile karşılaştırılması

Kimyasal Bileşim	Tez Çalışması	(Keskin 2016)	(Ghadzali vd. 2020)	(Lee vd. 2010)		(Aydin 2016)	(Mangi, Ibrahim, Jamaluddin, Arshad ve Ramadhansyah 2019)	(Plitsikas vd. 2019)
	% Ağırlık							
SiO ₂	53.72	58	53.80	44.20	48.00	55.1	53.80	49.22
Al ₂ O ₃	23.91	22.91	15.10	31.50	31.30	5.1	18.10	18.82
Fe ₂ O ₃	7.91	3.97	5.27	8.26	1.78	8.3	8.70	8.25
K ₂ O	1.50	0.55	1.00	4.14	4.96	1.5	-	0.53
MgO	2.00	2	0.53	2.60	2.00	0.3	0.58	3.22
Na ₂ O	0.95	0.54	0.23	-	-	-	-	1.54
CaO	4.81	4.2	1.32	1.41	0.75	1.1	5.30	13.85
P ₂ O ₅	-	0.2	-	0.33	0.06	-	-	-
SO ₃	0.58	58	-	1.20	0.76	0.3	0.90	1.18
Kızdırma Kaybı	3.09	-	-			-	-	-
Reaktif CaO	2.18	-	-			-	-	-
Reaktif SiO ₂	33.19	-	-			-	-	-
Serbest CaO	0.08	-	-			-	-	-
Cl-	-	-	-	0.47	5.24	-	-	-

Jayaranjan vd. (2014) literatürde yer alan 11 adet çalışmadan derlediği fosil yakıt kaynaklı linyit, bitüm ve antrasit kömürü kaynaklı taban külünün kimyasal özellikleriyle de çalışmada kullanılan taban külü Çizelge 4.3.'te karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.3. incelendiğinde çalışmada kullanılan taban külü linyit, bitüm ve antrasit kömüründen elde edilen taban külleri arasındadır. Çalışma kapsamında kullanılan taban külü kimyasal özelliklerinin literatür ile uyumlu olduğu söylenebilir.

Çizelge 4.3. Taban külü kimyasal özelliklerinin kömür kaynaklı taban külü kimyasal özellikleri ile karşılaştırılması (Jayaranjan vd. 2014)

Kimyasal Bileşim	Tez Çalışması	Linyit	Alt-bitüm	Bitüm	Antrasit Kömürü
	% Ağırlık				
SiO ₂	53.72	10.80-48.30	45.3	48.81-58.9	53.5
Al ₂ O ₃	23.91	2.50-24.90	24.0	10.12-36.0	27.6
Fe ₂ O ₃	7.91	0.50-8.20	18.0	2.4-6.10	6.0
K ₂ O	1.50	0.02-3.60	0.53	0.6-2.31	4.9
MgO	2.00	0.40-4.60	0.58	0.2-5.61	2.1
Na ₂ O	0.95	0.15-1.15	0.45	0.04-0.92	1.0
CaO	4.81	0.15-45.10	1.4	1.3-11.81	3.4
P ₂ O ₅	-	-	-	0.02-0.79	0.5
SO ₃	0.58	5.10-20.20	2.2	0.1-4.06	-
Kızdırma Kaybı	3.09	-	-	-	-
Reaktif CaO	2.18	-	-	-	-
Reaktif SiO ₂	33.19	-	-	-	-
Serbest CaO	0.08	-	-	-	-
Cl-	-	-	-	-	-

PET atıklarının geri dönüşüm uygulamaları ile ekonomik bir değere dönüştüren işletmelerin farklı sektörlere sunduğu PET atığı ürünlerin fiziksel özellikleri Çizelge 4.4.'de karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.4. PET fiziksel özelliklerinin, endüstriyel PET fiziksel örnekleriyle karşılaştırılması

Özellikler	Tez Çalışması	Sena PET	PET Yap Geri Dönüşüm	
	En az-En Fazla			
Renk/mavi (%)	10-30	15-25	-	-
Renk/beyaz (%)	70-90	75-85	-	-
Nem (%)	0.5-1.5	0.3-0.7	0.2-0.6	0.2-0.7
Kağıt (ppm)	0 -30	10	-	-
Polietilen (ppm)	0-30	10	10-20	10-20
Polipropilen (ppm)	0 -30			
Etiket (ppm)	0-30	10	5-20	5-20
Metal (ppm)	0-30	10	3-10	3-10
Polivinilklorür (ppm)	0-30	20	0-50	100-200
Renkli PET (ppm)	400	30	10-100	50-150
pH	6-8	6-7.5	-	-
Viskozite (dL g)	>0.7	0.65-0.75	0.65-0.76	0.65-0.76
Erime sıcaklığı (°C)	260		240-250	240-250
Yoğunluk	-	280-350	200-250	200-250

Çizelge 4.4. incelediğinde çalışmada kullanılan PET atıklardan elde edilen geri dönüşüm PET ürününün renk yüzdesi ve miktarı, nem içeriğinin diğer ürünlere göre görece daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Atık bulaşığı olarak kabul edilen kâğıt, diğer plastikler, yapıştırıcı-etiket ve metal gibi atık oranlarının piyasadaki ürünlerle uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada kullanılan geri dönüşüm PET' in viskozite değeri

diğer ürünlerle benzer aralıkta ancak erime sıcaklığı ile de diğer ürünlere göre görece daha yüksek bir değere sahiptir.

4.2. Basınç Dayanımı Testi

9 tip 3'er set olacak şekilde numuneler 7. ve 28. günde Akdeniz Üniversitesi'nde yer alan otomatik basınç dayanım makinesinde Şekil 4.1'de gösterildiği şekilde test edilmiştir. Teste yönelik numune makinenin test bölümüne yerleştirilmiştir. Cihazdaki kontrol menüsünden test başlatılmıştır. Sonuçlar makinede otomatik verilmektedir.

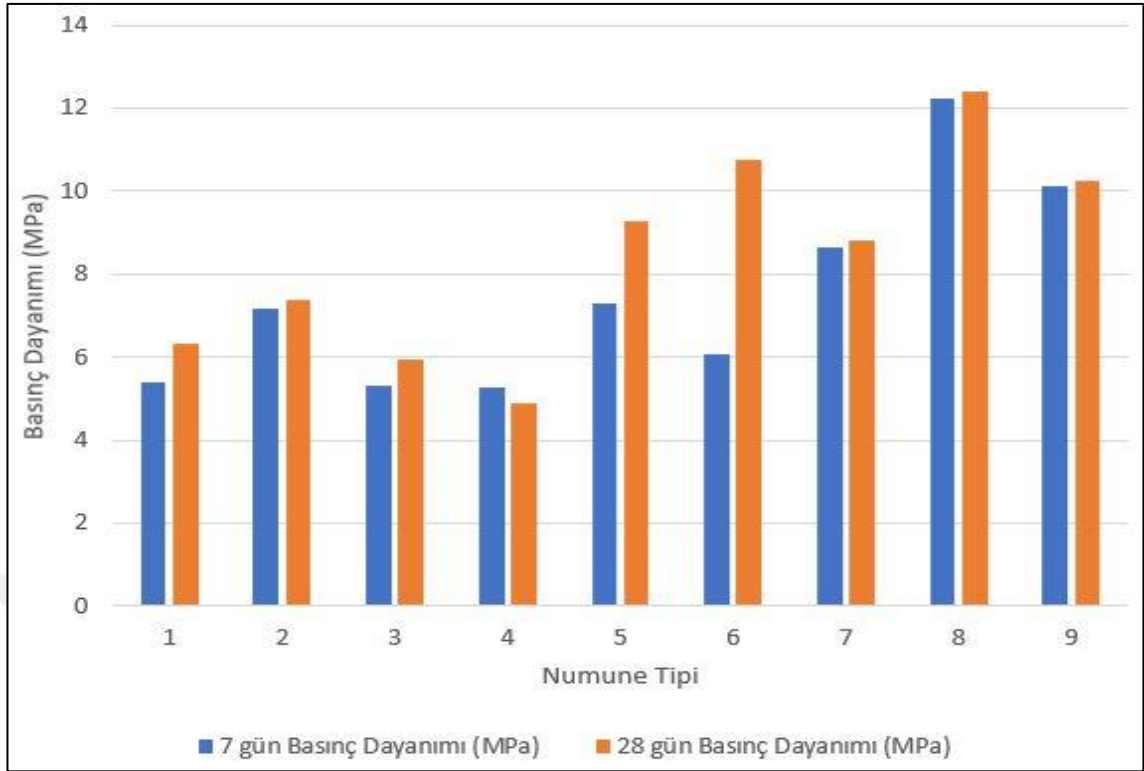


Şekil 4.1. Basınç dayanım testi

7 günlük ve 28 günlük 9 tip test sonuçları Çizelge 4.5'te ve Şekil 4.2'de verilmiştir. Test sonuçları sonunda makineden parçalanarak ya da çatlayarak alınan numune örnekleri Şekil 4.3'te gösterildiği şekildedir.

Çizelge 4.5. Numune tiplerin basınç dayanımları

Numune Tipleri	Basınç Dayanımı (MPa)	
	7. gün basınç dayanımı	28. gün basınç dayanımı
1	5.41	6.33
2	7.15	7.37
3	5.32	5.96
4	5.25	4.89
5	7.30	9.27
6	6.09	10.8
7	8.64	8.82
8	12.2	12.4
9	10.1	10.3



Şekil 4.2. Numune tiplerinin 7. ve 28. gün basınç dayanımları

Çizelge 4.11 ve Şekil 4.12 incelendiğinde numunelerin 7. ve 28. gün basınç dayanımlarında büyük oranlarda artışların olmadığı gözlemlenmiştir. 7. ve 28. Gün basınç dayanımının en az tip 4 numunesinde, en fazla ise tip 8 numunesinde olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.3. 7. gün ve 28. gün basınç dayanımı test sonucu sonrası numune görselleri

Basınç dayanımı deneyleri kapsamında elde edilen sonuçlar ile literatürdeki çalışmalar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonrası elde edilen bilgiler Çizelge 4.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.6. Beton malzemelerin basınç dayanımlarının literatür karşılaştırması

Sıra	Basınç 7 gün MPa	Basınç 28 gün MPa	Malzeme	Kaynak	Sonuçlar
1	5-21	5.2-25.4	PCPP	(Belmokaddem vd. 2020)	-Agrega artışı ile basınç azalmaktadır. PCPVC' ye göre basınç dayanımı daha azdır.
2	3-11	4-19.5	PCPE	(Belmokaddem vd. 2020)	-Agrega artışı ile basınç azalmaktadır. PCPP ve PCPVC'ye göre en azdır. Çünkü içerisindeki gözenek daha büyük hacime sahip oldukça basınç düşmektedir.
3	-	1.7-5	Farklı şekillerde PET	(Kim vd. 2008)	-PET katılmasıyla düşen basınç dayanımı PET tipinin kabartmalı, kıvrımlı ve düz olmasına göre de değişiklik göstermektedir. Basınç dayanımları çimentonun elyafa tutunmasından dolayı sırasıyla kabartmalı, kıvrımlı ve düz şeklinde sıralı olarak düşüş göstermektedir.
4	4.42-6.72	11.10-15.02	Pomza	(Yaşar ve Erdoğan 2008)	-Pomza ile yapılan çalışmada her geçen gün basınç dayanımı artmıştır. 14. günden sonra belirgin bir artış gözlemlenmiştir.
5	20.50-36.85	31.39-49.21	Taban Külü	(Torkittikul vd. 2017)	-Kömür taban külü içeriğinin artmasıyla, mukavemette hafif bir azalma gözlenmiştir. Kumun içeriği %50'ye kadar kömür dip külü ile yer değiştirilince basınç dayanımında güçlü bir şekilde etkilenme olmamıştır. İnce taban külü agregada basınç dayanımı daha da az düşüş göstermektedir.
6	-	0.68-5.91	Uçucu Kül	(Ghosh vd. 2018)	-Uçucu kül artmasıyla belli bir orana kadar basınçta azalmıştır.
7	-	0.75-3.19	Taban Külü	(Ghosh vd. 2018)	-Taban külü artmasıyla belli bir orana kadar basınçta azalmıştır.
8	-	15-55	PET	(Hannawi vd. 2010)	Plastik oranı arttıkça basınçta bir düşüş gözlemlenmektedir.
9	-	10-17	Bims, Alüminyum, Gazbeton, Agrega, Çimento,	(Binici vd. 2013)	Kontrol betonunun 17, bimsin 15, Alüminyumun 10, gazbetonun 12'dir.
10	5.25-12.24	4.89-12.38	Taban Külü, PET, Pomza	Tez Çalışması	-Elde edilen değer aralıkları literatürde tek bir atık ile çalışılarak elde edilen değerlerin aralığındadır.

4.3. Kuru Birim Ağırlık, Su Emme ve Boşluk Oranı Testi

Çalışmanın test ve analizleri için hazırlanan kürlenmiş 9 tipten 3' er adet numune, Şekil 4.4'te gösterildiği gibi kür havuzunda 72 saat bekletilmiştir.



Şekil 4.4. Kür havuzunda bekletilen numuneler

Bekleme süresi sonrası numuneler havuzdan alınmış suda tartımları yapılmıştır. Suda tartım ve suda tartıma yönelik yapılan çalışmalardan kesitler Şekil 4.5'te verilmiştir. Suda tartım sonuçları Çizelge 4.7'de ve Şekil 4.6'da verilmiştir.

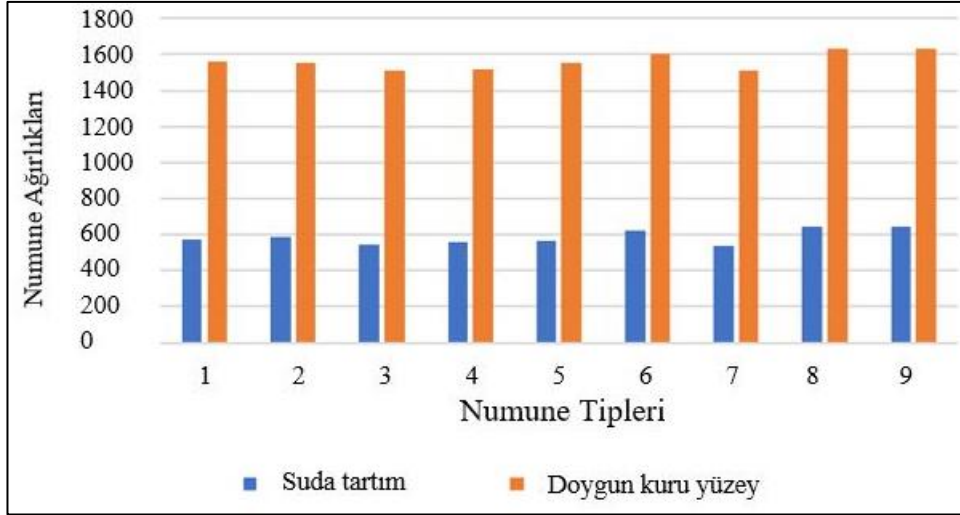


Şekil 4.5. Suda tartım işleminden kesitler

Suda tartım sonrası her tip için üç numunenin yüzeyleri bez yardımıyla silinerek hassas terazide tartılmıştır. Her tip için alınan üç numunenin ortalama suya doymun birim ağırlık verileri hassas tartım ile gerçekleştirilerek her tip için üç numuneden alınan sonuçların ortalaması Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.7. Numunelerin su içinde ve doymun kuru yüzey ortalama ağırlıkları

Numune Tipleri	Su içinde Birim Ağırlık (gr)	Doygun Kuru Yüzey Ağırlık (gr)
1	571.5	1558
2	583.5	1556
3	541.3	1509
4	555.9	1520
5	569.1	1554
6	619.1	1605
7	540.6	1510
8	640.6	1633
9	642.7	1628



Şekil 4.6. Numunelerin suda tartım ve doymun kuru yüzey ortalama ağırlıkları

Çizelge 4.7 ve Şekil 4.6. incelendiğinde su içinde birim ağırlığın en az tip 7 numunesinde, en fazla ise tip 9 numunesinde olduğu tespit edilmiştir. Doymun kuru yüzey ağırlıklarında ise en az tip 3 numunenin, en fazla ise tip 8 numunenin olduğu tespit edilmiştir.

Suya doymun birim ağırlıkları tespit edilen numuneler etüve konulmuştur. 72 saat boyunca 60 °C’de kurumaya bırakılmıştır. Numunelerin 72 saat sonra nem oranı %1.03 olarak ölçülmüştür. Bulunan nem oranı ile numunelerin kuruduğu saptandıktan sonra 9 tip 3’er set halinde numunelerin hassas terazide etüv kurusu ağırlıkları belirlenmiştir. Numunelerin etüvdeki durumu, nem ölçümleri ve etüv kurusu tartım işlemlerinden kesitler Şekil 4.7’de gösterilmiştir.

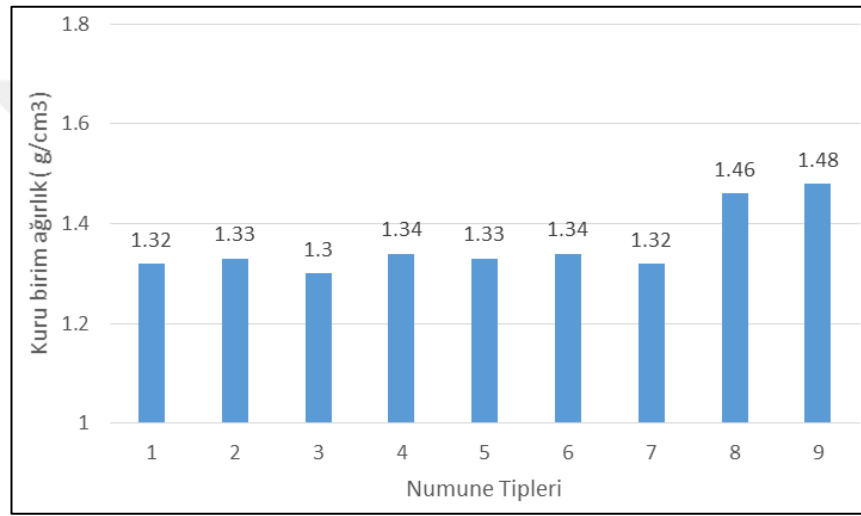
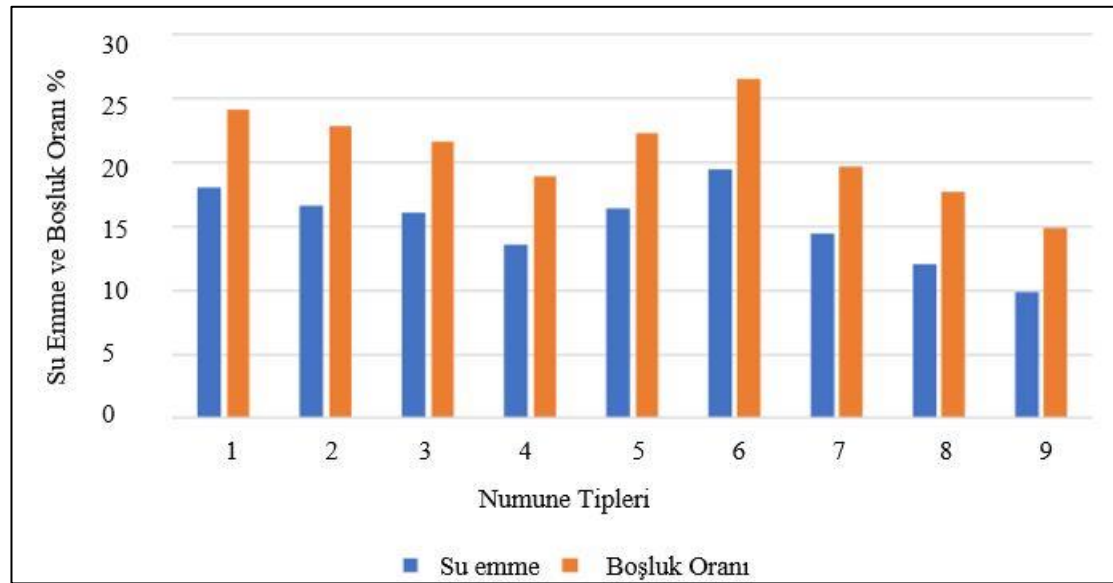


Şekil 4.7. Etüv kurusu, nem ölçüm ve etüv kurusu ağırlık tartım işlevleri

Formüller kullanılarak hesaplanan numunelerin kuru birim ağırlıkları, su emme ve boşluk oranı değerleri Çizelge 4.8’de gösterilmiştir. 9 tip numunenin kuru birim ağırlıkları Şekil 4.8’de, su emme ve boşluk oranı yüzdeleri ile oluşturulan grafik Şekil 4.9’da verilmiştir.

Çizelge 4.8. Kuru birim ağırlık, su emme ve boşluk oranı verileri

Numune Tipleri	Kuru Birim Ağırlık g/cm ³	Su Emme %	Boşluk Oranı %
1	1.32	18.0	24.1
2	1.33	16.7	22.8
3	1.30	16.1	21.6
4	1.34	13.6	18.9
5	1.33	16.4	22.2
6	1.34	19.5	26.6
7	1.36	14.4	19.6
8	1.46	12.1	17.7
9	1.48	9.88	14.9

**Şekil 4.8.** Kuru birim ağırlık değerleri**Şekil 4.9.** Su emme ve boşluk oranı değerleri

Çizelge 4.8 ve Şekil 4.8. incelendiğinde kuru birim ağırlığın en az tip 3 numunenin, en fazla ise tip 9 numunenin olduğu tespit edilmiştir. Çizelge 4.8 ve Şekil 4.9. incelendiğinde su emme ve boşluk oranının en az tip 9 numunenin, en fazla ise tip 6 numunenin olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçtan su emme ve boşluk oranı arasındaki doğrusal bağlantı da gözlemlenebilmektedir.

Deney sonuçları, literatürdeki diğer çalışmaların bulgularıyla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma verileri, Çizelge 4.9'da sunulmuştur.

Çizelge 4.9. Kuru birim ağırlık, su emme ve boşluk oranı literatür karşılaştırması

Sıra	Atık- Malzemeler	Kuru Birim Ağırlık	Su emme %	Boşluk oranı	Kaynak	Sonuç
1	Taban Külü	-	7.03- 25.21	15.48- 37.05	(Torkittikul vd. 2017)	-Taban külü arttıkça su emme ve boşluk oranı artmıştır. Kuru birim ağırlık ile ilgili bilgi verilmemiştir fakat taban külü artışıyla ürün yoğunluğunda azalma oranı gözlemlenmiştir. Buda birim ağırlığın azaldığını göstermektedir.
2	Taban Külü	1995- 1475	9.50- 20.94	≈16.00- 32.00	(Baite vd. 2016)	- Taban külünün kısmı veya tamamen kum ile değiştirilmesiyle özgül ağırlık azalarak kuru birim ağırlıkta da azalma sağlanmıştır. Su emme ve gözeneklilik oranı yükselmiştir.
3	Uçucu Kül	1088- 1933	-	22.58- 38.00	(Ghosh vd. 2018)	-Uçucu kül kullanım oranının artmasıyla daha düşük yoğunluk ve birim ağırlık elde edilmiştir. Daha fazla gözeneklilik gözlemlenmiştir. Su emme ile ilgili veri verilmesi de gözeneklilikle doğru orantılı olarak su emme de boşluktan dolayı artmaktadır.
4	Taban Külü	1000- 1871	-	25.806- 32.432	(Ghosh vd. 2018)	-Taban kül kullanım oranının artmasıyla daha düşük yoğunluk ve birim ağırlık elde edilmiştir. Daha fazla gözeneklilik gözlemlenmiştir. Su emme ile ilgili veri verilmesi de gözeneklilikle doğru orantılı olarak su emme de boşluktan dolayı artmaktadır.
5	PET	≈1600 -1400	≈2-20		(Babafemi vd. 2018)	-Doğal agregaya yerine kullanılan PET oranı arttıkça birim ağırlık düşmüştür. Plastik agregaya içeriğinin artmasıyla su emme oranı artış göstermiştir.
6	PET	1755- 2154	7.21- 7.58	15.41- 15.7	(Hannawi vd. 2010)	- Plastik agregaya arttıkça kuru yoğunlukta bir azalma olduğunu, su emme ve gözeneklilikte ise artma gözlemlenmektedir.

(Devamı Arkada)

Çizelge 4.9.' un devamı

7*	Bims, Alüminyum, Gazbeton, Agrega, Çimento	-	5,15- 12,55	-	(Binici vd. 2013)	-En yüksek su emme (12,55) gaz betonda gözlemlenirken en düşük referans betondadır (5,15). Alüminyum (8,3), bims (9,2) daha sonra gelen numunelerdir.
8	Taban Külü ve PET	1300- 1480	9.88- 19.49	14.85- 26.55	Tez Çalışması	-Elde edilen değer aralıkları literatürde tek bir atık ile çalışılarak elde edilen değerlerin aralığındadır.

*Sıra 7'de bulunan örnek piyasada satışı bulunan yapı bloklarına benzer akademik bir çalışma olduğundan dolayı tabloya eklenmiştir.

Not: Çizelge 4.9'da verilen değerler elde edilen numunelerin en düşük ve en yüksek değer aralığını göstermektedir.

4.4. Kılcal Su Emme Testi

Etüv kurusu 9 tip 3'er set numunenin alt dört kenar yüzeyi 3-4 cm yüksekliğinde eritilmiş mum ile kaplandıktan sonra Şekil 4.10'da gösterildiği şekilde hassas terazide tartılmıştır. Elde edilen sonuçların ortalaması alınarak Çizelge 4.10'da gösterildiği şekilde mumlu ağırlıklarının tespiti yapılmıştır.



Şekil 4.10. Etüv kurusu numunelerin mumlama ve tartım işlemleri

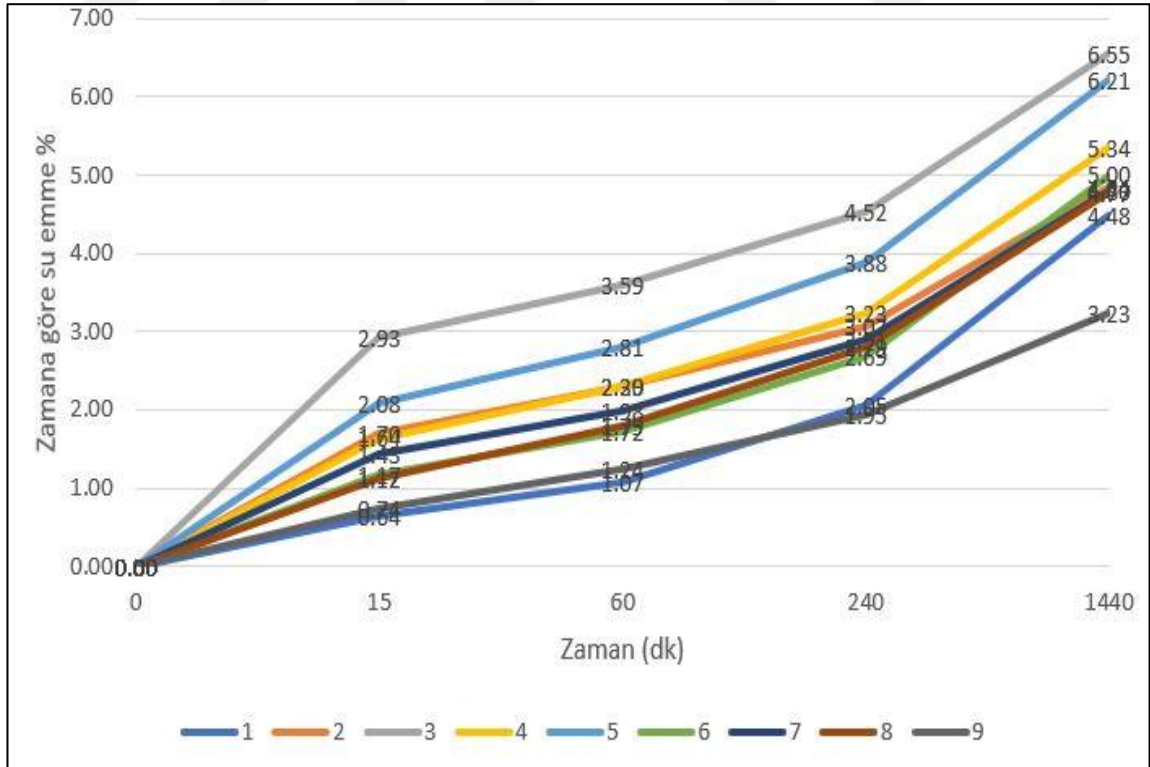
Çizelge 4.10. Etüv kurusu numune tiplerinin mumladıktan sonraki tartım ağırlıkları

Numune Tipleri	Ağırlık (gr)
1	1345
2	1337
3	1304
4	1343
5	1337
6	1348
7	1325
8	1462
9	1487

Mumlama işlemi sonrası kılcallık testine yönelik numuneler, 2-3 cm yüksekliğinde su doldurulmuş kasa içerisine yerleştirilmiştir şiş aparatlar üzerine konulmuştur. Numunenin tabanının su teması olacak şekilde ve yan yüzeylerinde su yüksekliği 2-3 cm olacak şekilde düzenek hazırlanmıştır. Numunelerin kasa içerisine yerleştirilmeleri ile aynı anda zaman ayarlaması yapılarak 15, 60, 240 ve 1440 dakikalarda numuneler su içerisinden anlık çıkarılıp, yüzeyi kurulandıktan sonra hassas terazide tartılmış ve diğer zamana kadar tekrar suda kalması sağlanarak periyodik olarak bu işleme devam edilmiştir. Teste yönelik görseller Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Su emme sonuçları, Şekil 4.12 ve Çizelge 4.11’de sunulmuştur.



Şekil 4.11. Kılcal su emme testi



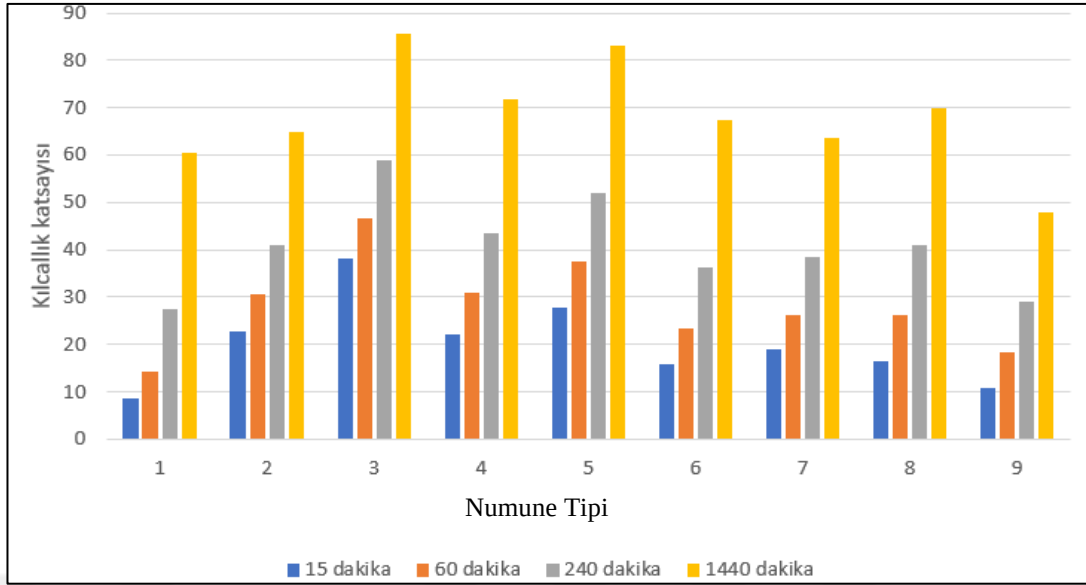
Şekil 4.12. Numune tiplerinin zamana göre su emme yüzdeleri

Çizelge 4.11. Numune tiplerinin zamana göre su emme ağırlıkları

Numune Tipleri	Ölçüm zamanı (dakika) Su emme yüzdeleri %				
	0 dak.	15 dak.	60 dak.	240 dak.	1440 dak.
1	0.00	0.64	1.07	2.05	4.48
2	0.00	1.70	2.29	3.07	4.84
3	0.00	2.93	3.59	4.52	6.55
4	0.00	1.64	2.30	3.23	5.34
5	0.00	2.08	2.81	3.88	6.21
6	0.00	1.17	1.72	2.69	5.00
7	0.00	1.43	1.98	2.91	4.80
8	0.00	1.12	1.79	2.79	4.77
9	0.00	0.74	1.24	1.95	3.23

Çizelge 4.12. Numune tiplerinin zamana göre kılcallık katsayıları

Numune Tipleri	Kılcallık katsayısı (g/cm ²) $A_T = (W_T - W_0) \times 10000 / (L_1 \times L_2)$			
	15 dak.	60 dak.	240 dak.	1440 dak.
1	8.630	14.37	27.59	60.32
2	22.73	30.67	41.07	64.71
3	38.16	46.77	58.97	85.45
4	22.00	30.90	43.40	71.73
5	27.84	37.55	51.90	83.02
6	15.76	23.26	36.26	67.42
7	18.97	26.28	38.53	63.68
8	16.46	26.21	40.85	69.75
9	10.95	18.39	28.93	48.00



Şekil 4.13. Numune tiplerinin zamana göre kılcılık katsayıları

Çizelge 4.11, Çizelge 4.12 ve Şekil 4.13 incelendiğinde kılcık su emmenin 15. dak., 60. dak., 240. dak. ve 1440. dakikalarda en az tip 9 numunesinde, en fazla ise tip 3 numunesinde olduğu tespit edilmiştir.

4.5. Isıl İletkenlik Testi

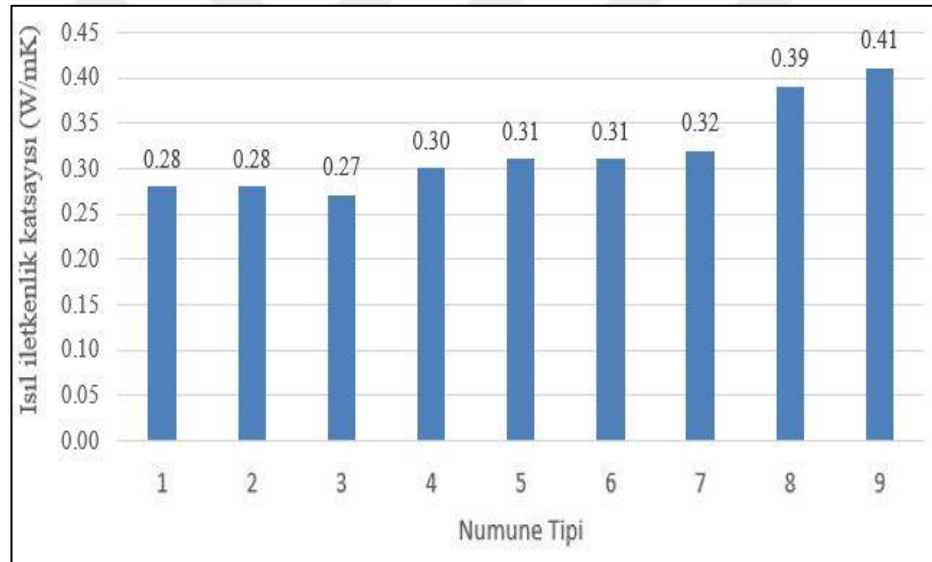
Çalışmada 9 tip için birer set 300 x 300 x 50 mm boyutlarında yapı bloğu numunelerinin ısı iletkenlik katsayısı belirlenmiştir. Numunelerin cihaz içerisine yerleştirilmeleri, teste hazırlanması ve testteki görselleri Şekil 4.14’ de verilmiştir. Cihaz içerisindeki kararlılık dengesi sonrası alınan değerler ile hesaplan an ısı iletkenlik değerleri Çizelge 4.13 ve Şekil 4.15’ de verilmiştir. Malzemelerin ısı iletkenlik literatür karşılaştırılması Çizelge 4.14’ de verilmiştir.



Şekil 4.14. 300 x 300 x 50 mm boyutlarındaki numunelerin etüvde kurutma ve ısı iletkenlik cihazında uygulama işlemi

Çizelge 4.13. Numune tiplerinin ısı iletkenlik test sonuçları

Numune Tipleri	Isıl iletkenlik katsayısı (W/mK)
1	0.28
2	0.28
3	0.27
4	0.30
5	0.31
6	0.31
7	0.32
8	0.39
9	0.41

**Şekil 4.15.** 300 x 300 x 50 mm boyutlarındaki numunelerin ısı iletkenlik test sonuçları

Çizelge 4.13 ve Şekil 4.15. incelendiğinde ısı iletkenliğinin en az tip 3 numunesinde, en fazla ise tip 9 numunesinde olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.14. Beton malzemelerin ısı iletkenlik literatür karşılaştırması

Sıra	Isıl iletkenlik katsayısı (W/mK)	Atık-Malzeme	Kaynak	Sonuçlar
1	$\approx 0.17-0.65$	PP	(Belmokadde m vd. 2020)	- Plastik agreganın içeriğinin artması, termal iletkenliğin azaldığı gözlemlenmiştir.
2	$\approx 0.25-0.66$	PE	(Belmokadde m vd. 2020)	- Plastik agregaların geleneksel agregalara göre daha düşük termal iletkenliğe sahip olmasıyla ilişkilendirildiğinde plastik agreganın içeriği arttıkça termal iletkenlik azalır
3	$\approx 0.17-0.19$	Pomza	(Yaşar ve Erdoğan 2008)	-Nevşehir pomzasıyla üretilen tuğlaların iyi ısı iletkenliğe sahip olduğu anlaşılmaktadır.
4	$\approx 0.52-1.80$	Taban Külü	(Torkittikul vd. 2017)	- Harçların ısı iletkenlik değerleri kömür taban külü içeriğinin artmasıyla birlikte önemli bir düşüş göstermektedir.
5	0.73-1.78	Taban Külü	(Baite vd. 2016)	-Taban külü kullanım oranı arttıkça ısı iletkenlik, malzeme yoğunluğunun azalmasıyla doğru orantılı olarak azalmıştır.
6	0.523-1.089	Taban Külü	(Torkittikul vd. 2017)	-Taban külü yoğunluğu arttıkça harç ve betonun ısı iletkenliği de gözeneklilik oranının artmasından dolayı doğrusal olarak azalmaktadır.
7	$\approx 0.3-0.9$	Uçucu Kül	(Ghosh vd. 2018)	-Uçucu kül oranının artmasıyla birlikte karışımdaki ısı iletkenliğin azaldığı tespit edilmiştir.
8	$\approx 0.10-0.30$	PET	(Babafemi vd. 2018)	-PET dahil edilmesi hava boşluğu içeriğinde artış olduğundan dolayı termal iletkenlik azalır.
9*	1,21-190	Bims, Alüminyum, Gazbeton, Agregası, Çimento,	(Binici vd. 2013)	-Gaz beton katkılı numune en düşük ısı iletimi sağlarken en yüksek ısı iletimi alüminyum katkılıdır. Gaz beton katkılı numune geleneksel betona oranla %35 düşüktür (Alüminyum 1.90, Kontrol betonu 1.8, bims 1.64, gaz beton 1.21).
10	0,28-0,41	Taban Külü, PET, Pomza	Tez Çalışması	-Elde edilen değer aralıkları literatürde tek bir atık ile çalışılarak elde edilen değerlerin aralığındadır.

*Sıra 9’da bulunan örnek piyasada satışı bulunan yapı bloklarına benzer akademik bir çalışma olduğundan dolayı tabloya eklenmiştir.

4.6. Yüksek Sıcaklık Testi

50x50x50 mm 9 tip, 9’ar set numuneden toplamda 81 numune 105 °C etüvden çıkarıldıktan sıcaklıklara yarım saatte bir 200 °C artış yapılarak; 600 °C’ye 1.5, 800 °C’ye 2, 1000 °C’ye 2.5 saatte çıkılarak, numuneler 3 saat daha fırın içinde bekletilmiş ve süre sonunda fırın kapağı açılarak oda ısısına gelmeleri sağlanmıştır. Numunelerin etüv ve kül fırınından görselleri Şekil 4.16’da verilmiştir.

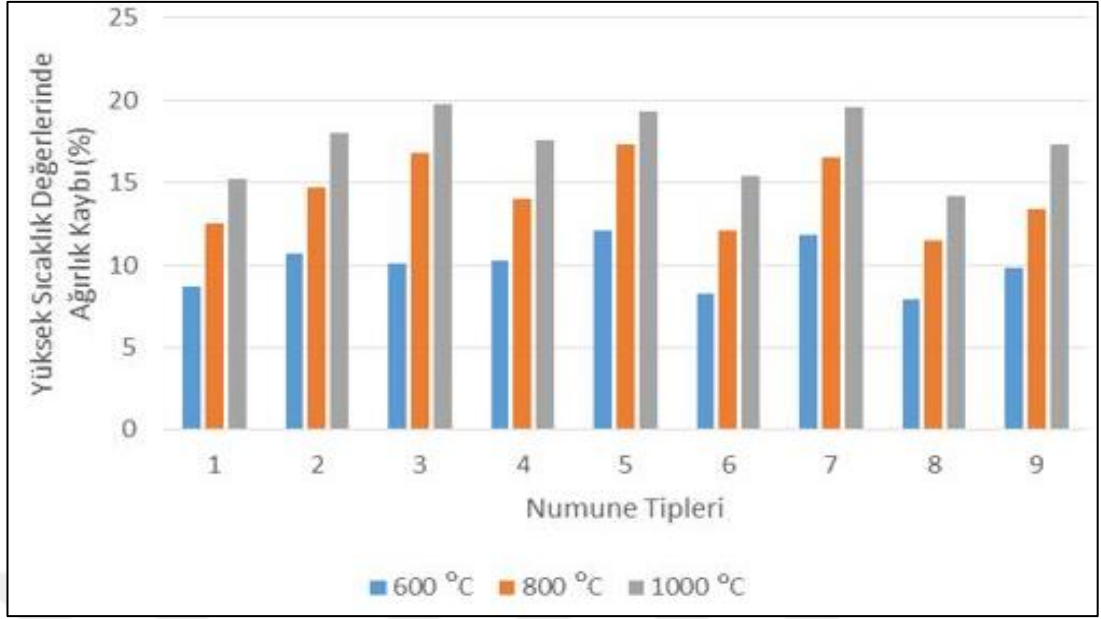


Şekil 4.16. 50x50x50 mm boyutlarındaki numunelerin etüv ve kül fırını görselleri

Numunelerin ağırlık kaybı yüzdeleri Çizelge 4.15’ de ve Şekil 4.17’de, dayanım kaybı yüzdeleri Çizelge 4.16’ da ve Şekil 4.18’de gösterilmiştir. Dayanım kaybı ölçümünde, test cihazının teknik sorunundan dolayı üst sıcaklıklarda hassas ölçüm yapamaması nedeniyle sadece 600 °C’de ölçüm yapılabildiğiştir.

Çizelge 4.15. Numunelerin yüksek sıcaklıkta ağırlık kaybı yüzdeleri

Numune Tipleri	Yüksek Sıcaklık Değerlerinde Ağırlık Kaybı (%)		
	600 °C	800 °C	1000 °C
1	8.70	12.5	15.2
2	10.7	14.7	18.0
3	10.1	16.8	19.8
4	10.3	14.0	17.6
5	12.1	17.3	19.3
6	8.30	12.1	15.4
7	11.8	16.5	19.6
8	7.90	11.5	14.2
9	9.80	13.4	17.3

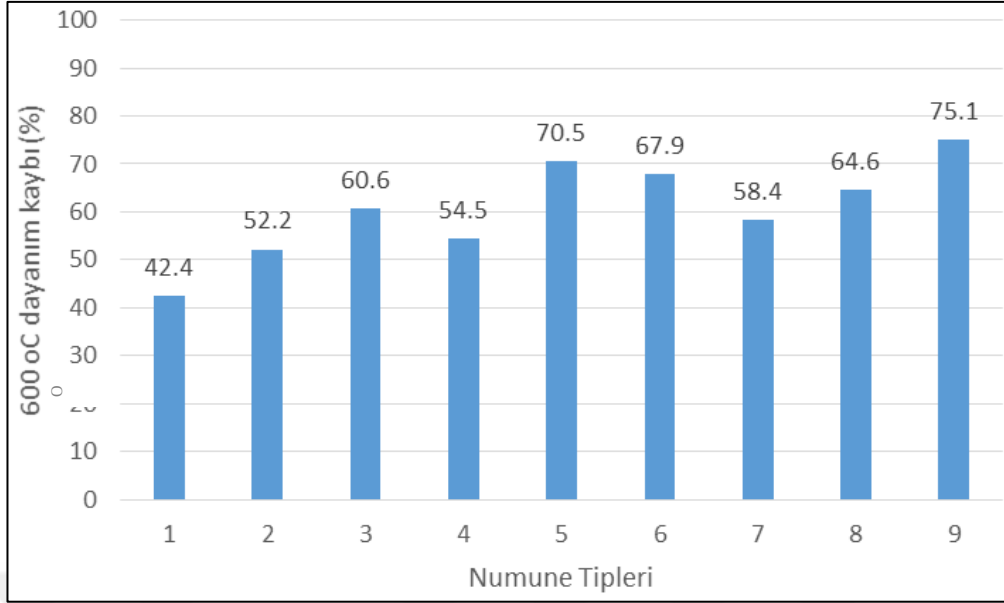


Şekil 4.17. 50x50x50 mm boyutlarındaki numunelerin yüksek sıcaklıkta ağırlık değişimleri

Çizelge 4.15 ve Şekil 4.17. incelendiğinde yüksek sıcaklıkta ağırlık kaybı en az 600 °C, 800 °C ve 1000 °C’ de tip 8 numunesinde, en fazla ise tip 5 numunesinde 800 °C’de, 1000 °C’ de ise tip 3 numunesinde olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.16. Numunelerin 600 °C sıcaklıkta dayanım kaybı yüzdeleri

Numune Tipleri	600 °C Dayanım Kaybı (%)
1	42.4
2	52.2
3	60.6
4	54.5
5	70.5
6	67.9
7	58.4
8	64.6
9	75.1



Şekil 4.18. 50x50x50 mm boyutlarındaki numunelerin 600 °C sıcaklıkta dayanım kaybı değişimleri

Çizelge 4.16 ve Şekil 4.18. incelendiğinde 600 °C sıcaklıkta dayanım kaybı en az tip 1 numunesinde, en fazla ise tip 9 numunesinde olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.17. Beton malzemelerin yüksek sıcaklıkta ağırlık ve dayanım kaybı yüzdeleri literatür karşılaştırması

Sıra	Malzeme	Sıcaklık (°C)	Ağırlık Kaybı (%)	Dayanım Kaybı (%)	Kaynak	Sonuçlar
1	Öğütülmüş yüksek fırın cürufu, Metakaolin, Alkali aktivatör, Öğütülmemiş cüruf agregası, Atık PET agregası, Karışım ve bakım suyu	200-400-600-800-1000	2.79-7.78-8.31-9.07-9.24	22-45-61-81-66	(Ulu 2016)	Sıcaklığın artmasıyla birlikte numunelerde boşluk yapısı artmakta ve yapısındaki suyun buharlaşmasından dolayı ağırlıklarında azalmalar olmaktadır. Normal betonda 300 °C sıcaklıktan sonra mikro çatlaklar gözlenirken basınç dayanımları da belirgin şekilde düşer. 800 °C'den sonra ise parçalanmalar gözlemlenir. Fakat bu numunelerde yapısal bütünlük sağlanmıştır.
2	Pomza, Kum, Kolemanit, Çimento	200-400-600	1.6 ve 3.1 aralığı-1.8 ve 4.4 aralığı-0.9 ve 12.9 aralığı	200 °C'e kadar basınç dayanımı değişmezken, 600 °C'de yaklaşık %50 mukavemet kaybı olmuştur	(Bideci 2016)	Sıcaklıkla birlikte ağırlık kaybının arttığı gözlemlenmiştir. Yüksek sıcaklık, sürdürülebilir beton tasarımında kritik bir faktör olarak dikkate alınmalıdır çünkü bu durum betonun mekanik özelliklerinde ciddi kayıplara yol açabilir.

(Devamı Arkada)

Çizelge 4.17.' in devamı

3	Uçucu kül, Taban külü, Çimento, Geni şletilmiş şeyl	200- 400- 600- 800	2 ve 11 aralığı- 4 ve 13 aralığı-5 ve 14 aralığı-6 ve 18 aralığı	0.2 ve 0.4 aralığı (bazı numunelerde artış olmuştur.)- 0.1 ve 0.4 aralığı (bazı numunelerde artış olmuştur.)- 0.1 ve 1 aralığı, 0.3 ve 0.8 aralığı	(Ahn vd. 2016)	Tüm silindirik numunelerde 600 °C'ye maruz kalan beton yüzeylerinde 800 °C'ye maruz kalan beton yüzeylerine göre daha fazla çatlak oluşmuştur. Geleneksel bilgiye göre beklenenin aksine, beton üzerindeki termal hasarın ve çatlak oluşumunun derecesi, maruz kalma sıcaklığının artışıyla yakından ilişkilidir. Maruz kalma sıcaklığındaki yükselmenin, çatlak oluşumu üzerindeki etkisi konusunda yapılan araştırmalar tutarsızlık göstermemiştir. Ayrıca, elde edilen sonuçlar, kömür küllerinin kullanılmasının çatlak hasarını ve ağırlık kaybını büyük ölçüde azalttığını göstermektedir.
4	Uçucu kül, Çimento, Su, Kum	200, 400, 600	1.1 ve 1.4 aralığı-10.6 ve 13.6 aralığı- 16 ve 19.2 aralığı	39.4 ve 50.4 aralığı- 33.7 ve 39.9 aralığı-25.2 ve 30.7 aralığı	(Subaşı vd. 2011)	Numunelerin kütle ve basınç kaybında 100, 200 ve 300 °C dereceye kadar büyük değişimler olmamıştır. 400 °C'den sonra önemli kayıpların olduğu gözlemlenmiştir. %5 uçucu kül ilavesiyle numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerin iyileşeceği, %10'a kadar iave ile de sıcaklıktan daha az zarar göreceği bilgisine varılmıştır.
5	Agrega, Çimento, Su (referans betonu)	200, 400, 600, 800	2.65- 4.6- 5.2-6.4	-	(Binici vd. 2013)	Sıcaklık artışıyla kütle kaybı da artmaktadır. 800 °C' e kadar malzemenin % 6.38'i kaybolmuştur.
6	Bims, Agrega, Çimento, Su	200, 400, 600, 800	0.85-1.98- 3.9-5.1	6.6-40- 46.6-46.6	(Binici vd. 2013)	Referans betonuna göre daha az değişim olmuştur. 800 °C' e kadar malzemenin % 5.1'i kaybolmuştur. Referansa göre daha dayanıklı denilebilir. 800 °C'den sonra dağılmaya başlamıştır. Fakat referans, alüminyum ve gaz beton numuneler içerisinde basınç dayanımı en yüksek olanıdır.
7	Alüminyum, Agrega, Çimento, Su	200, 400, 600, 800	0.9-1.56- 2.85-3.56	30-40-50- Dağılmıştır	(Binici vd. 2013)	800 °C' e kadar malzemenin % 3.56'sı kaybolmuştur. 600 °C'den sonra neredeyse kömür haline gelmiştir. Referans, bims ve gaz beton numuneler içerisinde basınç dayanımı en yüksek olanıdır.
8	Gazbeton Agrega, Çimento, Su	200, 400, 600, 800	0.25-0.95- 1.8-2.8	16.66- 33.33- 41.66-50		800 °C' e kadar malzemenin % 2.8'i kaybolmuştur. En az malzeme kaybı görülen numunedir.
9	Taban Külü, PET, Pomza, Çimento, Su	600, 800, 1000	7.90 ve 12.1 aralığı- 11.5 ve 16.8 aralığı-14.2 ve 19.8 aralığı	42.4 ve 75.1 aralığı (sadece 600 °C ölçülebilmi ştir.)	Tez Çalışması	-Elde edilen değer aralıkları literatürde tek bir atık ile çalışılarak elde edilen değerlerin aralığındadır.

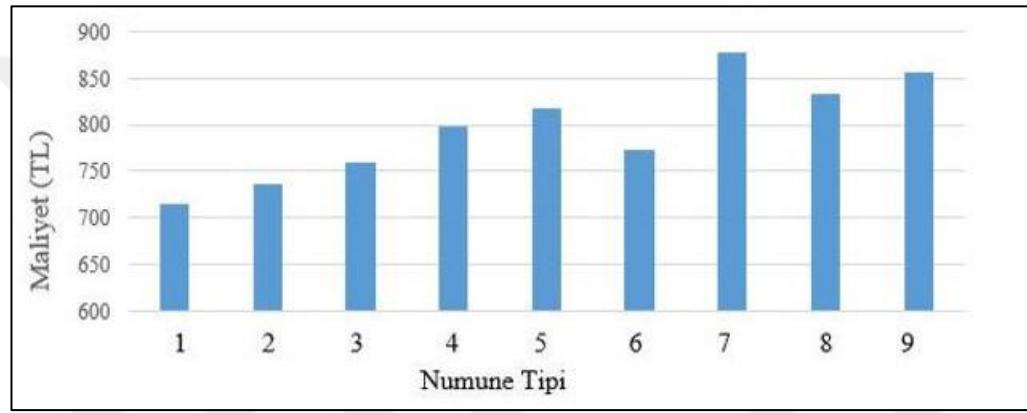
Not: Değerler sıcaklık değerlerine göre sırasıyla verilmiştir.

4.7. Maliyet Analizi

Hammadde temin yerlerinden alınan fiyatlar doğrultusunda her tip için kullanılan taban külü, PET, pomza agregası, çimento ve su hammadde miktarlarına göre ayrı ayrı maliyetleri çıkartılmıştır. 9 tipin fire vermeden 1m³ kompozit harç malzemesinin elde edilmesi için kullanılan hammadde maliyet fiyatları Haziran 2023 tarihine göre Türk Lirası (TL) para birimi cinsinden Çizelge 4.18 ve Şekil 4.19'da verilmiştir.

Çizelge 4.18. Numune tiplerinin 1m³ hammadde maliyetleri (TL)

Numune Tipleri	Birim Maliyet (TL)
1	714.5
2	736.7
3	758.9
4	797.9
5	817.3
6	772.8
7	878.5
8	834.0
9	856.2

**Şekil 4.19.** Numune tiplerinin 1m³ maliyetleri

Çizelge 4.18 ve Şekil 4.19. incelendiğinde 1m³ kompozit harç maliyetinin en az tip 1 numunesinde, en fazla ise tip 7 numunesinde olduğu tespit edilmiştir.

Maliyet analizleri kapsamında elde edilen sonuçlar ile Haziran 2023 tarihindeki piyasada satışı olan yapı blokları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonrası elde edilen bilgiler Çizelge 4.19'da gösterilmiştir. Çizelgeye tez çalışmasında elde edilen 1 m³ kompozit harç karışımının hammadde maliyet fiyatının piyasadaki yapı bloklarından görece daha ekonomik olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.19. 1 m³ kompozit harç ile piyasadaki yapı bloklarının 1 m³ satış fiyatı ile karşılaştırılması

Yapı Bloğu	1 m ³ harç için satış fiyatı (TL)
Tuğla	871,25
Gaz Beton	1.700,60
Bims	1.114,20
Tez Çalışması*	714,5-878,5

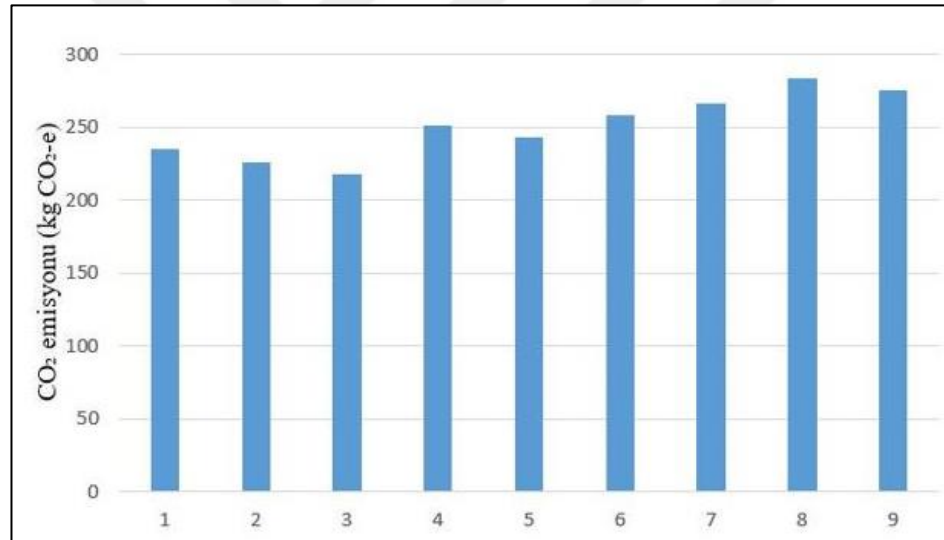
* Tez çalışmasında elde edilen 9 tip kompozit harç malzemesinin en düşük ve en yüksek numunelerin hammadde maliyet fiyatıdır.

4.8. CO₂ Eşdeğer (CO₂ -e) Emisyonu Analizi

9 tip, 1 m³ firesiz kompozit harç karışımını oluşturan çimento, su, taban külü, pomza, r-PET malzeme için CO₂-e emisyon değerleri hesabı Çizelge 4.20 ve Şekil 4.20'de verilmiştir.

Çizelge 4.20. 1 m³ kompozit harç malzemesi için CO₂-e emisyon değerleri

Numune Tipleri	1 m ³ kompozit harç malzemesi için CO ₂ -e emisyon (kg CO ₂ -e/m ³)
1	235
2	226
3	218
4	251
5	243
6	259
7	267
8	284
9	276

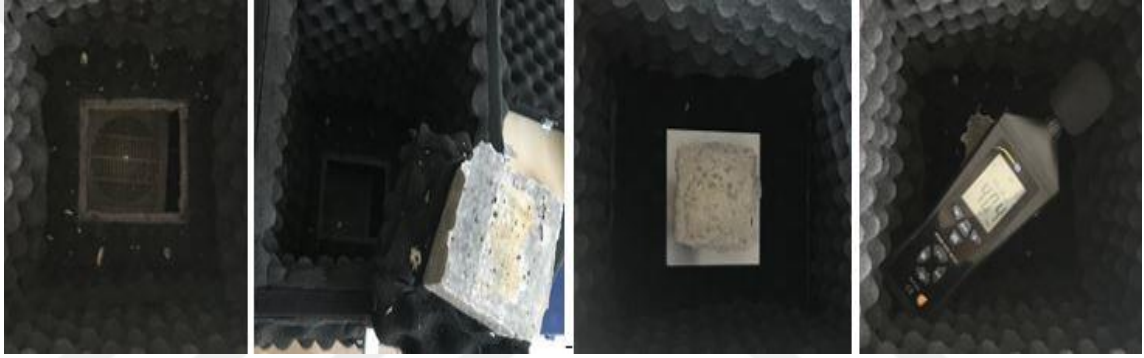


Şekil 4.20. Numunelerin 1 m³ malzeme için CO₂-e emisyon değerleri

Çizelge 4.20 ve Şekil 4.20. incelendiğinde 1m³ kompozit harç CO₂-e emisyon değerlerinin en az tip 3 numunesi olurken en fazla ise tip 8 numunesinin olduğu tespit edilmiştir. Çimento miktarı aynı tiplerdeki numunelerde PET oranından kaynaklı küçük oranlarda değişkenlerle benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlardan belirleyici etkenin çimento miktarının olduğu, çimento miktarının artışı ile CO₂-e emisyon değerinin arttığı söylenebilmektedir. PET oranının artması ile de CO₂-e emisyon değerinin azaldığı söylenebilmektedir. 1m³ çimento 2.800 kg (Anonim 8), CEM I çimentosunun bir kilogramı 1.165 kg CO₂ salınım (Gürsel ve Meral 2012) üretir kabulüyle, 1m³ çimento toplamda 3.262 kg CO₂ salınımına neden olmaktadır. Bu bağlamda Çizelge 4.20 verilerine göre atık katkı ilavesiyle çimento miktarındaki düşüş ile CO₂ salınımının büyük oranlarda düştüğü söylenebilmektedir.

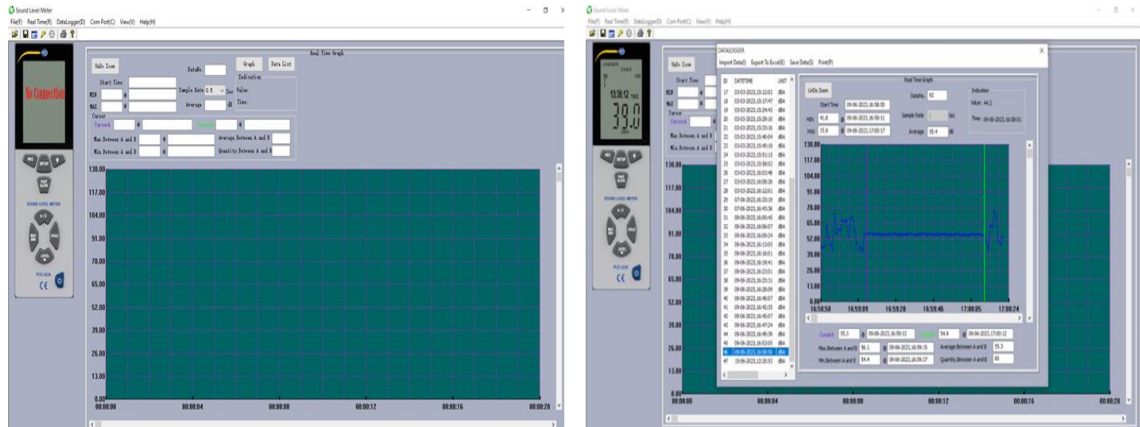
4.9. Ses İletim Testi

100x100x100 mm 9 tip, 2'şer set numune Şekil 4.21'de verilen görsel kesitler şeklinde ölçülmüştür. Kutu içerisinde bulunan hoparlör aracılığı ile telefona bağlanan kablo ile çok gürültü ve aynı zamanda ağır ısıtma kaybı ses sınıfına giren 85 dB ses verilmesi sağlanmıştır. En alt kısım 1. kısma hoparlör, en üst kısım 2. kısma numune üstüne ses ölçer yerleştirilmiştir. 1. ve 2. kısım arasındaki ayırıcı katmanda bulunan boşluğa ise tam oturacak şekilde numune yerleştirilmiştir. Numunenin alt yüzeyi 1. kısımda, üst yüzeyi ise 2. kısımda olacak şekilde yerleştirilerek numuneden geçen ses şiddeti ölçümü için kutu içeriği hazırlanmıştır. Kutunun yalıtımlı kapağı kapatılarak ortam sessiz bir hale getirilmiş ve 1 dakika boyunca cihazın her tip için tekrarlı olarak ölçüm yapması sağlanmıştır. Aynı zamanda numune konulmadan ara bölme boş bir şekilde yani sesin kendi şiddetinin ölçülebildiği ve numune alanının numune olmadan yalıtım malzemesi kaplı ahşapla kapatıldığı dolu ölçümleri yapılmıştır. Böylece numunelerin ses geçirgenliğini ne kadar sağladığı kıyaslanabilmektedir.



Şekil 4.21. Ses iletim testinden kesitler

Cihaz her numune için 1 dakika boyunca 60 ölçüm yapmıştır. Ölçüm verilerine ulaşmada kullanılan ses seviyesi ölçer cihazının, bilgisayar programı kullanılmıştır. Şekil 4.22'de ses seviye ölçer cihazı programı ara yüzü ve numunelere yönelik verilerin erişim ekran kesitleri verilmiştir. Ses seviyesi ölçer cihazın program ara yüzü kullanılarak 60 sn boyunca, 60 ölçüm sonucundaki verilerin ortalama sonucu her tip için Çizelge 4.21'de gösterilmiştir.



Şekil 4.22. Ses dinleme cihazı ara yüzü ve verilerin incelenmesi

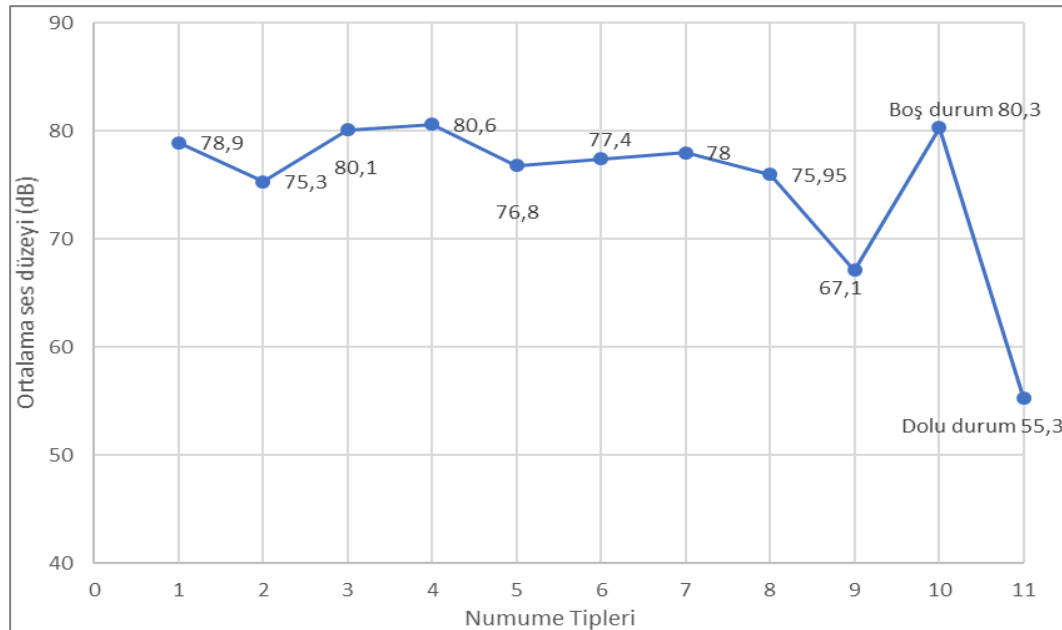
Çizelge 4.21. Ses iletim test sonuçları

Numune Tipleri	Ortalama Ses dB
1	78.9
2	75.3
3	80.1
4	80.6
5	76.8
6	77.4
7	78
8	75.95
9	67.1
Boş*	80.3
Dolu**	55.3

*Şekil 4.22’de verilen ses analizi cihazının numune bölgesinin boş olduğu ses dinleme durumudur.

** Şekil 4.22’de verilen ses analizi cihazının numune bölgesinde cihaz geliştirilmesinde kullanılan yalıtım malzemesi kapatılmış olduğu ses dinleme durumudur.

Tez çalışması kapsamında üretilen 100x100x100 mm boyutlarındaki numunelerin ses absorpsiyon performansları Çizelge 4.18’deki veriler kapsamında incelenmiştir. Numunelerin tümünün, dolu konumunda ses absorpsiyon performansları kullanılan yalıtım malzemesinden görece iyi olmadığı tespit edilmiştir. Numunelerin ortam sesinin absorpsiyonuna yönelik kendi içlerinde performansları incelendiğinde 9. numunenin ses absorpsiyon performansının görece en iyi olduğu belirlenmiştir. Ortalama ses düzeylerine yönelik hazırlanan grafik Şekil 4.23’te verilmiştir.

**Şekil 4.23.** Numune ortalama ses düzeyleri

Ses geçiş kaybı değerleri geleneksel duvar yapı bloğu olan bims, gaz beton ve tuğla literatür ile karşılaştırılacak olunursa; 19 cm kalınlıktaki bims sıvasız yapı bloğun 15 dB, 20 cm kalınlıktaki gaz beton sıvasız yapı bloğun 33 dB, 19 cm kalınlıkta düşey delikli sıvasız hafif tuğlanın ise 40 dB, 19 cm kalınlıkta yatay delikli sıvasız tuğlanın 43 dB'dir. Duvarlarda en iyi ses yalıtımı sağlayan yapı bloğun tuğla olduğu söylenebilmektedir. Ses yalıtımında sıva çok önemli etkindir (Demirkale 2008). Çalışma kapsamında elde edilen numunelerden Tip-9, 13.2 ses geçiş kaybı ile bims bloğa yakın değerde çıkmıştır.

4.10. Taguchi Tasarımı İstatistiksel Değerlendirmeler

Bu bölümde test ve analiz sonuçlarıyla elde edilen veriler kullanılarak Taguchi performans karakteristiğine yönelik S/G oranları belirlenmiştir. Sonuçlar desibel (dB) şeklinde ifade edilir (Mezarciöz ve Oğulata 2010). Her parametreye özgü sonuçlar çizelgelerde verilmiştir. Taguchi tasarımı istatistiksel değerlendirme bölümlerinden biri olan varyans analizleri bir aylık ücretsiz deneme lisansı olan istatistiksel paket programı ile gerçekleştirilmiştir. İncelenen parametrelerin varyans analiz sonuçları çizelgelerde verilmiştir.

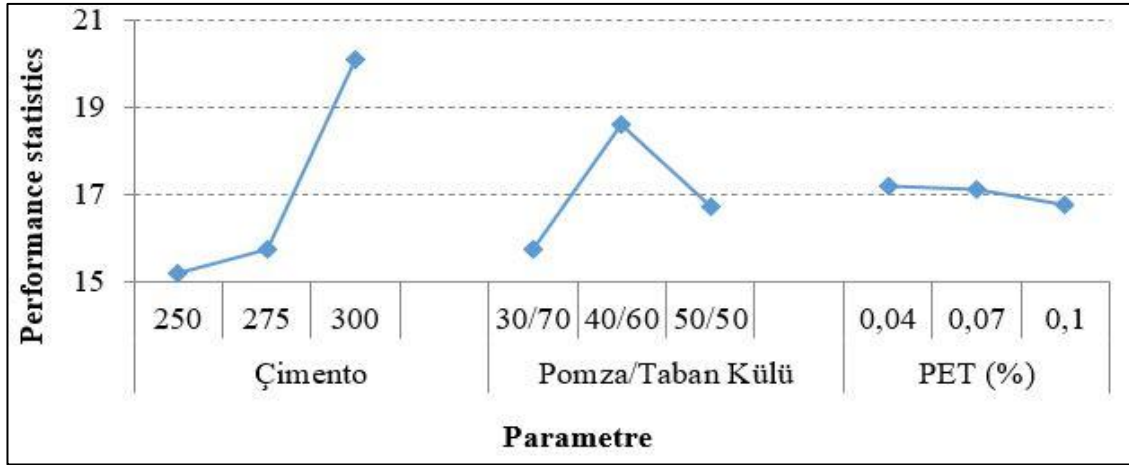
4.10.1. Basınç dayanım değerlerinin istatistiksel incelenmesi

Deney tasarımıdaki 9 tip numunenin basınç dayanım değerleri Çizelge 4.11' de verilmiştir. 9 tip numunenin 7. ve 28. günde ölçülen basınç dayanımı değerleri Taguchi tasarımıda “daha büyük daha iyidir” performans karakteristiği formülleri kullanılarak elde edilen S/G değerleri Çizelge 4.22'de verilmiştir.

Çizelge 4.22. Numunelerin 7. ve 28. gün basınç dayanımı S/G değerleri

Numune Tipleri	Basınç değerleri için S/G oranları 7 gün (dB)	Basınç değerleri için S/G oranları 28 gün (dB)
1	14.27	15.67
2	16.88	17.19
3	14.50	15.12
4	14.39	13.55
5	17.22	19.33
6	15.68	20.48
7	18.57	18.71
8	21.70	20.80
9	20.06	20.22

9 tip numunenin 7. gün basınç dayanım sonuçlarının elde edilen performans istatistiği üzerindeki etkileri Şekil 4.24'te verilmiştir. Sonuçlara göre karışımlarda çimento oranının artmasıyla basınç dayanım performans değerinin arttığı, pomza/tabana külü oranında ise en iyi değer 40/60 oranının olduğu, PET oranının artması ile de düşüş yaşandığı gözlemlenmektedir.



Şekil 4.24. Numunelerin 7 günlük basınç dayanım değerlerinin performans istatistiği üzerindeki etkisi

Deney tasarımındaki 9 tip numunenin 7. gün basınç dayanım değerlerinin varyans analizi sonuçları Çizelge 4.23'te verilmiştir. Çizelgeye göre anova analizi incelendiğinde üç faktörden ikisinin p değerlerinin 0.05'ten küçük olduğu belirlenmiştir. Analiz sonucunda çimento ve pomza/tabak külü faktörlerinin basınç dayanımı (7 gün) değerleri üzerinde istatistiksel etkisine yönelik anlamlı bir ilişki tespit edilmiştir. Ancak PET faktörünün p değerinin 0.05 değerinden büyük olduğu belirlenmiştir. Bu kapsamda analiz sonucu PET faktörünün basınç dayanımı (7 gün) değerleri üzerinde istatistiksel etkisine yönelik anlamlı bir ilişki tespit edilememiştir. Hipotez testleri açısından durum analizi incelendiğinde PET faktörü için H_0 hipotezi kabul edilirken, çimento ve pomza/tabak külü faktörleri için H_0 hipotezi reddedilerek H_1 hipotezi kabul edilmiştir.

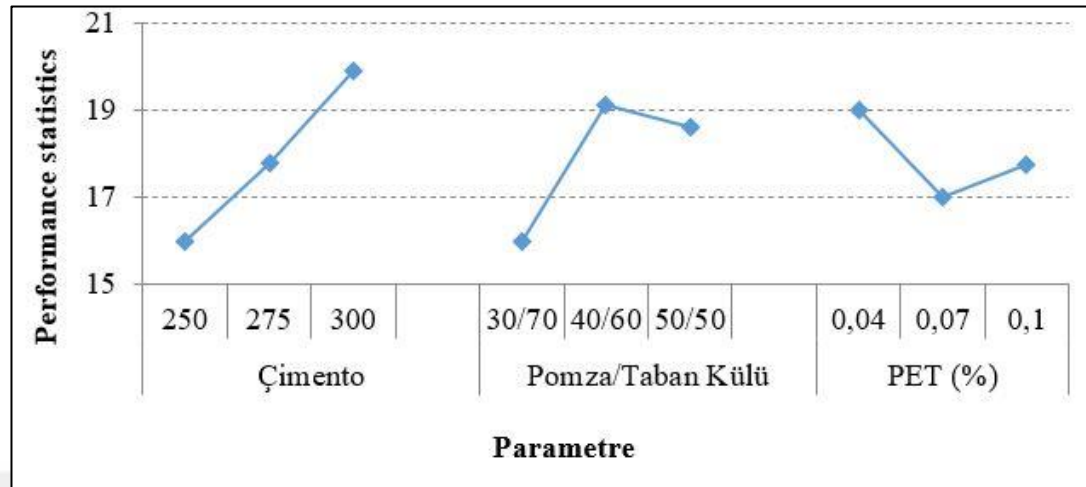
Çizelge 4.23. Numunelerin 7. gün basınç değerleri için anova analiz sonuçları

Kontrol Faktörleri	S. D	K.T.	Katkı %	K. O	F-Değeri	p-Değeri
Çimento (kg/m ³)	2	36.2041	77.01	18.1020	180.95	0.005
Pomza/Taban Külü (%)	2	9.5911	20,40	4.7955	47.94	0.020
PET (%)	2	1.0197	2,17	0.5099	5.10	0.164
Hata	2	0.2001	0,43	0.1000		
Toplam	8	47.0149	100			

Çizelge 4.23.'de deney tasarımı kapsamında elde edilen 9 tip numunenin 7. gün basınç dayanımı değerlerinde varyansa katkı yüzdesi en yüksek faktörün %77.01 ile çimento bileşeni olduğu ve onu sırasıyla pomza/tabak külü ve PET faktörlerinin izlediği tespit edilmiştir.

9 tip numunenin 28. gün basınç dayanım sonuçlarının elde edilen performans istatistiği üzerindeki etkileri Şekil 4.25'te verilmiştir. Sonuçlara göre karışımlarda çimento oranının artmasıyla basınç dayanım performans değerinin arttığı, pomza/tabak külü oranında ise en iyi değerin 40/60 oranının olduğu, PET oranında ise en düşük oranının en iyi değeri verdiği gözlemlenmektedir. 7 günlük değerler ile benzer sonuçlar elde edilse de zamanla tabak külü oranının düşük olduğu 60 ve 50 oranındaki tabak külü

performanslarının yakınlaştığı ve PET oranında sonuç aynı olsa da 0.07 oranının 0.1 oranına göre basınç performansını daha çok düşürdüğü gözlemlenmiştir.



Şekil 4.25. Numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin performans istatistiği üzerindeki etkisi

Deney tasarımındaki 9 tip numunenin 28. gün basınç dayanım değerlerinin varyans analizi sonuçları Çizelge 4.24'te verilmiştir. Çizelgeye göre anova analizi incelendiğinde üç faktöründe p değerlerinin 0.05'ten büyük olduğu belirlenmiştir. Analiz sonucu 3 faktöründe basınç dayanımı (28 gün) değerleri üzerinde istatistiksel etkisine yönelik anlamlı bir ilişki tespit edilememiştir. Hipotez testleri açısından analiz incelendiğinde üç faktör için de H_0 hipotezi kabul edilmiştir.

Çizelge 4.24. Numunelerin 28. gün basınç değerleri için anova analiz sonuçları

Kontrol Faktörleri	S. D	K.T.	Katkı %	K. O	F-Değeri	p-Değeri
Çimento (kg/m ³)	2	23.286	47.16	11.643	9.59	0.094
Pomza/Taban Külü (%)	2	14.765	29.90	7.382	6.08	0.141
PET (%)	2	8.903	18.03	4.452	3.67	0.214
Hata	2	2.427	4.92	1.214		
Toplam	8	49.382	100			

Çizelge 4.24'te deney tasarımı kapsamında elde edilen 9 tip numunenin 28. gün basınç dayanımı değerlerinde varyansa katkı yüzdesi en yüksek faktörün % 47.16 ile çimento bileşeni olduğu ve onu sırasıyla pomza/tabak külü ve PET faktörlerinin izlediği tespit edilmiştir.

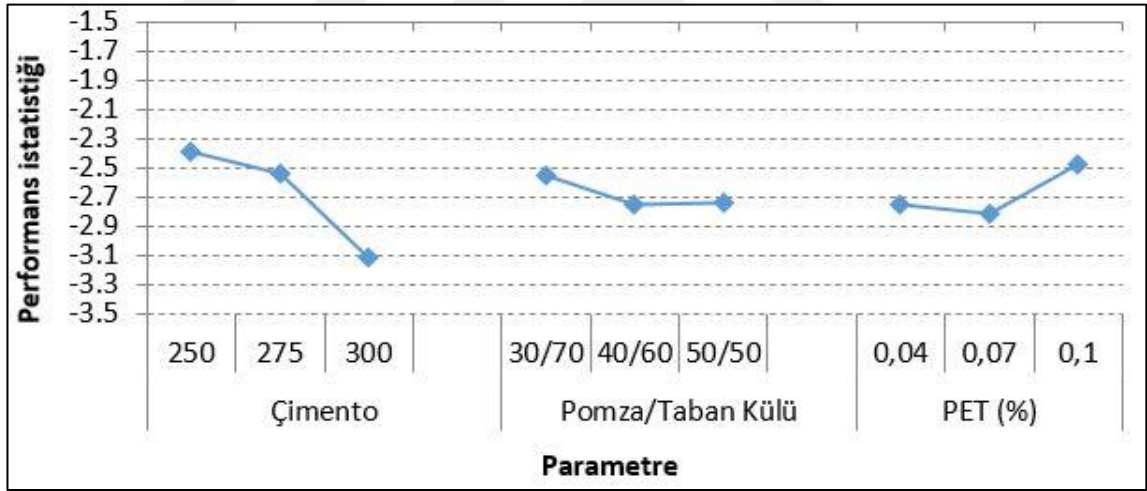
4.10.2. Kuru birim ağırlık değerlerinin istatistiksel olarak incelenmesi

Deney tasarımındaki 9 tip numunenin kuru birim ağırlık değerlerinden Taguchi tasarımıyla "daha küçük daha iyidir" performans karakteristiği formülleri kullanılarak elde edilen S/G değerleri Çizelge 4.25'te verilmiştir.

Çizelge 4.25. Numunelerin kuru birim ağırlık S/G değerleri

Numune Tipleri	Kuru birim ağırlık değerleri için S/G oranları (dB)
1	-2.41
2	-2.48
3	-2.28
4	-2.57
5	-2.50
6	-2.57
7	-2.67
8	-3.29
9	-3.39

9 tip numunenin kuru birim ağırlık değerlerinin sonucu elde edilen performans istatistiği üzerindeki etkileri Şekil 4.26'da verilmiştir. Sonuçlara göre karışımlarda çimento oranının düşmesiyle performans değerinin iyi olduğu, pomza/tabana külü oranında taban külü oranının düşmesiyle performansın düştüğü, PET oranında ise en fazla oranının en iyi değeri verdiği gözlenmektedir.

**Şekil 4.26.** Numunelerin kuru birim değerlerinin performans istatistiği üzerindeki etkisi

Deney tasarımıındaki 9 tip numunenin kuru birim ağırlık değerlerinin varyans analizi sonuçları Çizelge 4.26'da verilmiştir. Çizelgeye göre anova analizi incelendiğinde üç faktöründe p değerlerinin 0.05'ten büyük olduğu belirlenmiştir. Analiz sonucu 3 faktöründe kuru birim ağırlık değerleri üzerinde istatistiksel etkisine yönelik anlamlı bir ilişki tespit edilememiştir. Hipotez testleri açısından analiz incelendiğinde üç faktör için de Ho hipotezi kabul edilmiştir.

Çizelge 4.26. Numunelerin kuru birim ağırlık değerleri için anova analiz sonuçları

Kontrol Faktörleri	S. D	K.T.	Katkı %	K. O	F-Değeri	p-Değeri
Çimento (kg/m ³)	2	0.022402	72.50	0.011201	13.48	0.069
Pomza/Taban Külü (%)	2	0.002151	6.96	0.001075	1.29	0.436
PET (%)	2	0.004684	15.16	0.002342	2.82	0.262
Hata	2	0.001662	5.38	0.000831		
Toplam	8	0.030899	100			

Çizelge 4.26.'da deney tasarımı kapsamında elde edilen 9 tip numunenin kuru birim ağırlık değerlerinde varyansa katkı yüzdesi en yüksek faktörün %72.50 ile çimento bileşeni olduğu ve onu sırasıyla PET ve pomza/tabak külü faktörlerinin izlediği tespit edilmiştir.

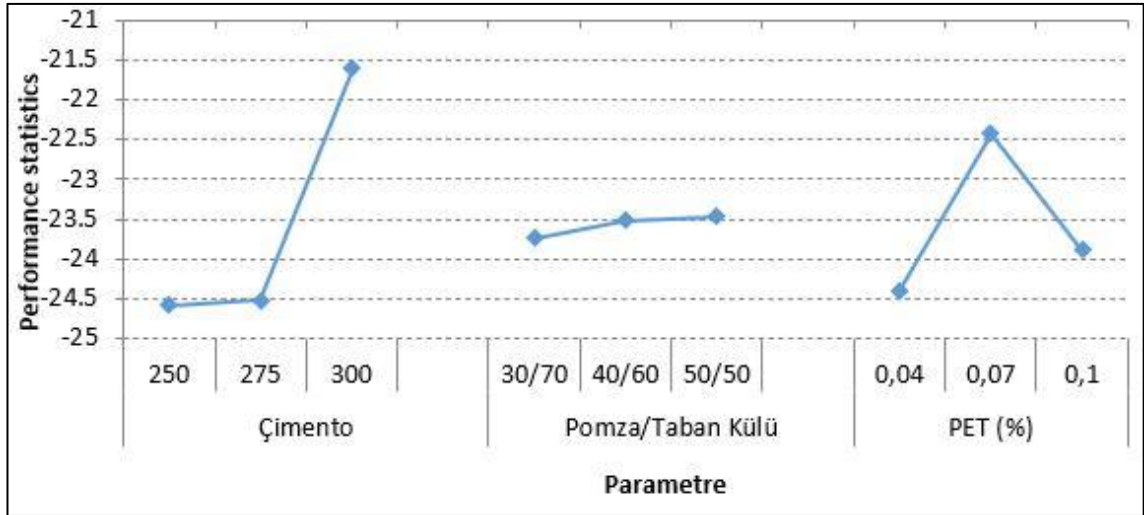
4.10.3. Su emme değerlerinin istatistiksel incelenmesi

Deney tasarımındaki 9 tip numunenin su emme değerlerinden Taguchi tasarımında “daha küçük daha iyidir” performans karakteristiği formülleri kullanılarak elde edilen S/G değerleri Çizelge 4.27’de verilmiştir.

Çizelge 4.27. Numunelerin su emme S/G değerleri

Numune Tipleri	Su Emme değerleri için S/G oranları (dB)
1	-25.13
2	-24.48
3	-24.16
4	-22.90
5	-24.32
6	-26.34
7	-23.19
8	-21.75
9	-19.90

9 tip numunenin su emme varyans analizi sonucu elde edilen performans istatistiği üzerindeki etkileri Şekil 4.27.’de verilmiştir. Sonuçlara göre karışımlarda çimento oranının artmasıyla boşlukların çimento ile kapanarak su emmenin az olmasından dolayı performans değerinin arttığı, pomza/tabak külü oranında ise en iyi değerin 50/50 oranında olmasıyla eşit kullanımın iyi sonuç verdiği, PET oranında ise en düşük oranının en kötü değeri verdiği gözlenirse de 0.07 oranının 0.1’den daha iyi sonuç verdiği gözlemlendiğinden dolayı kesin bir yargıya varılamamaktadır.



Şekil 4.27. Numunelerin su emme değerlerinin performans istatistiği üzerindeki etkisi

Deney tasarımındaki 9 tip numunenin su emme değerlerinin varyans analizi sonuçları Çizelge 4.28’de verilmiştir. Çizelgeye göre anova analizi incelendiğinde üç faktöründe p değerlerinin 0.05’ten büyük olduğu belirlenmiştir. Analiz sonucu 3 faktöründe su emme değerleri üzerinde istatistiksel etkisine yönelik anlamlı bir ilişki tespit edilememiştir. Hipotez testleri açısından analiz incelendiğinde üç faktör için de H_0 hipotezi kabul edilmiştir.

Çizelge 4.28. Numunelerin su emme değerleri için anova analiz sonuçları

Kontrol Faktörleri	S. D	K.T.	Katkı %	K. O	F-Değeri	p-Değeri
Çimento (kg/m^3)	2	42.3301	58.87	21.1651	3.08	0.245
Pomza/Taban Külü (%)	2	0.1475	0.21	0.0738	0.01	0.989
PET (%)	2	15.6709	21.80.	7.8354	1.14	0.467
Hata	2	13.7503	19.12	6.8752		
Toplam	8	71.8988	100			

Çizelge 4.28.’de deney tasarımı kapsamında elde edilen 9 tip numunenin su emme değerlerinde varyansa katkı yüzdesi en yüksek faktörün %58.87 ile çimento bileşeni olduğu ve onu sırasıyla PET ve pomza/tabak külü faktörlerinin izlediği tespit edilmiştir.

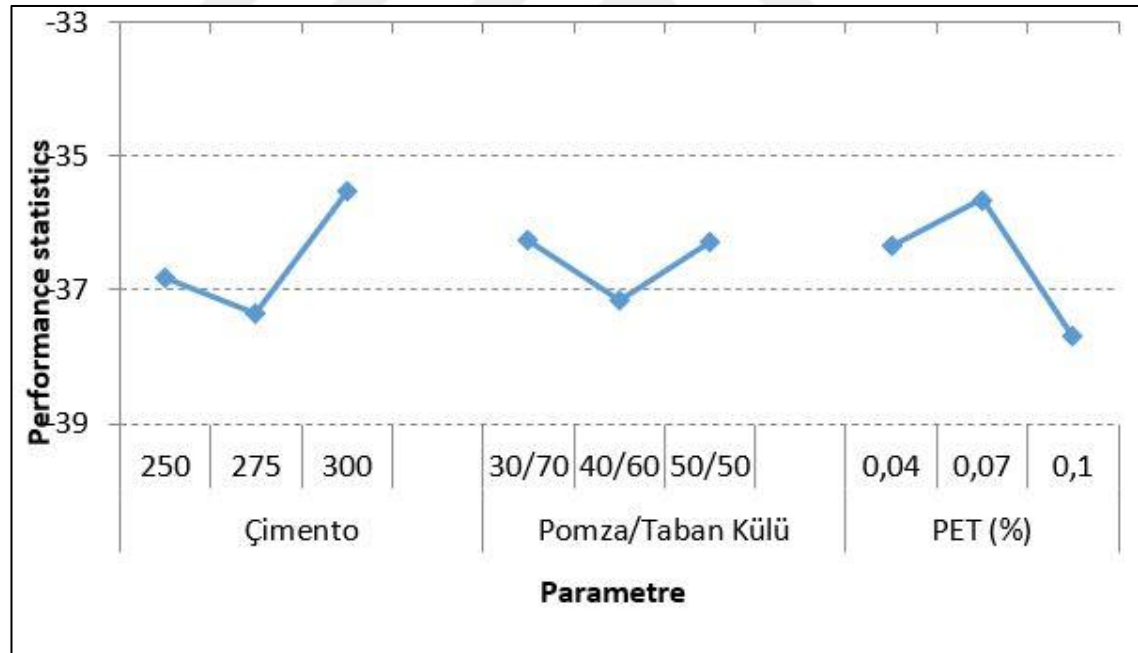
4.10.4. Kılcallık katsayı değerlerinin istatistiksel incelenmesi

Deney tasarımındaki 9 tip numunenin kılcallık katsayıları değerlerinden Taguchi tasarımı “daha küçük daha iyidir” performans karakteristiği formülleri kullanılarak elde edilen S/G değerleri Çizelge 4.29’da verilmiştir.

Çizelge 4.29. Numunelerin su emme ve kılcallık katsayısı S/G değerleri

Numune Tipleri	Kılcallık değerleri için S/G oranları (dB)
1	-35.61
2	-36.22
3	-38.63
4	-37.11
5	-38.38
6	-36.58
7	-36.08
8	-36.87
9	-33.62

9 tip numunenin kılcal su emme katsayısı varyans analizi sonucu elde edilen performans istatistiği üzerindeki etkileri Şekil 4.28.'de verilmiştir. Sonuçlara göre karışımlarda çimento oranının en yüksek olduğu performans değerinin iyi olduğu, pomza/tabak külü oranında ise en kötü değerin 40/60 oranında olmasıyla 30/70 ve 50/50 oranlarının hemen hemen benzer özellik sergilediği, PET oranında ise en fazla oranının en kötü değeri verdiği gözlenirse de 0.07 oranının 0.04'ten daha iyi sonuç verdiği gözlemlendiğinden dolayı kesin bir yargıya varılamamaktadır.

**Şekil 4.28.** Numunelerin kılcal su emme katsayısı değerlerinin performans istatistiği üzerindeki etkisi

Deney tasarımıındaki 9 tip numunenin kılcal su emme katsayısı değerlerinin varyans analizi sonuçları Çizelge 4.30'da verilmiştir. Çizelgeye göre anova analizi incelediğinde üç faktöründe p değerlerinin 0.05'ten büyük olduğu belirlenmiştir. Analiz sonucu 3 faktöründe kılcallık su emme katsayısı değerleri üzerinde istatistiksel etkisine

yönelik anlamlı bir ilişki tespit edilememiştir. Hipotez testleri açısından analiz incelendiğinde üç faktör için de H_0 hipotezi kabul edilmiştir.

Çizelge 4.30. Numunelerin kılcal su emme katsayısı değerleri için anova analiz sonuçları

Kontrol Faktörleri	S. D	K.T.	Katkı %	K. O	F-Değeri	p-Değeri
Çimento (kg/m ³)	2	293.44	28.35	146.72	1.17	0.461
Pomza/Taban Külü (%)	2	86.11	8.32	43.06	0.34	0.744
PET (%)	2	405.14	39.14	202.57	1.62	0.382
Hata	2	250.49	24.20	125.25		
Toplam	8	1035.19	100			

Çizelge 4.30.'da deney tasarımı kapsamında elde edilen 9 tip numunenin kılcallık su emme katsayısı değerlerinde varyansa katkı yüzdesi en yüksek faktörün %39.14 ile PET bileşeni olduğu ve onu sırasıyla çimento ve pomza/tabak külü faktörlerinin izlediği tespit edilmiştir.

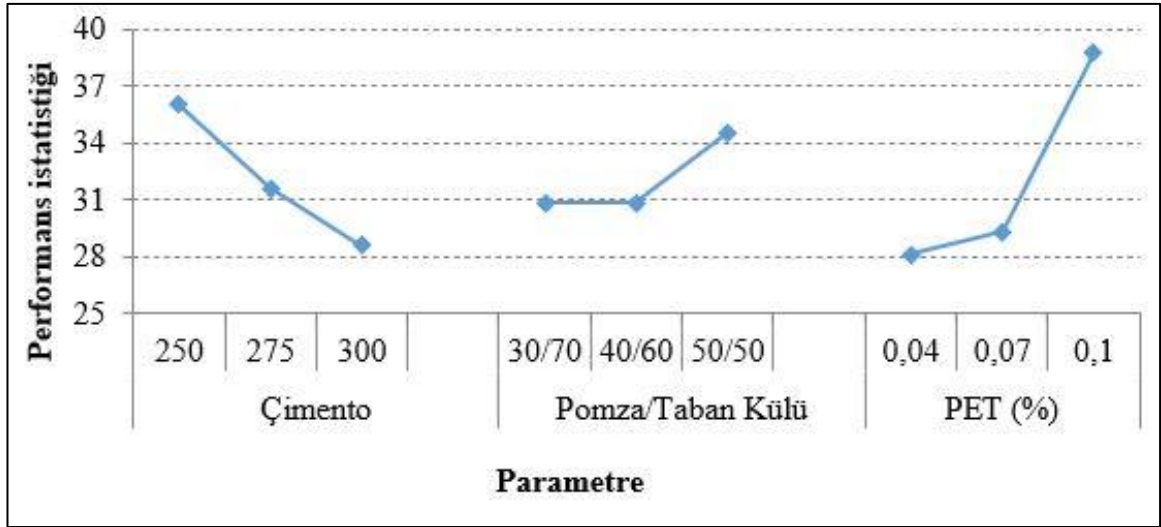
4.10.5. Isıl iletkenlik değerlerinin istatistiksel olarak incelenmesi

Deney tasarımındaki 9 tip numunenin ısı iletkenlik katsayısı değerlerinden Taguchi tasarımında “daha küçük daha iyidir” performans karakteristiği formülleri kullanılarak elde edilen S/G değerleri Çizelge 4.31’de verilmiştir.

Çizelge 4.31. Numunelerin ısı iletkenlik S/G değerleri

Numune Tipleri	Isıl iletkenlik katsayısı değerleri için S/G oranları (dB)
1	31.16
2	28.16
3	48.67
4	31.09
5	37.39
6	26.21
7	30.16
8	26.91
9	28.71

9 tip numunenin ısı iletkenlik katsayısı değerlerinin sonucu elde edilen performans istatistiği üzerindeki etkileri Şekil 4.29.’da verilmiştir. Sonuçlara göre karışımlarda çimento oranının düşmesiyle performans değerinin arttığı, pomza/tabak külü oranının eşitlenmesiyle en iyi performansın olduğu, PET oranının artmasıyla da performansın arttığı gözlenmektedir.



Şekil 4.29. Numunelerin ısı iletkenlik katsayısı değerlerinin performans istatistiği üzerindeki etkisi

Deney tasarımındaki 9 tip numunenin ısı iletkenlik katsayısı değerlerinin varyans analizi sonuçları Çizelge 4.32’de verilmiştir. Çizelgeye göre anova analizi incelediğinde üç faktöründe p değerlerinin 0.05’ten büyük olduğu belirlenmiştir. Analiz sonucu 3 faktöründe ısı iletkenlik katsayısı değerleri üzerinde istatistiksel etkisine yönelik anlamlı bir ilişki tespit edilememiştir. Hipotez testleri açısından analiz incelendiğinde üç faktör için de H_0 hipotezi kabul edilmiştir.

Çizelge 4.32. Numunelerin ısı iletkenlik katsayısı değerleri için anova analiz sonuçları

Kontrol Faktörleri	S.D	K.T.	Katkı %	K.O	F-Değeri	p-Değeri
Çimento (kg/m ³)	2	0.014689	76.15	0.007344	10.84	0.084
Pomza/Taban Külü (%)	2	0.001622	8.41	0.000811	1.20	0.455
PET (%)	2	0.001622	8.41	0.000811	1.20	0.455
Hata	2	0.001356	7.03	0.000678		
Toplam	8	0.019289	100			

Çizelge 4.32.’de deney tasarımı kapsamında elde edilen 9 tip numunenin ısı iletkenlik katsayısı değerlerinde varyansa katkı yüzdesi en yüksek faktörün %76.15 ile çimento bileşeni olduğu ve onu sırasıyla PET ve pomza/tabana külü faktörlerinin eşit yüzde ile izlediği tespit edilmiştir.

4.10.6. Yüksek sıcaklık değerlerinin istatistiksel olarak incelenmesi

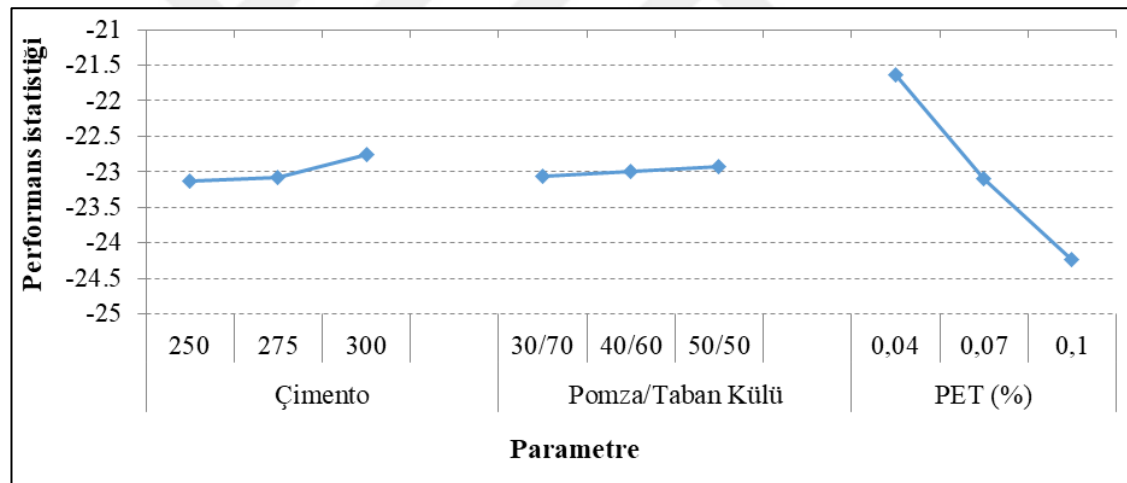
4.10.6.1 Yüksek sıcaklık ağırlık kaybı

Deney tasarımındaki 9 tip numunenin yüksek sıcaklık ağırlık kaybı değerlerinden Taguchi tasarımı “daha küçük daha iyidir” performans karakteristiği formülleri kullanılarak elde edilen S/G değerleri Çizelge 4.33’te verilmiştir.

Çizelge 4.33. Numunelerin yüksek sıcaklık ağırlık kaybı S/G değerleri

Numune Tipleri	Yüksek sıcaklık ağırlık kaybı değerleri için S/G oranları (dB)
1	-21.88
2	-23.39
3	-24.13
4	-23.10
5	-24.35
6	-21.80
7	-24.24
8	-21.22
9	-22.83

9 tip numunenin yüksek sıcaklık ağırlık kaybı değerlerinin sonucu elde edilen performans istatistiği üzerindeki etkileri Şekil 4.30'da verilmiştir. Sonuçlara göre karışımlarda çimento oranının artmasıyla performans değerinin arttığı, pomza/tabak külü oranının eşitlenmesiyle en iyi performansın olduğu ama diğer oranlar arasında da çok büyük farkın olmadığı, PET oranının artmasıyla da performansın azaldığı gözlenmektedir.

**Şekil 4.30.** Numunelerin yüksek sıcaklık ağırlık kaybı değerlerinin performans istatistiği üzerindeki etkisi

Deney tasarımıındaki 9 tip numunenin 600 °C -800 °C ve 1000 °C'deki yüksek sıcaklık ağırlık kaybı değerlerinin varyans analizi sonuçları Çizelge 4.34'te verilmiştir. Çizelgeye göre incelediğinde iki faktörün p değerlerinin 0.05'ten büyük olduğu belirlenmiştir. Analiz sonucunda çimento ve pomza/tabak külü 600 °C -800 °C ve 1000 °C'deki ağırlık kaybı değerleri üzerinde istatistiksel etkisine yönelik anlamlı bir ilişki tespit edilememiştir. Ancak analiz sonucunda PET faktörü p değerinin 0.05'ten küçük olduğu belirlenmiştir. PET faktörünün 600 °C -800 °C ve 1000 °C'deki ağırlık kaybı değerleri üzerinde istatistiksel etkisine yönelik anlamlı bir ilişki tespit edilmiştir. Hipotez testleri açısından analiz incelendiğinde çimento ve pomza/tabak külü faktörleri için H_0 hipotezi kabul edilirken, PET faktörü için H_0 hipotezi reddedilerek H_1 hipotezi kabul edilmiştir.

Çizelge 4.34. Numunelerin yüksek sıcaklık ağırlık kaybı değerleri için anova analiz sonuçları

Kontrol Faktörleri	S. D	K.T.	Katkı %	K. O	F-Değeri	p-Değeri
Çimento (kg/m ³)	2	0.4688	1.73	0.2344	1.00	0.501
Pomza/Taban Külü (%)	2	0.2086	0.77	0.1043	0.44	0.693
PET (%)	2	25.9284	95.76	12.9642	55.10	0.018
Hata	2	0.4705	1.74	0.2353		
Toplam	8	27.0764	100			

Çizelge 4.34.'te deney tasarımı kapsamında elde edilen 9 tip numunenin 600 °C - 800 °C ve 1000 °C'deki yüksek sıcaklık ağırlık kaybı değerlerinde varyansa katkı yüzdesi en yüksek faktörün %95.76 ile PET bileşeni olduğu ve onu sırasıyla çimento ve pomza/tabana külü faktörlerinin izlediği tespit edilmiştir.

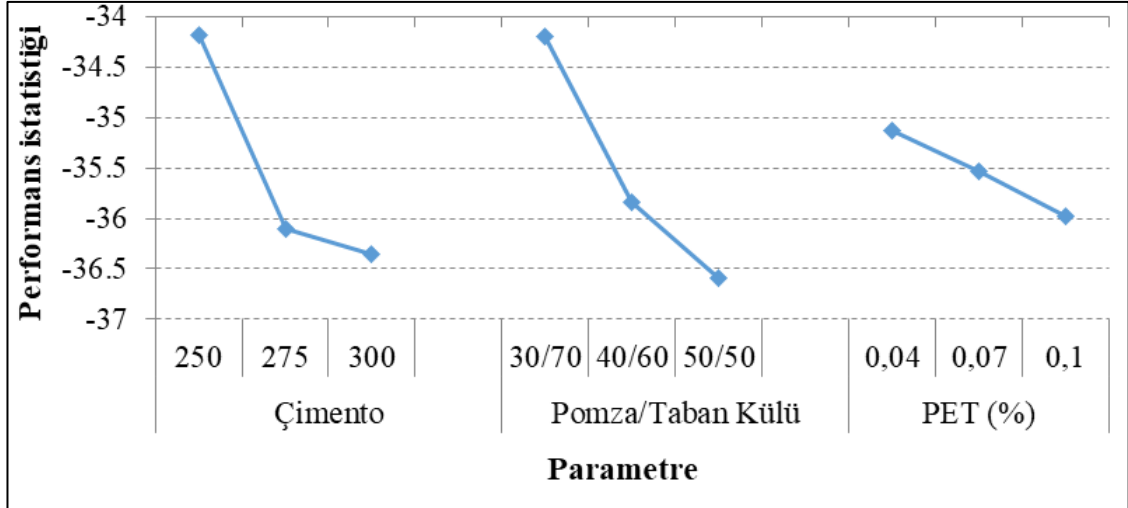
4.10.6.2. Yüksek sıcaklık dayanım kaybı

Deney tasarımındaki 9 tip numunenin 600 °C'deki yüksek sıcaklık dayanım kaybı değerlerinden Taguchi tasarımıyla “daha küçük daha iyidir” performans karakteristiği formülleri kullanılarak elde edilen S/G değerleri Çizelge 4.35'te verilmiştir.

Çizelge 4.35. Numunelerin yüksek sıcaklık dayanım kaybı S/G değerleri

Numune Tipleri	Yüksek sıcaklık ağırlık kaybı değerleri için S/G oranları
1	-32.55
2	-34.36
3	-35.65
4	-34.73
5	-36.96
6	-36.63
7	-35.32
8	-36.21
9	-37.51

9 tip numunenin 600 °C'deki yüksek sıcaklık dayanım kaybı değerlerinin sonucu elde edilen performans istatistiği üzerindeki etkileri Şekil 4.31'de verilmiştir. Sonuçlara göre karışımlarda çimento oranının artmasıyla performans değerinin düştüğü, pomza/tabana külü oranında taban külü oranının fazla olmasıyla performans değerinin arttığı, PET oranının artmasıyla da performansın azaldığı gözlenmektedir.



Şekil 4.31. Numunelerin yüksek sıcaklık dayanım kaybı değerlerinin performans istatistiği üzerindeki etkisi

Deney tasarımındaki 9 tip numunenin 600 °C’deki yüksek sıcaklık dayanım kaybı değerlerinin varyans analizi sonuçları Çizelge 4.36’da verilmiştir. Çizelgeye göre anova analizi incelediğinde üç faktörden ikisinin p değerlerinin 0.05’ten küçük olduğu belirlenmiştir. Analiz sonucunda çimento ve pomza/tabak külü faktörlerinin 600 °C’deki dayanım değerleri üzerinde istatistiksel etkisine yönelik anlamlı bir ilişki tespit edilmiştir. Ancak PET faktörünün p değerinin 0.05 değerinden büyük olduğu belirlenmiştir. Bu kapsamda analiz sonucu PET faktörünün 600 °C’deki dayanım değerleri üzerinde istatistiksel etkisine yönelik anlamlı bir ilişki tespit edilememiştir. Hipotez testleri açısından analiz incelendiğinde PET faktörü için H_0 hipotezi kabul edilirken, çimento ve pomza/tabak külü faktörleri için H_0 hipotezi reddedilerek H_1 hipotezi kabul edilmiştir.

Çizelge 4.36. Numunelerin 600 °C’deki yüksek sıcaklık dayanım kaybı değerleri için anova analiz sonuçları

Kontrol Faktörleri	S. D	K.T.	Katkı %	K. O	F-Değeri	p-Değeri
Çimento (kg/m ³)	2	364.88	44.57	182.442	20.74	0.046
Pomza/Taban Külü (%)	2	400.88	48.97	200.441	22.79	0.042
PET (%)	2	35.31	4.31	17.653	2.01	0.333
Hata	2	17.59	2.15	8.795		
Toplam	8	818.66	100			

Çizelge 4.36.’da deney tasarımı kapsamında elde edilen 9 tip numunenin 600 °C’deki yüksek sıcaklık dayanım kaybı değerlerinde varyansa katkı yüzdesi en yüksek faktörün % 48.97 ile pomza/tabak külü bileşeni olduğu ve onu sırasıyla çimento ve PET faktörlerinin izlediği tespit edilmiştir.

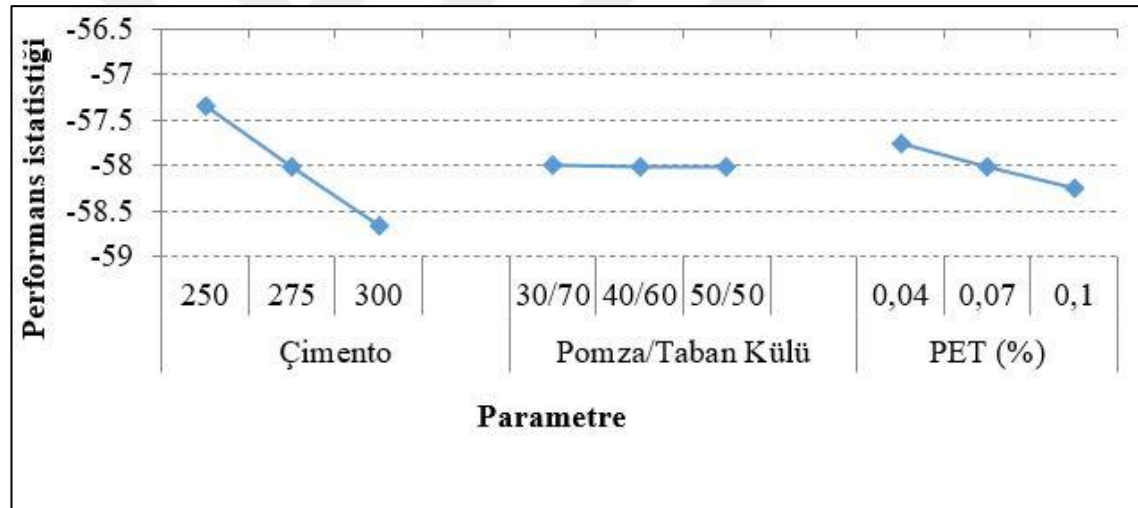
4.10.7. Maliyet analizi değerlerinin istatistiksel incelenmesi

Deney tasarımındaki 9 tip numunenin birim maliyet fiyatlarından Taguchi tasarımı “daha küçük daha iyidir” performans karakteristiği formülleri kullanılarak elde edilen S/G değerleri Çizelge 4.37’de verilmiştir.

Çizelge 4.37. Numunelerin 1m³ hammadde maliyet S/G değerleri

Numune Tipleri	Maliyet için S/G Oranları (dB)
1	-57.08
2	-57.34
3	-57.60
4	-58.03
5	-58.24
6	-57.76
7	-58.87
8	-58.42
9	-58.65

9 tip numunenin maliyet değerlerinin sonucu elde edilen performans istatistiği üzerindeki etkileri Şekil 4.32’de verilmiştir. Sonuçlara göre karışımlarda çimento oranının düşmesiyle performans değerinin arttığı, pomza/tabana külü oranının performansta çok etken olmadığı, PET oranının artmasıyla da performansın düştüğü gözlenmektedir.

**Şekil 4.32.** Numunelerin maliyet değerlerinin performans istatistiği üzerindeki etkisi

Deney tasarımıındaki 9 tip numunenin maliyet değerlerinin varyans analizi sonuçları Çizelge 4.38’de verilmiştir. Çizelgeye göre anova analizi incelediğinde üç faktörden ikisinin p değerlerinin 0.05’ten küçük olduğu belirlenmiştir. Analiz sonucunda çimento ve PET faktörlerinin maliyet değerleri üzerinde istatistiksel etkisine yönelik anlamlı bir ilişki tespit edilmiştir. Ancak pomza/tabana külü faktörü p değerinin 0.05 değerinden büyük olduğu belirlenmiştir. Bu kapsamda analiz sonucu pomza/tabana külü faktörünün maliyet değerleri üzerinde istatistiksel etkisine yönelik anlamlı bir ilişki tespit edilememiştir. Hipotez testleri açısından analiz incelendiğinde pomza/tabana külü faktörü için Ho hipotezi kabul edilirken, çimento ve PET faktörleri için Ho hipotezi reddedilerek H₁ hipotezi kabul edilmiştir.

Çizelge 4.38. Numunelerin maliyet değerleri için anova analiz sonuçları

Kontrol Faktörleri	S. D	K.T.	Katkı %	K. O	F-Değeri	p-Değeri
Çimento (kg/m ³)	2	21432.8	87.82	10716.4	12301.97	0.000
Pomza/Taban Külü (%)	2	1.9	0.01	1.0	1.11	0.474
PET (%)	2	2967.7	12.16	1438.8	1703.38	0.001
Hata	2	1.7	0.01	0.9		
Toplam	8	24404.1	100			

Çizelge 4.38.'de deney tasarımı kapsamında elde edilen 9 tip numunenin maliyet değerlerinde varyansa katkı yüzdesi en yüksek faktörün %87.82 ile çimento bileşeni olduğu ve onu sırasıyla PET ve pomza/tabak külü faktörlerinin izlediği tespit edilmiştir.

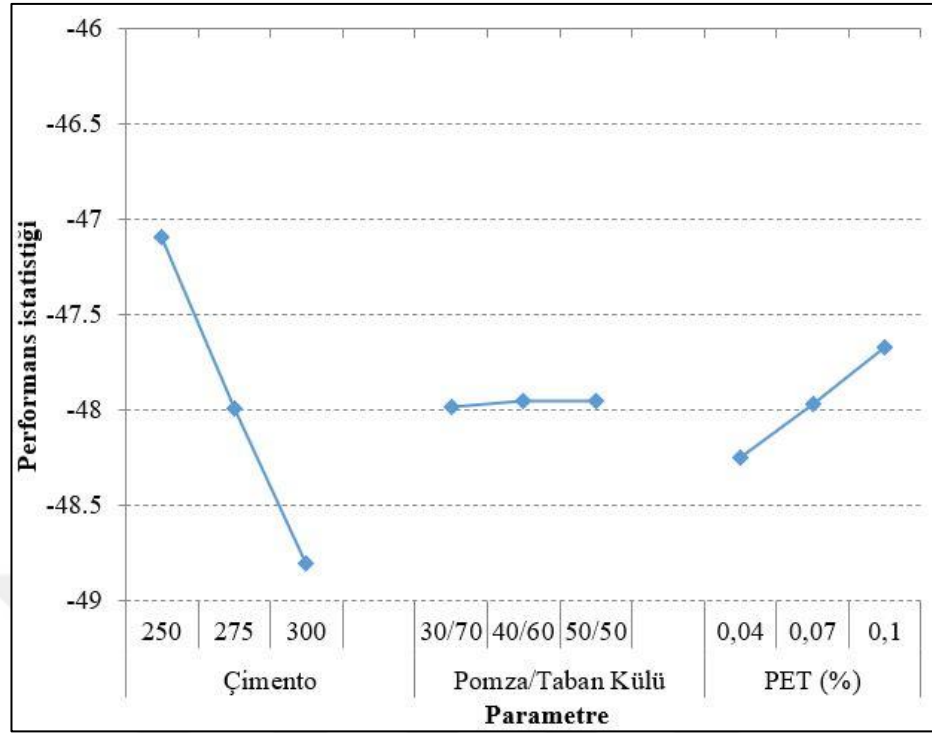
4.10.8. CO₂ eşdeğer (CO₂-e) emisyonu değerlerinin istatistiksel incelenmesi

Deney tasarımındaki 9 tip numunenin 1 m³ malzeme için CO₂-e emisyon değerleri Taguchi tasarımında “daha küçük daha iyidir” performans karakteristiği formülleri kullanılarak elde edilen S/G değerleri Çizelge 4.39’da verilmiştir.

Çizelge 4.39. Numunelerin 1 m³ malzeme için CO₂-e emisyon S/G değerleri

Numune Tipleri	CO ₂ emisyonu için S/G Oranları (dB)
1	-47.42
2	-47.08
3	-46.77
4	-47.99
5	-47.71
6	-48.27
7	-48.53
8	-49.07
9	-48.82

9 tip numunenin CO₂ emisyon değerlerinin sonucu elde edilen performans istatistiği üzerindeki etkileri Şekil 4.33’te verilmiştir. Sonuçlara göre karışımlarda çimento oranının düşmesiyle performans değerinin büyük oranlarda arttığı, pomza/tabak külü oranının performansta çok etken olmadığı, PET oranının artmasıyla da performansın arttığı gözlenmektedir. CO₂ emisyon değerlerinde çimento ve PET agrega atıklarının kullanım miktarının önemli olduğu söylenebilmektedir.



Şekil 4.33. Numunelerin CO₂-e emisyon değerlerinin performans istatistiği üzerindeki etkisi

Deney tasarımındaki 9 tip numunenin CO₂-e emisyon değerlerinin varyans analizi sonuçları Çizelge 4.40'ta verilmiştir. Çizelgeye göre anova analizi incelendiğinde üç faktörden ikisinin p değerlerinin 0.05'ten küçük olduğu belirlenmiştir. Analiz sonucunda çimento ve PET faktörlerinin CO₂-e emisyon değerleri üzerinde istatistiksel etkisine yönelik anlamlı bir ilişki tespit edilmiştir. Ancak pomza/tabak külü faktörü p değerinin 0.05 değerinden büyük olduğu belirlenmiştir. Bu kapsamda analiz sonucu pomza/tabak külü faktörünün CO₂-e emisyon değerleri üzerinde istatistiksel etkisine yönelik anlamlı bir ilişki tespit edilememiştir. Hipotez testleri açısından analiz incelendiğinde pomza/tabak külü faktörü için Ho hipotezi kabul edilirken, çimento ve PET faktörleri için Ho hipotezi reddedilerek H₁ hipotezi kabul edilmiştir.

Çizelge 4.40. Numunelerin CO₂-e emisyon değerleri için anova analiz sonuçları

Kontrol Faktörleri	S. D	K.T.	Katkı %	K. O	F-Değeri	p-Değeri
Çimento (kg/m ³)	2	3650.67	89.74	1825.33	5476.00	0.000
Pomza/Taban Külü (%)	2	0.00	0.00	0.00	0.00	1.000
PET (%)	2	416.67	10.24	208.33	625.00	0.002
Hata	2	0.67	0.02	0.33		
Toplam	8	4068.00	100.00			

Çizelge 4.40.'da deney tasarımı kapsamında elde edilen 9 tip numunenin CO₂-e emisyon değerlerinde varyansa katkı yüzdesi en yüksek faktörün %89.74 ile çimento bileşeni olduğu ve onu sırasıyla PET faktörünün izlediği tespit edilmiştir.

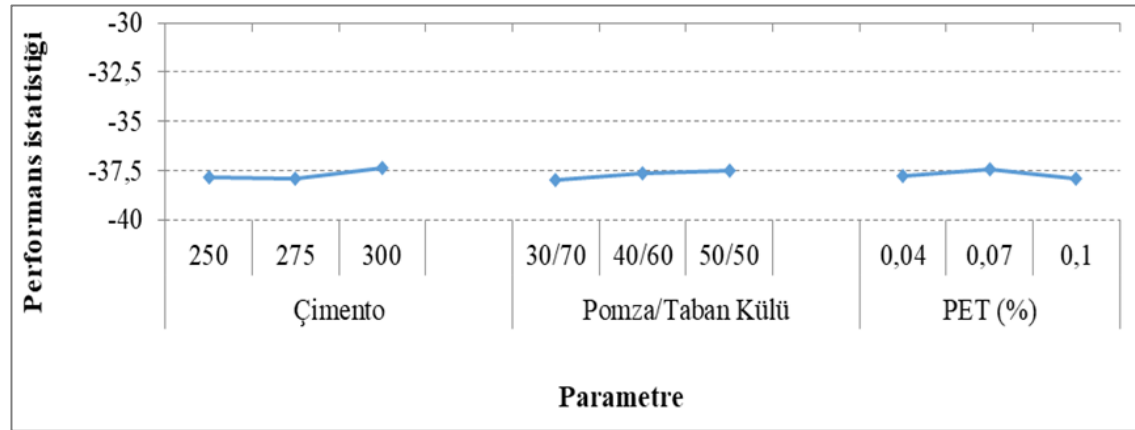
4.10.9. Ses iletim değerlerinin istatistiksel incelenmesi

Deney tasarımındaki 9 tip numunenin ses iletim değerleri Çizelge 4.18’de verilmiştir. 9 tip numunenin ses iletim değerleri Taguchi tasarımında “daha küçük daha iyidir” performans karakteristiği formülleri kullanılarak elde edilen Sinyal/Gürültü (S/G) değerleri Çizelge 4.41’de verilmiştir.

Çizelge 4.41. Numunelerin ses iletim S/G değerleri

Numune Tipleri	Ses iletim değerleri için S/G oranları (dB)
1	-37.94
2	-37.54
3	-38.07
4	-38.13
5	-37.71
6	-37.78
7	-37.84
8	-37.61
9	-36.53

9 tip numunenin ses iletim sonuçlarının elde edilen performans istatistiği üzerindeki etkileri Şekil 4.34’te verilmiştir. Sonuçlara göre karışımlarda çimento oranının artmasıyla ses iletim performans değerinin arttığı, pomza/tabak külü oranında pomzanın oranının artmasıyla artış olduğu, PET oranının da 0,07 değerinin en iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.34. Numunelerin ses iletim değerlerinin performans istatistiği üzerindeki etkisi

Deney tasarımındaki 9 tip numunenin ses iletim değerlerinin varyans analizi sonuçları Çizelge 4.42’de verilmiştir. Çizelgeye göre anova analizi incelediğinde üç faktöründe p değerlerinin 0.05’ten büyük olduğu belirlenmiştir. Analiz sonucu 3 faktöründe ses seviye değerlerinin üzerinde istatistiksel etkisine yönelik anlamlı bir ilişki tespit edilememiştir. Hipotez testleri açısından analiz incelendiğinde üç faktör için de Ho hipotezi kabul edilmiştir.

Çizelge 4.42. Numunelerin ses iletim değerleri için anova analiz sonuçları

Kontrol Faktörleri	S. D	K.T.	Katkı %	K. O	F-Değeri	p-Değeri
Çimento (kg/m ³)	2	40.54	31.55	20.27	1.26	0.443
Pomza/Taban Külü (%)	2	29.74	23.14	14.87	0.92	0.520
PET (%)	2	26.02	20.25	13.01	0.81	0.553
Hata	2	32.18	25.05	16.09		
Toplam	8	128.48	100			

Çizelge 4.42 deney tasarımı kapsamında elde edilen 9 tip numunenin ses iletim değerlerinde varyansa katkı yüzdesi en yüksek faktörün %31.55 ile çimento bileşeni olduğu ve onu sırasıyla pomza/tabana külü ve PET faktörlerinin izlediği tespit edilmiştir.

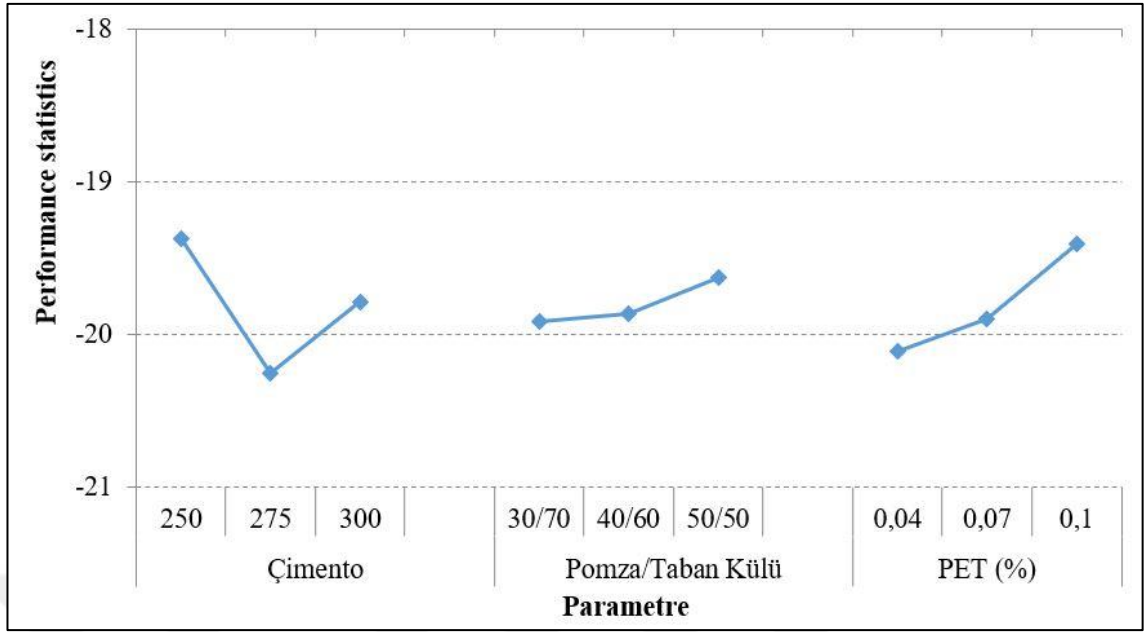
4.10.10. Taguchi tasarımı istatistiksel değerlendirme sonuçları

Bu bölümde Taguchi tasarımıya yönelik incelenen parametrelerden ses iletim parametresi dışında kalan parametreler 100 üzerinden %'lik etki değeri eşit belirlenerek performans istatistiğine yönelik S/G değerlerinin ortalamaları hesaplanmıştır. Hesaplama sırasında oluşturulan bilgiler ışığında Çizelge 4.43'te karışıma değişken parametrelerden olan çimento, pomza/tabana külü ve PET malzeme oranlarının eşit şekilde etki yüzdesi senaryo sonucu verilmiştir.

Çizelge 4.43. Numunelerde eşit oranlarda etki yüzdeli malzeme senaryo sonucu S/G değerleri ortalaması

S/G Değerleri (dB)										
Numune Tipleri	Basınç Dayanımı (28 günlük)	Kuru Birim Ağırlık	Su Emme	Kılcallık Katsayısı	Isıl iletk.	Yüksek Sıcaklıkta Dayanım Kaybı	Yüksek Sıcaklıkta Ağırlık Kaybı	Maliyet	CO ₂ Emisyonu	Ortalama S/G
1	14.27	-2.41	-25.13	-35.61	31.16	-32.55	-21.88	-57.08	-47.42	-19.627
2	16.88	-2.48	-24.48	-36.22	28.16	-34.36	-23.39	-57.34	-47.08	-20.035
3	14.51	-2.28	-24.16	-38.63	48.67	-35.65	-24.13	-57.60	-46.77	-18.449
4	14.40	-2.57	-22.90	-37.11	31.09	-34.74	-23.09	-58.03	-47.99	-20.106
5	17.23	-2.50	-24.32	-38.38	37.39	-36.96	-24.35	-58.24	-47.71	-19.761
6	15.69	-2.57	-26.34	-36.58	26.21	-36.63	-21.80	-57.76	-48.27	-20.894
7	18.58	-2.67	-23.19	-36.08	30.16	-35.32	-24.24	-58.87	-48.53	-20.020
8	21.70	-3.29	-21.75	-36.87	26.91	-36.21	-21.22	-58.42	-49.07	-19.801
9	20.06	-3.39	-19.90	-33.62	28.71	-37.51	-22.83	-58.65	-48.82	-19.550
Etki Yüzdesi (%)	11.11	11.11	11.11	11.11	11.11	11.11	11.11	11.11	11.11	100

Performans istatistiğine yönelik S/G değerlerinin ortalamalarının hesaplanmasında etki parametreleri %'leri eşit kabul edilmiştir. Elde edilen ortalama S/G değerlerine yönelik 9 numune değerlerinin performans istatistiği üzerindeki etkisi Şekil 4.35'te verilmiştir.



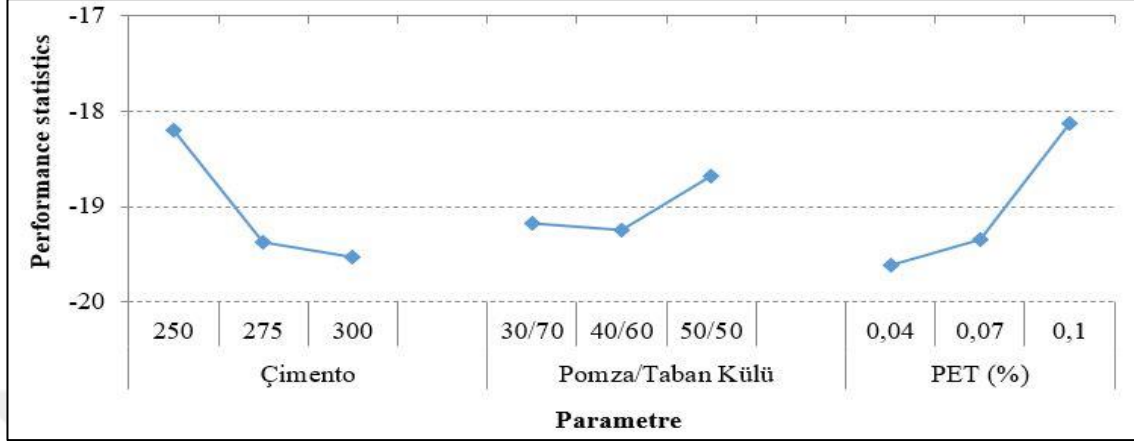
Şekil 4.35. Numunelerin eşit oranlarda etki yüzdeli malzeme senaryo sonucu değerlerinin performans istatistiği üzerindeki etkisi

Taguchi tasarımına yönelik kullanılan parametrelere 100 üzerinden farklı %'lik etki değerleri belirlenerek performans istatistiğine yönelik S/G değerlerinin ortalamaları hesaplanmıştır. Taguchi tasarım metodunda üretilecek malzemenin önemine göre ağırlık oranının belirlenmesi önemlidir. Tez çalışması kapsamında Taguchi metodunda verilen ağırlık oranları piyasada satışı olan duvar yapı bloklarındaki önem derecelerine göre belirlenmiştir. Hesaplama sonrasında oluşturulan bilgiler ışığında Çizelge 4.44'te karışıma değişken parametrelerden olan çimento, pomza/tabak külü ve PET malzeme oranlarının farklı şekilde etki yüzdesi senaryo sonucu verilmiştir.

Çizelge 4.44. Numunelerde farklı oranlarda etki yüzdeli malzeme senaryo sonucu S/G değerleri ortalaması

S/G Değerleri (dB)										
Numune Tipleri	Basınç Dayanımı (28 günlük)	Kuru Birim Ağırlık	Su Emme	Kılcal Katsa	Isıl iletkenlik	Yüksek Sıcaklıkta Dayanım Kaybı	Yüksek Sıcaklıkta Ağırlık Kaybı	Maliyet	CO ₂ Emisyonu	Ortalama S/G
1	14.27	-2.41	-25.13	-35.61	31.16	-32.55	-21.88	-57.08	-47.42	-18.772
2	16.88	-2.48	-24.48	-36.22	28.16	-34.36	-23.39	-57.34	-47.08	-19.449
3	14.51	-2.28	-24.16	-38.63	48.67	-35.65	-24.13	-57.60	-46.77	-16.361
4	14.40	-2.57	-22.90	-37.11	31.09	-34.74	-23.09	-58.03	-47.99	-19.250
5	17.23	-2.50	-24.32	-38.38	37.39	-36.96	-24.35	-58.24	-47.71	-18.537
6	15.69	-2.57	-26.34	-36.58	26.21	-36.63	-21.80	-57.76	-48.27	-20.318
7	18.58	-2.67	-23.19	-36.08	30.16	-35.32	-24.24	-58.87	-48.53	-19.491
8	21.70	-3.29	-21.75	-36.87	26.91	-36.21	-21.22	-58.42	-49.07	-19.739
9	20.06	-3.39	-19.90	-33.62	28.71	-37.51	-22.83	-58.65	-48.82	-19.347
Etki Yüzdesi (%)	5.17	15.52	8.62	8.62	17.24	8.62	8.62	15.52	12.07	100

Performans istatistiğine yönelik S/G değerlerinin ortalamalarının hesaplanmasında etki parametreleri %'leri farklı kabul edilmiştir. Elde edilen ortalama S/G değerlerine yönelik 9 numune değerlerinin performans istatistiği üzerindeki etkisi Şekil 4.36'da verilmiştir.



Şekil 4.36. Numunelerin farklı oranlarda etki yüzdeli malzeme senaryo sonucu değerlerinin performans istatistiği üzerindeki etkisi

Tez çalışması kapsamında farklı etki yüzdeleri aşağıdaki performans ölçütleri ile değerlendirilmiştir.

- Basınç Dayanımı (28 günlük): Deney kombinasyonlarına bağlı olarak değişen değerlerde görülmektedir. Daha yüksek basınç dayanımı genellikle daha iyi performans gösterir.
- Kuru Birim Ağırlık: Deney kombinasyonlarına bağlı olarak değişen değerlerde görülmektedir. Daha düşük kuru birim ağırlık genellikle daha iyi performans gösterir.
- Su Emme: Deney kombinasyonlarına bağlı olarak değişen değerlerde görülmektedir. Daha düşük su emme genellikle daha iyi performans gösterir.
- Kılcallık Katsayısı: Deney kombinasyonlarına bağlı olarak değişen değerlerde görülmektedir. Daha düşük kılcallık katsayısı genellikle daha iyi performans gösterir.
- Isıl İletkenlik: Deney kombinasyonlarına bağlı olarak değişen değerlerde görülmektedir. Daha düşük ısı iletkenlik genellikle daha iyi performans gösterir.
- Yüksek Sıcaklık: Deney kombinasyonlarına bağlı olarak değişen değerlerde görülmektedir. Daha düşük yüksek sıcaklık dayanım ve ağırlık kaybı genellikle daha iyi performans gösterir.
- Maliyet: Deney kombinasyonlarına bağlı olarak değişen değerlerde görülmektedir. Daha düşük maliyet genellikle daha iyi performans gösterir.

- CO₂ eşdeğer (CO₂ -e) emisyonu: Deney kombinasyonlarına bağlı olarak değişen değerlerde görülmektedir. Daha düşük CO₂ eşdeğer (CO₂ -e) emisyonu genellikle daha iyi performans gösterir.

Deney kombinasyonlarına bağlı olarak değişkenlik gösteren değerlerle karşılaşılmaktadır. Ortalama S/G değeri, genel performansın bir göstergesi olarak hizmet vermektedir.

Etki yüzdeleri ve puanlama değerleri, her bir performans ölçütünün toplam performans üzerindeki katkısını ve önemini göstermektedir. Etki yüzdeleri, performans ölçütlerinin toplam etki içindeki oranını ifade ederken, puanlama değerleri daha somut bir puanlama sistemi kullanarak performansını değerlendirir.

Tablodaki verilere bakarak, çeşitli deney kombinasyonlarının performans ölçütlerindeki değişkenlikler gözlemlenebilmektedir. Bu veriler, deney kombinasyonlarının belirli özelliklere sahip malzemelerin performansını nasıl etkilediğini anlamak için kullanılır.

Genel olarak, 28 günlük sürelerdeki S/G oranları, 7 günlük sürelerdeki oranlardan daha yüksektir. Bu, 28 günlük süre boyunca basınç değerlerinin arttığını ve gürültü seviyelerinin de arttığını göstermektedir. Numune 8 ve numune 9, 28 günlük sürelerde en yüksek S/G oranlarına sahiptir. Bu, basınç değerlerinin 28 günlük süre boyunca en fazla arttığı ve gürültü seviyelerinin diğer deneylere göre daha yüksek olduğu anlamına gelir.

Çimento oranının artmasıyla su içinde birim ağırlık ve doymuş kuru yüzey ağırlık değerlerinin genellikle arttığı görülmektedir. Örneğin, Tip 9 en yüksek su içinde birim ağırlık değeri olan 642.70 gr' a ve doymuş kuru yüzey ağırlığı olan 1628.43 gr' a sahiptir.

Genel olarak, deneyler arasında farklı S/G oranları görülmektedir. Bu, deneylerin farklı parametreler altında gerçekleştirildiğini ve farklı sonuçlar elde edildiğini göstermektedir. Verilere dayanarak, deneyde çimento oranının artmasıyla birlikte genel olarak su emme değerlerinin azaldığı görülmektedir. Örneğin, Tip 9 en düşük su emme değeri olan -19.90 dB' ye sahiptir.

Benzer şekilde, kılcallık değerleri için de çimento oranının artmasıyla birlikte genel olarak azalma eğilimi gözlenmektedir. Tip 3, kılcallık açısından en düşük değeri (-38.63 dB) temsil etmektedir.

Harç oranının artmasıyla ısı iletkenlik katsayısının arttığı. Bir örnek olarak, Tip 9'un ısı iletkenlik katsayısı en yüksek değer olan 0.4100 W/mK' ya sahip olduğu görülebilir.

Sıcaklık dayanım kaybında ve ağırlığında da performans istatistiği incelendiğinde PET oranının artmasıyla dayanım ve ağırlık kaybının düşüşünde önemli etken olduğu gözlemlenmiştir. Bu sebeple en düşük veriler PET oranı fazla olan numunelerde çıkmıştır.

Maliyet performans istatistiği incelendiğinde çimento oranının artmasıyla maliyetin önemli ölçüde arttığı, bu sebeple kompozisyonda en etken malzeme olduğu

gözlemlenmiştir. Atık katkılarının ilavesiyle çimento miktarındaki azalmayla maliyetinde azalacağı gözlemlenmiştir.

CO₂ eşdeğer (CO₂-e) emisyonu incelendiğinde çimento oranının artmasıyla CO₂ eşdeğer (CO₂ -e) emisyonu önemli ölçüde arttığı, bu sebeple kompozisyonda en etken malzeme olduğu gözlemlenmiştir. İkinci etken malzemedeki PET agrega malzemesidir. Atık katkılarının ilavesiyle çimento miktarındaki azalmayla CO₂ eşdeğer (CO₂-e) emisyonunda azalacağı gözlemlenmiştir. Bu sebeple tip 3 en az CO₂ eşdeğer (CO₂-e) emisyonuna sahiptir.

Şekil 4.37 ve Şekil 4.38 incelendiğinde yapılan test ve analiz sonuçlarından elde edilen verilerin istatistiği üzerinden aynı etki yüzdeleri de verilse farklı yüzdelerde verilse en optimum değerlerin çimentoda 250 (kg/m³), pomza/tabana külünde 50/50 ve PET değerinde ise % 0.1 olduğu tespit edilmiştir. Deney tasarımı verileri ile yapılan karşılaştırmada elde edilen kombinasyonun deney tasarımında tip 3 numunesi olduğu gözlemlenmiştir. Bu kapsamda Taguchi tasarımı işlemleri sürecinde doğrulama deneyleri yapılması ihtiyacına gerek kalmadan ticari boyutlarda prototip üretimine yönelik çalışmalar yapılabilmektedir.

4.11. Ticari Prototip Çalışması

Taguchi Metoduyla gerçekleştirilen deneylere, test-analiz bulgularına ve hesaplanan performans istatistiği sonuçlarına göre en optimum numune formülasyonunun tip 3 olduğu belirlenmiştir. Taguchi tasarımı sonrası tip 3'ün optimize formülasyon değerleri ile sırasıyla 80 x 100 x 200 mm, 200 x 100 x 350 mm, 200 x 150 x 350 mm ve 200 x 200 x 350 mm boyutlarındaki çelik kalıplar kullanılarak ticari prototip üretimleri Şekil 3.21'de verilen sistematik ile gerçekleştirilmiştir. Tez çalışması kapsamında elde edilen ticari boyutlardaki tip 3 formülasyonuna sahip ticari prototip görselleri Şekil 4.37'de verilmiştir.



Şekil 4.37. Ticari prototip görselleri

5. TARTIŞMA

Türkiye'de, ister alçak ister yüksek katlı yapılar yapılsın çoğunlukla yerinde betonarme yapısal çerçeveler ile son on yılda kullanımı genişletilen ateşlenmiş kil içi boş tuğlalarla, otoklavlanmış gaz beton bloklarla veya pomza agregası beton bloklardan dolgu yığma duvarlarla inşa edilmektedir (Kus vd. 2013). Muadil olarak karşılaştırılan ürünlerden tuğla; killi toprak, kum veya diğer toz katkı maddelerinin ilâve edilerek yüksek sıcaklıkta pişirilmesiyle elde edilir. Tuğla üretim prosesinde yüksek sıcaklık için yüksek enerji tüketimi vardır. Sera etkisi yapıcı gazlar, fosil yakıtların fırını ısıtmak amacıyla kullanılmasıyla çevreye yayılmaktadır. Verimli tarım arazileri, kil sağlamak için tahrip edilmektedir. Bims bir diğer ismi de pomza olan taşların granülometrik olarak parçalanması ile elde edilen agregalar, çimento, su ve gerektiğinde katkı maddeleri de ilave edilerek yüksek basınç ve vibrasyon altında kalıplarda preslenerek elde edilir. Bims üretiminde doğal kaynakların aşırı kullanımı söz konusudur. Polimer katkılı bağlayıcının kullanılması da çevre için zararlı bir malzemenin üretimine ve kullanımına neden olmaktadır. Gaz beton, silis kumu, çimento, kireç, alüminyum tozu ve suyun karışımı ile oluşturulan harcın, basınçlı buhar altında sertleşmesi ile oluşur. Gaz beton blokların yapımında da fazla doğal malzeme kullanımı vardır ve diğer ürünlere göre çok pahalıdır. Özellikle 21. yy. da plastik atıklarla duvar malzemelerinin yapıldığı bilinmekle birlikte çok fazla satışı bulunmamaktadır. Plastik atıklarla yapılan duvar bloklarından Polli-Brick blok PET atıklarının, Conceptos Plastico blok plastik atıkların eritilmesi ve yeniden kalıplanması ile yapılmaktadır. Byblock, tüm plastiklerin sıkıştırılması ile yapılmaktadır.

Çalışma kapsamında uygun optimizasyon olarak kabul edilen 3. tip formülasyon ile üretilen yapı bloğu, atık fazlalığından dolayı dünya çevre sorunlarından olan PET ve taban külü atıklarının, çimento, su ve pomza agregasıyla karıştırılmasıyla elde edilecektir. Yapı blokları buharsız, ısı enerjisi kullanılmadan, basınç etkisi ile sıkıştırma, presleme prosesi ile enerji avantajlı hidrolik yapı bloğu baskı makinesi ile yapılabilir. Bu özellikleri ile elde edilen kompozit blok, rakip bloklardan çevreci olarak farklılaşabilmektedir.

Geliştirilen kompozit harç ile üretilen yapı bloklarında, geri dönüşüm firmalarından temin edilen parçalanmış PET atık kullanımıyla PET geri dönüşümlerinde fazla harcanan enerjinin de önüne geçilebilecektir. PET kullanarak yapı bloğu üreten rakip firmalar gibi eritme yöntemi kullanılmadığından enerji sarfiyatının ve eritmede çıkan zararlı gazların atmosfere karışması önlenecektir. Taban külü ve PET atıklarının doğaya ve besin zincirine karışmasına engel olma çalışmalarına katkı sağlayacaktır. Atık kullanımı, bloklarda kullanılan doğal malzemenin miktarını azaltmaya yönelik bir adım olarak değerlendirilebilir. Pomza agregasının kullanılmasıyla birlikte hafiflik, ısı direnci, ses absorpsiyonu ve yangına karşı direnç sağlanabilecektir. Türkiye'nin de pomza rezervleri bakımından zengin ve ekonomik olması üretimde avantaj sağlamaktadır.

İnşaat sektöründe bulunan müşterilerle görüşmeler yapılmıştır. Müşteri görüşmelerinden ve literatür taramalarından edinilen bilgiye göre tuğla ve bims duvar yapı bloklarında aranan maliyet avantajlı, gaz betondan beklenen yapı bloğu hafifliği, yeterli basınç ve yüksek sıcaklığa dayanım, duvar yapı bloklarında aranan özelliklerdir. Görüşme sonuçlarına göre elde edilen bilgiler doğrultusunda, literatürden elde edilen bilgiler ışığında, yeni yapılan ürünün test ve analizleri sonucunda, geleneksel bloklarda aranan özelliklerin elde edilen yapı bloğunda sağlanabildiği gözlenmiştir. Atık

kullanımını sağlayan harç formülasyonundan ve presleme prosesindeki enerji tüketiminde sağlanan avantaj ile de çevreci ve inovatif bir ürün prototipi elde edilmiştir.

Çalışma kapsamında elde edilen tüm tipteki numunelere uygulanan test ve analiz sonuçlarının Taguchi istatistiksel değerlendirmesi sonucuna göre yapılan Anova analiz verilerinin genel değerlendirmesine göre malzemelerin istatistiksel anlamlılık ve varyansa katkı değerleri Çizelge 5.1’de gösterilmiştir. Tabloya göre en anlamlılık ve etken değerini oluşturan malzemenin çimento katılım oranının olduğu gözlemlenmiştir. Çimento oranının değiştirilmesiyle numune tasarımı iyi ya da kötü şekilde değiştirebilmektedir. Genel değerlendirmeye göre Tip-3 numunenin formülasyonunda çimento oranı düşürülerek atık katkılarının oranının artırılması avantaj oluşturmaktadır.

Çizelge 5.1. Anova analiz verilerinin genel değerlendirmesine göre malzemelerin istatistiksel anlamlılık ve varyansa katkı değerleri (Yazar tarafından oluşturulmuştur)

Testler	İstatistiksel Anlamlılık*			Varyansa Katkı Değeri**		
	Çimento	Pomza/Taban Külü	PET	Çimento	Pomza/Taban Külü	PET
Basınç dayanımı (7 gün)	+	+		+		
Basınç dayanımı (28 gün)				+		
Su emme				+		
Kılcallık emme katsayısı						+
Kuru birim ağırlık				+		
Isıl İletkenlik katsayısı				+		
Yüksek sıcaklık ağırlık kaybı			+			+
Yüksek Sıcaklık dayanım	+	+			+	
Ses iletim				+		
Maliyet	+		+	+		
CO ₂ emisyon değeri	+		+	+		

*Anova analizinde p değeri 0.05’ten küçük olan parametreler + ile gösterilmiştir.

**Anova analizinde elde edilen varyansa katkı değeri en yüksek olan parametre + ile gösterilmiştir.

Yığma yapı malzemesi olan, pişmiş kilden üretilen ve inşaat sektöründe duvar yapı elemanı olarak çok kullanılan kargir birim tuğlalar TS EN 771-1’e göre üretilmektedir. Çoğunlukla delikli kullanılan “kuru tuğlalar ağırlığının %15’inden fazla su emmeyecektir. Deliklerin toplam alanı; delik açılan yüzeyin tüm yüzey alanının en çok %75’i ve en az %14’ü olacaktır.” (Anonim 9; Anonim 10). Standartlara göre üretilen yatay delikli tuğlaların kuru hacim kütleleri Çizelge 5.2’de basınç dayanımları Çizelge 5.3’te, düşey delikli hafif tuğlaların birim hacim ağırlıkları ve basınç dayanımları Çizelge 5.4’te, düşey delikli ve pres kil tuğlaların birim hacim kütleleri ve basınç dayanımları

Çizelge 5.5'te, harman tuğlası dayanımları Çizelge 5.6'da verilmiştir. Çizelgeler incelendiğinde duvar elemanı olarak kullanılan tuğlaların çeşidine göre kuru hacim kütle değerinin en az 0.501 g/cm³, en fazla 2 g/cm³ olduğu gözlenmiştir. Basınç dayanımlarında ise en az 2 N/mm² (MPa), en fazla 24 N/mm² (MPa) olduğu gözlemlenmektedir.

Çizelge 5.2. Yatay delikli tuğla sınıfına göre brüt kuru hacim kütleleri (Anonim 10)

Tuğla Sınıfı	Brüt Kuru Hacim Kütle Değerleri g/cm ³	
	En Çok	En Az
1.0	1	0.901
0.9	0.9	0.801
0.8	0.8	0.701
0.7	0.7	0.601
0.6	0.6	0.501

Çizelge 5.3. Yatay delikli tuğla sınıfına göre basınç dayanımları (Anonim 10)

Tuğla Sınıfı	Basınç Dayanımı N/mm ² (MPa)	
	En Çok	En Az
(7.5)	7.5	6.0
(5.0)	5.0	4.0
(2.5)	2.5	2.0

Çizelge 5.4. Düşey delikli hafif tuğlaların (W sınıfı) brüt kuru birim hacim kütleleri ve basınç dayanımları (Anonim 10)

Tuğla		Basınç Dayanımı N/mm ² (MPa)		Brüt Kuru Birim Hacim Kütle g/cm ³		Tuğlanın Sembolü
Sınıfı	Tipi	Aritmetik Ortalama En Az	En Küçük Değer	En Fazla	En Az	
0.7	1	3.0	2.4	0.7	0.601	0.7/30
	11	4.0	3.2			0.7/40
0.8	1	4.0	3.2	0.8	0.701	0.8/40
	11	5.0	4.0			0.8/50
0.9	1	5.0	4.0	0	0.801	0.9/50
	11	6.0	4.8			0.9/60
1.0	1	6.5	5.2	1.0	0.901	1.0/65
	11	8.0	6.4			1.0/80

Çizelge 5.5. Düşey delikli ve pres (yüksek yoğunluklu) kil tuğlaların birim hacim kütleleri ve basınç dayanımları (Anonim 10)

Tuğla Tipi	Basınç Dayanımı N/mm ² (MPa)		Brüt Kuru Birim Hacim Kütleleri g/cm ³	
	Aritmetik Ortalama	En Küçük Değer	En Fazla	En Az
2	24	19	2.00	1.801
	18	14.5		
	12	9.5		
1.8	22	17.5	1.8	1.601
	18	12		
	10	8		
1.6	22	17.5	1.6	1.401
	15	12		
	10	8		
1.4	20	16	1.4	1.201
	12	9.5		
	8	6.5		
1.2	15	12	1.2	1.001
	10	8		
	6	4.5		

Çizelge 5.6. Harman tuğlası dayanımları (Anonim 10)

Sınıflar		Ortalama Hacim Kütleleri En Fazla (kg/dm ³)	Ortalama Basınç Dayanımı En Az (N/mm ²)	Basınç Dayanımı En Az (N/mm ²)
Dolu Harman Tuğlası	Orta Dayanımlı	-	5	4
	Az Dayanımlı	-	3	2.5
Delikli Harman Tuğlası	Orta Dayanımlı	1.4	5	4
	Az Dayanımlı	1.4	3	2.5

TS EN 771-3 standartlarına göre tuf cürufu, çakıl, kum ve pomza gibi malzemelerin agrega, su ve çimento ile karıştırılıp pres, dövme veya vibre edilerek özel kalıplara dökülerek imal edilen beton briketleri kullanılmaktadır. Birim hacim ağırlıkları duvar için kullanılacaksa 1.6 g/cm³, döşeme için kullanılacaksa 1.4 g/cm³'ten ağır olmamalıdır. Genelde yük taşımayan duvarlarda ve bacalarda kullanılır. 10x20x40, 30x20x40 ve 20x20x40 cm ebatlarında içi dolu veya delikli üretilir. Deliklerin toplam hacmi, tüm hacmin %50' sinden fazla olmamalıdır. Delikli olan briketlerinde 5 yüzü kapalı, bir yüzü açık olmalıdır. Su emme %20' den fazla olmamalıdır. Kullanmadan önce en az 7 gün kürlenmelidir. Beton briketlerin en düşük basınç dayanımları Çizelge 5.7'de gösterildiği şekilde olmalıdır (Anonim 9).

Çizelge 5.7. Beton briket en düşük basınç dayanımları (Anonim 9)

Çimento Dozajı (kg/m ³)	Brüt Yüzeye Göre Basınç Mukavemeti (N/mm ²)	Net Yüzeye Göre Basınç Mukavemeti (N/mm ²)
250	2	3.5
300	4	7

Beton bloklarda aynı beton briketler gibi aynı standartlarda ve aynı şekillerde üretilmektedir. Birim hacim ağırlığının 1.6 g/cm³' den ve 200 kg'dan az çimento dozajı olmaması gerekir. Su emme %15' den fazla olmamalıdır. Beton blokların en düşük basınç dayanımları Çizelge 5.8'de gösterildiği şekilde olmalıdır (Anonim 9).

Çizelge 5.8. Beton blokların en düşük basınç dayanımları (Anonim 9)

Çimento Dozajı (kg/m ³)	Brüt Yüzeye Göre Basınç Mukavemeti (N/mm ²)
200	5
250	7
300	9

Duvar yapı elemanlarında çok kullanılan bir diğer malzeme TS EN 771-4 standartlarına göre üretilen gaz betonlardır. Hacminin %70-%80'ini gözenekler oluşturmaktadır (Anonim 11). Ülkemizde üretilen gaz betonların kütlece su emmeleri %70 ile %90 arasında değişmektedir. Bu değişimin büyük bölümü ilk günde gerçekleşmektedir (Anonim 12). Çeşitli sınıflarda bulunan blokların mekanik özellikleri Çizelge 5.9'da verilmiştir. Ses yalıtım dirençleri Çizelge 5.10' da verilmiştir.

Çizelge 5.9. Gaz beton sınıflarına göre mekanik özellikler (Anonim 11; Anonim 13)

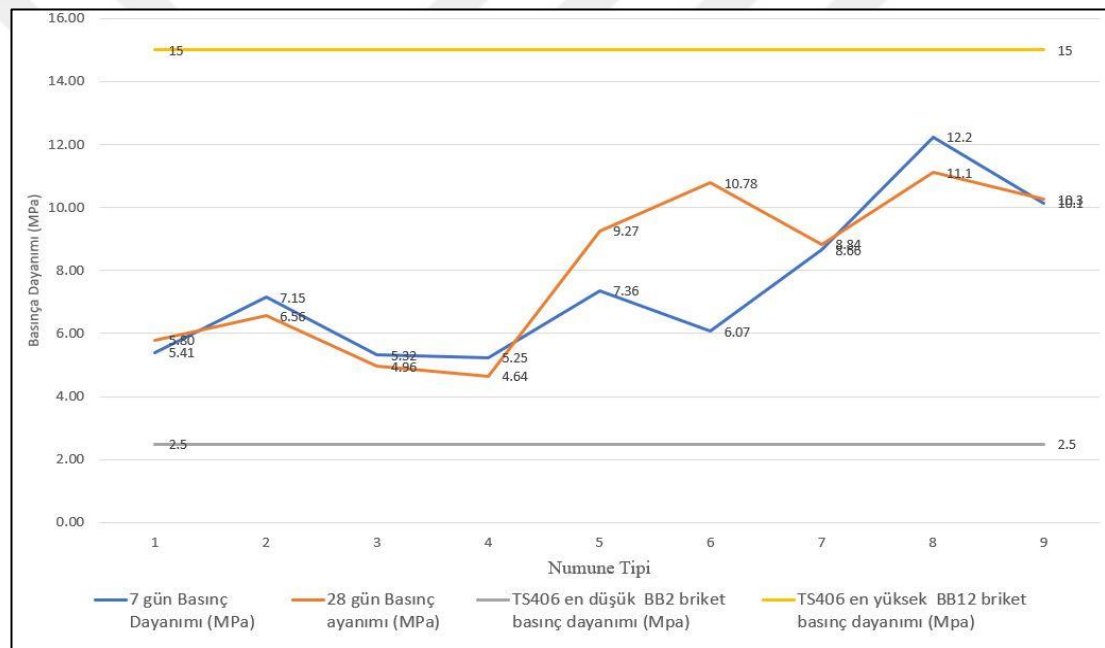
Blok Sınıfı	Basınç Dayanımı N/mm ² (MPa)	Brüt Kuru Birim Hacim Kütle (g/cm ³)	Duvarda Kullanım Malzemesi Çeşidi	Isı İletkenlik Hesap Değeri (λ) (W/mK)	Yanıcılık Sınıfı
G2	≥ 2	0.35	Dolgu	0.13	A1
G2	2.5	0.4	Dolgu	0.13	A1
G3	3.5	0.5	Dolgu	0.16	A1
G4	5	0.6	Dolgu ve Taşıyıcı	0.19	A1

Çizelge 5.10. Gaz beton duvarlarının ses yalıtım dirençleri (RW) (Anonim 13)

Duvar Malzemesi Kalınlığı	Ses Yalıtım Direnci	
	G2/04	G4/06
10	42	45
15	46	51
20	48	53
25	52	55

Not: Çizelge 5.10’da ses yalıtım dirençleri dışta 2 cm, içte 1 cm konvansiyonel sıva öngörülerek hesaplanmıştır.

Şekil 5.1’de belirtildiği şekilde TS406 standartlarına uyma zorunluluğu olan yapı blokları için olması gereken basınç dayanım aralığına, üretilen numunelerin bütün tiplerinin girdiği gözlemlenmektedir.

**Şekil 5.1.** Numunelerin ve TS406 standartların basınç grafiği

Kapı ve pencerenin yanında zemin, çatı, döşeme, duvar gibi yapı elemanları binalarda ısı kaybına neden olan faktörlerdendir. En fazla ısı kaybı dış duvarlardan olmakla birlikte yapının mimarisine bağlı olarak değişebilmektedir (Can 2013). Mesken ve ticari binalarda enerji tüketimi her geçen gün artmaktadır. Gelişmiş ülkelerdeki binaların enerji tüketiminin, toplam enerji tüketiminin %40'ına kadar çıktığı ifade edilmektedir (Pérez-Lombard vd. 2008). Bu sebeple yapılarda kullanılan yapı bloklarının ısı iletim değerleri önemli hale gelmektedir. Elde edilen numunenin de bu anlamda bu değerler arasında değere sahip olması ümitlendirici olmuştur.

Taşıyıcı hafif betonlar ACI 213R-03’e göre, 1120-1960 kg/m³ hava kurusu birim hacim ağırlığı ve basınç mukavemeti (28 günlük) 17 MPa’ı geçen betonlardır. TS EN 206-1 standardına göre, etüvde kurutulmuş birim hacim ağırlığı 800 kg/m³ ile 2000 kg/m³

arasında olan betonlar söz konusudur. TS 2511'e göre ise karakteristik basınç dayanımı 16 MPa'dan büyük ve hava kurusu birim hacim ağırlığı en fazla 1900 kg/m³ olan hafif agregalı betonlar taşıyıcı hafif betondur (Dikici 2010). Bu standartlara göre elde edilen numune incelendiğinde kuru birim ağırlık bakımından hafif beton sınıfına girdiği fakat taşıyıcı duvarlarda değil bölücü duvarlarda kullanılabilecek bir malzeme olduğu söylenebilmektedir.

Betonun termik ve mekanik özelliklerini su olumsuz etkilendiğinden dolayı beton malzemenin az su emmesi beklenmektedir. Hafif betonlarda agrega yapısından dolayı su emme yüksektir. Aynı şekilde kılcal su emme de çok önemlidir ve onun da az olması beklenmektedir (Dikici 2010). Çizelge 5.10 incelendiğinde elde edilen numunenin su emme değerinin de şu anda inşaat sektöründe kullanılan tuğlanın max. değerine yakın fakat beton briket ve gaz beton yapı blok değerlerinin altında olduğunu gözlemleyebiliyoruz.

Tez çalışması kapsamında elde edilen ürünün malzeme içeriğine bütün bu veriler ışığında bakılacak olursa geleneksel blokların değer aralığında fakat çevreye ve ekonomiye değer sağlayabilecek, birçok yönden avantajlı sağlanabilecek bir ürün elde edilebileceği söylenebilmektedir. Malzeme içeriklerinden plastik türlerine göre PET, içerikle neredeyse hiç etkileşimi olmadığı için, oldukça dayanıklı ve çok hafif olmasından, atık hacminin çok fazla yer kaplaması ile arazilerin bertarafını sağladığından, atıkların yakılarak bertaraf edildiği zaman zararlı gazların çıkışına neden olduğundan dolayı bunu da önleyici olarak, en masrafsız ve zararsız geri kazanma yolu duvar yapı bloğunda parçalanarak agrega şeklinde kullanımı olabileceğinden dolayı tercih edilmiştir. Termik santral atıklarından da taban külü tercih edilmiştir. Termik santralin bir diğer atığı olan uçucu küllerin betonda puzolan olarak kullanılmasıyla doğadaki atık oranının azaltılması sağlanabilmektedir. Taban külü ise betonda sadece agrega olarak kullanılabilmektedir. Fakat beton dayanımını düşürdüğü için tercih edilen bir yöntem değildir. Aynı zamanda taban külünün doğada atık olarak bulunması Dünya'ya büyük tehlikeler yaratmaktadır. Bu sebeple dayanımın fazla beklenmediği duvar yapı bloğunda kullanımı sağlanarak doğadaki atık miktarının azaltılması büyük oranlarda sağlanabilir. Ayrıca taban külünün, duvar yapı bloğunda katkı maddesi olarak kullanılmasıyla malzemeye ısı yalıtımı ve hafiflik özelliği de sağlanabilmektedir. Türkiye de rezervleri çok bulunan pomza doğal agrega da çalışma kapsamında kullanılan önemli malzemelerden biridir. Pomza boşluklu yapısından dolayı katıldığı ürünün hafif olmasını sağlaması, malzemenin taşınmasında ve kullanılmasında kolaylık oluşturması, zaman ve işçilikten tasarruf sağlanması nedeniyle üründe avantaj oluşturmaktadır. Zemin mekaniği açısından da temele iletilen yük azalacağından dolayı inşaat demirinden tasarruf sağlanabileceği, ısı geçirgenlik katsayısı bakımından da normal betondan daha fazla izolasyon yapmakta olup bu özelliklerinden dolayı da büyük çapta ısı ve enerji tasarrufu sağlanabileceği literatür bilgileriyle desteklenmektedir. Aynı zamanda doğal ve kaynağı ülkemizde bol olduğundan dolayı blok katkı malzemesi olarak maliyet avantajlı bir üründür. Bütün bu bilgiler ışığında PET, taban külü ve pomzanın, çimento ve su ile karışımı ile elde edilen, optimizasyonu sağlanan, kompozit harç malzemesinin, malzeme yapımında avantajlı olan özellikleri bir arada bulundurmasıyla standart duvar yapı blok özelliklerini de sağlayarak, bölücü duvar yapı bloğu olarak kullanılabileceği gözlemlenmiştir.

6. SONUÇLAR

Mimarlık ve tasarım, insanoğlunun yaşam alanlarına ve yaşamına yön veren birçok disiplini bünyesinde barındırmaktadır. Genel açıdan bakıldığında bu yön verme sadece tasarım ve/veya tasarımın hayata geçirilmesi ile sınırlı olarak tanımlanamamıştır. Tasarım bileşenleri ve üretim yöntemleri ihtiyaçlara göre şekillenmekte ve sürekli dinamik bir değişim içerisinde. Bu açıdan bakıldığında mimari tasarımın, dinamik değişiminin, bir parçası olan malzeme de günden güne gelişen ve ihtiyaçlara göre şekillenen bir platforma dönüşmüştür (Bechthold ve Weaver 2017). Teknolojideki artan gelişimle orantılı olarak yapı malzemelerindeki gelişim ve çeşitlilik, insanların yeniye ulaşma ve arama kaygılarını da artırarak farklı malzeme çeşitlerinin yapılarda uygulanabilirliğini artırmıştır. İnşaat sektöründeki malzeme çeşitliliğindeki hızlı değişim süreci mimar ve mühendislerin öncelikli ve temel sorunu haline gelmiştir (Çakmak ve Örmecioğlu 2020).

Yapı malzemelerinde asgari özellikler yanında teknolojinin ve bilimin gelişimi ile taşınabilir, esnek, ekonomik, taşıma kapasitesi yüksek, tasarıma göre değişebilir özellikleri barındıran, çevre ve kullanıcı ile uyumlu gibi birçok özellik eklenmiştir. Artan özelliklerle birlikte tasarımcılara, tasarımlarında çeşitlilik, farklı mekânsal algılar, özgünlük, çözümsel sonuçlar sunan birçok olanak, yapı malzemelerin çeşitliliği ile sağlanmıştır (Aytis ve Polatkan 2010; Çakmak ve Akıner 2021). Mimarlar için malzemenin işlevselliği, estetik değeri, sürdürülebilirliği, maliyeti, dayanıklılığı, işlenebilirliği ve çevresel etki özellikleri ile kullanılacak alanın iklimi, kültürel ve demografik yapısı gibi bazı özel tercih nedenleri de tasarım sürecinde malzeme seçimi için etkili olmaktadır (Güner vd. 2017). İnsanoğlunun göçebe yaşamdan yerleşik hayata geçmesi ile doğadan sağlanan malzemelerle başlayan süreç, endüstri devrimi ile üretilen malzemelerin çeşitliliği ve gelişimi ile sürekli artan bir hızda devam etmiştir.

Teknolojideki gelişmelerle birlikte artan malzeme çeşitliliği ile insanların refah düzeylerinin arttığı gözlenirse de bununla birlikte doğal kaynaklarında hızlı bir şekilde tüketiminin olması doğal ve çevre avantajlı malzemelerin üretimini kaçınılmaz kılmıştır (Çakmak ve Örmecioğlu 2020). Malzemelerin gelişiminde çevre dostu ve sürdürülebilir kavramları merkezine alan malzeme çeşitleri, mimarların tasarımlarında kullanacağı malzeme seçimlerinde önemli bir konuma gelmiştir. Özellikle 21. yüzyılda, atık katkılı malzemelere olan ilgi belirgin bir şekilde artmıştır. Endüstri devrimi ile artan nüfus ve değişen tüketim alışkanlıkları, atık miktarlarının artmasını neden olmuştur. Artan atıkların, çevre üzerinde oluşturduğu olumsuz etkiler, atıklara yönelik birçok disiplinin çalışmalarını hızlandırmıştır. Bu kapsamda atık yönetimi içinde tanımlanmış geri dönüşüm ve yeniden kullanım gibi yöntemler ile atıkların hem ekonomiye kazandırılması hem de çevreye olumsuz etkisinin azaltılması önemli bir konu haline gelmiştir.

Atıklar, günümüzde geri dönüşüm ve yeniden kullanım ile farklı alanlarda değerlendirilmektedir. Bu kullanım alanlarından biri de inşaat sektöründe önemli bir payı olan mimari tasarımlardır. Mimari tasarımlardaki malzeme seçim kriterleri açısından uygun olan atık katkılı yeni malzeme adayları, yeni tasarımların ana unsurları olarak yer almaktadır. Literatürde atıkların, yeniden kullanım ve geri dönüşüm yöntemleriyle tasarım bileşeni olarak kullanıldığı mimari çalışmalar oldukça fazladır. Mimarlıkta özellikle inşaat atıkları kümesine giren seramik, tuğla, beton vb. atıklar ile farklı üretim süreçlerinin atıkları olan kâğıt, plastik, cam, lastik vb. atıklar mimari tasarımlarda farklı

yapı elemanları olarak kendilerine örnek projelerde yer bulmaktadır (Yalçinkaya ve Karadeniz 2022).

PET, taban külü atıklarının ve CO₂ emisyonlarının her geçen gün büyük bir ivmeyle büyümesinin dünya için büyük tehlikeler oluşturduğu, çevreye ve canlı sağlığına verdiği zararların bilgisine literatürde sayısal verilerle sıklıkla rastlanmaktadır. Çevresel kaygılarla gelişen sürdürülebilir, yeşil mutabakat, Paris anlaşması gibi hükümet politikalarına dahil edilen kavramlar, iklim değişikliğinden gelen süreçle birlikte CO₂ emisyonunun azaltılmasına yönelik çözümlerin bulunmasını zorunlu kılmaktadır. CO₂ emisyonunun en büyük etkenlerinden biri olan inşaat sektöründe çimento kullanımının azaltılması, atık katkılarıyla sağlandığı takdirde atıkların çevreye verdiği zararında avantajlı duruma çevrildiği yapılan literatür taramalarıyla desteklenebilmektedir.

Tez çalışması kapsamında yüksek atık hacmine sahip ve çevre için önemli tehdit unsuru taban külü ve geri dönüştürülmüş PET atıkları, ülkemizde büyük rezervleri olan doğal kaynaklardan pomza ile geleneksel inşaat malzeme üretim prosesi kullanılarak kompozit harç geliştirilmiştir. Atık ve doğal kaynak içeren çimento esaslı olarak geliştirilen bu kompozit harç platform malzemesi, tez çalışmasında mimari tasarım açısından yapı bloğu üretim malzemesinin uygunluğu araştırılmıştır.

Harç geliştirilmesinde yapılan literatür taramalarından ve ön çalışmalardan elde edilen bilgiler doğrultusunda Taguchi deneysel tasarım yöntemiyle PET, taban külü/pomza ve çimento olmak üzere 3 değişkenle 9 tip harç formülasyonu belirlenmiştir. Tasarlanan formülasyon harç karışımları, yapı bloğu baskı makinesinde, yapılacak test ve analizlere göre istenilen ölçülerdeki kalıplara dökümler yapılarak gerçekleştirilmiştir. Ticari prototip üretim yöntemindeki procesteki makine verileriyle elde edilen 9 tipte üretilen numuneler farklı setlerde numuneler üretilerek test ve analize tabi tutulmuştur. Doygun kuru yüzey, kuru birim ağırlık, su emme, kılcal su emme, basınç dayanımı, ısı iletkenlik, yüksek sıcaklık ve ses iletim test sonuçları belirlenmiştir. Taguchi tasarımı istatistiksel değerlendirmeye basınç dayanımı, su emme ve kılcallık katsayısı, kuru birim ağırlık, ısı iletkenlik, yüksek sıcaklık testleri, maliyet analizi, CO₂ emisyonu verileri işlenerek anova analiziyle değerlendirmeler yapılmıştır. 9 tip numunenin test ve analiz sonuçları değerlendirildiğinde çimento oranı artışı ile basınç dayanımı ve ısı iletkenliğinin arttığı; PET ve pomza-taban külü agregalarının oranındaki artış ile düştüğü tespit edilmiştir. Bu ilişki kuru birim ağırlığında ise tam tersi durumda olduğu, çimento miktarı ile arttığı, PET ve pomza-taban külü agregaları ile azaldığı tespit edilmiştir. Su emme, gözeneklilik ve kılcallığın ise çimento kullanımının artmasıyla azaldığı, PET ve pomza-taban külü agregalarının kullanım oranının artmasıyla arttığı gözlemlenmiştir. Yüksek sıcaklıkta dayanım kaybının; çimentonun, pomzanın ve PET'in artmasıyla azaldığı, taban külünün artmasıyla arttığı, yüksek sıcaklıkta ağırlık kaybında ise tam tersi durum olsa da çimento, pomza ve taban külünde çok büyük değişikliğin olmadığı, PET oranındaki artışla azaldığı gözlemlenmiştir. Çimento oranının ve PET atığının artmasıyla maliyet ve CO₂-e artma gözlemlenirken, pomza/tabana külü oranında büyük değişiklikler tespit edilmemiştir. Maliyet analizi çerçevesinde tez çalışmasındaki numune bileşiminin doğal malzemelerin kullanım maliyetiyle karşılaştırıldığında, atıklar ve PET kullanımı nedeniyle maliyet avantajlı ve CO₂ emisyonu düşük olduğu tespit edilmiştir. Tüm bu değerlendirme sonuçlarına göre optimum numune-Tip 3 en iyi numune olarak tespit edilmiştir. Tip 3, 250 dozajında çimento, pomza/tabana külü oranı 50/50, PET atığı 0.1

olan formüldür. En optimum formülün bulunmasıyla tekrar doğrulama dökümünün yapılmasına gerek kalmamıştır.

Elde edilen optimum formülden elde edilen numunenin test ve analiz verileri, akademik ve ticari geleneksel blok malzeme özellikleriyle karşılaştırıldığında verilen değerlerin aralığında olduğu ve 5 N/mm² ile yüksek basınca sahip olduğu gözlenmiştir. Kuru birim ağırlığı 1.3 g/cm³ olan numune hafif beton sınıfına girmektedir. Isıl iletkenlik değeri 0.27 W/mK olarak ölçülmüş, su emme oranı ise 16.1 olarak belirlenmiştir. Optimum formül ile ticari prototip için dökümler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ürünlerin ticarileşebilecek niteliklere sahip olduğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda üretim prosesinde mevcutta kullanılan bloklara görece daha az enerji harcanarak üretimi sağlanmaktadır. Kendi atığının tekrar üretim prosesine dahil edilme avantajı sağlayacağı gözlemlenmiştir. Böylece kendi atığının da kullanılabileceği ve atık katkı ilavesiyle yeşil, sürdürülebilir, performans olarak literatürdeki deneysel çalışmalara, standart ve geleneksel bloklara uygun hatta bazı özelliklerinin muadil ürünlere kıyasla daha yüksek performanslı ürün elde edilebileceği gözlemlenmiştir.

Tartışma bölümünde standartlara göre verilen blokların, şu anda piyasada satışı olan geleneksel blok ürünlerin ve optimum numune olan tip-3'ün kuru birim ağırlıkları, basınç dayanımları, ısı iletkenlik ve su emme değerleri Çizelge 6.1'de karşılaştırılmıştır.

Çizelge 6.1. Standartlara göre blokların, ticari geleneksel blokların ve optimum numune tip-3'ün karşılaştırılması (Yazar tarafından oluşturulmuştur)

Blok Tipi	Kuru Birim Ağırlık (g/cm ³)	Basınç Dayanımı N/mm ² (MPa)	Isı İletkenlik Hesap Değeri (λ) (W/mK)	Su Emme (%)
Yatay Delikli Tuğla (Anonim 10)	min 0.50-max.1.0	min. 2.0-max.7.5	—	max. 15
*Yatay Delikli Tuğla (Anonim 14)	min. 0.6-max.0.7	min. 2.0-max.2.5	—	—
Düsey Delikli Hafif Tuğla (Anonim 10)	min. 0.6-max 1.0	min. 2.4-max.8.0	min. 0.16- max. 0.32	max. 15
Düsey Delikli ve Pres Kil Tuğla	min. 1.0- max. 2.0	min. 4.5- max. 22	—	max. 15
*Düsey Delikli Tuğla (Anonim 14; Anonim 10)	min. 0.65-max. 1.1	min. 3- max. 14	min. 0.18- max. 0.50	—
Dolu Harman Tuğlası (Anonim 10)	—	min. 2.5-max. 5	—	max. 15
Delikli Harman Tuğlası (Anonim 10)	max. 1.4	min. 2.5- max. 5	—	max. 15
Beton Briket Çimento Dozajı 250 kg/m³ (Anonim 9)	Duvar için max. 1.6- Döşeme için max1.4	min. 2.0-max. 3.5	—	max. 20
Beton Briket Çimento Dozajı 300 kg/m³ (Anonim 9)	Duvar için max. 1.6- Döşeme için max1.4	min. 4.0-max. 7.0	—	max. 20

(Devamı Arkada)

Çizelge 6.1.'in devamı

Beton Blok Çimento Dozajı 200 kg/m³ (Anonim 9)	min. 1.6	min. 5	—	max. 15
Beton Blok Çimento Dozajı 250 kg/m³ (Anonim 9)	min. 1.6	min. 7	—	max. 15
Beton Blok Çimento Dozajı 300 kg/m³ (Anonim 9)	min. 1.6	min. 9	—	max. 15
*Bims (Anonim 15)	min. 0.72- max. 1.28	min. 1.5- max. 5	min. 0.11- max. 0.50	—
Gaz Beton (Anonim 13)	min. 0.35- max. 0.6	min.2.0--max. 5	min. 0.13- max. 0.19	max. 70-90
*Gaz Beton (Anonim 16)	min. 0.30- max. 0.58	min.1.5-max. 5	min. 0.082- max. 0.19	—
Tip 3 - Optimum Numune	1.3	5.96	0.27	16.1

* Şu anda piyasada satışı olan ürün özellikleridir.

Çizelge 6.1 incelendiğinde üretilen optimum numune tip-3'ün değer aralıklarının olması gereken değer aralıklarında olduğu gözlemlenmektedir. Hatta taşıyıcı olmayan duvar bloklarına göre basınç dayanımının çok daha iyi çıktığı söylenebilmektedir. Müşteri görüşmelerine göre görece pahalılığından dolayı kullanımı az olan ama özelliklerinden dolayı da tercih sebebi olan piyasadaki gaz betonlardan daha yüksek basınç dayanımı, daha az su emme özelliği sağlanabilmiştir. Kuru birim hacim kütle değerleri incelendiğinde elde edilen numunenin hafif beton sınıfına girdiği söylenebilmektedir. Elde edilen analiz sonuçlarındaki değerlerden harç karışımı ile ticari yapı bloğu üretiminin sağlanabileceği anlaşılmaktadır.

Çizelge 6.2. Dayanım sınıfları bazında 1 m³ hazır betonun karbon ayak izi (Anonim 18, Yazar tarafından oluşturulmuştur)

Karbon Ayak İzi (kg CO₂ emisyon /m³)						
Ham maddeler	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	Tip 3- Optimum Numune
	285,17	308,96	339,57	370,16	396,43	217,55

Çizelge 6.2 incelendiğinde üretilen optimum numune tip-3 CO₂ emisyon değerlerinin diğer hazır beton sınıflarına göre oldukça düşük olduğu gözlemlenmektedir. Bu sonuçtan da beton içerisine atık malzeme katkısıyla CO₂ emisyon değerlerinin oldukça düşürülebileceği ve böylece çevreci bir yapı malzemesi elde edilebileceği sonucuna varılabilmektedir.

Çalışma kapsamında geliştirilen bu kompozit harç ile elde edilen yapı bloğunun mekanik ve fiziksel özellikleri, yapılan test ve analizler sonucunda kullanılabilir yapı bloğu özelliklerini karşıladığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte elde edilen kompozit harç karışımı aşağıda belirtildiği şekilde mimari tasarımlarda malzeme seçim kriterlerine göre incelenmiştir.

- İşlevselliği: Elde edilen harç karışımı ile işleve, gereksinime göre kullanılabilen bir malzeme hammadde elde edilmiştir. Bu hammadde, yapıların duvar bloklarını oluşturmakla birlikte çeşitli çalışmalarla geliştirilmesiyle yapıların tavan ve döşemesi, bahçe bölücü elemanı, çeşitli sokak ve ev mobilyaları, bölücü ve ayırıcı paneller, ışık panelleri, dış mekân zemin malzemesi gibi birçok gereksinimi karşılayabilecek formda kullanılabilir.

-Estetik değeri: Elde edilen harç kalıplar sayesinde istenilen formda ve şekilde üretilmektedir. Bu özelliği ile estetik tasarımlara imkân sağlamaktadır.

- Sürdürülebilirliği: Kullanılan atıklar özelinde mevcut atık miktarı ve üretim teknolojileri ile alternatifleri göz önüne alındığında atık potansiyelinin devamlılığı söz konusudur. Bu açıdan geliştirilen kompozit harç tasarımı hem kendi içinde malzeme sürdürülebilirliği potansiyeline sahiptir hem de çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır.

- Maliyeti: Geliştirilen kompozit harç içeriğinin atık kaynaklı olması nedeniyle avantaj sağlayacağı öngörülmektedir.

- Dayanıklılığı: Gerçekleştirilen test ve deney sonuçlarına göre mevcut kullanılan yapı bloğu olarak tanımlanan ürünlerle rekabet edebilen özelliklere sahiptir.

- İşlenebilirliği: Geleneksel yapı bloklarından olan bims yapı bloğuna benzer bir işlenebilirliğe sahiptir.

- Çevresel etki: Geliştirilen kompozit harç tasarımında kullanılan atıklar ile sürdürülebilirlik, atık yönetimi ve bertaraf süreçlerindeki enerji verimliliği, maliyet, karbon ve su ayak izine olumlu katkılar sağlanmıştır.

Dünyadaki sürdürülebilirlik merkezinde yürütülen çalışmalar ile çevresel etkilerin önemli belirteci karbon emisyonu ve karbon ayak izi olarak gösterilmektedir. İnşaat sektöründe özellikle kullanılan malzemelerin, karbon ayak izi yükleri oldukça büyük boyutlara ulaşmaktadır. Bu kapsamda karbon ayak izinin inşaat sektöründe azaltılması stratejik bir önem taşımaktadır. Özellikle mimari tasarımlar ile oluşturulan yapılar ve bu yapılarda kullanılan malzemelerin karbon ayak izi karbon nötr bir ekosisteme geçişte tedbirlerin alınmasını gerekli kılmaktadır (Anonymous 4). Bu açıdan sürdürülebilir ve çevreye olumlu etki sağlayacak karbon ayak izi düşük malzemelerin geliştirilmesi ve kullanımıyla hem küresel karbon emisyonunun azaltılması hem de Birleşmiş Milletler tarafından yayınlanmış “Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları” kapsamına olumlu katkılar sağlanması beklenmektedir (Anonim 17). Günümüze kadar gelen farklı ulusal ve uluslararası anlaşmalar ve düzenlemelerle yeşil mutabakatla ilerleyen süreçler için karbon emisyonunun sıfırlanmasına yönelik hedeflerin konulmasıyla atık katkılı malzemeler

daha da dikkat çekmektedir. Özellikle sürdürülebilir, çevreci, yeşil malzeme odağının mimarlarda olması dikkat çekicidir.

Tez çalışması kapsamında elde edilen ürün bir kompozit harç formülasyonudur. Elde edilen kompozit harç karışımı; tasarıma göre şekillenecek, mimarların düşünsel güçlerine göre yapıların cephe kaplaması, zemin, tavan, duvar gibi yapı malzemelerini oluşturulmasına imkân sağlayacak bir platform sunulmaktadır. İnşaat sektöründe CO₂ emisyonunda önemli bir yere sahip olan çimento oranı düşük, çevreci, atık katkılı geri dönüşüm ekonomisine katkısı olan, yeni ürünlerin geliştirilmesi önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Bu çalışma kapsamında elde edilen taban külü ve PET atığının birlikte kullanılma fırsatları önemlidir. Çalışma kapsamında taban külü ve PET atıklarının geri dönüşüm, yeniden kullanım gibi yöntemlerin kullanılması ile doğada depolanmasının önüne geçilerek doğadaki atık hacminin azaltılmasına, döngüsel ekonomiye, doğa ve canlılara zararlı etkinin azaltılmasına önemli katkılar sağlanacağı öngörülmektedir. Bu platformun yeni araştırmaların yapılmasına ve yeni projelerin yapılmasına önemli katkılar sağlayacağı öngörülmektedir.

7. KAYNAKLAR

- Abubakar, A. U. ve Baharudin, K. S. 2013. Tanjung bin coal bottom ash: from waste to concrete material, *Advanced Materials Research, Trans Tech Publ*, 705, 163-168.
- ACI Committee 213R-03.2003. Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete, American Concrete Institute, ACI.
- ACI 213R-87 ACI Standards Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete.
- Ahmadi, P. F., Ardeshir, A., Ramezaniapour, A. M. ve Bayat, H. 2018. Characteristics of heat insulating clay bricks made from zeolite, waste steel slag and expanded perlite. *Ceramics International*, 44(7), 7588-7598.
- Ahmaruzzaman, M. 2010. A review on the utilization of fly ash. *Progress in energy and combustion science*, 36(3), 327-363.
- Ahn, Y. B., Jang, J. G. ve Lee, H. K. 2016. Mechanical properties of lightweight concrete made with coal ashes after exposure to elevated temperatures. *Cement & Concrete Composites*, 72, 27-38.
- Akçaözoğlu, S. 2008. Atık pet şişe kırıklarının hafif beton agregası olarak kullanılabilirliği. Doktora tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana, 257 s.
- Akçaözoğlu, S., Atiş, C. D. ve Akçaözoğlu, K. 2010. An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete. *Waste Management*, 30(2), 285-290.
- Akinyele, J. O., Igba, U. T. ve Adigun, B. G. 2020. Effect of waste PET on the structural properties of burnt bricks. *Scientific African*, 7.
- Akkaş, A. 2011. Pomza agregalı taşıyıcı hafif betonların taşıyıcılık özelliklerinin araştırılması. Doktora tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, 131 s.
- Akkaya, B. 2021. Taban Külünün Karıştırılmalı Bilyeli Değirmende Öğütülerek Puzolanik Aktivitesinin Artırılması ve Çimento Üretiminde Kullanımının İncelenmesi. Doktora tezi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak, 133 s.
- Akkurt, I., Akyildirim, H., Mavi, B., Kilincarslan, S. ve Basyigit, C. 2012. The Effect of Pumice Rate on the Gamma Absorption Parameters of Concrete. *Acta Physica Polonica A*, 121(1), 144-146.
- Akkurt, I., Kilincarslan, S., Basyigit, C., Mavi, B. ve Akyildirim, H. 2009. Investigation of photon attenuation coefficient for pumice. *International Journal of the Physical Sciences*, 4(10), 588-591.
- Al-Fakih, A., Azan, R. M., Borisenko, Y. G., Shvachev, D. P., Vorobyev, D. A., Amran, Y. H. M., . . . Alabduljabbar, H. 2020. Bituminous mineral compositions for paving with cullet. *Case Studies in Construction Materials*, 12.
- Alani, A. H., Bunnori, N. M., Noaman, A. T. ve Majid, T. A. 2019. Durability performance of a novel ultra-high-performance PET green concrete (UHPPGC). *Construction and Building Materials*, 209, 395-405.
- Alfandawi, I. H., Osman, S. A., Hamid, R. ve AL-Hadithi, A. I. 2019. Influence of PET wastes on the environment and high strength concrete properties exposed to high temperatures. *Construction and Building Materials*, 225, 358-370.

- Analysts, G. I. 2011. A global strategic business report. global industry analysts. Inc., USA.
- Aneke, F. I. ve Shabangu, C. 2021. Green-efficient masonry bricks produced from scrap plastic waste and foundry sand. Case Studies in Construction Materials, 14.
- Anonim 1: https://www.imsad.org/files/fileman/Uploads/Eser_Erginoglu_44.Gundem_Bulusmalari_Eylul2021.pdf [Son erişim tarihi: 02.06.2023].
- Anonim 2: <https://www.sanalsantiye.com/agrega-cesitleri-nelerdir-agrega-siniflandirmalari/> [Son erişim tarihi: 05.06.2023].
- Anonim 3: <https://www.freewordcloudgenerator.com/generatewordcloud> [Son erişim tarihi: 01.04.2023].
- Anonim 4: <https://medcemglobal.com.tr/> [Son erişim tarihi: 10.04.2023].
- Anonim 5: https://www.asat.gov.tr/tr/su_kalite.html [Son erişim tarihi: 15.04.2023].
- Anonim 6: https://legacy.winnipeg.ca/finance/findata/matmgt/documents/2012/682-2012/682-2012_Appendix_HWSTP_South_End_Plant_Process_Selection_Report/Appendix%207.pdf [Son erişim tarihi: 02.06.2023].
- Anonim 7: <https://www.plasticstoday.com/packaging/use-rpet-drastically-cuts-carbon-footprint> [Son erişim tarihi: 02.06.2023].
- Anonim 8: <https://birimfiyatim.com/1-m3-cimento-kac-kg/> [Son erişim tarihi: 12.05.2023].
- Anonim 9: <https://www.ktimo.org> [Son erişim tarihi: 20.03.2023].
- Anonim 10: <https://docplayer.biz.tr/6998478-Turk-standardi-turkish-standard.html> [Son erişim tarihi: 20.05.2023].
- Anonim 11: <http://tgub.org.tr/SF/579/Gazbeton%20Blok%20%C4%B0le%20Duvar%20%C3%96rme%20%C5%9Eartnamesi.pdf> [Son erişim tarihi: 20.05.2023].
- Anonim 12: <http://www.yapkat.com/images/Malzeme/Dosya/35712832212442974315881729.pdf> [Son erişim tarihi: 20.05.2023].
- Anonim 13: <https://docplayer.biz.tr/11424834-Gazbeton-uygulama-el-kitabi.html> [Son erişim tarihi: 20.05.2023].
- Anonim 14: <https://www.kudret.com/dusey-delikli-tuglalar/> [Son erişim tarihi: 05.06.2023].
- Anonim 15: <https://www.teknobims.com.tr/katalog.pdf> [Son erişim tarihi: 05.06.2023].
- Anonim 16: <https://www.kcs.com.tr/upload/files/Katalog/kcskipasgazbeton.pdf/> [Son erişim tarihi: 05.06.2023].
- Anonim 17: <https://turkiye.un.org/tr/sdgs> [Son erişim tarihi: 12.06.2023].
- Anonim 18: <https://www.thbb.org/media/523136/haz%C4%B1r-beton-ya%C5%9Famd%C3%B6ng%C3%BCs%C3%BC-rehberi-v4010921.pdf> [Son erişim tarihi: 08.06.2023].
- Anonymous 1: Eco-friendly Plastic Houses? <https://www.ecoideaz.com/innovative%20green-ideas/eco-friendly-plastic-houses> [Son erişim tarihi: 05.05.2023].

- Anonymous 2: <https://www.statista.com/statistics/859266/number-of-coal-power-plants-by-country/> [Son erişim tarihi: 07.06.2023].
- Anonymous 3: <https://petrecyclingteam.com/en/excellent-co2-balance> [Son erişim tarihi: 12.05.2023].
- Anonymous 4: <https://architecture2030.org/> [Son erişim tarihi: 10.06.2023].
- Arenas, C. G., Marrero, M., Leiva, C., Solis-Guzman, J. ve Arenas, L. F. V. 2011. High fire resistance in blocks containing coal combustion fly ashes and bottom ash. *Waste Management*, 31(8), 1783-1789.
- Armstrong, R. A., Eperjesi, F. ve Gilmartin, B. 2002. The application of analysis of variance (ANOVA) to different experimental designs in optometry. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 22(3), 248-256.
- Arulrajah, A., Perera, S., Wong, Y. C., Horpibulsuk, S. ve Maghool, F. 2020. Stiffness and flexural strength evaluation of cement stabilized PET blends with demolition wastes. *Construction and Building Materials*, 239.
- ASTM C 67-08 Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile.
- ASTM C1754/C1754M-12 Standard Test Method For Density And Void Content Of Hardened Pervious Concrete
- Awasthi, A. K., Shivashankar, M. ve Majumder, S. 2017. Plastic solid waste utilization technologies: A Review, IOP conference series: Materials science and engineering, IOP Publishing, 263, 022024.
- Aydin, E. 2016. Novel coal bottom ash waste composites for sustainable construction. *Construction and Building Materials*, 124, 582-588.
- Ayhan, M., Gonul, H., Gonul, I. A. ve Karakus, A. 2011. Effect of basic pumice on morphologic properties of interfacial transition zone in load-bearing lightweight/semi-lightweight concretes. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2507-2518.
- Aytis, S. ve Polatkan, I. 2010. Gelenekten Geleceğe Mimarlık. 6. Uluslararası Sinan Sempozyumu.
- Azharpour, A. M., Nikoudel, M. R. ve Taheri, M. 2016. The effect of using polyethylene terephthalate particles on physical and strength-related properties of concrete; a laboratory evaluation. *Construction and Building Materials*, 109, 55-62.
- Babafemi, A. J., Šavija, B., Paul, S. C. ve Anggraini, V. 2018. Engineering properties of concrete with waste recycled plastic: A review. *Sustainability*, 10(11), 3875.
- Bagheri, S. M., Koushkbaghi, M., Mohseni, E., Koushkbaghi, S. ve Tahmouresi, B. 2020. Evaluation of environment and economy viable recycling cement kiln dust for use in green concrete. *Journal of Building Engineering*, 32.
- Bai, Y., Darcy, F. ve Basheer, P. A. M. 2005. Strength and drying shrinkage properties of concrete containing furnace bottom ash as fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 19(9), 691-697.

- Baite, E., Messan, A., Hannawi, K., Tsobnang, F. ve Prince, W. 2016. Physical and transfer properties of mortar containing coal bottom ash aggregates from Tefereyre (Niger). *Construction and Building Materials*, 125, 919-926.
- Bajracharya, R. M., Manalo, A. C., Karunasena, W. ve Lau, K. T. 2016. Characterisation of recycled mixed plastic solid wastes: Coupon and full-scale investigation. *Waste Management*, 48, 72-80.
- Bakoshi, T., Kohno, K., Kawasaki, S. ve Yamaji, N. 1998. Strength and durability of concrete using bottom ash as replacement for fine aggregate. *Special Publication*, 179, 159-172.
- Banerjee, A., Paterok, K., Saluja, M., Arora, R., Satpathy, I., Malik, J. ve Rathi, V. 2016. Material consumption patterns in India: A baseline study of the automotive and construction sectors. New Delhi: GIZ.
- Barnes, D. K., Galgani, F., Thompson, R. C. ve Barlaz, M. 2009. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 364(1526), 1985-1998.
- Barreto, J. M. L., da Costa, H. N., Candido, L. F. ve Correio, A. E. B. C. 2019. Analysis of physical and mechanical properties of pressed concrete blocks without structural purposes with additions of recycled PET. *Materia-Rio De Janeiro*, 24(2).
- Bayrak, Ü., Osman. 2002. Uçucu Kül ve Silis Dumanı İçeren Yol Betonlu Karışımlarının Bazı Mekanik Özelliklerinin Taguchi Metodu ile Optimizasyonu Yüksek Lisans tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, 99 s.
- Bechthold, M. ve Weaver, J. C. 2017. Materials science and architecture. *Nature Reviews Materials*, 2(12), 1-19.
- Behera, D., Damte, Y. ve Mola, A. 2018. Experimental investigation on recycling of plastic wastes and broken glass in to construction material. *International Journal of Creative Research Thoughts*, 6, 1659-1667.
- Belçer, G. 2019. Yüksek Sıcaklığın Atık Pet Agregalı Harçların Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans tezi Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Niğde, 51 s.
- Belmokaddem, M., Mahi, A., Senhadji, Y. ve Pekmezci, B. Y. 2020. Mechanical and physical properties and morphology of concrete containing plastic waste as aggregate. *Construction and Building Materials*, 257, 119559.
- Bhardwaj, B. ve Kumar, P. 2017. Waste foundry sand in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 156, 661-674.
- Bideci, O. S. 2016. The effect of high temperature on lightweight concretes produced with colemanite coated pumice aggregates. *Construction and Building Materials*, 113, 631-640.
- Binici, H., Temiz, H. ve Kose, M. M. 2007. The effect of fineness on the properties of the blended cements incorporating ground granulated blast furnace slag and ground basaltic pumice. *Construction and Building Materials*, 21(5), 1122-1128.

- Binici, H., Temiz, H., Sevinç, A. H., Eken, M., Kara, M. ve Şayir, Z. 2013. Alüminyum Talaşı, Bims ve Gazbeton Tozu İçeren Betonların Yüksek Sıcaklık Etkisinin İncelenmesi. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 9(1), 1-15.
- Brown, B. ve Skinner, M. 1990. Report on concrete mix design for lightweight masonry units using yali pumice coarse and fine aggregates. In: Report.
- Bui, N. K., Satomi, T. ve Takahashi, H. 2018. Recycling woven plastic sack waste and PET bottle waste as fiber in recycled aggregate concrete: An experimental study. *Waste Management*, 78, 79-93.
- Buyle, M., Galle, W., Debacker, W. ve Audenaert, A. 2019. Sustainability assessment of circular building alternatives: Consequential LCA and LCC for internal wall assemblies as a case study in a Belgian context. *Journal of Cleaner Production*, 218, 141-156.
- Can, A., ve Engin, Selin. 2013. Enerji Verimli Bina Isıtılmasının Termodinamik ve Ekonomik Değerlendirilmesi. In: 11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi 1073-1090, İzmir.
- Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., Chalee, W. ve Rattanasak, U. 2009. Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers. *Waste Management*, 29(2), 539-543.
- Choi, Y. W., Moon, D. J., Kim, Y. J. ve 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.
- Choudhary, K., Sangwan, K. S. ve Goyal, D. 2019. Environment and economic impacts assessment of PET waste recycling with conventional and renewable sources of energy. 26th Cirp Conference on Life Cycle Engineering (Lce), 80, 422-427.
- Cobrerros, C., Espinosa, D., Hidalgo, F., Manzano-Ramírez, A. ve Reyes, J. L. 2013. Cereal Straw Production Analysis, Availability of Materials, and Provincial Map for Manufacturing of Sustainable Prefabricated Panels. *BioResources*, 9(1).
- Corcoran, P. L., Moore, C. J. ve Jazvac, K. 2014. An anthropogenic marker horizon in the future rock record. *GSA today*, 4-8.
- Çakmak, A. ve Akıner, İ. 2021. Yapı Malzemesinin Mimarlık Eğitim Sürecinde Yeri ve Önem. *Kent Akademisi*, 14(4), 1022-1032.
- Çakmak, A., ve Örmecioğlu, H. T. 2020. Malzeme ve Mimarlığın Tarihsel Gelişimi . *Uluslararası Yapı Malzemeleri, Mühendislik ve Mimarlık Kongresi*, Ankara, 1-18 s.
- Da Silva, T. R., de Azevedo, A. R. G., Cecchin, D., Marvila, M. T., Amran, M., Fediuk, R., . . . Szelag, M. 2021. Application of Plastic Wastes in Construction Materials: A Review Using the Concept of Life-Cycle Assessment in the Context of Recent Research for Future Perspectives. *Materials (Basel)*, 14(13), 3549.
- Davraz, M., Ceylan, H. ve Kilincarslan, S. 2015. Mechanical Performances of Artificial Aggregated Lightweight Concrete. *Acta Physica Polonica A*, 127(4), 1246-1250.

- Debska, B. ve Licholai, L. 2015. The selected mechanical properties of epoxy mortar containing PET waste. *Construction and Building Materials*, 94, 579-588.
- Demir, İ., Başpınar, M. S., Görhan, G., Kahraman, E. ve Akyol, O. 2011. Pomza Agregalı Hafif Beton Isıl Özelliklerine Polistiren Köpük ve Uçucu Kül Katkısının Etkileri. *X. Ulusal Tesisat Mühensiliği Kongresi* 911-916.
- Demirel, B. ve Keleştemur, O. 2011. Yüksek sıcaklığa maruz pomza ve silis dumanı katkılı betonların mekanik ve fiziksel özelliklerine kür yaşının etkisi. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(1), 1-13.
- Demirel, S., Oz, H. O., Gunes, M., Ciner, F. ve Adin, S. 2019. Life-cycle assessment (LCA) aspects and strength characteristics of self-compacting mortars (SCMs) incorporating fly ash and waste glass PET. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 24(6), 1139-1153.
- Demirkale, Y., Sevtap. 2008. Çeşitli Duvarların Ses Geçiş Kaybı Değerlerinin Karşılaştırılması. Rapor, İTÜ Mimarlık Fakültesi, Ocak.
- Devi, V. S. 2018. Durability properties of multiple blended concrete. *Construction and Building Materials*, 179, 649-660.
- Dikici, T. 2010. Taşıyıcı Hafif Betonun Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 125 s.
- Doğan-Sağlamtimur, N., Güven, A. ve Bilgil, A. 2018. Physical and mechanical properties of cemented ash-based lightweight building materials with and without pumice. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018.
- Dolage, D., Dias, M. ve Ariyawansa, C. 2013. Offshore sand as a fine aggregate for concrete production. *British Journal of Applied Science & Technology*, 3(4), 813-825.
- Ersan, Y. C., Gulcimen, S., Imis, T. N., Saygin, O. ve Uzal, N. 2020. Life cycle assessment of lightweight concrete containing recycled plastics and fly ash. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(7), 2722-2735.
- Ersoy, B., Sariisik, A., Dikmen, S. ve Sariisik, G. 2010. Characterization of acidic pumice and determination of its electrokinetic properties in water. *Powder Technology*, 197(1-2), 129-135.
- Esfandabad, A. S., Motevalizadeh, S. M., Sedghi, R., Ayar, P. ve Asgharzadeh, S. M. 2020. Fracture and mechanical properties of asphalt mixtures containing granular polyethylene terephthalate (PET). *Construction and Building Materials*, 259.
- Fidan, O. 2018. Hafif Kompozit Malzemelerde İç Kürleme Etkisinin Taguchi Metodu İle İncelenmesi. Yüksek Lisans tezi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 84 s.
- Foti, D. ve Lerna, M. 2020. New mortar mixes with chemically depolymerized waste PET aggregates. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 1-9.
- Fraley, S., Oom, M., Terrien, B., ve Date, J. Z. 2006. Design of experiments via Taguchi methods: orthogonal arrays. *The Michigan chemical process dynamic and controls open text book*, USA, 2(3), 4.
- Garcia, M. D., Oliveira, M. R., Silva, T. N. ve Castro, A. C. M. 2021. Performance of mortars with PET. *Journal of material cycles and waste management*, 23(2), 699-706.

- Geyer, R., Jambeck, J. R. ve Law, K. L. 2017. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science advances*, 3(7), e1700782.
- Ghadzali, N. S., Ibrahim, M. H. W., Zuki, S. S. M., Sani, M. S. H. ve Al-Fasih, M. Y. M. 2020. Material Characterization and Optimum Usage of Coal Bottom Ash (CBA) as Sand Replacement against Concrete Properties. *International Journal of Integrated Engineering*, 12(9), 9-17.
- Ghosh, A., Ghosh, A. ve Neogi, S. 2018. Reuse of fly ash and bottom ash in mortars with improved thermal conductivity performance for buildings. *Heliyon*, 4(11), e00934.
- Gonzalez, A., Navia, R. ve Moreno, N. 2009. Fly ashes from coal and petroleum coke combustion: current and innovative potential applications. *Waste Manag Res*, 27(10), 976-987.
- Gorak, P., Postawa, P., Trusilewicz, L. N. ve Lagosz, A. 2021. Lightweight PET based composite aggregates in Portland cement materials - Microstructure and physicochemical performance. *Journal of Building Engineering*, 34.
- Gökçe, B. ve Taşgetiren, S. 2009. Kalite Dcin Deney Tasarımı. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6(1), 71-83.
- Gönen, T. 2009. Kendiliğinden Yerleşen Taşıyıcı Hafif Betonun Mekaniksel ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması. *Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ*, 130 s.
- Grasser, K. ve Minke, G. 1990. *Building with pumice*. F. Vieweg.
- Gu, L. ve Ozbakkaloglu, T. 2016. Use of recycled plastics in concrete: A critical review. *Waste Manag*, 51, 19-42.
- Gündüz, L. 2008. The effects of pumice aggregate/cement ratios on the low-strength concrete properties. *Construction and Building Materials*, 22(5), 721-728.
- Gündüz, L. ve Uğur, İ. 2005. The effects of different fine and coarse pumice aggregate/cement ratios on the structural concrete properties without using any admixtures. *Cement and concrete research*, 35(9), 1859-1864.
- Güner, C., Gökşen, F. ve Koçhan, A. 2017. Sürdürülebilir Kalkınma Modeli için Çevre Duyarlı Yapılarda Malzeme Seçiminin İncelenmesi. *Akademia Disiplinlerarası Bilimsel Araştırmalar Dergisi*, 3(2), 1-14.
- Gürsel, A. P. ve Meral, Ç. 2012. Türkiye’de Çimento Üretiminin Karşılaştırmalı Yaşam Döngüsü Analizi. 2. Proje ve Yapım Yönetimi Kongresi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, 1-13.
- Güzelküçük, S. 2014. Kompoze puzolan ikameli çimento harçlarına sülfatın etkisinin mikroyapısal olarak incelenmesi. *Yüksek Lisans tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale*, 147 s.
- Hall, M. L. ve Livingston, W. R. 2002. Fly ash quality, past, present and future, and the effect of ash on the development of novel products. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 77(3), 234-239.

- Hameed, A. M. ve Ahmed, B. A. F. 2019. Employment the plastic waste to produce the light weight concrete. *Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability (Tmrees)*, 157, 30-38.
- Hamzaçebi, C. ve Kutay, F. 2003. Taguchi Metodu: Bir Uygulama. *Teknoloji*, 6.
- Hannawi, K., Kamali-Bernard, S. ve Prince, W. 2010. Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates. *Waste Management*, 30(11), 2312-2320.
- Haque, M. S. 2019. Sustainable use of plastic brick from waste PET plastic bottle as building block in Rohingya refugee camp: a review. *Environ Sci Pollut Res Int*, 26(36), 36163-36183.
- Heidrich, C. F., H.; Weir, A. 2013. Coal Combustion Products: A Global Perspective, 2013 World of Coal Ash (WOCA) Conference, 22–25 April 2013, Lexington, KY, USA, .
- Hossain, K. M. A. 2003. Blended cement using volcanic ash and pumice. *Cement and concrete research*, 33(10), 1601-1605.
- Hossain, K. M. A., Ahmed, S. ve Lachemi, M. 2011. Lightweight concrete incorporating pumice based blended cement and aggregate: Mechanical and durability characteristics. *Construction and Building Materials*, 25(3), 1186-1195.
- Hui, K., Hui, K. ve Lee, S. K. 2009. A novel and green approach to produce nano-porous materials zeolite A and MCM-41 from coal fly ash and their applications in environmental protection. *International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering*, 3(5), 489-499.
- Hündür, Y. E. 2019. İstatistiksel Deney Tasarımı Yöntemi İle Plastik Kompozit Üretiminde Reçete Ve Proses Tasarımına Dair Bir Uygulama. Yüksek Lisans tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 71 s.
- Intini, F. ve Kuhtz, S. 2011. Recycling in buildings: an LCA case study of a thermal insulation panel made of polyester fiber, recycled from post-consumer PET bottles. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(4), 306-315.
- Irianto, Djameluddin, A. R., Pasra, M. ve Arsyad, A. 2021. Strength and Toughness Characteristics of Ac-Wc Mixture Containing Pet and Pp Plastic Waste under Static Compression. *International Journal of Geomate*, 20(78), 20-27.
- Ismail, A. I. M., Elmaghraby, M. S. ve Mekky, H. S. 2013. Engineering Properties, Microstructure and Strength Development of Lightweight Concrete Containing Pumice Aggregates. *Geotechnical and Geological Engineering*, 31(5), 1465-1476.
- Jaturapitakkul, C. ve Cheerarot, R. 2003. Development of bottom ash as pozzolanic material. *Journal of materials in Civil Engineering*, 15(1), 48-53.
- Jayaranjan, M. L. D., van Hullebusch, E. D. ve Annachhatre, A. P. 2014. Reuse options for coal fired power plant bottom ash and fly ash. *Reviews in Environmental Science and Bio-Technology*, 13(4), 467-486.
- Kahraman, M. U. 2015. Plastik ambalaj atıklarından yapı malzemesi üretimi Sanatta Yeterlilik Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 169 s.

- Kar, F. ve Bicer, A. 2018. Çimento-Pet Kompozitlerin Isıl ve Mekanik Özellikleri. *Firat University Journal of Science*, 30(2).
- Karaipekli, A. ve Sari, A. 2016. Development and thermal performance of pumice/organic PCM/gypsum composite plasters for thermal energy storage in buildings. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 149, 19-28.
- Karthika, R., Vidyapriya, V., Sri, K. N., Beaula, K. M. G., Harini, R. ve Sriram, M. 2021. Experimental study on lightweight concrete using pumice aggregate. *Materials Today: Proceedings*, 43, 1606-1613.
- Kaya, A. İ. 2010. Taban Külü Çimentolara Yönelik Bir Çalışma. Yüksek Lisans, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 60 s.
- Kaza, S. ve Bhada-Tata, P. 2018. Decision maker's guides for solid waste management technologies.
- Keskin, Ş. F. 2016. Perlit Ve Taban Külü Katkılı Harç Özelliklerinin Taguchi Deneysel Tasarım Yöntemi İle İncelenmesi. Yüksek Lisans, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 92 s.
- Khongpermgon, P., Boonlao, K., Ananthanet, N., Thitithananon, T., Jaturapitakkul, C., Tangchirapat, W. ve Ban, C. C. 2020. The mechanical properties and heat development behavior of high strength concrete containing high fineness coal bottom ash as a pozzolanic binder. *Construction and Building Materials*, 253, 119239.
- Kibria, M. G., Masuk, N. I., Safayet, R., Nguyen, H. Q. ve Mourshed, M. 2023. Plastic Waste: Challenges and Opportunities to Mitigate Pollution and Effective Management. *Int J Environ Res*, 17(1), 20.
- Kılıç, A., Atiş, C. D., Yaşar, E. ve Özcan, F. 2003. High-strength lightweight concrete made with scoria aggregate containing mineral admixtures. *Cement and concrete research*, 33(10), 1595-1599.
- Kilincarslan, Ş., Davraz, M. ve Akça, M. 2018. The effect of pumice as aggregate on the mechanical and thermal properties of foam concrete. *Arabian Journal of Geosciences*, 11, 1-6.
- Kim, J.-H. J., Park, C.-G., Lee, S.-W., Lee, S.-W. ve Won, J.-P. 2008. Effects of the geometry of recycled PET fiber reinforcement on shrinkage cracking of cement-based composites. *Composites Part B: Engineering*, 39(3), 442-450.
- Koçkal, N. U. 2016. Investigation about the effect of different fine aggregates on physical, mechanical and thermal properties of mortars. *Construction and Building Materials*, 124, 816-825.
- Konak, S. 2018. Granüle Yüksek Fırın Cürufu ve Taban Külü İnce Agregaları ile Üretilmiş Betonun Gerilme Şekil Değiştirme Davranışının İncelenmesi. Yüksek Lisans tezi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak, 105 s.
- Kumar, S. ve Stewart, J. 2003. Utilization of Illinois PCC dry bottom ash for compacted landfill barriers. *Soil & Sediment Contamination*, 12(3), 401-415.

- Kumbhar, S., Kulkarni, N., Rao, A. B. ve Rao, B. 2014. Environmental Life Cycle Assessment of Traditional Bricks in Western Maharashtra, India. 4 International Conference on Advances in Energy Research (Icaer 2013), 54, 260-269.
- Kus, H., Ozkan, E., Gocer, O. ve Edis, E. 2013. Hot box measurements of pumice aggregate concrete hollow block walls. *Construction and Building Materials*, 38, 837-845.
- Küçükgül, E. Y. ve Doğan, S. K. 2007. PET şişenin yaşam döngü analizi, 7. Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi, Yaşam Çevre Teknoloji, 24-27.
- Kylili, A. ve Fokaides, P. A. 2017. Policy trends for the sustainability assessment of construction materials: A review. *Sustainable Cities and Society*, 35, 280-288.
- Lamba, P., Kaur, D. P., Raj, S. ve Sorout, J. 2022. Recycling/reuse of plastic waste as construction material for sustainable development: a review. *Environ Sci Pollut Res Int*, 29(57), 86156-86179.
- Lee, H. K., Kim, H. K. ve Hwang, E. A. 2010. Utilization of power plant bottom ash as aggregates in fiber-reinforced cellular concrete. *Waste Management*, 30(2), 274-284.
- Li, Y., White, D. J. ve Peyton, R. L. 1998. Composite material from fly ash and post-consumer PET. *Resources, conservation and recycling*, 24(2), 87-93.
- Liban, İ. R. 2022. Taguchi Yöntemi ile Uçucu Kül ve Kalker Katkılı Zeolit Esaslı Geopolimer Harçların Tasarlanması. Doktora, Konya Teknik Üniversitesi, Konya, 160 s.
- Limami, H., Manssouri, I., Cherkaoui, K. ve Khaldoun, A. 2020. Study of the suitability of unfired clay bricks with polymeric HDPE & PET wastes additives as a construction material. *Journal of Building Engineering*, 27.
- Lin, K. L., Chang, W. C. ve Lin, D. F. 2008. Pozzolan characteristics of pulverized incinerator bottom ash slag. *Construction and Building Materials*, 22(3), 324-329.
- Litvan, G. G. 1985. Further study of particulate admixtures for enhanced freeze-thaw resistance of concrete, *Journal Proceedings*, 82, 724-730.
- Madloul, N. A., Saidur, R., Hossain, M. S. ve Rahim, N. A. 2011. A critical review on energy use and savings in the cement industries. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 2042-2060.
- Mangi, S. A., Ibrahim, M. H. W., Jamaluddin, N., Arshad, M. F. ve Mudjanarko, S. W. 2019. Recycling of Coal Ash in Concrete as a Partial Cementitious Resource. *Resources-Basel*, 8(2), 99.
- Mangi, S. A., Ibrahim, M. H. W., Jamaluddin, N., Arshad, M. F. ve Ramadhansyah, P. J. 2019. Effects of Ground Coal Bottom Ash on the Properties of Concrete. *Journal of Engineering Science and Technology*, 14(1), 338-350.
- Manjunath, R., Narasimhan, M. C., Umesh, K. M., Kumar, S. ve Bharathi, U. K. B. 2019. Studies on development of high performance, self-compacting alkali activated slag concrete mixes using industrial wastes. *Construction and Building Materials*, 198, 133-147.

- Marcelino-Sadaba, S., Kinuthia, J., Oti, J. ve Meneses, A. S. 2017. Challenges in Life Cycle Assessment (LCA) of stabilised clay-based construction materials. *Applied Clay Science*, 144, 121-130.
- Mardiha Mokhtar, S. S., Baizura Hamid, Masiri Kaamin, M. Jahaya Kesot, Law Chia Wen, Loo Yong ve Xin, N. P. L. a. V. S. J. L. 2016. Application of Plastic Bottle As A Wall Structure For Green House. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(12), 7617-7621.
- Marzouk, O. Y., Dheilily, R. M. ve Queneudec, M. 2007. Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites. *Waste Manag*, 27(2), 310-318.
- Mboya, H. A., Njau, K. N., Mrema, A. L. ve King'ondü, C. K. 2019. Influence of scoria and pumice on key performance indicators of Portland cement concrete. *Construction and Building Materials*, 197, 444-453.
- Mehta, P. K. 1998. Role of pozzolanic and cementitious material in sustainable development of the concrete industry. *Special Publication*, 178, 1-20.
- Meij, R. ve Berg, J. 2001. Coal fly ash management in Europe trends, regulations and health & safety aspects, *Proceedings of the International Ash Utilization Symposium*, Lexington, KY, USA, 20-24.
- Mezarcıöz, S. ve Oğulata, R. T. 2010. Süprem kumaşlarda patlama mukavemeti değerinin Taguchi ortogonal dizayna göre optimizasyonu. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 20(4), 320-328.
- Mohammadi Ahmadabad, Y. (2014). Öğütülmüş Atık Petlerle Üretilen Betonun Özelliklerinin Belirlenmesi Üzerine Bir Araştırma. Yüksek Lisans Tezi Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Mohammadi Ahmadabad, Y. 2014. Öğütülmüş Atık Petlerle Üretilen Betonun Özelliklerinin Belirlenmesi Üzerine Bir Araştırma. Yüksek Lisans tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, 72 s.
- Mohammed, S. A., Koting, S., Katman, H. Y. B., Babalghaith, A. M., Patah, M. F. A., Ibrahim, M. R. ve Karim, M. R. 2021. A Review of the Utilization of Coal Bottom Ash (CBA) in the Construction Industry. *Sustainability*, 13(14), 8031.
- Mondal, M. K., Bose, B. P. ve Bansal, P. 2019. Recycling waste thermoplastic for energy efficient construction materials: An experimental investigation. *J Environ Manage*, 240, 119-125.
- Moulton, L. K., Seals, R. K. ve Anderson, D. A. 1973. Utilization of ash from coal burning power plants in highway construction. *Transportation Research Record*, 430, 26-39.
- Naik, T. R., Kraus, R. N., Ramme, B. W. ve Canpolat, F. 2012. Effects of fly ash and foundry sand on performance of architectural precast concrete. *Journal of materials in Civil Engineering*, 24(7), 851-859.
- Nayak, S. K., Satapathy, A. ve Mantry, S. 2020. Processing and wear response study of glass-polyester composites with waste marble dust as particulate filler. *Polymer Composites*, 41(6), 2263-2273.

- Nayır, S. 2021. Pomza ve Perlit Agregası içeren Mineral Katkılı Taşıyıcı Hafif Betonların Enerji Performansı Açısından Değerlendirilmesi. Doktora tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 149 s.
- Nematzadeh, M., Shahmansouri, A. A. ve Fakoor, M. 2020. Post-fire compressive strength of recycled PET aggregate concrete reinforced with steel fibers: Optimization and prediction via RSM and GEP. *Construction and Building Materials*, 252.
- Nevruz, B. 2016. Çeşitli Agregalarla Üretilen Harçların Fiziksel, Mekanik ve Durabilite Özellikleri Yüksek Lisans tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, 95 s.
- Newman, J. ve Bremner, T. 1980. The testing of structural lightweight concrete. *Concrete International*, The Construction Press, London, 152-171.
- Nikbin, I. M., Dezhampanah, S., Charkhtab, S., Mehdipour, S., Shahvareh, I., Ebrahimi, M., . . . Pourghorban, H. 2022. Life cycle assessment and mechanical properties of high strength steel fiber reinforced concrete containing waste PET bottle. *Construction and Building Materials*, 337, 127553.
- Oğuz, C. 1989. Ponza Betonda Fiziksel ve Mekanik Özellikler Arasındaki İlişkiler. Yüksek Lisans tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, 102 s.
- Oktay, H., Yumrutas, R. ve Akpolat, A. 2015. Mechanical and thermophysical properties of lightweight aggregate concretes. *Construction and Building Materials*, 96, 217-225.
- Onacak, T. 1999. Türkiye'deki Termik Santrallara Beslenen Kömürlerin ve Yanma Sonucu Oluşan Katı Atıkların Çevresel Etkileri. Doktora tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 189 s.
- Orhon, A. ve Altın, M. 2012. Beton Yapıların Karbon Ayak İzi. *Sürdürülebilir Yapı Tasarımı Ulusal Konferansı*, Bornova, 12-13.
- Osial, M., Pregowska, A., Wilczewski, S., Urbańska, W. ve Giersig, M. 2022. Waste Management for Green Concrete Solutions: A Concise Critical Review. *Recycling*, 7(3).
- Oz, D., Koca, S. ve Koca, H. 2009. Recycling of coal combustion wastes. *Waste Manag Res*, 27(3), 267-273.
- Ölmez, Ö. 2010. Tehlikeli Atık Yakma Tesisi Taban Küllerinin Beton Hammaddesi Olarak Kullanılması ile Bertaraf Edilmesinin Araştırılması. Yüksek Lisans tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 83 s.
- Öner, B. 2013. Lif Takviyeli Çimento Esaslı Kompozit Üretiminde Polimer Atıkların Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 199 s.
- Özcan, F. ve Koç, M. E. 2018. Influence of ground pumice on compressive strength and air content of both non-air and air entrained concrete in fresh and hardened state. *Construction and Building Materials*, 187, 382-393.
- Park, S. H. ve Kim, S. H. 2014. Poly (ethylene terephthalate) recycling for high value added textiles. *Fashion and Textiles*, 1(1), 1-17.
- Paschoalin Filho, J. A., Storopoli, J. H. ve Dias, A. J. G. 2016. Evaluation of compressive strength and water absorption of soil-cement bricks manufactured with addition

- of pet (polyethylene terephthalate) wastes. *Acta Scientiarum. Technology*, 38(2), 163-171.
- Patil, A. R. ve Sathe, S. B. 2021. Feasibility of sustainable construction materials for concrete paving blocks: A review on waste foundry sand and other materials. *Materials Today-Proceedings*, 43, 1552-1561.
- Pehlivan, E., Ünal, S. ve Tunçsiper, B. 2004. Plastik Ambalaj Malzemelerinin Hayatımızdaki Yeri ve Bunların geri kazanılması ve Azaltımında Çağdaş Yöntemler. *Polimer İşleme ve Geri Kazanımı Sempozyumu*, Mersin, 114-128.
- Pekdemir, M. 2011. Hasankale Pasinler Pomzası ile Üretilen Betonların Bazı Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, 116 s.
- Pera, J., Coutaz, L., Ambroise, J. ve Chababbet, M. 1997. Use of incinerator bottom ash in concrete. *Cement and concrete research*, 27(1), 1-5.
- Perera, S., Arulrajah, A., Wong, Y. C., Horpibulsuk, S. ve Maghool, F. 2019. Utilizing recycled PET blends with demolition wastes as construction materials. *Construction and Building Materials*, 221, 200-209.
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J. ve Pout, C. 2008. A review on buildings energy consumption information. *Energy and buildings*, 40(3), 394-398.
- Perez, A. A. 2012. The mineral industry of France. *Minerals Yearbook*, 2010, V. 3, Area Reports, International, Europe and Central Eurasia, 3, 11.
- Pliatsikas, I., Robou, E., Samouhos, M., Katsiotis, N. S. ve Tsakiridis, P. E. 2019. Valorization of demolition ceramic wastes and lignite bottom ash for the production of ternary blended cements. *Construction and Building Materials*, 229.
- Prusty, R., Mukharjee, B. B. ve Barai, S. V. 2015. Nano-engineered concrete using recycled aggregates and nano-silica: Taguchi approach. *Advances in Concrete Construction*, 3(4), 253-268.
- Rahman, F., Adil, W., Raheel, M., Saberian, M., Li, J. ve Maqsood, T. 2022. Experimental investigation of high replacement of cement by pumice in cement mortar: A mechanical, durability and microstructural study. *Journal of Building Engineering*, 49, 104037.
- Rai, S., Lataye, D. H., Chaddha, M. J., Mishra, R. S., Mahendiran, P., Mukhopadhyay, J., Wasewar, K. L. 2013. An Alternative to Clay in Building Materials: Red Mud Sintering Using Fly Ash via Taguchi's Methodology. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013.
- Rajendran, S., Scelsi, L., Hodzic, A., Soutis, C. ve Al-Maadeed, M. A. 2012. Environmental impact assessment of composites containing recycled plastics. *Resources, conservation and recycling*, 60, 131-139.
- Rajput, S. ve Arora, K. 2017. Analytical Study of Green Spaces and Carbon Footprints. *Sustainable Smart Cities in India: Challenges and Future Perspectives*, 369-382.
- Risberg Ellekjær, M. ve Bisgaard, S. 1998. The use of experimental design in the development of new products. *International Journal of Quality Science*, 3(3), 254-274.

- Rojas, C., Cea, M., Iriarte, A., Valdes, G., Navia, R. ve Cardenas-R, J. P. 2019. Thermal insulation materials based on agricultural residual wheat straw and corn husk biomass, for application in sustainable buildings. *Sustainable Materials and Technologies*, 20, e00102.
- Sadrmomtazi, A., Dolati-Milehsara, S., Lotfi-Omran, O. ve Sadeghi-Nik, A. 2016. The combined effects of waste Polyethylene Terephthalate (PET) particles and pozzolanic materials on the properties of self-compacting concrete. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2363-2373.
- Safinia, S. ve Alkalbani, A. 2016. Use of Recycled Plastic Water Bottles in Concrete Blocks. *Procedia Engineering*, 164, 214-221.
- Sahin, A. E., Yildiran, Y., Avcu, E., Fidan, S. ve Sinmazcelik, T. 2014. Mechanical and Thermal Properties of Pumice Powder Filled PPS Composites. *Acta Physica Polonica A*, 125(2), 518-520.
- Samimi, K., Kamali-Bernard, S. ve Maghsoudi, A. A. 2018. Durability of self-compacting concrete containing pumice and zeolite against acid attack, carbonation and marine environment. *Construction and Building Materials*, 165, 247-263.
- Sayara, T. 2016. Environmental impact assessment of quarries and stone cutting industries in Palestine: case study of Jammain. *Journal of Environment Protection and Sustainable Development*, 2(4), 32-38.
- Serin, G., Çankıran, O., Başıyigit, C., Taş, H. H. ve Fenkli, M. 2007. Normal, hafif ve yarı hafif beton blokların fiziksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 3(1), 15-22.
- Sevencan, F. ve Vaizoğlu, S. A. 2007. Pet ve geri dönüşümü. *TSK Koruyucu Hekimlik Bülteni*, 6(4), 307-312.
- Shahidan, S., Ranle, N. A., Zuki, S. S. M., Khalid, F. S., Ridzuan, A. R. M. ve Nazri, F. M. 2018. Concrete Incorporated with Optimum Percentages of Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) Bottle Fiber. *International Journal of Integrated Engineering*, 10(1), 1-8.
- Siddique, R. 2010. Utilization of coal combustion by-products in sustainable construction materials. *Resources Conservation and Recycling*, 54(12), 1060-1066.
- Siddique, R. 2013. Compressive strength, water absorption, sorptivity, abrasion resistance and permeability of self-compacting concrete containing coal bottom ash. *Construction and Building Materials*, 47, 1444-1450.
- Singh, M. ve Siddique, R. 2016. Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on workability and strength properties of concrete. *Journal of Cleaner Production*, 112, 620-630.
- Skibicki, S., Techman, M., Federowicz, K., Olczyk, N. ve Hoffmann, M. 2021. Experimental Study of Hardened Young's Modulus for 3D Printed Mortar. *Materials*, 14(24).
- Srivastava, A. ve Singh, S. K. 2020. Utilization of alternative sand for preparation of sustainable mortar: A review. *Journal of Cleaner Production*, 253, 119706.

- Stepanova, V. F. 1991. The Protection of Steel Reinforcing by the Passivating Effect of Lightweight Concrete. *Durability of Concrete*, Vols 1 and 2, 126, 1135-1146.
- Subaşı, S., İşbilir, B. ve Ercan, İ. 2011. Uçucu kül ikameli çimento numunelerinin mekanik özelliklerine yüksek sıcaklığın etkisi. *Politeknik Dergisi*, 14(2), 141-148.
- Sulyman, M., Haponiuk, J. ve Formela, K. 2016. Utilization of recycled polyethylene terephthalate (PET) in engineering materials: A review. *International Journal of Environmental Science and Development*, 7(2), 100.
- Sutcu, M., Erdogmus, E., Gencel, O., Gholampour, A., Atan, E. ve Ozbakkaloglu, T. 2019. Recycling of bottom ash and fly ash wastes in eco-friendly clay brick production. *Journal of Cleaner Production*, 233, 753-764.
- Şengül, Ç. G. 2020. Benzer İnceliğe Sahip Uçucu Kül, Yüksek Fırın Cürufu ve Taban Külü İçeren Çimento Bağlayıcılı Kompozit Sistemin Dayanım ve Dayanıklılık Özellikleri. Yüksek Lisans tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, 110s.
- Taaffe, J., O'Sullivan, S., Rahman, M. E. ve Pakrashi, V. 2014. Experimental characterisation of Polyethylene Terephthalate (PET) bottle Eco-bricks. *Materials & Design*, 60, 50-56.
- Tahanpour Javadabadi, M. 2019. Comparative Life Cycle Assessment of Incorporating Recycled PET Aggregates into Concrete. NTNU.
- Tapan, M., Depci, T., Ozvan, A., Efe, T. ve Oyan, V. 2013. Effect of physical, chemical and electro-kinetic properties of pumice on strength development of pumice blended cements. *Materials and Structures*, 46(10), 1695-1706.
- Tayyar, A. E. ve Üstün, S. 2010. Geri Kazanılmış Pet'in Kullanımı. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 16(1).
- Tekin, D. 2014. Farklı inceliklerdeki mineral katkılı çimentoların bazı fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi. Yüksek Lisans tezi, Bayburt Üniversitesi, Bayburt, 117 s.
- Thorneycroft, J., Orr, J., Savoikar, P. ve Ball, R. 2018. Performance of structural concrete with recycled plastic waste as a partial replacement for sand. *Construction and Building Materials*, 161, 63-69.
- Tiwari, A., Singh, S. ve Nagar, R. 2016. Feasibility assessment for partial replacement of fine aggregate to attain cleaner production perspective in concrete: A review. *Journal of Cleaner Production*, 135, 490-507.
- Topal, M., Topal, E. I. A., Aslan, S. ve Kılıç, M. 2011. Termik Santral Uçucu Külü, Cürufu ve Arıtma Çamurundan Ağır Metallerin Liçlenebilirliği. *Sakarya University Journal of Science*, 15(2), 97-104.
- Torkittikul, P., Nochaiya, T., Wongkeo, W. ve Chaipanich, A. 2017. Utilization of coal bottom ash to improve thermal insulation of construction material. *Journal of material cycles and waste management*, 19(1), 305-317.
- Tunc, E. T. 2019. Recycling of marble waste: A review based on strength of concrete containing marble waste. *Journal of environmental management*, 231, 86-97.
- Türk Standartları Enstitüsü. (1988). Beton bloklar-Briketler-Duvarlar için (TS 406). Ankara.

- Türk Standartları Enstitüsü. (2002). Beton Standartı (TS EN 206). Ankara.
- Türk Standartları Enstitüsü. (2002). Çimento-Bölüm 1: Genel çimentolar- Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri (TS EN 197-1). Ankara.
- Türk Standartları Enstitüsü. (2010). Beton - Taze Beton Deneyleri Bölüm 2: Çökme (Slump) Deneyi (TS EN 12350-2). Ankara.
- Türk Standartları Enstitüsü. (2012). Genel Çimento Sınıflarının Bileşimini, Özellikleri ve Uygunluk Kriterleri (TS EN 197-1). Ankara.
- Türk Standartları Enstitüsü. (2015). Beton deneyleri-Bölüm 10: Basınç Altında Statik Elastik Modülünün Belirlenmesi (TS ISO 1920-10). Ankara.
- Türk Standartları Enstitüsü. (2017). Taşıyıcı hafif betonların karışım hesap esasları (TS 2511). Ankara.
- Türkel, S. ve Kadiroğlu, B. 2007. Pomza agregali taşıyıcı hafif betonun mekanik özelliklerinin incelenmesi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 13(3), 353-359.
- Ulu, C. 2016. Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu ve Metakaolinli Harçlarda Atık Pet Agrega Kullanımının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi Ömer Halisdemir Üniversitesi, 79, Niğde.
- Ulus, H., Aruntas, H. Y. ve Gencel, O. 2016. Investigation on characteristics of blended cements containing pumice. Construction and Building Materials, 118, 11-19.
- Unep. 2011. Emerging Issues in Our Global Environment. In: United Nations Environment Programme, Nairobi.
- Uran, Y. 2022. Taguchi Yöntemi Kullanılarak Hafif Genleşmiş Kil Üretiminin Optimizasyonu. Yüksek Lisans tezi, Bilecik Şeyh Edabali Üniversitesi, Bilecik, 82 s.
- Usahanunth, N. ve Pochanart, P. 2017. CO₂-emission assessment of the concrete added crushed PET bottles waste. Interdisciplinary Research Review, 12(1), 9-15.
- Uysal, H., Demirboğa, R., Şahin, R. ve Gül, R. 2004. The effects of different cement dosages, slumps, and pumice aggregate ratios on the thermal conductivity and density of concrete. Cement and concrete research, 34(5), 845-848.
- Uzal, B., Turani, L. ve Mehta, P. K. 2007. High-volume natural pozzolan concrete for structural applications. ACI Materials Journal, 104(5), 535-538.
- Van Oss, H. G. ve Padovani, A. C. 2003. Cement manufacture and the environment part II: environmental challenges and opportunities. Journal of Industrial ecology, 7(1), 93-126.
- Veliev, E., Öztürk, T., Veli, S. ve Fatullayev, A. 2006. Application of diffusion model for adsorption of azo reactive dye on pumice. Polish Journal of Environmental Studies, 15(2).
- Verma, R., Vinoda, K. S., Papireddy, M. ve Gowda, A. N. S. 2016. Toxic Pollutants from Plastic Waste- A Review. Procedia Environmental Sciences, 35, 701-708.

- Wang, Y. R., Cao, Y. B., Zhang, P. ve Ma, Y. W. 2020. Effective Utilization of Waste Glass as Cementitious Powder and Construction Sand in Mortar. *Materials*, 13(3).
- Wei, L. 1992. Utilization of coal combustion by-products for masonry construction.
- Wei, Z. 2017. Synthesis of Nano-Carbons from Different Waste Plastics and Diverse Catalysts. Master of Science, Northeastern University, 34 p.
- Xiao, J., Zhang, H., Hu, X., Ding, T. ve Xiao, X. 2023. Impact assessment of river sand resource shortage under different policy scenarios in China. *Low-carbon Materials and Green Construction*, 1(1), 16.
- Xu, Y., Wong, Y. L., Poon, C. S. ve Anson, M. 2001. Impact of high temperature on PFA concrete. *Cement and concrete research*, 31(7), 1065-1073.
- Yalçınkaya, Ş. ve Karadeniz, İ. 2022. Sürdürülebilir Mimari Tasarımda Atık Malzemenin Yeri. *Journal of Architectural Sciences and Applications*, 7(2), 750-762.
- Yao, W., Li, J. ve Wu, K. 2003. Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber volume fraction. *Cement and concrete research*, 33(1), 27-30.
- Yaşar, E. ve Erdoğan, Y. 2008. Strength and thermal conductivity in lightweight building materials. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67, 513-519.
- Yıldırım, S. T. ve Duygun, N. P. 2017. Mechanical and physical performance of concrete including waste electrical cable rubber, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 245, 022054.
- Yıldırım, S. T. ve Erman, B. 2018. Bims agregalı ve genleştirilmiş perlit agregalı hafif kompozit harçların özelliklerinin deneysel olarak incelenmesi. *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 1(1), 47-52.
- Yılmaz, Ş. 2010. Kitre Bağlayıcılı Termik Santral Uçucu Küllerinin Yeni Bir Yapı Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi. *Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ*, 97 s.
- Yu, J., Yao, J., Lin, X. Y., Li, H. D., Lam, J. Y. K., Leung, C. K. Y., . . . Shih, K. M. 2018. Tensile performance of sustainable Strain-Hardening Cementitious Composites with hybrid PVA and recycled PET fibers. *Cement and concrete research*, 107, 110-123.
- Yuan, X. L., Tang, Y. Z., Li, Y., Wang, Q. S., Zuo, J. ve Song, Z. L. 2018. Environmental and economic impacts assessment of concrete pavement brick and permeable brick production process - A case study in China. *Journal of Cleaner Production*, 171, 198-208.
- Yüksel, İ., Özkan, Ö. ve Bilir, T. 2006. Kazanaltı Külü ile Briket Üretimi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(3).
- Zhang, F., Zhao, Y., Wang, D., Yan, M., Zhang, J., Zhang, P., . . . Chen, C. 2021. Current technologies for plastic waste treatment: A review. *Journal of Cleaner Production*, 282, 124523.
- Zhang, L. W., Sojobi, A. O., Kodur, V. K. R. ve Liew, K. M. 2019. Effective utilization and recycling of mixed recycled aggregates for a greener environment. *Journal of Cleaner Production*, 236.

ÖZGEÇMİŞ

ARZU ÇAKMAK

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Doktora	Akdeniz Üniversitesi
2019-2023	Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, Antalya
Yüksek Lisans	Kocaeli Üniversitesi
2010-2013	Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, Kocaeli
Lisans	Kocaeli Üniversitesi
2005-2009	Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Kocaeli

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Kısmi Zamanlı Öğretim Görevlisi	Antalya Bilim Üniversitesi
2019-Devam Ediyor	Güzel Sanatlar ve Mimarlık Fakültesi, Mimarlık- İç Mimarlık Bölümü, Antalya
Kısmi Zamanlı Öğretim Görevlisi	Akev Üniversitesi
2020-2022	Sanat ve Tasarım Fakültesi, İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Bölümü, Antalya

ESERLER

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

- Şekerci, Y., Kahraman, U. M. & Çakmak A. (2021). Internship Experience in Architecture and Interior Architecture Departments from Students' Point of Views. Online Journal of Art and Design, 9 (2), 172-188.

2. Çakmak, A. & Akıner, İ. (2021). Yapı Malzemesinin Mimarlık Eğitim Sürecinde Yeri ve Önemi. Kent Akademisi , 14 (4), 1022-1032 .
3. Çelebi, Karakök, E. & Çakmak, A. (2021). Sinema ve Dizi Filmlerde Kültür ve Mekân Algısının Turizme Etkisi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Sosyal Bilimler Dergisi, (54) , 199-219 .
4. Çakmak, A., Kavas, K. R. & Mutlu, Danacı, H. (2022). Steven Holl'ün Mimari Tasarım Yaklaşımında Fenomenolojik ve Tektonik Duyarlılıklar Üzerine Bir Çözümleme. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 13 (1), 134-149.
5. Mutlu, Danacı, H. & Çakmak, A. (2022). Computer-Aided Design and Virtual Reality in Architecture. Journal of Scientific Reports-A, (048), 98-112.

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında (Proceeding) basılan bildiriler

1. Çakmak, A. & Örmecioğlu, T. H. (2020). Malzeme ve Mimarlığın Tarihsel Gelişimi. Uluslararası Yapı Malzemeleri, Mühendislik ve Mimarlık Kongresi, 1-18.
2. Çakmak, A., Erbaş, İ. & Danacı, M. H. (2021). İnşaat Sektöründe Proje Yönetimi Uygulamalarında Teknoloji Kullanımının Avantajları, Atlas International Journal on Social Sciences, 64-74.

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

- 1- Çakmak, A., (2018). Şeffaf Beton Yapı Malzemesinin Türk Yapı Sektöründeki Yeri ve Mevcut Uygulamaları. 4. Ulusal Yapı Kongresi.

Ulusal hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

1. Çakmak, A. (2021). Yapı Malzemesinin Tarihsel Gelişimi ve Mimarlığa Etkileri. ATA Planlama ve Tasarım Dergisi , 5 (1) , 41-54 .

Diğer Yayınlar

1. Gölcük Mimari Miras Kitabı, T. Gül Köksal yürütücülüğünde Gölcük Envanter dolum aşamasında bulunma.

Projeler

1. TÜBİTAK TEYDEB BİGG 1512 2021-2 Yeşil Büyüme - Pomza Agregası ile Atık aban Külü ve Polietilen Tereftalat (PET) Katkılı Yapı Bloğu Geliştirilmesi