



T.C.

TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ATIK BİYOKÜTLE KÜLÜNÜN KİLİTLİ BETON PARKE TAŞINDA
KULLANILMASININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ersin MELEK

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Melih Naci AĞAOĞLU

TOKAT- 2024

ÖNSÖZ

Yüksek Lisans eğitimim ve tez çalışmam boyunca değerli tecrübelerini, bilgilerini ve yardımlarını esirgmeden ihtiyaç duyduğum her anda bana zaman ayıran ve beni yönlendiren danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Melih Naci AĞAOĞLU' na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım süresince yardımlarını ve fikirlerini esirgemeyen İnşaat Mühendisliği Bölüm Başkanı Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ferit YAKAR' a, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin BAŞDEMİR' e, Sayın Arş. Gör. Erdinç Halis ALAKARA' ya ve tüm İnşaat Mühendisliği Bölümü' ne, üretim aşamasında büyük bir ilgi ile bana yardımcı olan NURAK Beton Sanayi ve Ticaret A.Ş. yetkililerine ve çalışanlarına, deneysel çalışmalarımda büyük bir ilgi ile bana yardımcı Erbaa Beton Sanayi ve Ticaret A.Ş. yetkililerine ve çalışanlarına teşekkür ederim.

Son olarak maddi ve manevi desteğini her zaman hissettiren ve yüksek lisans çalışmalarım boyunca beni yalnız bırakmayan sevgili eşim Rumeysa Gülsüm MELEK' e ve her daim bana enerji veren oğlum Yusuf Aras MELEK' e sevgi ve saygılarımı sunarım.

Ersin MELEK

Eylül 2024

ÖZET

ATIK BİYOKÜTLE KÜLÜNÜN KİLİTLİ BETON PARKE TAŞINDA KULLANILMASININ İNCELENMESİ

Ersin MELEK

Yüksek Lisans, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Melih Naci AĞAOĞLU

Eylül 2024, xii + 63 sayfa

Gelişmiş olan birçok ülkede artan kentleşme, sanayileşme ve altyapı gelişimine bağlı olarak kirlilik ve çevre sorunlarında artış yaşanmaktadır. Bu artış farklı türlerde tehlike ve biyolojik olarak parçalanmayan katı atıkların üretilip çevreye salınmasına yol açmaktadır. Atıkların fiziksel ve kimyasal özelliklerinin doğru tespit edilerek farklı sektörlerde alternatif ürün olarak değerlendirilmesi ülkelerin ekonomisine katkı sağlayacaktır. Atık malzemelerin depolanması veya taşınması da ekstra maliyet gerektirdiğinden genellikle içeriği ne olursa olsun direkt yok edilmeye çalışılmaktadır. Ancak bu malzemelerin kaynak olarak değerlendirilmesi çoğu zaman daha avantajlı olabilmektedir. Bu çalışmada, Tokat ilinde faaliyet gösteren CEMAK Elektrik Enerjisi A.Ş.'den alınan biyokütle atığı külü çimento yerine kademeli olarak ikame ederek beton parke taşlarında kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu kapsamda beton parke taşı üretiminde kullanılacak olan kül yabancı maddelerden arındırılmış ve bilyeli değirmenden geçirilerek kullanıma hazır hale getirilmiştir. Bu kül, çimento yerine ağırlıkça %0, %5, %10, %15, %20, %25 ve % 30 oranlarında ikame olarak kullanılarak beton parke taşları üretilmiştir. Kontrol grubu ve diğer numune gruplarına boyut ve görünüş tayini, su emme oranı tayini, aşınma direnci tayini, yarmada çekme dayanımı, buz çözücü tuz etkisi ile birlikte donma-çözülme direnci tayini ve ultrasonik hız deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; biyokütle atığı külünün beton parke taşlarında çimento yerine ağırlıkça %15 oranına kadar kullanılabilir olduğu tespit edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Biyokütle Atığı, Kül, Beton Parke Taşı, Geri Dönüşüm, Çimento

ABSTRACT
**INVESTIGATION OF THE USE OF WASTE BIOMASS ASH IN CLAY CONCRETE
PAVING STONE**

ERSİN MELEK

Master's Thesis, Department Of Civil Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Melih Naci AĞAOĞLU

September 2024, XIII + 63 pages

In many advanced countries, increasing urbanization, industrialization, and infrastructure development have led to a rise in pollution and environmental issues. This increase has resulted in the production and release of various types of hazards and biologically non-degradable solid wastes into the environment. Correctly identifying the physical and chemical properties of these wastes and evaluating them as alternative products in different sectors can contribute to a country's economy. Since the storage or transportation of waste materials also incurs additional costs, they are often disposed of directly, regardless of their content. However, utilizing these materials as resources can often be more advantageous. This study investigates the feasibility of using biomass ash from CEMAK Elektrik Enerjisi A.Ş., located in Tokat, as a partial replacement for cement in concrete paving stones. In this context, the ash, which was freed from foreign substances and processed through a ball mill, was prepared for use. The ash was used as a replacement for cement in proportions of 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, and 30% by weight to produce concrete paving stones. Various tests were conducted on the control group and other sample groups, including dimensional and appearance determination, water absorption rate, abrasion resistance, splitting tensile strength, resistance to freeze-thaw cycles with de-icing salts, and ultrasonic velocity tests. According to the results obtained, it was determined that biomass ash can be used as a replacement for cement in concrete paving stones up to 15% by weight.

KEYWORDS: Biomass Waste, Ash, Concrete Paving Stone, Recycling, Cement

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
1.GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	4
2.1. BETON	12
2.1.1. Çimento	13
2.1.2. Agregası.....	14
2.1.3. Su.....	14
2.1.4. Puzolanlar	15
2.1.5. Tarımsal ve biyokütle atıklarının puzolonik özellikleri.....	17
2.2 KİLİTLİ BETON PARKE TAŞLARI	18
2.2.1. Kilitli beton parke taşlarının özellikleri.....	20
2.2.2. Kilitli beton parke taşlarının üretimi	21
2.2.3. Kilitli beton parke taşlarına uygulanan deneyler.....	22
3. MATERYAL VE YÖNTEM	26
3.1 MATERYAL.....	26
3.1.1. Agregası.....	26
3.1.2. Çimento	26
3.1.3. Su.....	27
3.1.4. Katkı malzemesi	27
3.2. YÖNTEM.....	31
3.2.1. Agregası deneyleri.....	31
3.2.2. Kilitli beton parke taşı üretimi.....	32
3.3. Kilitli Beton Parke Taşlarının Deney Metotları ve Gerekli Şartlar	38
3.3.1. Kilitli beton parke taşları boyut ve görünüş tayini	38
3.3.2. Kilitli beton parke taşları su emme oranı tayini	39
3.3.3. Kilitli beton parke taşları aşınma direnci tayini	40
3.3.4. Kilitli beton parke taşları yarma çekme dayanımı deneyi	41
3.3.5. Kilitli beton parke taşları buz çözücü tuz etkisi ile donma-çözülme direnci tayini	42
3.3.6. Ultrasonik hız deneyi.....	43

4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	44
4.1. BOYUT VE GÖRÜNÜŞ TAYİNİ DENEY SONUÇLARI.....	44
4.2. SU EMME ORANI TAYİNİ DENEYİ SONUÇLARI.....	46
4.3. AŞINMA DİRENCİ TAYİNİ DENEY SONUÇLARI.....	48
4.4. YARMADA ÇEKME DAYANIMI DENEY SONUÇLARI	49
4.5.BUZ ÇÖZÜCÜ TUZ ETKİSİ İLE BİRLİKTE DONMA VE ÇÖZÜLME ETKİSİNE DİRENÇ TAYİNİ DENEYİ SONUÇLARI	51
4.6. ULTRASONİK HIZ DENEYİ SONUÇLARI	52
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	55
6. KAYNAKLAR	59



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Al_2O_3	Alüminyum Oksit
$CaCO_3$	Kalsiyum Karbonat
$CaMg(CO_3)_2$	Dolomit
CO_2	Karbondioksit
$NaOH$	Sodyum Hidroksit
$NaCl$	Sodyum Klorür

Kısaltmalar

Açıklama

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
CBR	The California Bearing Ratio (Kaliforniya Taşıma Oranı)
CEN	Comité Européen Des Normes (Avrupa Standartları Komitesi)
cm	Santimetre
Ç	Çimento
D	Agrega Tane Çapı
dk	Dakika
gr	Gram
K	Kül
kg	Kilogram
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
kg/m^2	Kilogram/Metrekare
kg/m^3	Kilogram/Metreküp
Kw	Kilowatt
lt	Litre
m	Metre
m^2	Metrekare
mm	Milimetre

mm ²	Milimetre-kare
mm ³	Milimetre-küp
max	Maksimum
min	Minimum
MPa	Megapaskal
N	Newton
N/mm	Newton/milimetre
sn	Saniye
TS	Türk Standartları
T.C.	Türkiye Cumhuriyeti
TOGÜ	Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi
W/C	Su/Çimento
Wa	Su emme oranı

ŞEKİL LİSTESİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. Çimento kaynaklı CO ₂ salınımı	2
Şekil 2.1. Puzolanların Sınıflandırılması	16
Şekil 2.2. Beton parke taşı modelleri	18
Şekil 2.3. Kilitli beton parke üretim makinesi	22
Şekil 3.1. İnce agrega	26
Şekil 3.2. Kaba agrega	26
Şekil 3.3. Çamur haldeki kül	28
Şekil 3.4. Külün etüvden çıkardıktan sonraki hali	28
Şekil 3.5. Çarklı değirmen	28
Şekil 3.6. Çarklı değirmenden geçirilen kül	28
Şekil 3.7. Bilyalı değirmen	29
Şekil 3.8. Bilyalı değirmenin tamburu ve külün tambura aktarılması	30
Şekil 3.9. Bilyalı değirmenden geçirilen kül ve vakumlu elek	31
Şekil 3.10. Elek analizi deneyi düzeneği	32
Şekil 3.11. Kilitli beton parke taşının mm cinsinden şekli ve boyutları	32
Şekil 3.12. Çimento silosu	33
Şekil 3.13. Agrega silosu	33
Şekil 3.14. Bir kalıpta üretilen 36 adet parke taşı	34
Şekil 3.15. Elle karıştırılan malzemenin kalıplara yerleştirilme aşaması	35
Şekil 3.16. Kilitli beton parke taşı üretim süreci	37
Şekil 3.17. Kilitli beton parke taşlarının istiflenmesi	37
Şekil 3.18. Kilitli beton parke taşlarının kür havuzunda bekletilme süreci	38
Şekil 3.23. Aşındırma Cihazı	40
Şekil 3.24. Yarmada Çekme Deneyi Cihazı	41
Şekil 3.25. Yarmada Çekme Deneyi sonucu kırılmış numuneler	42
Şekil 3.26. Ultrasonik hız deneyi cihazı ve sismik hız ölçümü	43
Şekil 4.1. Kilitli beton parke taşlarının görünüşleri	44
Şekil 4.2. Kilitli beton parke taşı boyutları ölçümü	45
Şekil 4.3. Numunelerin Doygun kütlede(M1) ve Kuru kütledeki(M2) ağırlıkları	47

Şekil 4.4. Su emme oranı deneyi sonuçları grafiksel gösterimi.....	48
Şekil 4.5. Ortalama aşınma direnci grafiksel gösterimi.....	49
Şekil 4.6. Yarmada çekme deneyi sonuçları grafiksel gösterimi	51
Şekil 4.7. Ortalama kütle kaybı	52
Şekil 4.8. Ultrasonik hız deneyi sonuçlarının grafiksel gösterimi.....	54



ÇİZELGE LİSTESİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. TS 2824 EN 1338 Beton Parke Taşlarının Dayanım Standartları.....	20
Çizelge 2.2. Beton parke taşlarının çevre etkilerine göre sınıflandırılması Şartnamesi Kısım 316.01.04, 2013).....	23
Çizelge 2.3. İzin verilen sapmalar	23
Çizelge 2.4. Su emme	24
Çizelge 2.5. Buz çözücü tuz etkisiyle birlikte donma çözülme etkisine direnç.....	24
Çizelge 2.6. k düzeltme katsayısı.....	24
Çizelge 2.7. Aşınmaya direnç sınıfları.....	25
Çizelge 3.1. CEM I 42,5 çimentosunun kimyasal özellikleri (Anonim, 2020)	27
Çizelge 3.2. Numune grupları reçeteleri	35
Çizelge 3.2(devamı). Numune grupları reçeteleri	36
Çizelge 3.3. Numunelerin Doygun kütlede(M1) ve Kuru kütledeki(M2) ağırlıkları	39
Çizelge 3.3(devamı). Numunelerin Doygun kütlede(M1) ve Kuru kütledeki(M2) ağırlıkları	40
Çizelge 4.1. Numunelerin Ölçüleri	46
Çizelge 4.2. Su emme oranı deney sonuçları.....	47
Çizelge 4.4. Aşınma direnci tayini deney sonuçları.....	48
Çizelge 4.5. Numune gruplarının kırılma anındaki yükleri ve T dayanım değerleri	49
Çizelge 4.6. Yarmada çekme deneyi sonuçları	50
Çizelge 4.7. Donma-Çözölmeye Karşı Direnç Tayini Deney Sonuçları	52
Çizelge 4.8. Ultrasonik hız ölçüm değerleri	53
Çizelge 4.8(devamı). Ultrasonik hız ölçüm değerleri	53
Çizelge 5.1. Deney sonuçları ortak çizelgesi	57

1.GİRİŞ

Gelişmekte olan birçok ülke artan kentleşme, sanayileşme ve altyapı gelişimine bağlı olarak kirlilik ve çevre sorunlarında artış yaşamaktadır. Bu artış, farklı türlerde tehlike ve biyolojik olarak parçalanamayan katı atıkların üretilip çevreye salınmasına yol açmıştır. Hem endüstriyel hem de inşaat atıklarından kaynaklanan çevre kirliliğinin yönetimi, birçok gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin halihazırda karşı karşıya olduğu süregelen sorunlardan biridir (Olofinnadea, 2021).

Teknolojinin gelişimi üretime dayalı endüstri sektörünü de doğrudan etkilemektedir. Artan dünya nüfusu ve ihtiyaçları göz önüne aldığımızda üretim hızı da buna bağlı olarak artmaktadır. Üretimin bu denli arttığı günümüzde üretim esnasında yan ürün olarak çıkan, bertaraf ve geri dönüştürölmesi gereken atık malzemeler atık sahalarında birikerek doğal yaşam için tehlike arz etmektedir. Ortaya çıkan atıkların fiziksel ve kimyasal özelliklerinin doğru tespit edilerek farklı sektörlerde uygun noktalarda alternatif ürün olarak değerlendirilmesi hem hammadde açısından ülke ekonomimize katkı sağlayacak hem de atıkların geri kazanımı ile temiz bir çevre yolunda adım atılmış olunacaktır (Torlak, 2023).

Atık malzemelerin depolanması veya taşınması da ekstra maliyet gerektirdiğinden genellikle içeriğı ne olursa olsun direkt yok edilmeye çalışılmaktadır. Ancak bu malzemelerin kaynak olarak değerlendirilmesi çoğu zaman daha avantajlı olabilmektedir (Aydın, 2013).

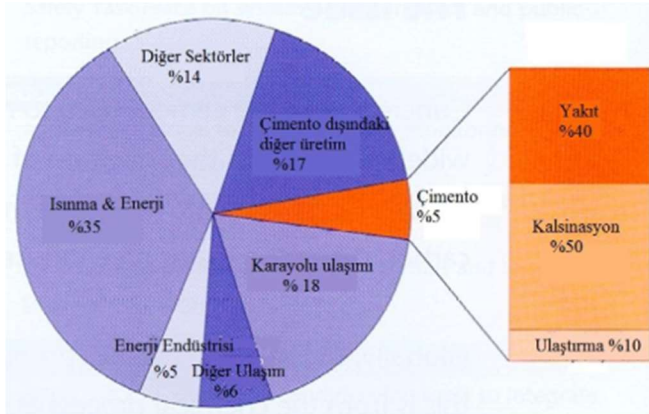
Biyokütle atığı, organik materyallerden oluşan ve biyolojik süreçlerle ayrışabilen atıklardır. Bu tür atıklar genellikle tarımsal ürünlerin atıklarından, hayvancılıkla ilgili atıklardan, gıda üretimi ve tüketiminden kalan atıklar gibi kaynaklardan gelmektedir. Örneğın meyve ve sebze kabukları, yem atıkları, saman, odun ve yaprak gibi maddeler biyokütle atığına örnek olarak verilebilmektedir.

Biyokütle atıkları, enerji üretimi ve diğeri geri dönüşüm süreçlerinde kullanılabilir. Bu tür atıkların değerlendirilmesi hem çevre kirliliğini azaltmakta hem de doğal kaynakları daha verimli kullanmamıza yardımcı olmaktadır.

Gelişmekte olan ülkelerde, tarım ve sanayi kaynaklı biyokütle atıkları büyük hacimlerde yer kaplamakta ve enerji sağlamak açısından önemli bir potansiyele sahip olmaktadır. Ancak bu atıkların doğrudan kullanımı, taşıma ve depolama gibi sorunlara neden olmanın yanı sıra çevre kirliliğine de yol açmaktadır. (Özocak, 2021).

Çevre kirliliğini uzun vadede azaltmanın en etkili yollarından bir tanesi de atık yönetimi politikalarının etkin bir şekilde uygulanmasıdır. Atık; insanların üretim ve kullanım faaliyetleri sonucunda ortaya çıkan, insanların ve doğal ortamın sağlığını olumsuz etkileyen ve doğrudan veya dolaylı olarak çevreye bırakılması zararlı olan her türlü maddeyi kapsamaktadır (Kumaş, 2019).

Beton inşaat sektöründe en yaygın olarak kullanılan malzemedir ve üretimi için büyük miktarda doğal kaynak gerekmektedir. Bir beton karışımı genellikle ağırlıkça %8-16 çimento, %10-18 su ve %65-75 agrega içermektedir. Betonlu oluşturan malzemelerden yalnızca çimentonun üretimi doğaya bir miktar zarar vermektedir. Agregalar ise ya doğrudan alınmakta ya da az bir işleme tabii tutulduktan sonra kullanılmaktadır. Çimento ise endüstriyel bir ürün olarak üretim aşamasında belirli miktarda CO₂ salınımına yol açmaktadır (Şekil 1). Dünya genelindeki CO₂ emisyonlarının %5'i çimentodan kaynaklanmaktadır. Ancak, diğer sektörlerle kıyaslandığında, çevresel etkisi daha düşük olduğu ve sanılandan daha az zarar verdiği görülmektedir (Gönen ve ark., 2012).



Şekil 1.1. Çimento kaynaklı CO₂ salınımı

Son yıllarda, beton yapımında endüstriyel atıkların kısmi veya tamamen kullanımı üzerine yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Atık geri dönüşümünün başlıca avantajları, çevre kirliliğinin azaltılması ve doğal kaynakların korunmasıdır. İnşaat sektöründe,

hammadelerin sürdürülebilir kullanımı, beton bileşenlerinin sınırlı olması nedeniyle büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, atık malzemelerin beton üretiminde kullanılması, atıkların depolanması veya imha edilmesi için gereken maliyetleri ortadan kaldırmakta ve doğal kaynak tüketimini azaltmaktadır. (Kara, 2020).

İnşaat sektöründe, geleneksel Portland çimentosunun olumsuz etkilerini azaltmak için, çimento üretiminde uçucu kül ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu gibi puzolan malzemelerin kullanımının artırılması önerilmektedir. Son yıllarda yapılan beton araştırmalarında, geleneksel betonlarda kullanılan çimento ve agregaların yerine uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, tarımsal atıklar, inşaat yıkım atıkları ve geopolimer kompozitler kullanılarak ya da farklı üretim yöntemleriyle beton üretimi gerçekleştirilmektedir (Şenol, 2022).

Türkiye’de elektrik enerjisi, kömürle çalışan termik santraller, hidroelektrik santraller, doğalgazlı santraller ve biyokütle elektrik santralleri aracılığıyla üretilmektedir. Düşük kalorili linyit kömürlerinin yakıldığı termik santrallerde, kömürün toz halinde yanması sırasında oluşan baca gazlarıyla birlikte mikron boyutlarında kül tanecikleri meydana gelir. Bu tanecikler elektro filtreler aracılığıyla tutulur ve atmosfere salınımları engellenir. Endüstriyel atık olarak kabul edilen bu tür kül taneciklerine uçucu kül denir (Yılmaz, 2014).

Tokat ilinde faaliyet gösteren CEMAK Biyokütle Elektrik Santralinde, yöre çiftçilerinin kendi sahalarında yakarak yok etmeye çalıştıkları tarımsal ve ormansal atıklar toplanarak elektrik enerjisine çevrilmektedir. Elektrik üretimi sırasında, biyokütle atıklarının yanması sonucu oluşan ve elektro filtreler yardımı ile tutularak atmosfere çıkışının önlenmesiyle kül meydana gelmektedir.

Bu çalışmada, elektrik santralinden alınan biyokütle atığı külü çimento yerine kademeli olarak ikame ederek kilitli beton parke taşlarında kullanılabilirliği araştırılmıştır. Deney sonuçları ile standart koşullarda üretimi yapılan numunelerin sonuçları karşılaştırılmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu bölümde, yapılacak çalışmaya benzer kilitli beton parke taşları ve biokütle atıklarının değerlendirilmesi ile ilgili makale ve tez çalışmaları incelenmiştir.

Torlak (2023) yapmış olduğu yüksek lisans tez çalışmasında, iki seri halinde beton üretimi yapmış, çimento yerine %0, %10, %20, %30, %40 oranlarında öğütülmüş yüksek fırın cürufu ikame ederek 10 farklı beton karışımı hazırlamıştır. Hazırlamış olduğu beton numuneleri 28 günlük standart kürde bekletmiş, dayanım ve durabilite özelliklerini incelemiştir. Beton numuneler üzerinde beton test çekici ve basınç dayanım deneyleri yapmıştır. Deney sonuçlarına göre çimento üzerinde öğütülmüş yüksek fırın cürufu ikame oranı arttıkça betonların performansında genel olarak artış görmüştür.

Nagrokiene (2018) yapmış olduğu çalışmasında, farklı biyokütle uçucu kül içeriğine sahip yedi numune hazırlamış ve karşıdaki çimento yerine %0, %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranlarında biyokütle uçucu külü ikame etmiştir. Farklı oranlarda biyokütle uçucu külü ikame ettiği numunelere basınç dayanımı, su emme, yoğunluk, ultrasonik darbe hızı, gözeneklilik, donma ve çözülme deneyleri uygulamıştır. Hazırlamış olduğu numunelere yapılan deneyler sonucunda %15 oranında biyokütle uçucu kül ikame ettiği numunenin, daha iyi dayanım ve donma-çözülme direnci özelliklerine sahip olduğu sonucuna varmıştır.

Olofinnadea (2021) yapmış olduğu çalışmasında, beton kilitli parke üretiminde doğal kumun yerine kırılmış atık fırın çelik cürufunun faydalı kullanımını araştırmıştır. Hazırlamış olduğu numunelerde 1:1,5:3(çimento: kum: granit) karışım oranı kullanarak, kumun yerine ağırlıkça % 0, 20, 40, 60, 80 ,100 değiştirme yüzdeleriyle atık fırın çelik cürufu ikame ederek numuneleri oluşturmuştur. Numunelere basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve su emme eğilimi testleri yapmıştır. Yapmış olduğu testler sonucuna göre %40'a kadar kum değişiminde basınç dayanımında %15'lik önemli bir artış olduğunu, çekme dayanımının %20'ye kadar olan kum değişim oranında %10 arttığını gözlemledi. Yapmış olduğu çalışmanın sonuçlarında Birleşmiş Milletler sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda kilitli beton kaldırım taşlarının üretiminde atık fırın cürufunun kullanılma olasılığını göstermiştir.

Silva (2023) yapmış olduğu çalışmasında, fiziksel ve mekanik karakterizasyon yoluyla, kaba kömür taban külünü beton kaldırım taşına ikame etmeyi ve külü bu şekilde değerlendirmeyi hedeflemiştir. İki farklı su çimento oranında (0,63 ve 0,73) sekiz adet beton karışım numunesi (ikisi kömür taban külü ve altısı kömür taban külsüz) tasarlamış ve 20cm*10cm*8cm boyutlarında kilitli beton kaldırım taşı üretmiştir. Yapmış olduğu deneyler sonucunda su/çimento oranı 0,73 olan numunelerde 28 günlük basınç dayanımlarını 25,34 MPa ve 25,05 MPa bulmuştur. Bu çalışma sonucunda daha iyi beton mekanik davranışı için daha fazla suyun gerekli olabileceğini göstermiştir.

Kareem (2023) yapmış olduğu çalışmasında, kaju yaprağı külünün kilitli kaldırım taşlarının üretiminde çimento yerine kısmi olarak ikame edilmesini değerlendirmiştir. Kaju yaprağı külünü çimento yerine ağırlıkça %0, 5, 10, 15, 20 ve 25 oranlarında ikame ederek altı adet numune hazırlamıştır. Numuneler üzerinde basınç dayanımı, aşınma direnci ve su emme deneyleri yapmıştır. Kaju yaprağı külünün c sınıfı puzolanlar için tamamlayıcı çimento malzemesi olarak kullanılmasının uygun olacağı sonucuna varılmıştır. Düşük kaju yaprağı külü içeren numunelerde (%5 ve %10), 28 ve 90 günlük dayanım kontrollerinde basınç dayanımının %87,86 ila %98,95'ini sağladığı görülmüştür. Ayrıca %5 ve %10 kaju yaprağı içeren numuneler kontrol numunesiyle benzer 28 günlük aşınım direnci ve su emme özelliği sergilediğini gözlemlemiştir.

Salem (2022) yapmış olduğu çalışmasında, mısır sapı külünün beton üretiminde çimento yerine kullanılmasının uygulanabilirliğini incelemiştir. Bu çalışmada beton üretiminde üç farklı çimento değıştirme oranı (ağırlıkça %5, %10, %15) kullanarak numuneler üretmiştir. Bu numunelere işlenebilirlik, basınç, bükülme ve yarıma mukavemeti deneyleri yapmıştır. Ayrıca, çimento kalitesinin değıştirilmesinin yanı sıra mısır sapı külünün de kısa ve uzun vadeli basınç dayanımı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Mısır sapı külünün çimento kısmi ikamesi olarak uygulanması erken yaşlarda (7 ve 28 gün) basınç dayanımında azalmaya yol açmış, ancak mısır sapı külü ile yapılan beton karışımları daha sonraki aşamalarda (56 ve 90 gün) dayanım kazanmıştır. Son olarak, beklenen dayanıklılık davranışının bir göstergesi olarak mısır sapı külünün çimento yerine kullanılmasının geçirgenlik üzerindeki etkisini araştırmıştır.

Özocak (2021) yapmış olduğu doktora tezinde, fındık kabuğu külünün puzolan malzeme olarak beton üretiminde kullanılabilirliğini araştırmıştır. Beton üretiminde çimento ile

%5,10,15,20 oranlarında yer değiştirerek fındık kabuğu külü kullanmıştır. Farklı oranlarda kül kullanarak ürettiği numunelere birim ağırlık, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, su emme oranı, dinamik elastisite modülü, donma-çözünme deneyi, permeabilite, ses geçiş hızı ve ısı iletkenlik deneyleri yapmıştır. Yapmış olduğu deneyler sonucunda beton örneklerinin birim ağırlıkları karışımdaki kül oranına bağlı olarak %4 ile %13,67 arasında değişmiştir. Basınç dayanımları kür süresi ile doğru orantılı olarak artmıştır. Ancak karışıma giren kül miktarına bağlı olarak basınç dayanımları azalmış bu azalma fındık kabuğu külü için 33,20 MPa' dan 27,47 MPa' ya düşmüştür. Üretilen beton örneklerinin ısı yalıtım özelliklerinin kül oranıyla doğru orantılı olarak arttığını ve %20 fındık kabuğu külü katkılı örneklerde %33 iyileşme sağlandığını belirtmiştir. C25 sınıfı beton için, %10' a kadar fındık kabuğu külünün puzolan malzeme olarak kullanılması sonucuna varılmıştır. Bu betonların tarımsal yapılarda yalıtımı arttırmak, yapı elemanlarının ağırlığını azaltmak ve yapı maliyetini düşürmek amacı ile taşıyıcı bölme elemanlarında ve döşemelerde kullanılabileceği sonucuna varmıştır.

Kumaş (2019) yapmış olduğu yüksek lisans tez çalışmasında, bitkisel atıkların küllerinin harç yapımında kullanılabilirliği üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Çalışmalar neticesinde referans numunesine en yakın değerleri veren harç numunesi fındık kabuğu külü ilaveli numunedir. Üretilen numunelere yapılan deneylerde, eğilme dayanımını 7,62 MPa, basınç dayanımını 31,19 MPa, ultra ses geçiş hızı değerini 3,97 km/s ve su emme yüzdesi de %6,49 olarak bulmuştur.

Örtlek (2015) yapmış olduğu yüksek lisans çalışmasında, mısır, buğday ve ayçiçeği sapı külü ile barit ve kolemanit içeren harçlar ile betonların dayanım özellikleri araştırılmıştır. Betonda ince agrega yerine barit, kolemanit, çimento yerine mısır sapı külü, buğday sapı külü ve ayçiçeği sapı külünü farklı yüzdelerde kullanmıştır. Hazırlamış olduğu beton numunelerin 180 ve 360 günlük sülfat dayanımlarını araştırmıştır. Beton numunelerin 7, 28 ve 180 günlük basınç dayanımı, aşınma dayanımı ve donma- çözülme etkisi gibi mekanik ve fiziksel özelliklerini araştırmıştır. Ayrıca 12x12x2 cm üretilen harçların radyasyon geçirgenliğinin tespiti için Am 241 gama ışını kaynağı kullanmıştır. Ayrıca harç ve betonların mikro yapılarını incelemiştir. Yapılan çalışmada küllerin kullanılması ile beton ve harçların birçok mühendislik özelliklerinin iyileştirildiğini gözlemlemiştir. Söz konusu küllerin betonda dolgu etkisi yaptığı ve boşluk miktarını azalttığını görmüştür. Çalışmasında, söz konusu atık küller ile kolemanit ve baritin yüksek

dayanıklılık özelliklere sahip harç ve beton üretiminde kullanılabileceğini göstermiştir. Ayrıca baritle birlikte buğday, mısır ve ayçiçeği sapı küllerinin betonların radyasyon geçirgenliğini azalttığı gözlemlenmiştir. Bu küller hem beton dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin geliştirilmesinde hem de radyasyon geçirgenliğinin önlenmesinde kullanılabilir sonucuna varmıştır.

Eken (2018) yapmış olduğu doktora çalışmasında, laboratuvar ortamında üretilen organik küllerle (mısır sapı külü, buğday sapı külü, çınar yaprağı külü ve ayçiçeği sapı külü) ve inorganik mineral katkılarla (kolemanit, diatomit, yüksek fırın cürufu, zeolit, bazaltik ponza ve uçucu kül) üretilen betonlarda dayanım ve dayanıklılık performanslarını incelemiştir. Organik küllerin ve inorganik minerallerin tekli ve ikili kombinasyonlarını oluşturarak beton ve boya üretimi gerçekleştirmiştir. Üretilen betonlarda organik küller çimentodan ikame edilerek, inorganik mineraller ise agregadan ikame edilerek, üretilen betonların durabilitesine etkisini araştırmıştır. Beton numunelerin 7, 28, 90 ve 180 günlük basınç dayanımı, aşınma dayanımı, ultrasonik ses, kapiler su emme, sülfat dayanımı, donatı korozyon, donma-çözülme, mikroyapı özelliklerini araştırmıştır. Çalışma sonuçlarına göre; organik küllerle üretilen tekli ve ikili karışımlardan mısır sapı külü, buğday sapı külü, ayçiçeği sapı külü ve çınar sapı külü katkılı numunelerin dayanım ve dayanıklılık performanslarını arttırdığını gözlemlenmiştir. Küllerin betonda dolgu malzemesi görevi gördüğü ve boşlukları azalttığını görmüştür. Minerallerle üretilen tekli ve ikili karışımların betonda kullanılması ile birçok mühendislik özelliklerinin iyileştirildiğini belirlemiştir.

Aydın (2022) yapmış olduğu doktora çalışmasında, çeltik kavuzlarının yanması sonucu oluşan küllerin beton üretiminde puzolan olarak kullanılmasının betonun fiziksel, mekanik ve termal özellikleri üzerine etkilerinin belirlenmesini amaçlamıştır. Bu amaçla, 200, 250, 300 ve 400 olmak üzere dört farklı dozajda ve ağırlık yüzdesi olarak %0, %5, %10 ve %20 oranlarında çeltik kavuzu külü ile çimento yer değiştirilerek beton örnekleri dökülmüştür. Üretilen örnekler üzerinde birim ağırlık, su emme, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, donma-çözünme dayanımı, ısı iletkenlik deneyleri yapmıştır. Ayrıca her katkı oranı ve her dozaj miktarı için örneklerin mikro yapılarını SEM görüntüleri yardımıyla incelemiştir. Araştırma sonuçlarına göre, sertleşmiş haldeki birim ağırlıklarda en yüksek birim ağırlık değerleri 400 dozajda üretilen çeltik kavuzu külü katkılı betonlarda, en düşük birim ağırlık değerleri de %20 çeltik kavuzu külü ikamesi için elde

edilmiştir. 400 dozajda çeltik kavuzu %20 oranındaki kül ikamesi hiç kül katılmayan örneğe kıyasla birim ağırlık değerinde %4,96 oranında azalma oluşturmuş ve yüksek dozajlı ve yüksek mukavemetli betonların kullanıldığı tarımsal yapılarda ölü yükün azaltılması açısından önemli bir etki sağladığını belirlemiştir. 250 dozajda çeltik kavuzu külü kullanılarak üretilen örneklerde; şahit numuneye kıyasla tüm kür süreleri için %5 çeltik kavuzu katkılı örneklerde basınç dayanımında artış görülmüştür. Bu durum, 250 dozaj betonda kullanılabilir en ideal kül yüzdesi hakkında önemli fikir vermekle birlikte bu oranın %5 olduğunu değerlendirmiştir. Sıcaklık farkının fazla olduğu bölgelerde, çimento miktarı bakımından en ideal dozaj için şahit örneğe kıyasla donma-çözünme çevrimi sonrasında basınç dayanım kaybının %20'den az olduğu dozaj sadece 200 dozajlı çeltik kavuzu kül ikameli beton grubunda görülmüş ve diğer gruplarda bu dayanım kaybının %20'den fazla olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çeltik kavuzu külü ağırlık yüzdesi olarak %5 ile %10 arasında kullanıldığında; daha dayanıklı, daha çevreci ve daha ekonomik betonlar üretmenin mümkün olabileceği sonucuna varılmıştır.

İşbilir (2012) yapmış olduğu yüksek lisans çalışmasında, pirinç kabuğu külünün, çimento numunelerinin fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisini araştırmıştır. Pirinç kabuğu külleri %0, 5, 10, 15, 20 oranlarında çimento ile ikame edilerek çimento numuneleri hazırlamış ve her bir grup için standart kıvam priz süresi, hacim genleşmesi değerlerini tespit etmiştir. 50*50*50 mm boyutlarında çimento harç numuneleri hazırlamış ve her bir grup için, numunelerin 2, 7, 28, 56, 90 günlük basınç dayanımlarını tespit etmiştir. Yapılan çalışma sonucunda %5, 10, 15, 20 oranlarında hazırlanan tüm çimento hamurlarında, referans çimentoya göre su ihtiyacının arttığını ancak çok yüksek düzeyde olmadığını, en yüksek basınç dayanımının, birim hacim ağırlık değerine %5 oranında pirinç kabuğu külü ikameli çimento numunesinde sahip olduğu görülmüştür.

Demirkan Çetinkale (2022) yapmış olduğu çalışmada, kazan altı külünün beton üretiminde kullanılabilirliğinin belirlenmesini amaçlamıştır. Bu doğrultuda kazan altı külü, çimentoya %0,10,20,30,40,50,60 oranlarında karıştırılmıştır. Hazırlanan karışımlarda 4*4*16 cm ebatlarında beton numuneler üretilmiştir. Üretilen örneklerin fiziksel ve mekanik özellikleri (basınç, eğilme ve su emme yüzdesi) belirlenmiştir. Elde edilen veriler sonucunda atık kazan altı külünün hacimce %70-50 oranlarında karıştırıldığı numuneler peyzaj konstrüksiyonlarında betonların detay malzemesi ve düşey kaplama malzemesi olarak, bordür taşı yapımında, bitki kasalarında, kent

mobilyalarında, üst yüzeylerinde kaplama yapılarak beton taş döşemelerinde kullanılabileceği sonucuna ulaşmıştır.

Ceylan ve Davraz (2018) yapmış oldukları çalışmada, betonda mineral katkı malzemesi olarak andezit atık tozların kullanılması ile F sınıfı uçucu küllerin kullanılmasını karşılaştırmıştır. Mineral katkıların farklı yer değiştirme seviyesindeki durumunu belirlemek için, farklı çimento dozajlarında beton örnekleri hazırlayarak 28 ve 90 günde basınç dayanımlarını test etmiştir. C40/50 dayanım sınıfı için, 28 ve 90 günlük kür yaşlarında atık andezit tozlarının en uygun yer değiştirme oranını %10 olarak belirlemiştir. Çalışmada elde ettikleri bulgulara göre atık andezit tozlarının uçucu küller gibi betonda mineral katkı olarak kullanılabileceğini göstermişlerdir. Mineral katkı olarak en ideal yer değiştirme oranlarında andezit kullanımı durumunda, C40/50 betonunda yaklaşık 20 kg, C55/67 betonunda 46 kg, C70/85 betonunda 52 kg çimento tasarrufu sağlanabileceği sonucuna varmıştır.

Durmuş ve Şimşek (2008) yapmış oldukları çalışmada, %10-20-30-40 oranlarında uçucu külü çimento yerine ikame ederek parke taşı hazırlamışlardır. Üretilen parke taşlarına standart ve tuzlu su kürü uygulaması yapmıştır. Yapılan kür uygulamaları sonucunda kilitli parke taşlarına yarmada çekme, su emme ve aşınma direnci tayini deneyleri uygulanmıştır. Sonuçta, tuzlu su küründe, erken yaşlarda yarmada çekme dayanımını arttırırken, ileriki yaşlarda düşürmüştür. Ayrıca kilitli parke taşında uçucu kül ikame oranı arttıkça aşınma kaybı değerinin arttığını, su emme oranının ise azaldığını belirlemişlerdir.

Görhan, Demir, Başpınar ve Kahraman (2019) yapmış oldukları çalışmada, taş unu katkılı beton parke taşlarının özelliklerini araştırmıştır. Yaptıkları çalışmada, çimentonun ağırlıkça % 5'i ve %10'u oranında taş unu, çimentonun % 1' i oranında ise Na₂SO₄ katkısını kullanmışlardır. Biri kontrol karışımı olmak üzere toplam 6 farklı karışımda deney örnekleri hazırlamışlardır. Tüm karışımlarda su / çimento oranını 0,3 olarak sabit tutmuşlardır. Her karışım serisinde 12 adet parke taşı örneği üretilmiş ve dayanım kazanmaları amacıyla 28 gün su kürüne tabi tutmuşlardır. Kür uygulanan örnekler üzerinde; yarmada çekme dayanımı, böhme aşınma oranı, su emme, görünür porozite, birim hacim ağırlık ve görünür yoğunluk deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri bulgulara göre, karışımlara eklenen taş unu katkısı örneklerinin yarmada çekme dayanımı, birim hacim ağırlığı ve görünür yoğunluk değerlerini düşürürken; böhme

aşınma, su emme ve porozite değerlerini arttırdığını gözlemlemişlerdir. Na_2SO_4 ve taş unu katkısının beraber uygulandığı karışımlarda ise taş unu katkısının artmasıyla birlikte yarmada çekme dayanımı ve böhme aşınma değerlerinde artışlar olduğunu çalışmalarında belirtmişlerdir.

Büyükörsal ve Akkuş (2024) yapmış oldukları çalışmada, atık mermerlerin beton kilitli parke taşlarında agrega olarak kullanılması yöntemi ile yeniden işlevsel hale getirilmesi, kısmen de olsa atıkların yönetilerek sürdürülebilirliğinin sağlanmasını hedeflemişlerdir. Deneyleri sırasında TSE Standartları ve Karayolları Teknik Şartnamesinden faydalanmışlardır. %20, %40, %60, %80, %100 olarak üzere beş farklı oranda toplamda 60 adet beton parke taşı ve buna ilave olarak 20 adet bir kenarı 10 cm olan küp numuneler hazırlamışlardır. Numunelerinin yarısı tuzlu suda yarısı da normal suda bekletilerek priz almaları sağlanmıştır. Beton parke taşı numunelerine su emme, aşınma direnci, yarmada çekme dayanımı deneylerini uygulamışlardır. Küp numunelere ise basınç dayanımı deneyi yapmışlardır. Su emme oranını belirleme, basınç dayanımı, aşınma direnci deney verilerinin standartların içerisinde kaldığı sonucuna varmışlardır. Yarmada çekme dayanımı deneyinin sonuçları incelendiğinde ise %20, %40 ve %60 oranında mermer agregası bulunan numunelerin yeterli dayanımı sağladığını; fakat %80 ve %100 oranında hazırlanan numunelerin ise dayanımının yetersiz olduğunu gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak beton parke taşlarında atık numunelerin agrega olarak %60 oranına kadar kullanılabileceğini tespit etmişlerdir.

Çeviren (2021) yapmış olduğu yüksek lisans çalışmasında, Tokat ilinde mermer işleme tesislerinde ortaya çıkan atık mermerlerin beton parke taşlarında ince agrega olarak kullanılabilirliğini incelemiştir. Yaptığı çalışma kapsamında geleneksel beton parke taşlarında kullanılan agrega ile atık mermer agregalarına gereken deneyleri yapmıştır. Bu iki agrega grubu ile önce doğal agregalar kullanarak kontrol karışımları hazırlamıştır. Daha sonra ince agrega olarak %25, %50, %75 ve % 100 oranlarında atık mermer ikame edilerek beton parke taşları üretmiştir. Hem kontrol grubu için hem de mermer katkılı karışım grupları için gerekli deneyler yapıp elde edilen sonuçlar boyut ve görünüş, mukavemet, su emme oranı, aşınma direnci ve donma/çözünme direnci bakımından incelemiştir. Elde edilen sonuçlara göre; mermer atıklarının beton parke taşlarında % 50 oranına kadar kullanılabilirliğini tespit etmiştir.

Kaya ve Karakurt (2016) yapmış oldukları çalışmada, beş farklı kullanım alanından ve her alan için 12 adet olmak üzere toplamda 60 adet beton kilitli parke taşı temin ederek numunelerin TS 2824 EN1338 standardına uygun su emme ve dayanım özelliklerini incelemişlerdir. Numunelerden elde ettikleri sonuçları standartta belirtilen sınır değerlerle karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak bütün gruplarda su emme yüzdeleri standartta belirtilen sınır değerinin altında olduklarını görmüşlerdir. Dayanım değerlerinde ise grup ortalama değerleri standardın altında fakat yakın değerler elde etmişlerdir.

Bakis (2021) yapmış olduğu çalışmasında, kilitli parke taşı üretiminde kireçtaşı kumu ve volkanik kül kullanımına ilişkin bir çalışma yapmıştır. Yapmış olduğu deneyler sonucunda kireçtaşı kumundan üretilen parke taşlarının kombine kürleme sonrasında yarmada çekme mukavemeti 4,2 MPa, aşınma direnci 13,4 cm³/50 cm² ve donma/çözünme dayanımını 0,54 kg/m² olarak bulmuşlardır. DeneySEL sonuçlara göre volkanik külden üretilen parke taşlarının kombine kürleme sonrasında yarmada çekme mukavemetini 5,0 MPa, aşınma direnci 10,2 cm³/50 cm² ve donma/çözünme dayanımını 0,41 kg/m² olarak bulmuşlardır. Yaptıkları çalışma sonuçlarında kilitli kaldırım taşları üretiminde kireçtaşı kumu ve volkanik külün kullanımının uygunluğunu doğrulamışlardır. Yaptıkları çalışmaya göre kilitli parke taşı üretiminde agrega karışımının % 100'ünü oluşturacak miktarda kireç kumu ve volkanik kül kullanılabilirliği sonucuna ulaşmışlardır.

Raheem, AA, Adedokun, SI, Raphael, AB, Adedapo, AO ve Olayemi, AB (2017) yapmış oldukları çalışmada, kilitli beton kaldırım taşı üretiminde sıradan Portland çimentosunun kısmi ikamesi olarak talaş külünün uygulanmasını araştırmışlardır. 3-56 gün süreyle kürlen, çimento yerine ikame seviyeleri %5 ila %25 arasında değişen numunelerin basınç dayanımının ilk kürleme dönemlerinde düşük ancak daha sonraki günlerde önemli ölçüde arttığını gözlemlemişlerdir. %5 ikame oranının şahit numunelere göre kür süresinden bağımsız olarak dayanım artışı gösterdiğini görmüşlerdir. Kül içeriğinin arttıkça yoğunluğunun azaldığını su emme oranının arttığını görmüşlerdir. Bu nedenle çalışmalarının taş külü içeren parke taşlarının daha uzun kürleme sürelerinde geleneksel olanlara göre daha yüksek mukavemet kazanabildiği sonucuna varmışlardır.

2.1. Beton

Beton üretiminde kullanılan çimentoya, betonun dayanım özelliklerine göre farklı oranlarda puzolan malzeme ikame edilebilir. Bu oranlar %10 ile % 40 arasında değişim göstermektedir. Beton üretiminde çimento yerine kullanılan bu puzolanlar maliyeti de düşürmektedir (Şimşek, 2004).

Betonun yoğunluk değeri agreganın türüne ve agreganın granülometrisine göre değişmektedir. Betonlar hafif, normal ve ağır betonlar olmak üzere 3 ayrı özellikte toplanmaktadır (Arslan, 2008; Şimşek, 2009).

- Hafif beton: Etüv kurusu halinde 800 kg/m^3 ile 2000 kg/m^3 arasında birim hacim ağırlığa sahip,
- Normal beton: Etüv kurusu halinde 2000 kg/m^3 ile 2600 kg/m^3 arasında birim hacim ağırlığa sahip
- Ağır beton: Etüv kurusu halinde 2600 kg/m^3 'ten daha büyük birim hacim ağırlığa sahip olan betonlardır.

Dayanım özellikleri açısından değerlendirildiğinden betonlar 3 gruba ayrılmaktadır (Mehta ve Monteiro, 2006).

- Düşük dayanımlı betonlar; dayanım değeri 20 MPa dan az olan,
- Orta dayanımlı betonlar; dayanım değeri 20-40 MPa arasında olan,
- Yüksek dayanımlı betonlar; dayanım değeri 40 MPa dan fazla olan betonlardır.

Betonların bir diğer sınıflandırma türü de üretim yeridir. Betonlar üretim yeri açısından iki farklı başlık altından değerlendirilir (Bakır, 2011).

- Santral betonu; üretim yeri hazır beton santrali olan betonlardır. Bu betonlar şantiye sahasına transmikserler ile taşınırlar.
- Şantiye betonu; inşaatın yapıldığı yerde üretilen betonlardır.

Betonu oluşturan malzemeler olan çimento, agrega, su ve katkı malzemeleri aşağıda alt başlıklar halinden açıklanmaktadır.

2.1.1. Çimento

Çimento, kil ve kalkerin pişirilmesi ve alçı taşının eklenmesiyle elde edilen, gerektiğinde tek başına suyla, gerektiğinde ise kum, çakıl ve kırma taşla karıştırılarak havada ve suda priz alarak sertleşebilen bağlayıcı bir maddedir (Şimşek, 2012).

Çimentonun su ile tepkimesi sonucu başlangıç aşamasında gösterdiği plastik özelliği ile beton karışımının kolayca karıştırılabilmesini ve istenilen şekle girebilmesini sağlamaktadır. Hidratasyon tepkimesi ile çimento hamuru zamanla sertleşerek betona istenilen dayanımı kazandırmaktadır. Bu sebeple betonun göstereceği performans çimentonun mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre değişim göstermektedir (Topgül, 2016).

Çimentolar TS EN 197-1 (2012) standardına göre farklı şekillerde gruplandırılırlar:

- Portland çimentosu (CEM I)
- Portland kompoze çimentoları (CEM II)
- Portland yüksek fırın çimentoları (CEM III)
- Puzolanik çimento (CEM IV)
- Kompoze çimento (CEM V)

Portland çimentosu, dünyada en çok kullanılan çimento türüdür ve dünyadaki kullanılan çimentoların %70'ini oluşturmaktadır (Ekmekyapar ve Örüng, 1993).

Çimento üretiminde kullanılan ana maddeler; kalker, kil ve marndır.

Kalker; doğada kalsiyum karbonat olarak bulunmaktadır. Klinkerdeki CaO, bu bileşenden sağlanmaktadır. Kalkerin mineralojik incelemesinde saf halde kalsit ve çok az miktarda aragonit kristallerinden oluştuğu görülmektedir. Kalkerin sertlik derecesi 3, özgül ağırlığı 2,5-2,7 gr/cm³ arasındadır.

Kil; çimento üretiminin ikinci derecede en önemli maddesidir. Kil minerallerinin temel özelliği, kimyasal bileşenlerinde alüminyum oksit (Al₂O₃) bulunması ve sulu alüminyum silikatlardan meydana gelmiş olmasıdır (Koçak, 2008).

Marn; doğada bulunan, %50-70 oranında kalker ve %30-50 oranında kil karışımından oluşmuş kayalardır. Yeryüzünden yaygın olarak bulunurlar. Marn ideal çimento

hammaddesidir. Kalkere göre daha yumuşak olmasından dolayı daha kolay öğütülebilmektedir (Yalçın ve Gürü, 2006).

2.1.2. Agregalar

Betonun ana iskeletini oluşturan ve beton içerisinde %70-75'lik bir alan kaplayan agregalar; doğal (kum, çakıl vb.), yapay ve doğal-yapay malzemelerden oluşmaktadır. Betonda yer alan agregalar, istenilen dayanıma ulaşılmasında, çevre şartlarına karşı betonun dayanımını arttırmakta ve betonda meydana gelebilecek hacimsel değişimleri önlemekte yardımcı olmaktadır (Topgül, 2016).

Beton üretiminde kullanılan agregalarda aranan özellikler: aşınmaya karşı sağlam ve dış etkilere karşı dayanıklı olması, çimento ile zararlı reaksiyonlar gerçekleştirmemesi, tane şekilleri ve dağılımı uygun olması ve zayıf taneler içermemesidir (Şimşek, 2012).

Agregalar çimentonun karşılaşacağı büzülmeğe karşı direnç oluşturup, betonun hacminin korunmasını sağlamaktadır (Saran ve ark, 2007).

Beton üretiminde kullanılacak olan agreganın yüksek dayanımlı olması ile betonun dayanımı da yüksek olmaktadır. Agregaların tane boyutu, su emme değeri, özgül ağırlığı, birim ağırlığı, tane şekil yapısı, dona dayanım, aşınmaya dayanım, elastikiyet modülü gibi özelliklerin beton üretiminde göz önünde bulundurularak değerlendirilmesi gereken konulardır (Erdoğan, 2007).

Parkenin fiziksel anlamda kalıcılığı ve aşınma direnci üst tabaka ile ilgilidir. Ancak gerilme, mukavemet, donma-çözünme direnci alt tabaka ile ilgilidir. Bu nedenle beton parke taşlarının imalatı sırasında kullanılacak malzemelerden olan agregalar özellik açısından önemlidir (Çeviren, 2021).

2.1.3. Su

Beton üretiminde kullanılan diğer bir malzeme ise sudur. Betonun oluşmasında çimentonun sertleşerek dayanım kazanması için su ile priz olayının gerçekleşmesi gerekmektedir. İçilebilir seviyede olan sular beton üretiminde kullanılabilir (Sarıkaya, 2006).

Suyun beton üretiminde önemli işlevleri vardır. Bunlar; hidrasyon tepkimesiyle çimentonun kimyasal yapısına değişim meydana getirip çimentoya dayanım kazandırması, çimento hamuru sayesinde agregaların birbirine yapışmasını sağlaması ve

tane betonun boşluksuz ve homojen bir yapı haline gelip yerleşmesine yardımcı olmasıdır (Şimşek, 2012).

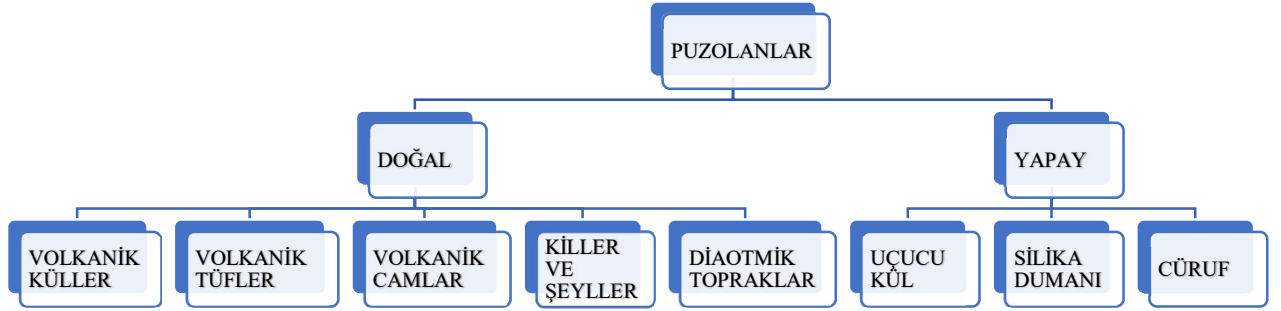
Karışım suyunun gerekenden fazla olması hidrasyon sonrası çimentonun sertleşmesinden sonra suyun bir kısmının buharlaşmasına ve betonda boşluklar oluşmasına sebep olmaktadır. Boşlukların oluşması ise betonun geçirimli yapıya sahip olmasını ve betonun dayanımının düşmesine sebep olmaktadır. Karışım suyunun az olması ise betonun yerleşebilmesine ve şekil verilebilmesine olumsuz etki yapmaktadır. Dolayısıyla betonun kolay şekil alabilmesi ve belirli bir kıvamı sağlayabilmesi için, dayanım olarak da betonun gerekli dayanımları sağlayabilmesi için su/çimento oranının optimum düzeyde olması gerekmektedir (Ekmekyapar ve Örüng, 1993).

2.1.4. Puzolanlar

Puzolanlar; minerolojik, fiziksel ve kimyasal olarak benzerlik gösterse de bileşenleri açısından karşılaştırıldığında puzolanlar silikat (SiO_2) esaslı, Portland çimentosu ise CaO esaslıdır. Bundan dolayı puzolanlar tek başına bağlayıcı özelliğe sahip değildir. Bu nedenle ikincil bağlayıcı madde veya katkı maddesi olarak anılmaktadırlar (Alkaya, 2009).

Puzolanlara örnek olarak uçucu kül, öğütülmüş yüksek fırın cürufu, tras, silis dumanı gösterilebilir. Bu puzolanların kullanımı ekonomik açıdan büyük yararlar göstermektedir (Şengül, 2007).

Puzolanlar, doğal ve yapay olarak iki gruba ayrılırlar. Doğal puzolanlar volkanik kökenli kayalardan oluşurken, yapay puzolanlar ise termik santrallerde oluşan uçucu kül, cüruf ve silis dumanı gibi endüstriyel tesislerde meydana gelen atık malzemeleri kapsamaktadır (Bulut, 2008). Şekil 2.1’de puzolanların sınıflandırılması gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Pozolanların Sınıflandırılması

Puzolanların Portland çimentosunda kullanılabilmesi için içeriğindeki SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 bileşenlerinin oranı en az %70 olması gerekmektedir. Puzolanların ince öğütülerek kullanılması, çimento hamurundaki boşlukların giderilmesine ve daha geçirimsiz bir beton elde edilmesine yardımcı olur. Puzolanların istenilen aktiviteyi sağlayabilmesi için yeterince ince taneli yapıda olması, yukarıda belirtilen miktarda silis, alümin ve demir oksit bulundurması gerekmektedir (Erdoğan, 2009).

Puzolan maddeler beton içerisinde çimentoyla yer değiştirmeli olarak çimentoya ağırlıkça %15 ile %40 arasında ikame edilebilmektedir. İdeal oranda kullanılan puzolan sayesinde betonun özellikleri iyileştirilebilmektedir (Gündeşli, 2008).

Puzolan kullanımının betondaki olumlu etkileri şunlardır;

- Karışımın işlenebilirliğini artırır
- Hidratasyon ısını azaltır
- Nihai basınç dayanımını artırır
- Alkali silika reaksiyonunu kontrol altına alır
- Sülfata etkisine karşı dayanıklılığı artırır

- Donma-çözölmeye karşı direnci arttırır
- Su geçirirnililiğini azaltır (Şimşek, 2012).

2.1.5. Tarımsal ve biyokötle atıklarının puzolonik özellikleri

Tarımsal kaynaklı atıkların biyokötle temelli puzolan malzeme olarak kullanılma imkanlarının araştırılması günden güne artmaktadır (Pappu ve ark, 2007).

Bitkilerin doğal yaşam alanı olan toprağın bol miktarda silikat bulundurması ve bitkilerin lifli yapıya sahip olmasından dolayı beton üretiminde tarımsal atıkların kullanılması fikri oluşmuştur. Bu atıkların yüksek lif oranı sayesinde, betonun dayanıklılığını arttıran sentetik lifler yerine kullanılabilirliği mümkün olmaktadır (Mo ve ark, 2016).

Buğday, ayçiçeğı, pirinç, tütün ve diğerk tek yıllık tarım ürünlerinin atıkları olan yaprak ve saplarında bulunan bileşenler yüksek oranda silis ve silikat bulundurmaktadır (Biricik ve ark, 1996).

Tarımsal atıklar genel anlamda yapı maliyetini düşürmektedir. Tarımsal atıkların kısa sürede meydana gelmeleri, inşaat alanlarına yakın yerlerden temin edilebilme imkanları, ekolojik koşullarda kolay yok olmaları ve çevre kirliliğini engellemeleri yapı alanında kullanılmaları için sağladıkları avantajlardandır (Esin ve Yüksek, 2008).

Ölkemizde yapılan akademik çalışmaların birçoğunda tarımsal atık malzemelerin yapı sektöründe kullanılması çalışmaları yapılmaktadır. Ayçiçeğı sapı, şeker kamışı, pirinç sapı, buğday sapı, mısır sapı vb. tarımsal kaynaklı atıkların inşaat sektöründe çimento yerine yapı malzemesi olarak kullanılması çalışmaların ortak sonucudur (Şişman ve Gezer, 2011).

Buğday saplarının üreticiler tarafından açık alanda yakılması ve sonrasında oluşan külün doğal çevreye bırakılması çevre kirliliğine neden olmaktadır (Binici ve Aksoğan, 2011).

Buğday sapı külünün çevre kirliliğine sebep olacağı zararların önüne geçilebilmesi aynı zamanda ekonomik olarak değerlendirilebilmesi için beton üretiminde puzolan olarak kullanılabilmesi için çalışmalar yapılmıştır (Mo ve ark, 2016).

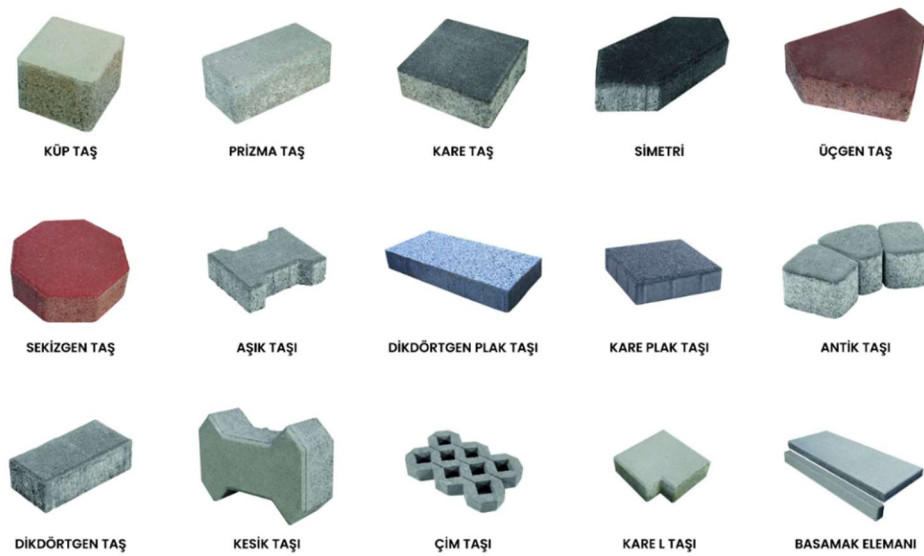
Çimentoya ikame %20 oranında buğday sapı külünün kullanılması ile üretilen betonun dayanımının %25 arttığı belirlenmiştir (Ataie ve Riding, 2013).

Mısır sapı gibi ayçiçeği saplarının da yakılmasından dolayı oluşan küllerin, çimento yerine ikame oranlarının betonun kullanım amacına göre değişmektedir. Ayçiçeği sapı külünün %20-40 aralığında kullanılması tavsiye edilmektedir. %40'tan fazla kullanılan kül ikamesi ise betonun dayanım özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir (Alkaya, 2010).

Rukzon ve Chindaprasirt (2012) tarafından yapılan betonların basınç dayanımını arttırmak amacıyla mineral katkıların kullanılması çalışması kapsamında %10-20-30 oranlarından çimento yerine ikameli olarak şeker kamışı külü kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda basınç ve porozite özelliklerini araştırmış ve kül katkılarının olumlu etki yaptığını gözlemlemişlerdir.

2.2 Kilitli Beton Parke Taşları

Beton parke taşları su, çimento, agrega ve bazı durumlarda katkı maddelerinin belirli oranlarda homojen bir şekilde karıştırılmasıyla, beton parke taşı makinası ile üretilen yapı elemanlarıdır. Ağır taşıt trafiğinin olmadığı yollarda, kaldırımlarda vb. yerlerde kullanılmaktadır. Beton parke taşları; kilitli beton parke taşları, damla taşı, süper dekor parke taşı, yelpaze parke taşı, küp parke taşı, s tipi parke taşları, baklava parke taşları, kare parke taşları, delta parke taşları gibi çeşitli modellerde üretimi yapılmaktadır (Yıldız, 2013). Şekil 2.2'de beton parke taşı modelleri gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Beton parke taşı modelleri

Asfalt ve beton yollara farklı bir seçenek olarak parke taşları, uygun ve sağlam bir alt zemine yan yana dizilerek oluşmaktadır. Beton parke taşlarını diğer döşeme çeşitlerinden ayıran özellikler; parke taşının mekanik davranışı, yapısal davranışı ile tasarımı, üretim ve yerleştirme teknikleri gibi özellikleridir (Aslantaş, 2004).

Kilitli beton parke taşları dünya da olduğu gibi ülkemizde de çok sık tercih edilen bir kaplama ve döşeme elemanıdır. Kolay döşenebilmesi, uzman işçilik gerektirmeyişi, bakımının kolay olması, dondan etkilenmeyişi, karlı ve buzlu havalarda kaymayışı, kolay taşınabilir olması, tekrar kullanılabilir olması, asfalt ve betona oranla daha ekonomik olması ideal bir malzeme olmasının sebeplerindendir (Tekmen, 2006).

Hızlı, yerli ve ekonomik imalatı, onarımının kolaylığı sayesinde şehir içinde, yaya kaldırımlarında, otoparklarda ve parklarda sıklıkla beton parke taşlarına rastlanılmaktadır. Beton parke taşları eğilme, çekme, aşınma gibi zorluklarla karşılaşılır. Bu zorlanmalardan dolayı betonun mekanik ve fiziksel olarak mukavemeti yeterli düzeyde olmalıdır. Ülkemizde dahil olmak üzere çoğu ülkede beton parke taşları için belirli standartlar oluşturulmuştur. Çizelge 2.1’de TS 2824 EN 1338’e göre beton parke taşlarına ait dayanım özellikleri belirtilmiştir (Topçu, 2019).

Çizelge 2.1. TS 2824 EN 1338 Beton Parke Taşlarının Dayanım Standartları

Gereklikler	TS 2824 EN 1338
Basınç Dayanımı (MPa)	-
Çekme Dayanımı (MPa)	Ortalama $\geq 3,6$ MPa Tek Sonuç $> 2,9$ MPa Minimum kırılma yükü 250 N/mm
Su Emme (%)	A sınıfı için yok B sınıfı için $\leq 6,0$
Aşınma Dayanımı	F sınıfı (1. Sınıf) için yok H sınıfı (3. Sınıf) için $\leq 20 \text{ cm}^3/50\text{cm}^2$ I sınıfı (4. Sınıf) için $\leq 18 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$
Donma ve Çözülme Dayanımı	1.Sınıf parkelerde performans ölçümü gerekmez. 3.Sınıf parkelerde donma çözülme deneyinden sonra metrekaresindeki kilogram kütle kaybı ortalama olarak %1,0' dan büyük olmamalıdır. Tek numune sonuçlarından hiçbirisi %1,5' ten büyük olmamalıdır.

Beton parke taşlarının görünüşünün düzgün sayılabilmesi için yüzey boşlukları, çatlaklar, çukur ve pürüzler bulunmamalıdır.

2.2.1. Kilitli beton parke taşlarının özellikleri

Kilitli beton parke taşının betonu yüksek dayanıma sahip ve dayanıklı olmalıdır. Aynı zamanda taze haldeyken işlenebilir olması gerekmektedir.

Betonun dayanıklı olması için taze haldeki betonda boşluk olmaması gerekmektedir. Kilitli beton parke taşları genellikle dış ortamda kullanıldığı için dış ortam kilitli beton parke taşlarını fiziksel ve kimyasal olarak etkilemektedir. Isınma ve kuruma, donma-çözünme, taşıtların etkileri ve aşınma kilitli beton parke taşlarını etkileyen fiziksel

faktörlerdir. Kimyasal faktörler ise; betonu oluşturan malzemelerin limit değerler dışında olması ve buz çözücü tuz, hava kirliliği, katı atıklardan kaynaklanmasıdır (Yıldız, 2013).

Asfalt ve beton kaplamalar gibi kilitli beton parke taşları da zemin döşemelerinde kullanılmaktadır. Fakat su emme oranı %5-6 dan daha düşük olduğu için kilitli beton parke taşları asfalt ve beton kaplamalara göre daha uzun ömürlüdür (Canpolat, 2018).

Kilitli beton parke taşları düşük su/çimento oranına sahiptir. Üretimleri sırasında yoğun titreşim ve baskıya maruz kalırlar. Maruz kaldıkları titreşim ve baskı sayesinde hava boşlukları en aza indirilir ve su emme oranı azalır. Böylelikle donmaya karşı dirençli hale gelir (Canpolat, 2018).

Belirtilen bu özellikleri sağlaması halinde kilitli beton parke taşları birçok konuda avantajlı hale gelmekte, kullanım alanı giderek genişlemekte ve yaygınlaşmaktadır.

2.2.2. Kilitli beton parke taşlarının üretimi

Kilitli beton parke taşları, parke makinesinde yüksek derecede sıkıştırma ve titreşim etkisiyle metal kalıplarda üretilmektedir. Kilitli beton parke taşının üretilmesi için, çimento, su, agrega ve gerekli hallerde katkı malzemesi karıştırılarak bir harç elde edilmektedir. Elde edilen harç, kilitli parke taşı kalıbına dökülerek baskı ve sıkıştırma ile kullanım halini almaktadır. Kilitli beton parke taşını üretmek için parke üretim makinesi kullanılmaktadır (Anonim, 2021). Şekil 2.3'de beton parke taşı üretim makinası gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Kilitli beton parke üretim makinesi

Kilitli beton parke taşlarının üretimi sırasında, malzemeler hesaplanan ve istenilen oranlarda hazneden karıştırıcıya aktarılmakta, homojen bir hal alarak silolara gitmektedir. Homojen haldeki bu malzemeler bantların üzerindeki kalıplara dökülerek, ayarlanan miktarda basınç ve titreşim etkisi ile preslenmektedir. Kalıptan çıkan kilitli beton parke taşları kurumaya bırakılır. Kuruyan kilitli beton parke taşları kür işlemine tabi tutularak paletler halinde stoklanır ve satışa hazır hale gelmektedir (Akyüz, 2019).

2.2.3. Kilitli beton parke taşlarına uygulanan deneyler

Kilitli beton parke taşlarının sahip olması gereken şartlar ve uygulanan deneyler TS 2824 EN 1338'e göre aşağıdaki gibidir.

- Boyut ve görünüş tayini
- Su emme oranı tayini
- Aşınma direnci tayini
- Yarmada çekme dayanımı
- Buz çözücü tuz etkisiyle birlikte donma çözülme etkisine direnç tayini

Ayrıca bu deneylere ek olarak Ultrasonik hız deneyi de kilitli beton parke taşlarının kalitesini belirlemek için yapılabilmektedir.

Beton parke taşlarının çevre etkilerine göre sınıflandırılması Çizelge 2.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 2.2. Beton parke taşlarının çevre etkilerine göre sınıflandırılması (KGM Şartnamesi Kısım 316.01.04, 2013)

1. Sınıf	a	Kar-buz mücadelesi yapılmayan ve bu nedenle tuz etkilerine maruz kalmayan bölgelerde kullanılır
	b	Sık donma-çözülme tekrarı olmayan bölgelerde kullanılır
	c	Deniz suyunun aşındırıcı mekanik etkilerine maruz kalmayan ılıman iklim bölgeleri ve sahillerde kullanılır
2. Sınıf	a	Kar-buz mücadelesi yapılmayan ve bu nedenle tuz etkilerine maruz kalmayan bölgelerde kullanılır
	b	Sık donma-çözülme tekrarı olmayan bölgelerde kullanılır
3. Sınıf	a	Sert karasal iklimi olan bölgelerde kullanılır
	b	Trafik ve iklim ya da deniz nedeniyle sık tekrarlanan ıslanma-kuruma etkileri olan bölgelerde kullanılır
	c	Çok sık donma-çözülme tekrarı olan bölgelerde kullanılır
	d	Kar -buz mücadelesi nedeniyle tuz etkisine maruz bölgelerde kullanılır

Görünüş özelliklerini kapsayan biçim ve boyut tayininde izin verilen sapmalar Çizelge 2.3’de belirtilmiştir.

Çizelge 2.3. İzin verilen sapmalar

Blok kalınlığı (mm)	Uzunluk (mm)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)
<100	±2	±2	±3
≥ 100	±3	±3	±4
Bir bloğun kalınlığındaki herhangi iki ölçme değeri arasındaki fark ≤ 3 mm olmalıdır			

Fiziksel ve mekanik özelliklerden olan su emme tayini ve buz çözücü tuz etkisiyle donma çözülme etkisine karşı direnç tayini deneylerine ait uygunluk kriterleri Çizelge 2.4 ve Çizelge 2.5’teki gibidir.

Çizelge 2.4. Su emme

Sınıf	Sınıf gösterimi	Su emme kütlece %
1	A	Performans ölçülemez
2	B	≤ 6 (ortalama olarak)

Çizelge 2.5. Buz çözücü tuz etkisiyle birlikte donma çözülme etkisine direnç

Sınıf	Sınıf gösterimi	Donma çözülme deneylerinden sonra kütle kaybı kg/m ²
3	D	$\leq 1,0$ Tek numune sonuçlarından hiçbirisi 1,5'ten büyük olmamalıdır

Karakteristik yarmada çekme dayanımı T, 3,6 MPa'dan daha küçük olmamalıdır. Tek deney sonuçlarından hiçbirisi 2,9 MPa'dan daha küçük olmamalı ve numune kırılma yüklerinden hiçbirisi de 250 N/mm'den daha küçük olmamalıdır.

Yarmada çekme deneyinde numuneler 20 ± 5 santigrat derecedeki suyun içinde 24 saat bekletildikten sonra çıkarılıp iyice kurulandıktan sonra deneye tabii tutulurlar. Numunelerin T dayanımı formülü aşağıdaki gibidir:

$$T = 0.637 \times k \times P/S$$

T: Dayanım (MPa)

P: Kırılma yükü (N)

k: Parke taşı kalınlığı(t) için düzeltme katsayısı (Çizelge 2.6' da verilmiştir)

S: Kırılma alanı (mm²)

Çizelge 2.6. k düzeltme katsayısı

t:(mm)	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
k	0,71	0,79	0,87	0,94	1,00	1,06	1,11	1,15	1,19	1,23	1,25

Aşınma direnci, geniş diskli aşınma deneyi yoluyla veya alternatif metot olarak Böhme deneyi ile tayin edilir. Geniş diskli aşınma deneyi referans deneydir. Çizelge 2.7’de aşınmaya direnç sınıfları belirtilmiştir.

Çizelge 2.7. Aşınmaya direnç sınıfları

Sınıf	Sınıf gösterimi	Gerekli şartlar	
		KGM Şartnamesi Kısım 316.01.04, 2013’te Ek G’de tarif edilen deney metodu kullanılarak ölçülen değer	KGM Şartnamesi Kısım 316.01.04, 2013’te Alternatif olarak Ek H’de tarif edilen deney metodu kullanılarak ölçülen değer
1	F	Performans ölçülmez	Performans ölçülmez
3	H	$\leq 23 \text{ mm}$	$\leq 20\,000 \text{ mm}^3 / 5000 \text{ mm}^2$
4	I	$\leq 20 \text{ mm}$	$\leq 18\,000 \text{ mm}^3 / 5000 \text{ mm}^2$

Yapılacak olan bu çalışmada, elektrik enerjisi üretimi santralinde kullanılan biyokütle atığı külünün kilitli beton parke taşları üretiminde puzolan malzeme olarak kullanılabilirliğinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Çalışmanın bu bölümünde, araştırmanın amacını gerçekleştirmek için kullanılan materyaller ve metotlar hakkında bilgiler verilecektir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Materyal

Bu çalışmada, Tokat ilinde faaliyet gösteren CEMAK elektrik enerjisi üretim tesisinden elde edilen biyokütle atığı külün kilitli beton parke taşlarında çimento yerine farklı yüzdelarla ikamesi ile kullanılabilirliği incelenmiştir. Deneyler kapsamında, Karayolları Genel Müdürlüğü'nün Teknik şartnamesinde belirtilen uygunluk kriterlerine göre karışımlar hazırlanmıştır. Numunelere uygulanan deneylerin bir kısmı TOGÜ İnşaat Mühendisliği laboratuvarında bir kısmı ise Erbaa Beton Sanayi ve Ticaret A.Ş. Laboratuvarında yapılmıştır.

3.1.1. Agrega

Deneyler kapsamında hazırlanan numunelerde Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de gösterilen tokat ilinde bulunan bir taş ocağından temin edilen kalker kökenli agrega kullanılmıştır.



Şekil 3.1. İnce agrega



Şekil 3.2. Kaba agrega

3.1.2. Çimento

Deneyler kapsamında yaptığımız çalışmada TS EN 197-1 standardı kapsamında Akçansa Çimento Fabrikası'nda üretilen CEM I 42,5 R çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan çimento, dayanım sınıfı 42,5 MPa olan ve yüksek erken dayanımlı portland çimentosudur.

Bu çimento gri renkte toz halde ve kalker ve kilden oluşmaktadır. Kullandığımız çimentonun kimyasal özellikleri Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. CEM I 42,5 çimentosunun kimyasal özellikleri (Anonim, 2020)

Priz başlama süresi	≥ 60 dakika
Genleşme	≤ 10 mm
2 günlük dayanım	$\geq 20,0$ MPa
28 günlük dayanım	$\geq 42,5$ N/mm ² ve $\leq 62,5$ N/mm ²
Özgül yüzey (blaine)	3500 – 3700 cm ² /g
Yoğunluk	3,10 – 3,15 gr/cm ³
Sülfat miktarı (SO ₃)	$\leq \%4,0$
Klorür muhtevası (Cl ⁻)	$\leq \%0,1$
Kızdırma kaybı	$\leq \%5,0$
Çözünmeyen kalıntı	$\leq \% 5,0$

3.1.3. Su

Kilitli beton parke taşı üretimi esnasında karışımda şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

3.1.4. Katkı malzemesi

Deneyler sırasında üretimi yapılan kilitli beton parke taşlarını oluşturan beton karışımına çimento yerine ikame olarak %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranlarında Tokat ilinde faaliyet gösteren CEMAK Elektrik Enerjisi üretim tesisinden elde edilen biyokütle atığı külü kullanılmıştır.

Bu tesiste elektrik enerjisi üretimi için yakılan biyokütle atıklarının külleri havaya karışmaması için sulu bir şekilde atık havuzlarına aktarılmaktadır. Bu atık havuzlarından alınan Şekil 3.3’de gösterilen çamur halindeki biyokütle atığı külleri TOGÜ İnşaat Mühendisliği laboratuvarına getirilmiştir. Getirdiğimiz bu küller laboratuvarında bulunan etüvlerde 150 santigrat derecede 24 saat boyunca kurutulmuştur. Şekil 3.4’te kurutulmuş haldeki biyokütle atığı külü gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Çamur haldeki kül



Şekil 3.4. Külün etüvden çıkardıktan sonraki hali

İnşaat mühendisliği labovatuvarında etüvde kuruttuğumuz küller yabancı maddelerden arındırıldıktan sonra yine bu labovatuvarında bulunan Şekil 3.5'te gösterilen çarklı değirmenden geçirilerek Şekil 3.6'da gösterilen hale getirilmiştir.



Şekil 3.5. Çarklı değirmen



Şekil 3.6. Çarklı değirmenden geçirilen kül

Çarklı değirmenden geçirilen biyokütle atığı kül istenilen çapa yani 0,09 mm lik elekten geçecek hale gelmemiştir. Külün 0,09 mm lik elekten geçecek hale gelmesi için Tokat ilinde faaliyet gösteren ADOÇİM çimento üretim tesisinde bulunan Şekil 3.7’de gösterilen bilyalı değirmen kullanılmıştır.



Şekil 3.7. Bilyalı değirmen

Bilyalı değirmen 120*50*84 cm. ölçülerindedir. Değirmen, öğütme işlemini 33 cm. çapında ve 33 cm. boyunda bir tamburun içerisinde yapmaktadır. Tambur içerisinde kullanıcı tarafından konulan bilya miktarına şarz denilmektedir.

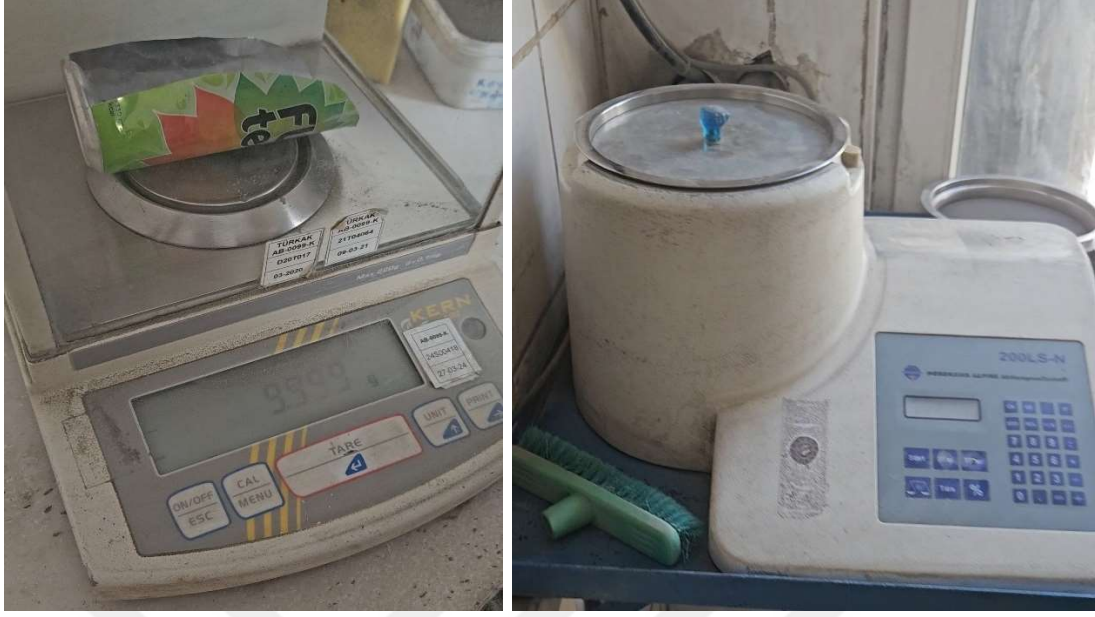
Öğütme inceliği ve öğütme süresi bu şarz miktarına göre değişmektedir. Öğütme süresi, şarz miktarı ve istenilen inceliğe göre 3 saate kadar uzayabilmektedir. Cihazda 200 mikron civarındaki inceliklere inilebilmektedir. Cihazın standart devir sayısı 70 dev./dk dır ve bu değer sabittir.



Şekil 3.8. Bilyalı değirmenin tamburu ve külün tambura aktarılması

Biyokütle atığı kül Şekil 3.8’ gösterildiği gibi 300 gramlık paketler halinde değirmende 45 dakika öğütölme işlemine tabii tutulmuştur.

Öğüttüğümüz külün istediğimiz çap olan 0,09 mm lik elek çapına gelip gelmediğini kontrol etmek için öğütme işlemimizin yapıldığı ADOÇİM çimento üretim fabrikasının içinde bulunan labovatuarda bulunan vakumlu elekte analiz yapılmıştır.



Şekil 3.9. Bilyalı değirmenden geçirilen kül ve vakumlu elek

Bilyalı değirmenden geçirilen külümüz Şekil 3.9’da görülen vakumlu elekten geçirilerek analiz edilmiş ve sonuç olarak % 2’ lik bir kayıp ile külümüz 0,09 mm çapıda elekten geçecek hale getirilmiştir.

Bilyalı değirmenden geçirilen kül daha sonra TOGÜ İnşaat Mühendisliği labovatuvarında tekrardan 0,09 mm lik elekten geçirilerek kilitli beton parke taşı üretiminde çimento yerine ikameli olarak kullanılacak hale getirilmiştir.

3.2. Yöntem

Bu bölümde; kilitli beton parke taşı numunelerinin üretimi ve üretilen numunelere uygulanan deneyler hakkında bilgiler verilmektedir.

3.2.1. Agregada deneyleri

Elek Analizi Deneyi

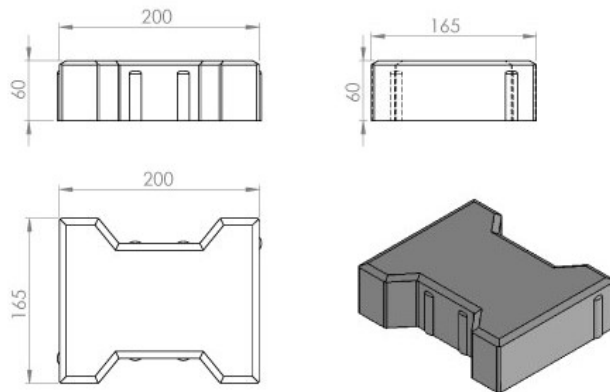
Kilitli beton parke taşı üretiminde kullandığımız agregalar TS EN 933-1 standardı göz önünde bulundurularak tane büyüklüğü dağılımının belirlenmesi için eleme işlemi yapılmış ve TS 706 elek serisi kullanılmıştır. Böylece 0-4 mm dane boyutundaki ince agregada belirlenmiştir. Elek analizi yapmak için aşağıdan yukarıya doğru 0.063, 0.125, 0.25, 0.5, 1, 2, 4 ve 8 No’lu elekler sıralanmıştır. Şekil 3.10’da elek analizi deneyi düzeneği gösterilmektedir.



Şekil 3.10. Elek analizi deneyi düzeneği

3.2.2. Kilitli beton parke taşı üretimi

Üreteceğimiz kilitli beton parke taşlarının şekli ve boyutları Şekil 3.11’de gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Kilitli beton parke taşının mm cinsinden şekli ve boyutları

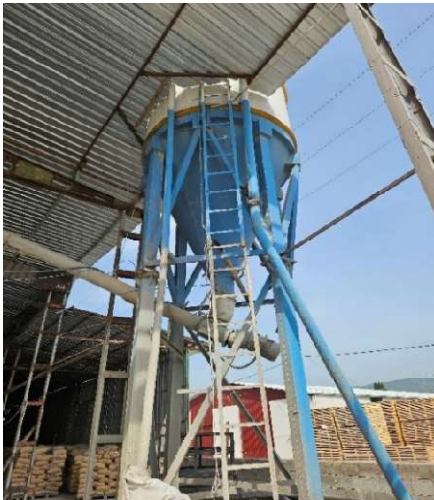
Kilitli beton parke taşları üretilirken belirlenen reçeteye göre kilitli beton parke taşı oluşturan malzemeler silolardan çekilerek parke taşı üretim makinesine transfer edilmektedir. Kilitli beton parke taşının üretiminde kullanılan bu malzeme reçetesi üretim tesislerine göre farklılık göstermektedir. Bu farklılığın nedeni kullanılan malzemenin özellikleri ve ortam hava koşullarıdır.

Silolarda depolanmış halde duran malzemeler kullanılan reçeteye göre tartıldıktan sonra mikser kazanına aktarılıp homojen hale gelene kadar karıştırılmaktadır. Homojen haldeki bu karışım kilitli beton parke taşı kalıplarına aktarılıp, sıkıştırılıp preslenmiştir.

Kilitli beton parke taşı numunelerimiz Tokat ilinde faaliyet gösteren NURAK Beton Sanayi ve Ticaret A.Ş. parke taşı üretim tesisinde 6 cm'lik kalıplarda üretilmiştir. Bu tesiste 6 cm'lik kilitli beton parke taşı üretiminde kullanılan malzemelerin karışım oranı yüzdesel olarak ağırlıkça şu şekildedir:

- % 49 İnce agraga
- % 27 Kaba agrega
- % 17 Çimento
- % 7 Su

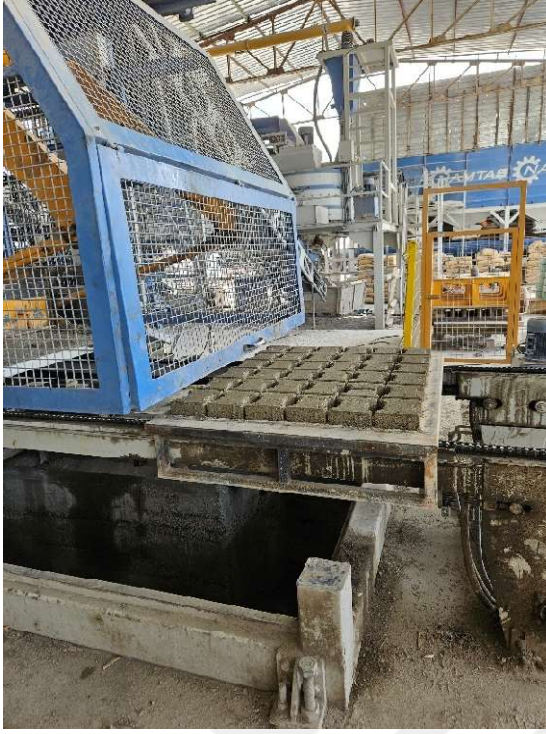
Kilitli beton parke taşını üreten makinemiz Şekil 3.14'te gösterildiği gibi bir kalıpta 36 adet olacak şekilde seri üretim yapmaktadır ve malzemeler Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'te gösterilen silolardan çekilmektedir.



Şekil 3.12. Çimento silosu



Şekil 3.13. Agregat silosu



Şekil 3.14. Bir kalıpta üretilen 36 adet parke taşı

Yapılan bu çalışmada çimento yerine yüzdesel olarak ağırlıkça %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranlarında biyokütle atığı kül kullanılmaktadır. Kullandığımız külü silolardan çekemeyeceğimiz için malzemelerimiz kullanılan reçete oranına göre dışarıda elle karıştırarak Şekil 3.15'te gösterildiği gibi kalıplara dökülmüştür. Daha sonra beton parke taşı üretim makinesi sıkıştırma ve presleme işlemi yaparak parke taşının üretimi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.15. Elle karıştırılan malzemenin kalıplara yerleştirilme aşaması

Üretim için dışarıda elle oluşturduğumuz her harçta kaba agrega, ince agrega ve su miktarları sabit tutulmuştur. Her karışıma 62,23 kg ince agrega, 34,29 kg kaba agrega ve 8,90 kg şehir şebeke suyu karıştırılmış ve her numunede sabit tutulmuştur. Karışımlarda çimento yerine ağırlıkça yüzdesel olarak %0, %5, %10, %15, %20, %25 ve % 30 oranlarında bilyalı değirmende öğüttüğümüz, 0,09 mm çapındaki elekten geçen biyokütle atığı kül ikame edilmiştir.

Kilitli beton parke taşı üretiminde kullanılacak olan beton harcının karışım oranları Çizelge 3.2' gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Numune grupları reçeteleri

Numune No	Numune Adı	Kaba agrega (kg)	İnce agrega (kg)	Çimento (kg)	Biyokütle Atığı Kül (kg)	Su (kg)
1	100Ç	34,29	62,23	21,6	0	8,9
2	95Ç-5K	34,29	62,23	20,52	1,08	8,9
3	90Ç-10K	34,29	62,23	19,44	2,16	8,9
4	85Ç-15K	34,29	62,23	18,36	3,24	8,9
5	80Ç-20K	34,29	62,23	17,28	4,32	8,9

Çizelge 3.2(devamı). Numune grupları reçeteleri

6	75Ç-25K	34,29	62,23	16,20	5,40	8,9
7	70Ç-30K	34,29	62,23	15,12	6,48	8,9

Çimento ve kül ikameli olarak elde edilen kilitli beton parke taşlarının üretimi beton parke taşı makinesinde yapılmıştır. Makina; parke taşı, briket, bordür, bims blok, duvar taşı, beton oluklar dahil olmak üzere 40 mm – 500 mm yükseklikte üretim yapmaktadır.

NT-42 beton blok makinasında 4 adet servo kontrollü motorun tek bir tablada toplanmış vibrasyon sistemi mevcuttur. Farklı ürün gruplarına göre ayrı ayrı vibre ayarı yapıldığından üretim baskı süreleri kısa, günlük baskı kapasiteleri fazladır.

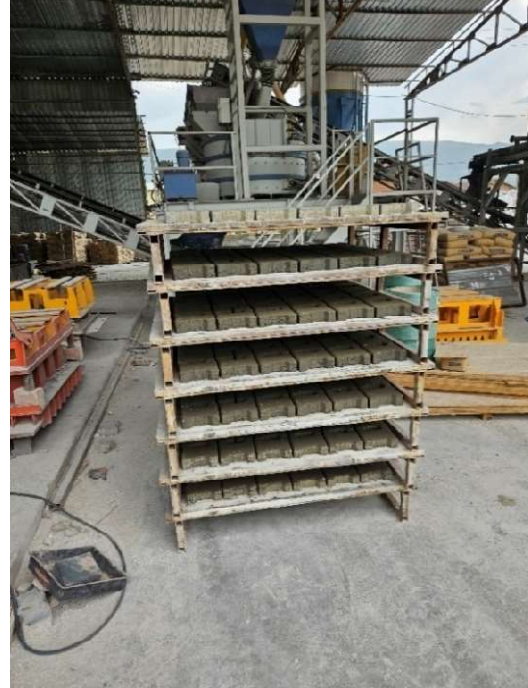
Makine minimum sürede yeni bir ürün üretimi için yeniden ayarlamaya izin veren hızlı kalıp değiştirme sistemine sahiptir. 0,1 mm hassasiyetli lineer cetveller ile ürün yükseklikleri istenilen boyutta ayarlanarak minimum sürede aynı boyutta ürün imal edilmesine olanak sağlamaktadır.

Manuel şekilde yönetilebilen makine iki harç blunkerine ve istifleme robotuna sahiptir. Makinadan çıkan ürün paletlerini üst üste istifleyerek forklifte aktarılmasını sağlayan istifleme robotu vardır.

Numunelerin üretim sürecinde dışarıda elle karıştırdığımız beton harçları sırasıyla makinedeki kalıplara yine elle yerleştirilmiştir. Gerekli presleme ve sıkıştırma işlemi yapılan kalıptan çıkarılan numuneler Şekil 3.16 ve Şekil 3.17’de gösterildiği gibi gruplandırılmıştır. Üretilen numuneler günde bir defa olacak şekilde üç gün sulanmıştır.



Şekil 3.16. Kilitli beton parke taşı üretim süreci



Şekil 3.17. Kilitli beton parke taşlarının istiflenmesi

Sulama işlemleri bittikten sonra ürettiğimiz bütün numuneler gerekli dayanımı sağlamak amacıyla 28 gün 20 ± 5 °C sıcaklığındaki Şekil 3.18'deki gibi kür havuzunda bekletilmiştir.



Şekil 3.18. Kilitli beton parke taşlarının kür havuzunda bekletilme süreci

3.3. Kilitli Beton Parke Taşlarının Deney Metotları ve Gerekli Şartlar

Üretilen kilitli beton parke taşı numunelerine TS 2824 EN 1338 standartlarında ve Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik şartnamesi Kısım 316.01.06'da belirtilen uygunluk şartları esas alınmış ve deneyler uygulanmıştır. Yapılan bu çalışmada çimento yerine ağırlıkça yüzdesel olarak %0, %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranlarında biyokütle atığı külü içeren numunelerin gerekli standartları sağlayıp sağlamadığını kontrol etmek için numunelere boyut ve görünüş, su emme oranı tayini, yarmada çekme dayanımı deneyi, aşınmaya karşı direnç tayini, ultrases geçiş hızı deneyi, buz çözücü tuz etkisiyle donma-çözünme direnci ve suda ağırlık ölçümleri tayini deneyleri uygulanmıştır.

3.3.1. Kilitli beton parke taşları boyut ve görünüş tayini

Kilitli beton parke taşı numunelerine göz ile yapılan muayene sonucunda parke taşlarının yüzeylerinde çatlak, kırık, döküntü ve çukurlara rastlanmamalıdır. Yüzeyleri düzgün ve köşeleri gerekli ölçülerde olmalı ve herhangi bir biçim bozukluğuna rastlanmamalıdır.

3.3.2. Kilitli beton parke taşları su emme oranı tayini

Kilitli beton parke taşı numuneleri 20 °C sıcaklıktaki suda sabit kütleye (M1) ulaşınca kadar 72 saat boyunca bekletilmektedir. 72 saat bekletildikten sonra 24 saat arayla oda sıcaklığındaki numuneye iki kere tartım yapılmakta, iki tartım arasındaki fark %0,1'den küçük olduğu görülmekte ve doymun kütleye ulaştığı kabul edilmektedir.

Tartım yapılmadan önce kilitli beton parke taşı numuneleri kuru bezle üzerinde su kalmayacak şekilde iyice kurulanır ve tartım yapılır. Tartılan numuneler daha sonra etüvde 105 °C sıcaklıkta kuru kütleye(M2) ulaşınca kadar 72 saat boyunca kurutulur. Kurutulan numunelerin ağırlıkları tekrar tartılır.

Su emme oranı(Wa) kütlece % cinsinden aşağıdaki formül yoluyla bulunmaktadır.

$$Wa = \frac{100 * (M1 - M2)}{M2}$$

Numune gruplarına ait doymun kütlede(M1) ve kuru kütledeki(M2) ağırlıkları Çizelge 3.3' te gösterilmektedir.

Çizelge 3.3. Numunelerin Doymun kütlede(M1) ve Kuru kütledeki(M2) ağırlıkları

Numune grubu	Numune No	Doymun kütle(M1) (kg)	Kuru Kütle(M2) (kg)
100Ç	1	3690	3535
	2	3666	3521
	3	3663	3514
95Ç-5K	1	3795	3616
	2	3815	3638
	3	3820	3643
90Ç-10K	1	3610	3409
	2	3638	3468
	3	3695	3499
85Ç-15K	1	3617	3416
	2	3657	3452
	3	3598	3395

Çizelge 3.3(devamı). Numunelerin Doygun kütlede(M1) ve Kuru kütledeki(M2) ağırlıkları

80Ç20K	1	3594	3368
	2	3592	3360
	3	3574	3342
75Ç-25K	1	3616	3373
	2	3625	3371
	3	3660	3404
70Ç-30K	1	3684	3406
	2	3625	3361
	3	3680	3422

3.3.3. Kilitli beton parke taşları aşınma direnci tayini

Aşınmaya karşı direncin tayini için Aşındırma Cihazı kullanılmaktadır. 85 kg ağırlığındaki bu cihaz beton elemanlarının aşınma direncini tespit etmek için tasarlanmıştır. Aşındırma cihazının diski 7 cm kalınlığındadır ve dakikada 75 devir yapmaktadır. Aşındırma tozu olarak Alüminyum Oksit (Al_2O_3) kullanılmaktadır. Aşındırma Cihazı Şekil 3.23’ de gösterilmektedir.



Şekil 3.23. Aşındırma Cihazı

Kilitli beton parke taşı cihaza yerleştirilir ve cihaz çalıştırılarak deneye başlanılmaktadır. Cihaz 60 saniye çalıştırdıktan sonra durdurulur. Kumpasın ölçme uçları aşındırma sonucu oluşan oyuk içine yerleştirilerek ölçüm yapılmaktadır.

3.3.4. Kilitli beton parke taşları yarma çekme dayanımı deneyi

24 saat boyunca $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$ suda bekletilen numune grupları sudan çıkarılarak kuru bez yardımıyla temizlenmekte ve yarmada çekme dayanımı deneyine hazır hale getirilmektedir. Numuneler simetrik bir şekilde en uzun yarıma kesiti boyunca deney düzeneğine yerleştirilmektedir. Kırılma yükü (P), yükleme hızı $0,05 \pm 0,01$ N olacak şekilde düzgün bir biçimde artırılarak numunelere uygulanmaktadır. Kırılmanın gerçekleştiği andaki yük, kırılma yükü olarak kaydedilmektedir. Her numune grubu için 3 adet deney yapılmıştır.

Yarmada çekme deneyi cihazı Şekil 3.24’ de, yükleme yükü sonucu kırılan numune Şekil 3.25’ de gösterilmektedir.



Şekil 3.24. Yarmada Çekme Deneyi Cihazı



Şekil 3.25. Yarmada Çekme Deneyi sonucu kırılmış numuneler

3.3.5. Kilitli beton parke taşları buz çözücü tuz etkisi ile donma-çözülme direnci tayini

Her numune grubuna ait numuneler elmas kesici yardımı ile 91x91x91mm boyutlarında küp şeklinde olacak biçimde kesilmiştir. Küp şeklindeki numuneler 28 gün boyunca, %97'si su ve %3'ü NaCl olan çözelti ile kaplanarak, %65 bağıl neme sahip olan, buharlaşmanın 200 gr/m² olduğu, 20°C'deki iklim kabininde 7 gün bekletilmiştir.

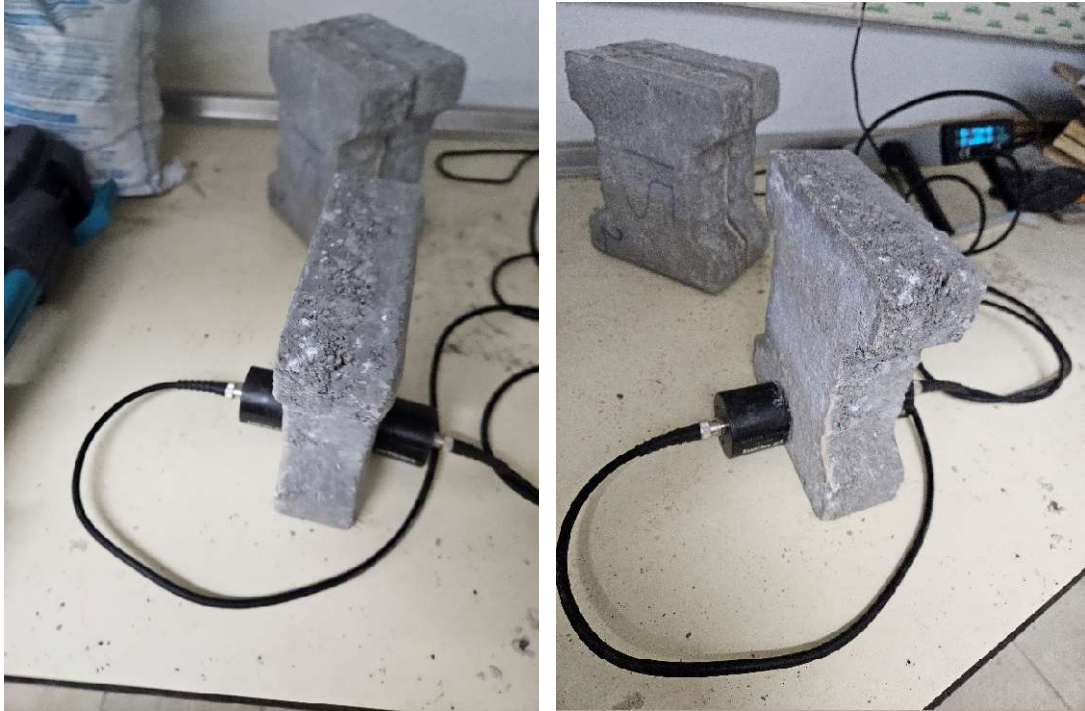
Numunelerin deney yapılacak yüzeyi dışında kalan tüm yüzeyleri plastik kaplama ile örtülmüştür. Test edilen yüzeye 20°C sıcaklıkta ve 5 mm derinlikte su eklenmiş, bu şekilde 72 saat boyunca suyun yüzeyle plastik kaplama arasındaki izolasyon özellikleri değerlendirilmiştir.

Deney numunelerindeki su, 5 mm derinliğide %3 NaCl çözeltisi ile değiştirilmiş ve 30 dakika bekledikten sonra numuneler donma odasına yerleştirilmiştir. 28 gün boyunca donma ve çözülme döngülerine maruz kalan numunelerde yüzeyde meydana gelen pul pul dökülme ile birlikte ayrılan malzeme, su püskürtme yöntemiyle toplama kabına doğru yıkanmış ve fırçalanmıştır. Bu şekilde toplanan malzeme, süzgeç kağıdına konularak NaCl çözeltisinden arındırılması amacıyla 1 litre su ile yıkanmış ve 24 saat boyunca

105°C sıcaklıkta kurutulmuştur. Kuruyan malzemenin kütlesi ölçülmüş ve kütle kaybı belirlenmiştir.

3.3.6. Ultrasonik hız deneyi

Ultrasonik hız testi, ISMR(1981) standartlarına uygun olarak uygulanmıştır. Yapılan testte, cihazın bağlı alıcı ve vericisinin arasına yerleştirilen parke numunelerinin sismik hızları ölçülmüştür. Şekil 3.26’da Ultrasonik hız deneyi cihazı ve sismik hız ölçümüne dair bir örnek gösterilmiştir. Alıcı ve vericinin parke numunesiyle doğrudan temasını sağlamak amacıyla aralarına ultrason jeli sürülmüştür. Her numune grubundan üç adet test yapılmış ve her bir numune üzerinde üç farklı noktadan ölçüm gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçların ortalaması alınarak kayıt altına alınmıştır.



Şekil 3.26. Ultrasonik hız deneyi cihazı ve sismik hız ölçümü

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, Tokat ilinde faaliyet gösteren CEMAK Elektrik Üretim tesisinden alınan biyokütle atığı kül çarklı değirmen ve bilyeli değirmen yardımıyla 0,09 mm' lik elekten geçecek boyuta getirilerek kilitli beton parke taşı üretiminde kullanılmıştır. Çizelge 3.2., Çizelge 3.3, Çizelge 3.4, Çizelge 3.5, Çizelge 3.6, Çizelge 3.7 ve Çizelge 3.8'de belirtilen karışım oranlarına (100Ç, 95Ç-5K, 90Ç-10K, 85Ç-15K, 80Ç-20K, 75Ç-25K, 70Ç-30K) göre 7 farklı harç hazırlanarak toplamda 252 adet kilitli beton parke taşı üretilmiştir.

Kilitli beton parke taşlarının boyut ve görünüş deneyi, su emme oranı tayini deneyi, aşınma direnci deneyi, yarmada çekme dayanımı deneyi, donma-çözülme deneyi ve ultrasonik hız deneyi için her gruptan üçer numune olmak üzere toplam on sekizer numune deneye tabii tutulmuştur.

4.1. Boyut ve Görünüş Tayini Deney Sonuçları

Belirlediğimiz karışım oranlarına göre elde edilen numuneler üzerinde yapılmış gözle kontroller sonucu kilitli beton parke taşlarının yüzeylerinde kırık, çatlak, döküntü ve çukurlaşma olmadığı, düzgün yüzeyli, köşeleri sorunsuz, simetrik ve biçimsel bozuklukların oluşmadığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2' de kilitli beton parke taşlarının görünüşleri ve ölçümleri gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Kilitli beton parke taşlarının görünüşleri



Şekil 4.2. Kilitli beton parke taşı boyutları ölçümü

Numuneler üzerinde yapılan boyut ölçüm sonuçları Çizelge 4.1’ de gösterilmiştir. Biyokütle atığı külünün kilitli beton parke taşlarında boyut ve görünüş açısından bir soruna yol açmadığı tespit edilmiştir.

Çizelge 4.1. Numunelerin Ölçüleri

Numune İsmi ve Numarası	Pah (mm)	Uzunluk (mm)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)
1 (100Ç)	5	198	163	60
2 (95Ç-5K)	5	198	163	60
3 (90Ç-10K)	5	198	163	60
4 (85Ç-15K)	5	198	163	60
5 (80Ç-5,20K)	5	198	163	60
6 (75Ç-25K)	5	198	163	60
7 (70Ç-30K)	5	198	163	60

4.2. Su Emme Oranı Tayini Deneyi Sonuçları

Numune grupları üzerinde yapılan su emme oranı tayini deney sonuçlarına göre; şahit numune olup %0 kül içeren 1 numaralı (100Ç) numune grubu, % 5 kül içeren 2 numaralı (95Ç-5K) numune grubu, %10 kül içeren 3 numaralı(90Ç-10K) numune grubu, %15 kül içeren 4 numaralı(85Ç-15K) numune grubunun, KGM Karayolları Teknik Şartnamesi Kısım 316.01.06' da belirtilen sınır değeri aşmadığı görülmektedir. %20 kül içeren 5 numaralı(80Ç-20K) numune grubu, %25 kül içeren 6 numaralı(75Ç-25K) numune grubu ve %30 kül içeren 7 numaralı(70Ç-30K) numune grubunun şartnamede belirtilen sınır değeri aştığı görülmektedir. Şahit numuneye göre kıyas yapıldığında, numunelerde biyokütle atığı kül oranının arttıkça su emme değerinin de arttığı görülmüştür. Şekil 4.3'te numunelerin doymun kütlede(M1) ve kuru kütledeki(M2) ağırlıkları gösterilmektedir.

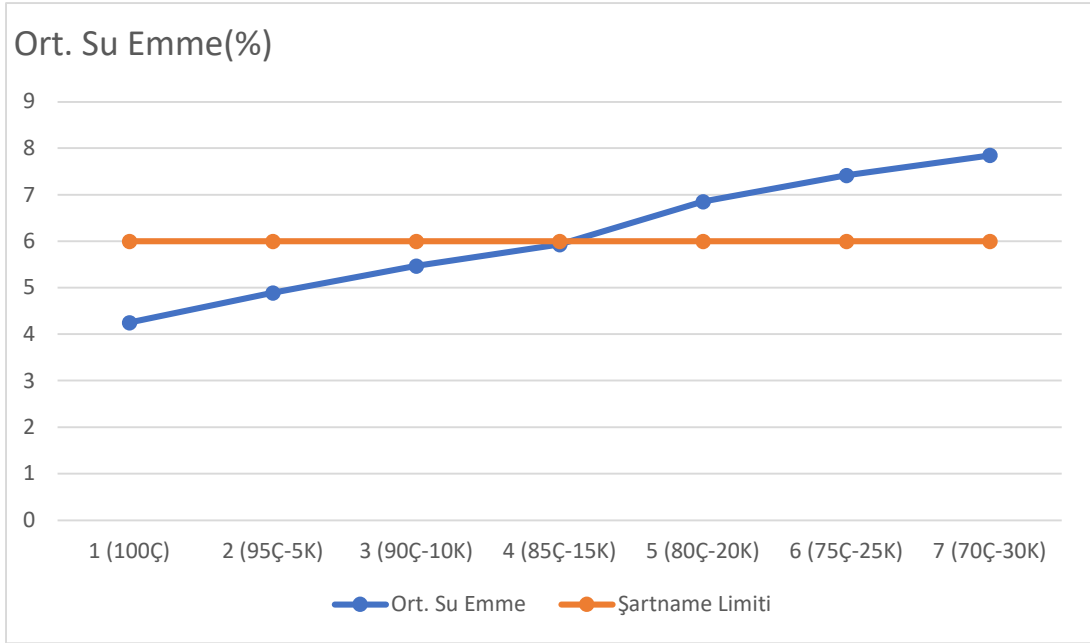


Şekil 4.3. Numunelerin Doygun kütlede(M1) ve Kuru kütledeki(M2) ağırlıkları

Çizelge 4.2’ de numunelerin su emme oranı tayini deney sonuçları ve Şekil 4.4’de deney sonuçlarının grafiksel hali gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Su emme oranı deney sonuçları

Numune no	1 (100Ç)	2(95Ç-5K)	3(90Ç-10K)	4(85Ç-15K)	5(80Ç-20K)	6(75Ç-25K)	7(70Ç-30K)
1	%4,38	%4,95	%5,90	%5,88	%6,71	%7,20	%8,16
2	%4,12	%4,87	%4,90	%5,94	%6,90	%7,53	%7,85
3	%4,24	%4,86	%5,60	%5,98	%6,94	%7,52	%7,54
Ort.	%4,25	%4,89	%5,47	%5,93	%6,85	%7,42	%7,85
Şartname limiti	Maksimum su emme miktarı %6 olmalıdır						



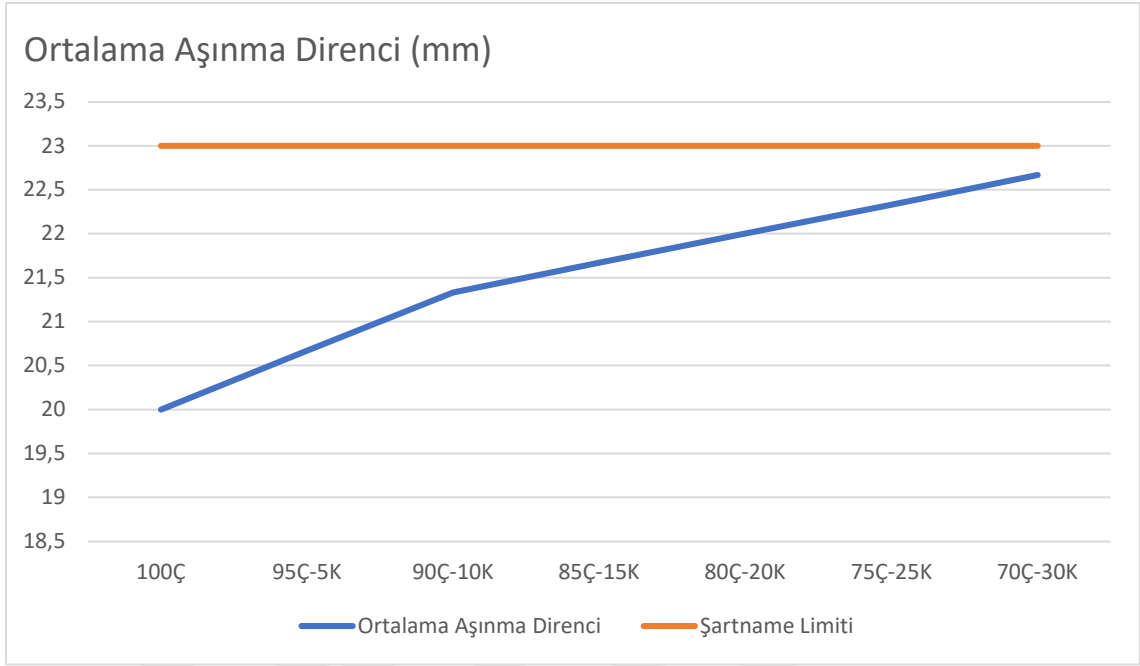
Şekil 4.4. Su emme oranı deneyi sonuçları grafiksel gösterimi

4.3. Aşınma Direnci Tayini Deney Sonuçları

Aşağıda Çizelge 4.4’ de gösterilen sonuçlara göre deneye tabii tutulan bütün numune gruplarının aşınmaya karşı direnç tayini sınır değerlerini aşmadığı tespit edilmiştir. Şekil 4.5’ te ortalama aşınma direnci değerleri grafiksel olarak gösterilmektedir.

Çizelge 4.4. Aşınma direnci tayini deney sonuçları

	1 (100Ç)	2 (95Ç- 5K)	3 (90Ç- 10K)	4 (85Ç- 15K)	5 (80Ç- 20K)	6 (75Ç- 25K)	7 (70Ç- 30K)
Numune No	Aşınma (mm)	Aşınma (mm)	Aşınma (mm)	Aşınma (mm)	Aşınma (mm)	Aşınma (mm)	Aşınma (mm)
1	20	21	21	22	22	22	23
2	20	20	21	21	22	23	23
3	20	21	22	22	22	22	22
Ortalama (mm)	20,00	20,67	21,33	21,67	22	22,33	22,67
Şartname Limiti (mm)	≤ 23 mm						



Şekil 4.5. Ortalama aşınma direnci grafiksel gösterimi

4.4. Yarmada Çekme Dayanımı Deney Sonuçları

Numunelere yapılan yarmada çekme deneyinde, numunelerin kırılma anındaki yükleri ve T dayanım değerleri Çizelge 4.5’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. Numune gruplarının kırılma anındaki yükleri ve T dayanım değerleri

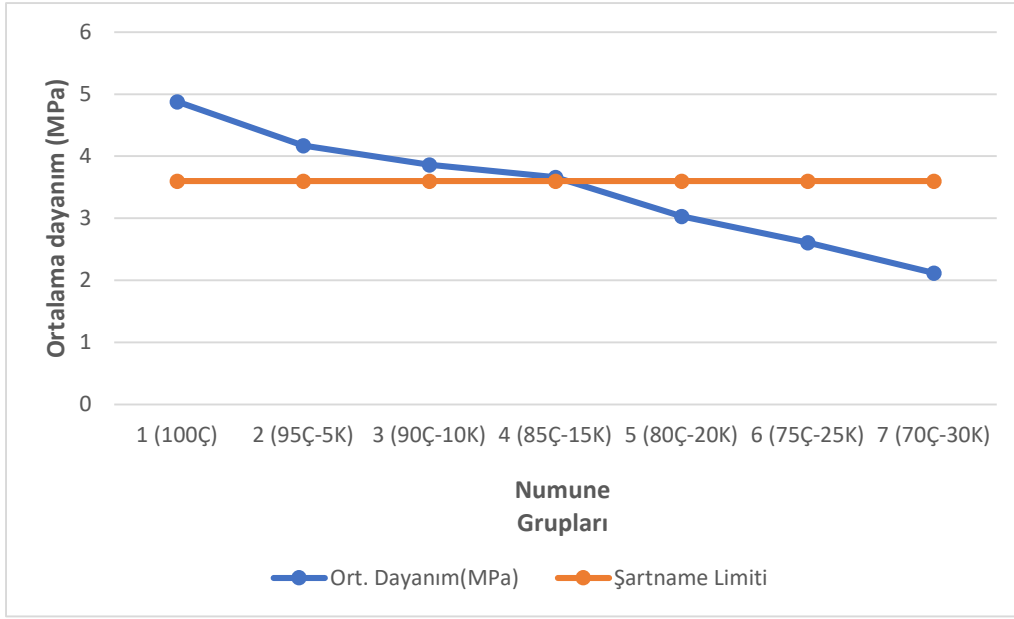
Numune grubu	Numune No	Kırılma Anındaki Yük(kN)	T Dayanım Değeri (N/mm ²)
100Ç	1	103,63	4,78
	2	107,53	4,96
	3	99,08	4,57
95Ç-5K	1	89,97	4,15
	2	88,45	4,08
	3	92,79	4,28
90Ç-10K	1	83,03	3,83
	2	83,68	3,86
	3	84,55	3,90
85Ç-15K	1	80,43	3,71
	2	79,13	3,65

	3	78,70	3,63
80Ç-20K	1	67,21	3,10
	2	67,20	3,09
	3	63,09	2,91
75Ç-25K	1	53,33	2,46
	2	56,15	2,59
	3	60,27	2,78
70Ç-30K	1	49,00	2,26
	2	45,31	2,09
	3	47,26	2,18

Aşağıda Çizelge 4.6’da gösterilmiş olan sonuçlara göre; şahit numune olup %0 kül içeren 1 numaralı (100Ç) numune grubu, % 5 kül içeren 2 numaralı (95Ç-5K) numune grubu, % 10 kül içeren 3 numaralı (90Ç-10K) numune grubu ve % 15 kül içeren 4 numaralı (85Ç-15K) numune grubuna ait numunelerin yarmada çekme deneyi sonucunda standartta belirtilen dayanımı sağladığı, % 20 kül içeren 5 numaralı (80Ç-20K) numune grubu, % 25 kül içeren 6 numaralı (75Ç-25K) numune grubu ve % 30 kül içeren 7 numaralı (70Ç-30K) numune grubunun ise yeterli dayanımı sağlamadığı tespit edilmiştir. Şekil 4.6’ de ortalama dayanım değeri grafiksel olarak gösterilmiştir.

Çizelge 4.6. Yarmada çekme deneyi sonuçları

	1 (100Ç)	2 (95Ç-5K)	3 (90Ç-10K)	4 (85Ç-15K)	5 (80Ç-20K)	6 (75Ç-25K)	7 (70Ç-30K)
Numune no	Dayanım (MPa)	Dayanım (MPa)	Dayanım (MPa)	Dayanım (MPa)	Dayanım (MPa)	Dayanım (MPa)	Dayanım (MPa)
1	4,78	4,15	3,83	3,71	3,10	2,46	2,26
2	4,96	4,08	3,86	3,65	3,09	2,59	2,09
3	4,89	4,28	3,90	3,63	2,91	2,78	2,00
Ort (MPa)	4,88	4,17	3,86	3,66	3,03	2,61	2,18
Min (MPa)	4,78	4,08	3,86	3,63	2,91	2,46	2,00



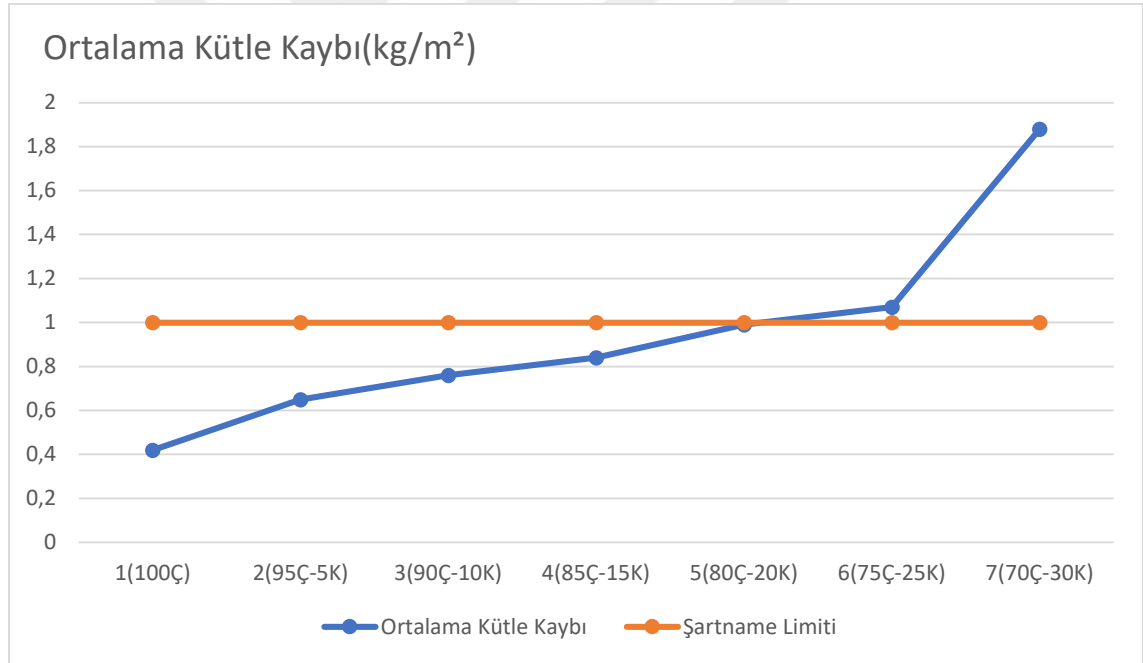
Şekil 4.6. Yarmada çekme deneyi sonuçları grafiksel gösterimi

4.5.Buz Çözücü Tuz Etkisi İle Birlikte Donma ve Çözülme Etkisine Direnç Tayini Deneyi Sonuçları

Çizelge 4.7’ de sunulan donma-çözünme dayanıklılığı test sonuçlarına göre, % 25 kül içeren 6 numaralı (75Ç-25K) numune grubu ve % 30 kül içeren 7 numaralı (70Ç-30K) numune grubunun KGM Karayolları Teknik Şartnamesi Kısım 316.01.06’da belirtilen limitleri aştığı belirlenmiştir. Şahit numune ile yapılan karşılaştırmalarda, biyokütle atığı külü oranı arttıkça donma-çözülme testinden sonra numunelerdeki kütle kaybının da arttığı gözlemlenmiştir. % 5 kül içeren 2 numaralı (95Ç-5K) numune grubu, % 10 kül içeren 3 numaralı (90Ç-10K) numune grubu, % 15 kül içeren 4 numaralı (85Ç-15K) numune grubu, % 20 kül içeren 5 numaralı (80Ç-20K) numune gruplarında, belirtilen sınır değerlerin aşılması nedeniyle, test edilen %5, %10, %15 ve %20 kül içeren beton parke taşı numune gruplarının uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Şekil 4.7’ de ise ortalama kütle kaybı grafiksel olarak sunulmuştur.

Çizelge 4.7. Donma-Çözölmeye Karşı Direnç Tayini Deney Sonuçları

Numune no	1 (100Ç)	2 (95Ç-5K)	3 (90Ç-10K)	4 (85Ç-15K)	5 (80Ç-20K)	6 (75Ç-25K)	7 (70Ç-30K)
1	0,41	0,67	0,76	0,82	0,95	1,02	1,83
2	0,41	0,63	0,72	0,84	1,05	1,09	1,90
3	0,43	0,65	0,79	0,87	0,97	1,10	1,92
Ort.	0,42	0,65	0,76	0,84	0,99	1,07	1,88
Şartname Limiti	Ortalama Kütle Kaybı $\leq 1 \text{ kg/m}^2$ Tek Numune Sonuçlarından Hiçbirisi $1,5 \text{ kg/m}^2$ 'Den Büyük Olmamalıdır						



Şekil 4.7. Ortalama kütle kaybı

4.6. Ultrasonik Hız Deneyi Sonuçları

Çizelge 4.8’de yer alan ultrasonik hız test sonuçlarına göre, şahit numunelerin yayılma hızlarının ortalaması, diğer grup numunelerin ortalamasından daha yüksek çıkmıştır. Yüksek hızlar ($>4570 \text{ m/s}$) genellikle yüksek kaliteli betonun bir göstergesi olarak kabul edilirken, düşük hızlar ($<3050 \text{ m/s}$) ise kalitesiz betonları işaret eder (Şahbaz, 2010). Şahit

numunelerin ortalama sismik hızı 4389 m/sn olarak ölçülmüş olup , bu değer numunelerin kaliteli beton sınıfında yer aldığını göstermektedir.

Çizelge 4.8. Ultrasonik hız ölçüm değerleri

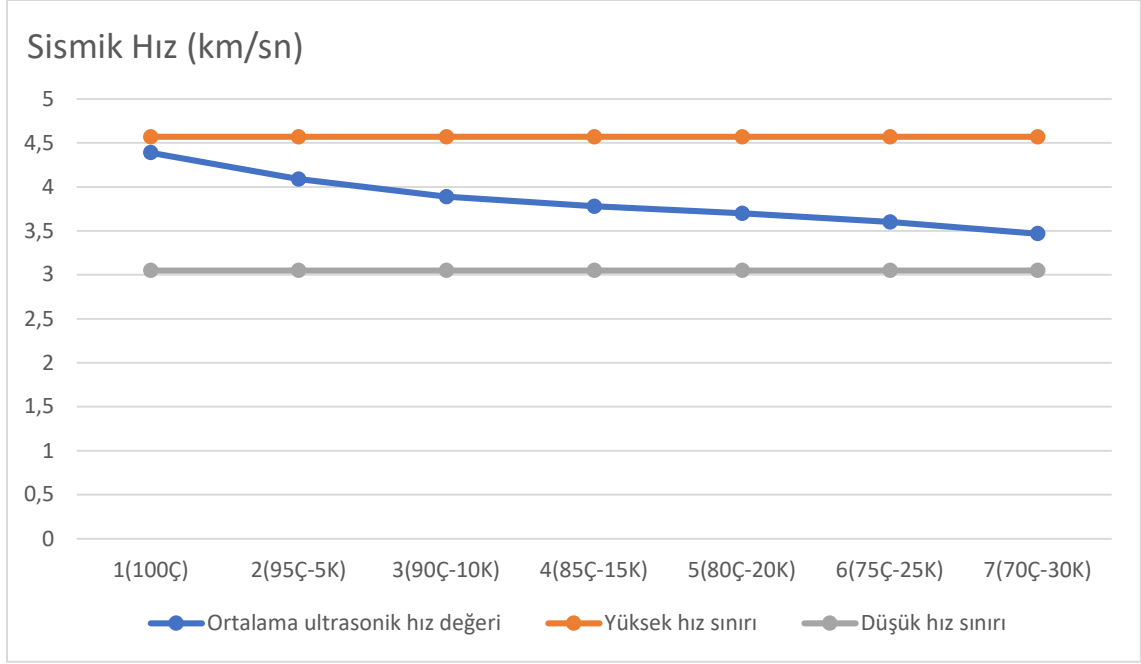
Numune Grubu	Numune Numarası	Sismik Hız(km/sn)	Grup Ortalaması(km/sn)
1 (100Ç)	1	4340	4389
	2	4385	
	3	4450	
2 (95Ç-5K)	1	4030	4087
	2	4085	
	3	4145	

Çizelge 4.8(devamı). Ultrasonik hız ölçüm değerleri

3 (90Ç-10K)	1	3800	3880
	2	3870	
	3	3970	
4 (85Ç-15K)	1	3700	3784
	2	3760	
	3	3892	
5 (80Ç-20K)	1	3680	3704
	2	3700	
	3	3730	
6 (75Ç-25K)	1	3590	3603
	2	3600	
	3	3620	
7 (70Ç-30K)	1	3450	3467
	2	3460	
	3	3490	

Çizelge 4.6’ daki verilere göre biyokütle atığı kül oranı arttıkça beton parke taşlarının kalite göstergesi olan ultrasonik hız değerlerinin düştüğünü ve yüksek kül oranının beton

parke taşlarının genel kalitesini olumsuz yönde etkilediğini açıkça ortaya koymaktadır. Yüksek kaliteli beton parke taşları üretimi için, biyokütle atığı kül oranının dikkatli bir şekilde kontrol edilmesi gerektiği vurgulanabilir. Şekil 4.8’de ultrasonik hız deneyi sonuçlarının grafiksel gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.8. Ultrasonik hız deneyi sonuçlarının grafiksel gösterimi

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Gelişmiş olan birçok ülkede artan kentleşme, sanayileşme ve altyapı gelişimine bağlı olarak kirlilik ve çevre sorunlarında artış yaşanmaktadır. Bu artış farklı türlerde tehlike ve biyolojik olarak parçalanmayan katı atıkların üretilip çevreye salınmasına yol açmaktadır. Çevreye salınan bu atıklar çevre kirliliğine sebep olmaktadır. Atıkların giderek artması ve hammaddenin azalması geri dönüşüm kavramının önemini gözler önüne sermiştir. Geri dönüşüm sayesinde ortaya çıkan atıkların tekrar kullanılabilirliğinin incelenmesi üzerinde çalışmalar yaygınlaşmaktadır.

Yapılan bu tez çalışması kapsamında; Tokat ilinde faaliyet gösteren elektrik enerjisi üretim tesisinden alınan biyokütle atığı kül bilyeli değirmenden geçirilerek çimento boyutlarına getirilmiştir. Kilitli beton parke taşları üretimindeki harçta bulunan çimento miktarı farklı oranlarda azaltılarak yerine biyokütle atığı külün kullanılabilirliği incelenmiştir.

Üretilen şahit numune grubu ve 6 farklı beton parke numune grubuna yapılan deneyler ile aşağıda verilen sonuçlar elde edilmiştir.

- Boyut ve görünüş deneylerinde, şahit numuneler ile farklı oranlarda biyokütle atığı kül içeren diğer numuneler aynı sonucu vermişlerdir. Biyokütle atığı külünün çimento yerine ağırlıkça %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında kullanılması parke taşı kalıbının şeklini almasında herhangi bir olumsuz etkisi olmamıştır. Beton parke taşlarının ebatlarını değiştirmemiştir.
- Su emme oranı tayini deney sonuçlarına göre, şahit numunelerde elde edilen sonuçlar ile 2 numaralı (95Ç-5K) isimli, 3 numaralı (90Ç-10K) isimli ve 4 numaralı (85Ç-15K) isimli numune gruplarında elde edilen sonuçlar şartname limiti olan %6 su emme oranının altındadır. Ancak 5 numaralı (80Ç-20K) isimli numune grubunda, 6 numaralı (75Ç-25K) isimli numune grubunda ve 7 numaralı (70Ç-30K) isimli numune grubunda su emme oranları şartname limitinin üzerindedir. Kül oranı arttıkça su emme oranı tayini değerinin de arttığı gözlemlenmiştir.

- Aşınmaya karşı direnç tayini deneyinde, beton blok kısmı ile 4 mm kalınlıktaki kumlu yüzey tabakası bütün olacak şekilde üretilen şahit numune grubu ve biyokütle atığı kül içeren numune grupları benzer sonuçlar vermiştir. Şahit numune grubunun ortalama aşınma değeri 20 mm iken, 2 numaralı (95Ç-5K) isimli numune grubunda 20,67 mm, 3 numaralı (90Ç-10K) isimli numune grubunda 21,33 mm, 4 numaralı (85Ç-15K) isimli numune grubunda 21,67 mm, 5 numaralı (80Ç-20K) isimli numune grubunda 22 mm, 6 numaralı (75Ç-25K) isimli numune grubunda 22,33 mm ve 7 numaralı (70Ç-30K) isimli numune grubunda 22,67 mm olarak ölçülmüş olup şartname limiti olan 23 mm'yi aşmamıştır. Elde edilen sonuçlara göre biyokütle atığı külünün kullanımının herhangi bir olumsuz etkisi olmamıştır.
- Yarmada çekme dayanımı deneyi sonuçlarına göre, kilitli beton parke taşları üretimden kullanılan karışımdaki çimento miktarı yerine ağırlıkça %5, %10, %15 oranlarında biyokütle atığı kül kullanımı standartta belirtilen değerlere uygundur. Ancak çimento yerine ağırlıkça %20, %25 ve %30 oranlarında kül ikame edilmesi sonucu üretilen numune gruplarının dayanımının yetersiz olduğu görülmektedir. Biyokütle atığı kül içermeyen numunelerde olduğu gibi %5, %10, %15 oranlarında biyokütle atığı kül içeren numuneler yarmada çekme dayanımı deneyinde başarılı olmuştur.
- Buz çözücü tuz etkisi ile birlikte donma ve çözülme etkisine direnç tayini deneyi sonuçlarına göre, şahit numune ile karşılaştırmalarda, biyokütle atığı kül oranı arttıkça donma-çözülme testinden sonra numunelerdeki kütle kaybının da arttığı gözlemlenmiştir. %25 kül içeren ve %30 kül içeren numune grupları belirtilen limitleri aşmıştır. %5, %10, %15 ve %20 kül içeren beton parke taşı numune grupları belirtilen sınır değerlerin aşılması nedeniyle uygun bulunmuştur.
- Ultrasonik hız deneyi sonuçlarına göre, şahit numuneye göre değerlendirmede, biyokütle atığı kül oranının arttığı numunelerde hız değerlerinin azaldığı ve bu durumun beton parke taşlarının genel kalitesini olumsuz yönde etkilediği belirlenmiştir. Ancak tüm numuneler şartname değer aralıkları içerisinde olduğundan uygun bulunmuştur.

Çizelge 5.1’ de deney sonuçları ortak tabloda gösterilmiştir.

Çizelge5.1. Deney sonuçları ortak çizelgesi

Numune Grubu	Yapılan Deney			
	Su Emme	Aşınma direnci	Yarmada Çekme	Donma-Çözünme
100Ç	%4,25	20,00	4,88	%0,42
95Ç-5K	%4,89	20,67	4,17	%0,65
90Ç-10K	%5,47	21,33	3,86	%0,76
85Ç-15K	%5,93	21,67	3,66	%0,84
80Ç-20K	%6,85	22,00	3,03	%0,99
75Ç-25K	%7,42	22,33	2,61	%1,07
70Ç-30K	%7,85	22,67	2,18	%1,88
Şartname limiti	≤%6	≤23 mm	≥3,6 MPa	≤%1 kütle kaybı
Standardı Sağlayan Kül Oranı	%15	%30	%15	%20

Sonuç olarak; oluşturulan 6 farklı numune grubu ve şahit numune grubuna uygulanan deneyler bir bütün olarak değerlendirildiğinde, su emme oranı tayini deneyi ve yarmada çekme deneyinden elde edilen sonuçlardan dolayı numunelerde %15 oranına kadar biyokütle atığı kül kullanımının uygun olduğu düşünülmektedir. Bu oran, hem performans kriterlerini karşılamada hem de ekonomik ve çevresel açıdan uygunluk sağlamada optimum bir denge sunmaktadır.

Biyokütle atığı külünün, kilitli beton parke taşları üretiminde kullanılmasıyla parke taşlarının su tutma oranının arttığı sonucuna varılmıştır.

Yapılan deneyler sonucunda parke taşı oluşturulan harcın elle hazırlanması; harcın homojen hale gelmemesine ve malzemeleri karıştırma esnasında geçen zamandan dolayı suyun bir miktar buharlaşmasına sebep olmaktadır. Bu nedenlerden dolayı su emme oranının ve dayanımının düşmesine sebep olabileceği kanısına varılmıştır.

İleride yapılacak çalışmalarda, su-çimento oranının değiştirilmesi ve farklı özelliklere sahip atık kül kullanılarak kilitli beton parke taşı üretilmesi önerilmektedir. Bu değişikliklerin amacı, parke taşlarının dayanıklılığını arttırmak ve çevresel sürdürülebilirliği sağlamak olarak öne çıkmaktadır.

Su-imento oranının ayarlanması, betonun işlenebilirliğini ve sertleşme sürecini etkileyerek, ürünün genel performansını iyileştirmektedir. Ayrıca farklı özelliklere sahip atık kül kullanımı, betonun mekanik özelliklerini zenginleştirmekte, çeşitlilik ve yenilik sağlamaktadır.

Şu anki çalışmalar kısa vadeli performansı değerlendirmiştir. Uzun vadeli dayanıklılık ve performansı belirlemek için uzun süreli testler yapılabilir.

Tokat ilindeki biyokütle atığı kül dışında, farklı biyokütle kaynaklarından elde edilen kül türlerinin de incelenmesi, malzeme çeşitliliği ve performans üzerindeki etkilerini belirlemek açısından önemlidir.

Biyokütle atığı kül kullanımının ekonomik ve çevresel etkilerini değerlendiren analizler yapılabilir. Bu, maliyet avantajlarını ve çevresel faydaları belirlemek açısından yardımcı olacaktır.

Bu öneriler, biyokütle atığı kül kullanımının beton parke taşları üretimindeki etkilerini daha iyi anlamak ve performansı optimize etmek için ileriye dönük araştırmaların yönlendirilmesine yardımcı olabilir.

6. KAYNAKLAR

- Açıkgöz, Y., 2008. Uçucu Küllerin Beton Kilitli Parke Taşı Üretiminde Kullanımının Araştırılması. (Yüksek Lisans Tezi), Gazi Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü/Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, Ankara.
- Akbulut, A., 2006. Kilitli Beton Parke Taşı İle Yapılan Yol Kaplamaları. İnşaat Mühendisleri Odası Adana Şubesi Dergisi, 31, 4-9.
- Alkaya, Ş., 2010. Hafif Beton Üretiminde Organik Atıkların (Ayçiçeği Sapı) Kullanılabilir Olanakları . (Yüksek Lisans Tezi), Namık Kemal Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü / Tarımsal Yapılar Ve Sulama Ana Bilim Dalı/ İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Tekirdağ.
- Anonim, <https://kilittasifiyati.wordpress.com/2017/09/03/parke-tasi-cesitleri/> - (26.08.2024)
- Aydın, A. B., 2013. İnce Agregasında Farklı Oranlarda Mermer Tozu Kullanılmış Betonların Dayanım ve Dayanıklılık Özellikleri. (Yüksek Lisans Tezi), T.C. 74 Fırat Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü/İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Elazığ.
- Aydın, A., 2022. Beton Üretiminde Puzolan Olarak Çeltik Kavuzu Külünün Kullanılabilirliğinin Araştırılması. (Doktora Tezi), Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü / Biyosistem Mühendisliği Ana Bilim Dalı / Tarımsal Yapılar Ve Sulama Bilim Dalı, Tekirdağ.
- Bakış, A., 2022. Kireçtaşı Kumu Ve Volkanik Kül Agregalarından Yapılmış Birbirine Kenetlenen Kaldırım Taşları. (Yol Malzemeleri Ve Kaplama Tasarımı Dergisi) , Cilt 23, Sayı 7.
- Binici, H., Aksogan, O., (2011). The Use Of Ground Blast Furnace Slag, Chrome Slag And Corn Stem Ash Mixture As A Coating Against Corrosion, Construction And Building Materials, 25 (11), 4197-4201.
- Büyüüksal, A., Ve Akkuş, B., 2024. Mermer Atıklarının Parke Taşı Üretiminde Agregalar Olarak Kullanılması. (Mühendislik Bilimleri Ve Tasarım Dergisi), Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi. Lisansüstü Eğitim Enstitüsü/İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta.
- Ceylan, H. Ve Davraz, M., 2019. Atık Andezit Tozu Ve Uçucu Küllerin Betonda Kullanımının Karşılaştırılması. (Artvin Çoruh Üniversitesi Doğal Afetler Uygulama Ve Araştırma Merkezi Doğal Afetler Ve Çevre Dergisi), Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi. Teknik Bilimler MYO/İnşaat Bölümü, Isparta.
- Çeviren, E., 2021. Tokat Yöresine Ait Atık Mermerlerin Beton Parke Taşında İnce Agregalar Olarak Kullanılabilirliğinin İncelenmesi. (Yüksek Lisans Tezi), Tokatgaziosmanpaşa Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü/İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Tokat.
- Çetinkale Demirkale, G., 2023. (Oku Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi), Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi. Mimarlık Fakültesi/Peyzaj Mimarlığı Bölümü, Niğde.

- Durmuş, G. Ve Şimşek, O., 2008. Uçucu Küllerin Beton Kilitli Parke Taşı Üretiminde Kullanımının Araştırılması. (Tübav Bilim Dergisi), Gazi Üniversitesi. Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümü, Ankara.
- Eken, M., 2018. Organik Küller Ve İnorganik Minerallerle Üretilen Betonların Durabilite Özelliklerinin Araştırılması. (Doktora Tezi), Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü / İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kahramanmaraş.
- Gündeşli, U., 2008. Uçucu Kül, Silis Dumanı Ve Yüksek Fırın Cürufunun Beton Ve Çimento Katkısı Olarak Kullanımı Üzerine Bir Kaynak Taraması. (Yüksek Lisans Tezi), Çukurova Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü / İnşaat Mühendisliği Bölümü / İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Adana.
- Gönen, T., Onat, O., Cemalgil, S., Yılmaz, B., Altuncu, Y., 2012. Beton Teknolojisi İçin Yeni Atık Malzemeler Üzerine Bir İnceleme. Tunceli Üniversitesi. Mühendislik Fakültesi/İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi Cilt: 8, No: 1, Tunceli.
- Görhan, G., Demir, İ., Başpınar, M. S., Kahraman, E., 2019. Beton Parke Taşı Özelliklerine Taş Unu Katkısının Etkileri. (Journal Of Innovations In Civil Engineering And Technology Dergisi), Afyon Kocatepe Üniversitesi. İnşaat Mühendisliği Bölümü, Afyon.
- İşbilir, B., 2012. Pirinç Kabuğu Külü İkameli Çimento Numunelerinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. (Yüksek Lisans Tezi), Düzce Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü / Yapı Eğitimi Ana Bilim Dalı, Düzce.
- Kara, İ., 2020. Çay Endüstrisi Atık Küllerinin Beton Üretiminde Değerlendirilmesi. Artvin Çoruh Üniversitesi. İnşaat Bölümü,/Borçka Acarlar Myo, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, Artvin.
- Karayolu Teknik Şartnamesi (Yol Altyapısı, Sanat Yapıları, Köprü Ve Tüneller, Üstyapı Ve Çeşitli İşler), 2013. Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Kareem, M.A. Ve Ark, 2023. Çimento Yerine Kısmi İkame Olarak Kaju Yaprığı Külü İle Yapılan Birbirine Kenetlenen Parke Bloklarının Özellikleri. (Science Direct Dergisi), Osun Eyalet Üniversitesi. İnşaat Mühendisliği Bölümü, Osogbo, Nijerya.
- Kaya, T., Ve Karakurt, C., 2016. Uygulamadaki Beton Parke Taşlarının Mühendislik Özelliklerinin İncelenmesi. (Düzce Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi), Düzce Üniversitesi. İnşaat Mühendisliği Bölümü, Düzce.
- Kumaş, H., 2019. Bitkisel Atık Küllerinin Yapı Malzemesi Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. (Yüksek Lisans Tezi), Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü/Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Tekirdağ.
- Mo, K. H., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., Yap, S. P., Lee, S. C., 2016. Green Concrete Partially Comprised Of Farming Waste Residues: A Review, Journal Of Cleaner Production ,117, 122-138.

- Nagrockiene, D., 2018. Biyokütle Yanması Uçucu Kül İle Modifiye Edilmiş Betonun Özelliklerinin Araştırılması. (Science Direct Dergisi), Vilnius Gediminas Teknik Üniversitesi, Vilnius, Litvanya.
- Olofinnade, O., Morawo, A., Okedairo, O., Kim, B., 2021. Çelik Cüruf Agregasının Çevre Dostu Kilitli Beton Parke Blokları Üretiminde Yeniden Kullanılması. (Science Direct Dergisi), Covenant Üniversitesi. İnşaat Mühendisliği Bölümü, Nijerya.
- Örtlek, E., 2015. Mısır, Buğday Ve Ayçiçeği Sapı Külü İle Barit Ve Kolemanit Katkılı Betonların Mühendislik Özellikleri. (Yüksek Lisans Tezi), Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü / İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kahramanmaraş.
- Örüng, İ., 1993. Erzurum Yöresindeki Tarımsal Yapılarda Yaygın Olarak Kullanılan Şenkaya Sarıçamı'nın Önemli Fiziksel Ve Mekanik Özellikleri Üzerine Bir Araştırma. (Doktora Tezi), Atatürk Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü / Kültürteknik Ana Bilim Dalı, Erzurum.
- Özbay, E., 2007. Mineral Katkıların Kendiliğinden Yerleşen Betonların Taze Ve Sertleşmiş Beton Özellikleri Üzerine Etkileri: İkili, Üçlü Ve Dörtlü Sistemler. (Doktora Tezi), Gaziantep Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü / İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gaziantep.
- Özocak, M., 2021. Fındık Kabuğu Külünün Puzolan Malzeme Olarak Kullanılması İle Üretilen Betonun Tarımsal Yapılarda Kullanılabilirliğinin Araştırılması. (Doktora Tezi), Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü/ Biyosistem Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Tekirdağ.
- Özşahin, B., 2011. Yalıtım Kalıplı Donatılı Beton Duvarlı Binaların Yapımsal Ve Ekonomik Uygulanabilirliği. (Doktora Tezi), Trakya Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü / Mimarlık Ana Bilim Dalı, Tekirdağ.
- Pappu, A., Saxena, M., Asolekar, S.R., 2007. Solid Wastes Generation In India And Their Recycling Potential In Building Materials, Building And Environment, 42 (6) 2311-2320.
- Raheem, Aa., Adedokun, Si., Raphael, Ab., Adedapo, Ao. ve Olayemi, Ab., 2017. Kilitli Parke Taşı Üretiminde Çimentoya Kısmi Yer Değiştirme Olarak Testere Tozu Külünün Uygulanması. Uluslararası Sürdürülebilir İnşaat Mühendisliği Ve Teknolojisi Dergisi , 8 (1), 1-11.
- Saran, A., 2007. Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Betonun Durabilite Özelliklerine Etkisi. (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü / İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı / Yapı Mühendisliği Bilim Dalı, İstanbul.
- Sarıkaya, H., 2006. Zeolit Katkılı Betonların Fiziksel Ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. (Yüksek Lisans Tezi), Süleyman Demirel Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü / Yapı Eğitimi Ana Bilim Dalı, Isparta.

- Salem, S. Ve Ark, 2022. Sürdürülebilir Betona Doğru: Mısır Mısır Sapı Külü Kullanılarak Çimento Değişimi. (Science Direct Dergisi), Mısır İngiliz Üniversitesi. İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kahire, Mısır.
- Silva, W. Ve Ark., 2023. Kömür Dip Külü İle Beton Yol Kaplama Bloklarının Değerlendirilmesi. (Science Direct Dergisi), Ceara Federal Üniversitesi. Ulaştırma Mühendisliği Bölümü, Fortaleza, Brezilya.
- Standart Agregalı Beton Parke Taşları Teknik Şartnamesi, 2005.
- Şengül, Ö., Taşdemir, C., Koruç, Ş. ve Sönmez, R., 2003. Agregat Türünün Betonun Donma-Çözülme Dayanıklılığına Etkisi. III. Ulusal Kırmataş Sempozyumu, 3-4 Aralık 2003, İstanbul.
- Şenol, A., 2022. Yeşil Beton Teknolojisinde Atık Malzemelerin Kullanımı Ve Üretim Yöntemlerinin İncelenmesi. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi. Mühendislik Fakültesi/İnşaat Mühendisliği Bölümü, 1. Uluslararası Yenilikçi Akademik Konferansı, Bilecik.
- Torlak, İ., 2023. Yüksek Fırın Cürufu Ve Çelikhane Cürufunun Farklı Kompozisyonlarda Beton Üretiminde Kullanımının Araştırılması. (Yüksek Lisans Tezi), Sakarya Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü/İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Sakarya.
- Topçu, Ö. B., 2019. Geçirimli Beton Tasarımı ve Zemin Kaplama Bloklarında Kullanım Olanaklarının Araştırılması. (Yüksek Lisans Tezi), Dokuz Eylül Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü/İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir.
- Topgül, S., 2016. Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Geri Kazanılmış Agregalı Betonların Özelliklerine Etkisi. (Yüksek Lisans Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü / İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı / Yapı Bilim Dalı, İstanbul.
- Ts En 197-1, 2012. Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler Ve Uygunluk Kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Ts 1247, 1984. Beton Yapım Döküm Ve Bakım Kuralları (Normal Hava Koşullarında). Türk Standartları Enstitüsü, 5-19, Ankara.
- Ts 2824 En 1338, 2006. Zemin Döşemesi İçin Beton Kaplama Blokları-Gerekli Şartlar Ve Deney Metotları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.