



**T.C.
RECEP TAYYIP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ÇAY FABRİKASI KÖMÜR KÜLÜ ATIĞININ YOL
BETONUNDA İNCE AGREGA OLARAK KULLANILMASI**

(Yüksek Lisans Tezi)

Tunahan HACIMUSTAFAOĞLU

Danışman

Doç. Dr. Tuba KÜTÜK

II. Danışman

Dr. Öğr. Üyesi İlknur BEKEM KARA

RİZE

2023

KABUL VE ONAY

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında, Doç. Dr. Tuba KÜTÜK danışmanlığında, Tunahan HACIMUSTAFAOĞLU tarafından hazırlanan *Çay Fabrikası Kömür Külü Atığının Yol Betonunda İnce Agregâ Olarak Kullanılması* adlı bu tez çalışması, 16/02/2023 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliğiyle/~~oy çokluğuyla~~ başarılı bulunarak jürimiz tarafından **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	Unvanı, Adı SOYADI	İmza
Başkan	:Doç. Dr. İlker USTABAŞ	
Üye	:Doç. Dr. Tuba KÜTÜK	
Üye	:Dr. Öğr. Üyesi İlknur BEKEM KARA	
Üye	:Dr. Öğr. Üyesi Ali GÜRBÜZ	
Üye	:Dr. Öğr. Üyesi Serkan BİÇİCİ	

ETİK BEYAN

İnşaat Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programından mezun olmak üzere teslim ettiğim ‘Çay Fabrikası Kömür Külü Atığının Yol Betonunda İnce Agrega Olarak Kullanılması’ adlı tezim, bilim ve araştırma etiği prensiplerine riayet edilerek tarafımdan yazılmıştır.

Tez çalışmamda, başka kaynaklardan aktarılan bütün bilgi ve alıntılar, Enstitünüz Tez Yazım Kılavuzuna uygun olarak açıkça gösterilmiştir. Kaynağı gösterilenler dışında kalan bütün bilgiler uygun araştırma yöntemi kullanılarak tarafımdan edinilmiş ve esere bu şekilde yansıtılmıştır. Şahsıma ait olmayan hiçbir bilgi, kasıt veya kusurlar, şahsıma aitmiş gibi gösterilmemiştir. İnternet kaynakları dâhil, sahibine/kaynağına atıf yapılmaksızın hiçbir bilgi kullanılmamıştır. Aksinin ortaya çıkması halinde doğacak bütün hukuki, idari, akademik ve etik sorumluluk tarafıma ait olacaktır. Eserin tesliminden sonra herhangi bir zamanda, bilim etiğine aykırılık tespit edilmesi ve/veya eserimle ilgili intihal veya intihal şeklinde anlaşılabilecek bir durumun ortaya çıkması halinde; Üniversiteniz ve eğitim kadronuzun hiçbir şekilde sorumlu tutulmayacağını hür irademle kabul, beyan ve taahhüt ederim. 16/02/2023

Tunahan HACIMUSTAFAOĞLU

ÖN SÖZ

Bu çalışma Doğu Karadeniz Bölgesi’nde yapılan çay tarımı ve kuru çay üretimi sonunda açığa çıkan kömür külü atıklarının, yeniden ekonomiye kazandırılması ve muhtemel çevresel risklerinin bertaraf edilebilmesi amacıyla yapılmıştır.

Yüksek lisans çalışmalarım boyunca bilgi ve tecrübeleri ile bana yol gösteren danışmanım Doç. Dr. Tuba KÜTÜK’e ve II. danışmanım Dr. Öğr. Üyesi İlknur BEKEM KARA’ya teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmaları ve tez yazım sürecinde deneyimlerinden yararlandığım Öğr. Gör. Cuma KARA’ya, çalışmamın kimya ve fizik ile ilgili olan bölümlerinde desteklerini esirgemeyen Prof. Dr. Hakkı Türker AKÇAY ve Doç. Dr. Murat ŞİRİN’e, yüksek lisans tez savunma sınavı jürimde yer alan Doç. Dr. İlker USTABAŞ, Dr. Öğr. Üyesi Ali GÜRBÜZ ve Dr. Öğr. Üyesi Serkan BİÇİCİ’ye teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmaları süresince bana yardımcı olan annem Nevin HACIMUSTAFAOĞLU, babam İbrahim HACIMUSTAFAOĞLU, kardeşim inşaat mühendisi Batuhan HACIMUSTAFAOĞLU, halalarım Mihriban HACIMUSTAFAOĞLU ve Müyesser HACIMUSTAFAOĞLU, amcam İsmail HACIMUSTAFAOĞLU’na teşekkürü borç bilirim.

Tunahan HACIMUSTAFAOĞLU

2023/RİZE

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	I
ETİK BEYAN.....	II
ÖN SÖZ	III
İÇİNDEKİLER	IV
ÖZET	VI
ABSTRACT	VII
KISALTMALAR	VIII
TABLolar LİSTESİ	IX
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	X
GİRİŞ.....	1
1. GENEL BİLGİLER.....	4
1.1. Beton Yollar	4
1.2. Beton.....	9
1.3. Çay Fabrikası Kömür Külü Atığı	15
2. MATERYAL VE METOT	20
2.1. Materyal	20
2.1.1. Çimento	20
2.1.2. Kömür Külü Atığı	20
2.1.3. Agregas	23
2.1.4. Beton Katkı Maddesi.....	23
2.1.5. Beton Karma Suyu	23
2.1.6. Kimyasallar	23
2.2. Metot.....	24
2.2.1. Kömür Külü Atığı	24
2.2.2. Agregas	25
2.2.3. Beton Tasarımı ve Karışımların Hazırlanması	25
2.2.4. Taze Beton Deneyleri.....	27
2.2.5. Sertleşmiş Beton Deneyleri	28
3. BULGULAR	33
3.1. Kömür Külü Atığının Özellikleri	33
3.2. Agregas Özellikleri	35

3.3. Karışımlara Ait Taze Hal Özellikleri.....	36
3.4. Sertleşmiş Beton Deneyleri.....	37
3.4.1. Ultrases Geçiş Hızı ve Schmidt Çekici	37
3.4.2. Kapiler Su Emme	38
3.4.3. Basınç Dayanımı	39
3.4.4. Eğilme Dayanımı ve Yarmada Çekme Dayanımı.....	40
3.4.5. Aşınma Miktarı	41
3.4.6. Basınç Dayanımı ve Testler Arası İlişkiler	42
3.4.7. Ağır Metal Sızma Testi	43
3.4.8. Maliyet.....	44
4. SONUÇ.....	46
4.1. ÖNERİLER.....	47
KAYNAKÇA.....	48

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ana Bilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Tez Türü : Yüksek Lisans

Danışman : Doç. Dr. Tuba KÜTÜK

Hazırlayan : Tunahan HACIMUSTAFAOĞLU

Yıl : 2023

Sayfa Sayısı : 57

ÖZET

ÇAY FABRİKASI KÖMÜR KÜLÜ ATIĞININ YOL BETONUNDA İNCE AGREGA OLARAK KULLANILMASI

Bu tezin amacı çay fabrikalarında ortaya çıkan kömür külü atığının (KKA) beton içerisinde bertaraf edilebilirliğinin ve beton özelliklerine etkisinin belirlenmesidir. KKA fiziksel, kimyasal ve morfolojik özellikleri tespit edildikten sonra %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında 0-1 mm ince agregaya ikame edilerek tüm slump sınıfları S1 olacak şekilde beton yol tasarımı yapılmıştır. Taze betonların yoğunluk ve pH değerleri ölçülmüş silindir, küp ve prizmatik kalıplara dökümü yapılmıştır. 7. ve 28. günlerde sertleşmiş beton numuneleri üzerinde Schmidt çekici, ultrases geçiş hızı, kapiler su emme, basınç, eğilme, yarmada çekme ve aşınma dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca %0 ve %50 KKA ikameli betonların ağır metal sızıntısı ölçülmüştür.

Sonuç olarak, KKA'nın beton türlerinin kapiler su emme değerlerini arttırdığı, basınç dayanımını azalttığı, çekme dayanımlarını %50 ikame oranına kadar iyileştirdiği, %50 ikame oranına kadar aşınma dayanımı üzerinde herhangi bir değişim yaratmadığı belirlenmiştir. Sızıntı testi sonuçlarına göre ise, KKA'nın betonda kullanılmasıyla ağır metallerin bertaraf edilebildiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler : Kömür külü atığı, Beton yol, İnce agreg, İkame

Recep Tayyip Erdogan University Institute of Graduate Studies

Department : Civil Engineering

Thesis Type : Master Thesis

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Tuba KÜTÜK

Author : Tunahan HACIMUSTAFAOĞLU

Year : 2023

Pages : 57

ABSTRACT

USE OF TEA FACTORY COAL ASH WASTE AS FINE AGGREGATE IN ROAD CONCRETE

This thesis aims to determine the in-concrete disposal of the coal ash waste (CAW) generated in tea factories and its effect on concrete properties. After the physical, chemical and morphological properties of CAW were determined, a road design where all slump degrees are S1 was made by being substituted at the rates of 0%, 25%, 50%, 75% and 100% to 0-1 mm fine aggregate. The intensity grades and pH values of fresh concrete were measured and was cast in cylinder, cube and prismatic molds. Schmidt hammer, ultrasonic pulse velocity, capillary water absorption, compression, deflection, splitting tensile strength and abrasion strength tests were carried out on the concrete samples hardened on the 7th and 28th days. Furthermore, the heavy metal leakage of 0% and 50% CAW substituted concrete was measured.

It is detected that the heavy metal leakage was significantly reduced when used as a fine aggregate substitute in concrete, eliminating environmental effects.

Keywords : Coal ash waste, Concrete road, Fine aggregate, Substitution

KISALTMALAR

BET	: Brunauer, Emmet ve Teller metodu
BOREN	: Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü
CRCP	: Sürekli donatılı beton kaplama
Çaykur	: Çay İşletmeleri Genel Müdürlüğü
Dmaks	: Maksimum dane çapı
f_{ck}	: Karakteristik basınç dayanımı
HCl	: Hidroklorik asit
JPCP	: Derzli donatısız beton kaplama
JRCP	: Derzli donatılı beton kaplama
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
KKA	: Kömür külü atığı
M0	: 0-1 mm ince agrega için %0 kül ve %100 kum kullanımı
M25	: 0-1 mm ince agrega için %25 kül ve %75 kum kullanımı
M50	: 0-1 mm ince agrega için %50 kül ve %50 kum kullanımı
M75	: 0-1 mm ince agrega için %75 kül ve %25 kum kullanımı
M100	: 0-1 mm ince agrega için %100 kül ve %0 kum kullanımı
MgSO ₄	: Magnezyum sülfat
PMT	: Plentmiks temel
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
TÇMB	: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği
UPV	: Ultrases geçiş hızı

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1. Satış cinsine göre yol ağı	1
Tablo 2. Beton deneme yolları özet bilgi tablosu	9
Tablo 3. Ultrases geçiş hızı beton kalitesi ilişkisi	12
Tablo 4. 2020-2021 yılları çaylık alanı ve üretici sayıları	15
Tablo 5. Çaykur ve özel sektöre ait fabrikaların sayı ve kapasiteleri	16
Tablo 6. Çimentoya ait kimyasal, fiziksel ve basınç dayanımı özellikleri	20
Tablo 7. Katkı maddesine ilişkin teknik özellikler	23
Tablo 8. Karma suyuna ait analiz sonuçları	23
Tablo 9. KKA ikame oranları ve beton numunelerin etiketlenmesi	25
Tablo 10. Beton karışımlarına giren malzeme miktarları (kg/m ³)	27
Tablo 11. KKA'nın kimyasal özellikleri	35
Tablo 12. Karışımlara ait taze hal özellikleri	37
Tablo 13. M0 ve M50 beton türlerinin ağır metal salınımları (mg/L)	44
Tablo 14. Yerel ve birim fiyatlar	45

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Ohio'daki bilinen en eski beton yol	4
Şekil 2. Alt zemine sahip beton yollar	4
Şekil 3. Afyon-Emirdağ beton yol uygulaması	6
Şekil 4. Hasdal Kavşağı-Kemerburgaz beton yolu	6
Şekil 5. Ordu-Ulubey devlet yolu	7
Şekil 6. Karamürsel şehir geçişi beton yol kesimi	8
Şekil 7. Çaykur Derepazarı Tersane Çay Fabrikası	21
Şekil 8. Kömürün küle dönüşüm süreci	22
Şekil 9. KKA depolama ünitesi	22
Şekil 10. Piknometre ve lazer parçacık boyutu analizörü	24
Şekil 11. Laboratuvar tipi beton mikseri	26
Şekil 12. Beton üretiminde kullanılan numune kalıpları.....	26
Şekil 13. Kür havuzu.....	27
Şekil 14. Taze hal özelliklerinde kullanılan deney düzenekleri ve cihazlar	28
Şekil 15. Tahribatsız deney cihazları (Schmidt çekici ve ultrases geçiş hızı cihazı). 29	
Şekil 16. Basınç ve eğilme dayanımı test cihazı.....	29
Şekil 17. Böhme cihazı.....	30
Şekil 18. Kapiler su emme deney düzeneği.....	31
Şekil 19. Sızma testi deney düzeneği.....	32
Şekil 20. Tez çalışmasına ait akış diyagramı.....	32
Şekil 21. KKA ve ince agregası (0-1 mm) tane boyutu dağılımları.....	33
Şekil 22. KKA ve ince agregası (0-1 mm) ait SEM görüntüleri	34
Şekil 23. Agregalara ait deneysel granülometri eğrisi	36
Şekil 24. Karışımlara ait yoğunluk ve pH değerleri.....	37
Şekil 25. Numunelerin ultrases geçiş hızı ve Schmidt çekici ölçüm sonuçları	38
Şekil 26. Numunelerin kapiler su emme sonuçları	39
Şekil 27. Numunelerin basınç dayanımı ölçümü sonuçları	40
Şekil 28. KKA'ya ait SEM görüntüleri	40
Şekil 29. Numunelerin eğilme ve yarmada çekme dayanımı sonuçları	41
Şekil 30. Numunelerin aşınma miktarı ölçümü sonuçları	42

Şekil 31. Basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı ve beton test çekici arasındaki ilişki	42
Şekil 32. Basınç dayanımı ile aşınma ve kapiler su emme arasındaki ilişki.	43
Şekil 33. Basınç dayanımı ile eğilme ve yarmada çekme dayanımları arasındaki ilişki.	43
Şekil 34. Beton türlerinin m ³ maliyetleri.....	45



GİRİŞ

Ulaştırma geçmişten günümüze toplumdaki ilerlemenin öncü faktörlerinden birisi olmuştur. Ulaştırmadaki olanakların artması ile birlikte toplumda yaşayan bireylerin birbirleri ile olan iletişim ve etkileşimi güçlenmiştir. Bu durumun sonucu olarakta insanlığın ortak mirasının gelişimi ivme kazanmıştır (Altan vd., 2021). Ulaştırmada ana amaç kişilerin ulaşım talebini en kısa mesafe, en az süre ve en az maliyet ile yerine getirebilmektir. Bu amaçlar gerçekleştirilirken kişilerin konforlu ve emniyetli seyahat ihtiyaçları da göz ardı edilmemelidir (Akgüngör ve Demirel, 2004; Aydemir, 2016; Bakkaloğlu ve İncekara, 2017). Günümüzde kara yolu, deniz yolu, hava yolu, demir yolu ve boru hatları olmak üzere 5 tür ulaştırma çeşidi bulunmaktadır (Altınok, 2001). Karayolu taşımacılığı aktarmasız ulaşım imkanı sunması, güzergah belirlenmesinde esneklik sağlayabilmesi, diğer taşıma türlerinin tamamlayıcısı olması nedeniyle yukarıda sayılan diğer ulaşım türlerinden sıyrılmaktadır (Taç, 2018). Bunlarla birlikte gelişmiş bir kara yolu ağının sağladığı ulaşım kolaylığının ülkeler için kalkınma konusunda en önemli unsurlardan birisi olduğu yadsınamaz bir gerçektir (Yayla, 2011). Ülkemizde Karayolları Genel Müdürlüğü'nün sorumluluğu altında bulunan kara yolu uzunluğu 01.01.2022 tarihi itibarıyla 68526 km olup bu yollar otoyol, devlet yolu ve il yollarından oluşmaktadır. Bu yolların satış cinsine göre uzunlukları Tablo 1'de görülmektedir. Otoyol uzunluklarına Yap – İşlet – Devret ile yapıp hizmete açılan yollar dahil edilmiştir (URL-1).

Tablo 1. Satış cinsine göre yol ağı

Satış Cinsi	Otoyol (km)	Devlet Yolları (km)	İl Yolları (km)	Toplam (km)
Asfalt Betonu	3532	19280	5494	28306
Sathi Kaplama	-	11314	25573	36887
Parke	-	46	241	287
Stabilize	-	22	303	325
Toprak	-	-	339	339
Diğer Yollar	-	303	2079	2382
Toplam	3532	30965	34029	68526

Kara yolları; görevleri, özellikleri ve yapısı bakımından üst ve alt yapı olarak iki ayrı kısımda incelenebilmektedir (Kozak, 2011). Kara yolu üstyapısı trafik

yüklerini taban zemininin göçmeden taşıyabileceği gerilme değerlerine indiren ve çevresel etkilere karşıda dayanımlı olan bir yol yapısıdır. Üstyapı alt temel, temel ve kaplama tabakalarından meydana gelmektedir (Yıldırım, 2012). Kara yolu üstyapılarının tasarımı; imalatla kullanılacak malzemelerin seçimi ve tabaka kalınlıklarının belirlenmesini kapsamaktadır (Kök, 2008).

Kara yolu üstyapıları esnek kaplamalar ve rijit kaplamalar olmak üzere iki türde tasarlanabilmektedir. Esnek kaplamalar bitümlü kaplama tabakalarından meydana gelirken rijit kaplamalar ise portland çimentosu ile imal edilmektedir (Demir, 2022).

Esnek kaplamalar uzun yıllardır kara yollarında kullanılmaktadır. Türkiye’de de esnek kaplamalar bu alanda uzmanlaşmış olan ekiplerin varlığı, yeterli tesis ve makine sayısı sebebiyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Esnek kaplamalı yollar rijit kaplamalı yollara göre daha hızlı inşa edilebilmektedir. Bu durumda yolun daha kısa sürede trafiğe açılmasını sağlamakla ve oluşabilecek muhtemel trafik sıkışıklıklarını önlemektedir (Bağdatlı ve Yıldırım, 2017).

Esnek kaplamaların belirtilmiş olan avantajlarının yanında bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlardan biri; asfalt betonunun viskoelastik bir malzeme olması nedeni ile yollarda görülen tekerlek izi oluşumudur (Tanyıldızı ve Geçkil, 2019). Bir diğer ismi oluklanma olan tekerlek izi oluşumu taşıt tekerlerinin yola temas eden bölümlerinde yol hattı boyunca görülen düşey kalıcı deformasyonlar olarak tanımlanır. Ağır taşıt sayılarında ve bu taşıtların lastik basınçları ile dingil yüklerinde meydana gelen artışla birlikte karayollarında görülen tekerlek izi oluşumunda da bir yükselme olmuştur (Kutluhan ve Ağıar, 2009). Esnek kaplamaların bir diğer dezavantaj yaratan özelliğı ise sürtünme katsayılarının rijit kaplamalara göre daha düşük değerlerde olmasıdır. Bu durum yağışsız havalarda çok fark yaratmamakla birlikte yağışlı havalarda yol ıslandığında taşıt tekerleri ile yol arasındaki aderans azalır. Ayrıca tekerler ile yol arasında ince bir su filmi oluştuğunda su kızıağı etkisi görülür ve sürüş güvensizlikleri baş gösterir. Bu tip yağışlı bölgelerde rijit kaplamaların kullanılması daha uygun olmaktadır (Kaya vd., 2018; URL-2). Rijit kaplamalar literatürde beton yollar olarak bilinmektedir.

Türkiye genelinde en uzun beton yol ağı Doğı Karadeniz Bölgesi’nde bulunmaktadır. Bu yollar, yapıldıkları dönemin asgari ihtiyaçlarını giderecek şekilde

yapılmıştır. Bununla beraber genel bir teknik şartname bulunmadığından ötürü birbirinden farklı şekillerde (derz, kalınlık, çimento dozajı, donatı vb.) beton yol uygulamaları yapılmıştır. Bugün bölgede 10 bin km'nin üzerinde beton yol ağı bulunmaktadır. Rize ili yüzölçümüne oranla Trabzon ili ise nüfus sayısına oranla Türkiye'nin en uzun beton yol ağına sahip yerleşim yerleridir. Bölgedeki beton yolların bir kısmı 35 yılı aşkın süredir hizmet vermektedir (Çelik vd., 2020).



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Beton Yollar

Çimento betonu ile yapılan kaplamalara beton yol denir. Betonun yol kaplaması olarak kullanılmasının amacı trafikten gelen ağır yükleri yol altyapısının zarar görmeyeceği bir seviyeye indirerek altyapıya iletmesidir. Betonun rijitliği sonucunda bu durum oluşmaktadır (Ağar vd., 1998). Betonun sahip olduğu rijitlik özelliği sayesinde nispeten daha zayıf altyapıya sahip yollar üzerinde inşa edilebilmektedir (Gill ve Maharaj, 2015).

Beton yolların tarihsel gelişimine bakıldığında ilk olarak Romalılar M.Ö. 1. yüzyılda inşa ettikleri yollarda kullandıkları taşları birbirine bağlamak için puzolanik bağlayıcılar kullanmışlardır. Modern çağlardaki ilk beton yol ise 1891 yılında Şekil 1’de görülen Ohio’da bir sokakta inşa edilmiştir. (Güner, 2019).



Şekil 1. Ohio’daki bilinen en eski beton yol

Fazla hesaba dayanmayan bu yollardan sonra 1920’li yıllar itibari ile tasarım ilkelerine sahip beton yollar inşa edilmeye başlanmıştır. Daha sonra alt zemin problemleri oluşmaya başlamış ve alt zemini olan yollar inşa edilmiştir. Bu yollardan bazıları Şekil 2’de görülmektedir (URL-3).



Şekil 2. Alt zemine sahip beton yollar

Ülkemizde de beton yolların yapımı; yerli hammadde kullanımı ve dışarıya bağlı olunmaması gibi stratejik önemi ile birlikte, özellikle ağır taşıt trafiğine maruz yollarda ideal bir çözüm sunması, araçların yol tutuş kabiliyetini arttırması ve akaryakıt tasarrufu sağlaması gibi faydalarından ötürü son yıllarda önem kazanmıştır (Boztepe, 2011). Türkiye’de Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma ve Geliştirme Başkanlığı tarafından 2016 yılında, teknik gerekliliklerin ve yapım esaslarının yer aldığı ‘ Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesi ’ oluşturularak yürürlüğe konulmuştur (Cömert vd., 2019). Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesi’ne göre üstyapı beton kaplama tipleri; Derzli Donatısız Beton Kaplama (JPCP), Derzli Donatılı Beton Kaplama (JRCP), Sürekli Donatılı Beton Kaplama (CRCP) olmak üzere 3 çeşittir (Karayolları Genel Müdürlüğü, 2016). Ülkemizde Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından 4 farklı güzergahta beton yol deneme kesimi yapılmıştır. Bu kesimler şunlardır; Afyon-Emirdağ Ayrım Yolu, Hasdal Kavşağı-Kemberburgaz Devlet Yolu, Ordu-Ulubey Devlet Yolu, Karamürsel Şehir Geçişi (Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, 2021).

Afyon – Emirdağ Ayrım Yolu, Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) ve Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TÇMB) tarafından birlikte yapılmıştır. 2004 yılında trafiğe açılan bu yol KGM’nin ilk beton yol deneme kesimi olma özelliğini taşımaktadır. Afyon – Emirdağ km:5+700 – 7+700 arasında 2 km’lik bölünmüş yolun tek yönünde 3 şeritli olarak inşa edilmiştir. Derzli donatısız beton yol tipinde 27 cm kalınlığında inşa edilen beton yol, km:5+700 – 7+200 arasında mevcut sathi kaplama üzerine 30 cm alttemel ve 10-15 cm temel, km:7+200 – 7+700 arasında ise astar tabakası üzerine 25 cm alttemel ve 15 cm plentmiks temel (PMT) şeklinde inşa edilmiştir (Komut vd., 2019). Afyon-Emirdağ beton yol uygulaması Şekil 3’de görülmektedir (Arık, 2022).



Şekil 3. Afyon-Emirdağ beton yol uygulaması

Hasdal Kavşağı – Kemerburgaz Devlet Yolu, KGM ile TÇMB arasında varılan anlaşma sonucunda TÇMB tarafından bedelsiz olarak yapılmıştır. Km:40+000 – 43+500 arasında iki farklı kesitli derzli donatısız beton yol şeklinde inşa edilmiştir. Km:40+000 – 42+620 arasındaki kesit 15 cm kırmataş alttemel, 15 cm PMT, 5 cm aşınma tabakası üzerine 27 cm beton kaplamadan oluşurken, km:42+620 – 43+500 arasındaki kesit 15 cm kırmataş alttemel, 15 cm PMT üzerine 32 cm beton kaplamadan oluşmaktadır (Komut vd., 2019). İnşa edilen beton yol Şekil 4 de görülmektedir (Arık, 2022).



Şekil 4. Hasdal Kavşağı-Kemerburgaz beton yolu

Ordu-Ulubey Devlet Yolu KGM ile Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü (BOREN) arasında imzalanan protokol ile km:5+000 – 6+000 arasında yapılmıştır.

Farklı çimento performanslarının değerlendirilebilmesi amacıyla yolun 700 m’lik kısmı bor katkılı çimento ve 300 m’lik kısımda normal katkısız çimento ile imal edilmiştir. Mevcut sathi kaplama üzerine 28 cm beton kaplama yapılmıştır (Komut vd., 2019). Ordu-Ulubey devlet yolu Şekil 5 de görülmektedir (URL-4).



Şekil 5. Ordu-Ulubey devlet yolu

İzmit – Yalova D-130 Devlet Yolu’nun Karamürsel şehir geçişinde 29.10.2009 tarihinde başlayan yol imalatı 15.01.2010 tarihinde sonuçlanmıştır. Km:38+400 – 40+000 arasında 1600 m’lik beton yol deneme kesimi yapılmıştır. Seçilen kesim trafik hacminin yüksek, sinyalizasyonlu kavşaklar nedeniyle trafik hızının düşük ve tekerlek izi oluşumu şeklindeki bozulmaların yaygın olarak görüldüğü bir yol kesimidir. Mevcut olan bitümlü sıcak kaplamalı yolda, asfalt tabakaları ve terasman kotu altındaki taşıma gücü düşük zemin sökülmüş, yerine taş dolgu yapılarak altyapı oluşturulmuştur. Daha sonra 20 cm PMT tabakası ve 6 cm binder tabakası serilmiş ve üzerine 30 cm kalınlığında beton kaplama imalatı yapılmıştır (Komut vd., 2019). Karamürsel şehir geçişi beton yol kesimi Şekil 6 da görülmektedir (URL-5).



Şekil 6. Karamürsel şehir geçişi beton yol kesimi

Ülkemizde yapılan beton deneme yolları ile ilgili özet bilgi Tablo 2’de verilmiştir (Komut vd., 2019).

Tablo 2. Beton deneme yolları özet bilgi tablosu

Beton Yol Verileri	Afyon- Emirdağ	Hasdal Kavşağı- Kemerburgaz	Ordu- Ulubey Devlet Yolu	Karamürsel Şehir Geçişi
Yolun Tipi	JPCP	JPCP	JPCP	JPCP
Bölgesi	3.Bölge	1.Bölge	7.Bölge	1.Bölge
Kilometresi	5+700- 7+700	40+000- 43+500	5+000- 6+000	38+400- 40+000
Yapıldığı Tarih	2004	2006	2007	2010
Proje Süresi	30 yıl	30 yıl	30 yıl	30 yıl
Protokol Tarafları	KGM- TÇMB	KGM-TÇMB	KGM- BOREN	KGM
Beton Yol Uzunluğu	2 km	3,5 km	1 km	1,6 km
Platform Genişliği	12 m	10,5 m	2x10,5 m	2x8,5 m
Şerit Sayısı	3	2	2x2	2x2
Derzler Aralığı	5 m	5 m	4,5 m	4,5 m
Plak Kalınlığı	27 cm	32 cm/27 cm	28 cm	30 cm
Beton Plâgın Oturduğu Zemin	Sathi Kaplama	PMT üzeri astar, 5 cm Bitümlü Sathi Kaplama	Sathi Kaplama	6 cm binder
Çimento Tipi	CEM I 42,5+(Silis Dumanı)	CEM I 42,5	Bor Katkılı	CEM I 42,5 R
Çimento Miktarı	375 kg/m ³	400 kg/m ³	350 kg/m ³	378 kg/m ³
Su/Çimento	0,41-0,45	≤ 0,35	~0,30	~0,43
Agreganın Özellikleri	Kırma çakıl, kırma kum, Dmaks 32 mm	Doğal kum ve kırmataş, Dmaks 32 mm	Melet ırmağı kırma taş, Dmaks 25 mm	Kırma çakıl, kırma kum, Dmaks 25 mm

KGM dışında belediyeler, orman müdürlükleri ve özel idareler tarafından beton yol uygulamaları yapıldığı bilinmektedir.

1.2. Beton

Beton, ham madde temininin kolay olması, üretiminin basit olması ve düşük maliyeti nedeniyle dünyada yaygın olarak kullanılan yapı malzemelerinden biridir

(Ding vd., 2022). Beton karışımı; çimento, ince agrega, kaba agrega ve su gibi uygun bileşenlerle yapılır (Bixapathi ve Saravanan, 2022).

Sertleşmiş betondan beklenen başlıca özellikler dayanım ve dayanıklılık olarak iki gruba ayrılabilir. Bunlardan 7,28 ya da 90 günlük gibi herhangi bir yaş için hedeflenmiş olan basınç, eğilme, çekme, tekrarlı yükler altında yorulma dayanımı ilk grubu oluşturmaktadır. Betonun donma-çözölmeye, ıslanma-kurumaya, ısınma-soğumaya, aşınmaya, asitlere, sülfatlara ve alkali agrega reaksiyonu gibi kimyasal reaksiyonlara karşı gösterdiği direnç ise dayanıklılık bir başka deyişle durabilite olarak adlandırılmaktadır (Erdoğan, 2010).

TS EN 206+A2 standardında beton özellik, performans, imalat ve uygunluk şartları verilmiştir. Betonu oluşturan malzemeler, hazır beton uygunluk kriterleri, beton üretimi ve imalat kontrolleri standarda uygun gerçekleştirilmelidir. Beton sınıfları silindir ($\phi 150 \times 300$ mm) veya küp ($150 \times 150 \times 150$ mm) olan standart deney numuneleri üzerinden hesaplanır. Numuneler TS EN 12390-4 standardına uygun şekilde basınç dayanımı testine tabi tutulur (TS 500, 2000; TS EN 206+A2, 2021; TS EN 12390-4, 2019).

Betonun basınç dayanımı, karışım bileşimlerine son derece bağlıdır. Çimento ve puzolanların miktarı, suyun çimentoya oranı (S/Ç), ince ve iri agregaların tane boyutu ve kimyasal katkıların türü ve miktarı beton basınç dayanımını etkileyen faktörlerdir. Bu arada çeşitli ham maddelerin etkileri tamamen bağımsız değildir, aralarında bir etkileşim vardır. Havanın sıcaklığı ve bağıl nemi gibi farklı maruz kalma koşulları da betonun dayanım özelliklerini etkilemektedir (Liu ve Sun, 2023). Sertleşmiş betonun basınç dayanımını tespit eden yöntemlerden birisi, betondan alınan karot örneklerinin dayanım testlerine tabi tutulmasıdır (Pucinotti, 2015). Karotla tahribatlı test doğası gereği tahribatsız testten daha doğrudur (Al-Bayati, 2018).

Enine yük taşıyan kiriş gibi elemanlar eğilmeye maruz kalırlar. Kirişin her bir bölgesinde eğilme momentleri meydana gelir. Bu durum madencilikte tünel ve galerilerde tahkimat amaçlı ve birçok yapıda (bina, yol, köprü, baraj vb.) kullanılan betonun eğilme dayanımının bilinmesinin önemini ortaya koymaktadır (URL-6). Yapılan beton yol çalışmalarında eğilme dayanımının önemli bir kriter olduğu vurgulanmaktadır (Kara, 2019).

Beton karışımları, belirtilen yaşta istenen basınç dayanımına ulaşılmasına göre değerlendirilmesine rağmen, çekme dayanımları da genellikle beton yapımında önemli bir rol oynar. Beton çatlaklarının çoğunun, betonun çekme dayanımının doğal zayıflığı nedeniyle olduğu bilinmektedir. Betonda çatlaklar çekmede çok kolay ilerleyebilmekte ve betonun çekme gerilmesinin aşılması nedeniyle çatlaması servis ve dayanıklılık sorunlarına yol açabilmektedir (Bhanja ve Sengupta, 2005).

Betondan beklenen özellikler yapının kullanım amacına göre farklılık gösterebilir. Örnek olarak kaplama malzemesi olarak kullanılan beton için aşınma ve darbe yüklerine karşı yüksek direnç göstermesi, taşıyıcı eleman olarak kullanılan betondan daha önemlidir. Beton yollarda aşınma genellikle tekerleklerin beton yüzey üzerinde sürekli hareket etmesinden kaynaklanır (Garcia vd., 2012). Araç trafiğinin yanı sıra yaya trafiği de aşınmaya neden olan etmenlerden biridir (URL-7). Aşınma dayanımı beton yollar için en önemli hususlardan biridir. Çevre koşulları, betonun dayanım özellikleri ve beton bileşenleri (çimento bağlayıcılar, agregalar ve lifler gibi) kaplama malzemesi olarak kullanılan beton bileşenlerinin aşınma direnci değerlerini önemli ölçüde etkilemektedir (Alaskar vd., 2021). Beton bileşenlerinin dışında hem yüzey bitirme tekniklerinin hem de kürleme türlerinin betonun aşınma dayanımı üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğu daha önceki çalışmalarda vurgulanmıştır (Li vd., 2006).

Tahribatsız muayene teknikleri yapıların hizmet verebilirliğine yönelik yapılan sorgulamalarla birlikte inşaat endüstrisinde oldukça popüler hale gelmiştir. Bu tür uygulamaların beton yapıların mukavemet değerlendirmesini kolaylaştırdığı ve malzemelerin fiziksel özellikleri hakkında değerli bilgiler sağlamada etkili olduğu kanıtlanmıştır (Hwang vd., 2018; Sbartaı vd., 2012). 1940'ların sonlarında betonun mukavemetinin yerinde değerlendirilmesi için Schmidt çekici geliştirilmiştir (Prikryl ve Snizek, 2023). Bu test cihazı ucuz, taşınabilir ve kullanımı kolay olup, bileşenleri çekiç, piston, dış gövde ve yaydan oluşmaktadır (Kazemi vd., 2019). N tipi ve L tipi olmak üzere iki tip Schmidt çekici ticari olarak mevcuttur ve sırasıyla 2,207 ve 0,735 Nm darbe enerjisine sahiptirler (Kong vd., 2021). Schmidt çekici, beton malzemenin yüzeyine bastırılır ve ardından Schmidt çekicindeki piston, serbest bırakılır. Piston enerjisinin bir kısmı ses ve ısıya dönüşür. Kalan enerji, pistonun geri tepmesini sağlayan yüzeyin darbe penetrasyon direncini temsil eder. Pistonun geri tepme

yüksekliğine Schmidt çekici geri tepme değeri denir ve yüzey sertliğini yansıtan geri tepme değeri doğrudan çekiç üzerinde okunmaktadır (Wang ve Wan, 2019).

Ultrases geçiş hızı (UPV), betonun genel performansını belirlemek için tercih edilen en popüler tahribatsız testlerden biridir. Taş, harç, beton ve tuğlaların mekanik tepkisini ve homojenliğini değerlendirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Kasinikota ve Tripura, 2022). UPV, genellikle bir ultrasonik dalgaının bir malzeme boyunca belirli bir mesafeyi kat etmesi için geçen süreye bağlı bulunan genel bir terimdir (Heras vd., 2020). Hesaplanan dalga hızı ile betonun basınç dayanımı yaklaşık olarak hesaplanmaktadır. Tablo 3’de beton kalitesinin belirlenmesinde ultrases geçiş hızı ölçüm sonuçlarının kullanımı gösterilmektedir (Erdoğan, 2010).

Tablo 3. Ultrases geçiş hızı beton kalitesi ilişkisi

Ultrases Geçiş Hızı(km/s)	> 4,5	3,5-4,5	3,0-3,5	2,0-3,0	< 2,0
Beton Kalitesi	mükemmel	iyi	şüpheli	zayıf	çok zayıf

Her yıl 10 milyar ton üzerinde beton üretimi gerçekleştirilmektedir (Balasubramaniam ve Stephen, 2022). Beton hacminin yaklaşık %70-80’ini oluşturan agregaların tüketimi, beton üretimi ve kullanımının artmasıyla birlikte hızla artmaktadır. Bilindiği üzere beton karışımında kullanılacak agrega miktarı da beton maliyetinin düşük olmasını etkileyecektir (Boğa ve Şenol, 2023). İnşaat sektörünün sürekli gelişmesiyle birlikte agregalar azalmakta ve yetersiz kalmaktadır (Li vd., 2023). Katı atıkların betonda alternatif agrega olarak yeniden kullanılması ham madde çıkarılması sırasındaki enerji tüketimini büyük ölçüde azaltmaktadır. Ayrıca yeniden değerlendirilen atık malzemeler sürdürülebilir kalkınmaya katkıda bulunur (Balasubramaniam ve Stephen, 2022). Bu amaçla araştırmacılar, agrega kaynaklarımızın tükenmesini önleyecek, ekonomiklik ve dayanıklılık açısından beton üretimine katkı sağlayacak agrega ikamesi olarak atık kullanımı üzerinde son yıllarda yoğunlaşmışlardır (Boğa ve Şenol, 2023).

Çeşitli endüstriyel atıklar, betondaki bağlayıcı veya agrega bileşenleri için kısmen veya tamamen ikame olarak kullanılabilir. Bağlayıcı ikamesi olarak silis dumanı, yüksek fırın cürufu, uçucu kül kullanımına ilişkin literatürde pek çok çalışma bulunmaktadır (Abdellatief vd., 2023; Dey vd., 2022; Islam vd., 2015; Patil vd., 2022; Suryanita vd., 2022). Beton üretiminde ince agrega olarak yukarıda bahsedilen

endüstriyel atıklar dışında atık mermer, atık döküm kumu, inşaat yıkıntı atığı, plastik kökenli atıklar, kazınmış asfalt malzemeler kullanıldığı literatürden görülmüştür (Ağaoğlu vd., 2022; Gül ve Koçkal, 2022; Şahan ve Canpolat, 2021; Yentimur vd., 2022).

Yapılan çalışmalarda ince agrega ikame malzemesi olarak tercih edilen endüstriyel atıklardan birinin de kömür külü olduğu göze çarpmaktadır.

Singh ve Siddique (2015), kömür dip külünü beton içerisinde ince agrega yerine kütlece %0, %30, %50, %75 ve %100 oranlarında kullanmış 28 günlük basınç dayanımının ve betondaki darbe hızının, betonda taban külü kullanımından etkilenmediğini tespit etmişlerdir. Kömür dip külü ikameli betonların aşınma direnci kontrol betonunun aşınma direncinden daha düşük çıkmıştır. Yaşla birlikte kömür dip külü ikameli betonların ve kontrol betonunun aşınma direnci artmıştır. Nehir kumunun kömür dip külü gibi yan ürünlerle değiştirilmesi, inşaat sektörü için ekonomik açıdan faydalı olabilir. Dip külünün kullanılması doğal kaynakların sürdürülebilirliği açısından büyük öneme sahiptir (Singh ve Siddique, 2015).

Kim ve Lee (2011), termik santral taban külünü %25, %50, %75 ve %100 oranlarında hem ince agrega hem de iri agrega ile ikame ederek beton üretimi gerçekleştirmiştir. %80'e kadar ince agrega ikamesi olarak kullanılan külün çökme değerini azalttığı, ayrı ayrı veya beraber kullanımlarının tüm ikame oranlarında taze beton yoğunluğunu düşürdüğü tespit edilmiştir. Basınç dayanım değerleri kül ikamesinden etkilenmemiştir (Kim ve Lee, 2011).

Singh ve Siddique (2016), ince agregayı %20, %30, %40, %50, %75 ve %100 oranlarında kömür dip külü ile ikame ederek 2 farklı dayanıma sahip beton tasarımı yapmışlardır. İkameli beton türlerinin elastisite modülünün, içeriğindeki kül artışı ile doğrusal olarak azaldığı rapor edilmiştir. Schmidt çekici testi sonuçları, betonda ince agrega yerine kömür dip külü kullanımı sonucu iyi kalitede beton üretilebileceğini göstermiştir. Ultrases geçiş hızı sonuçları da basınç dayanımı sonuçlarıyla uyumludur. Sabit su/çimento oranında, kömür dip külü ikameli betonların işlenebilirliği azalmıştır (Sing ve Siddique, 2016).

Rafieizonooz ve arkadaşları (2016), çimento yerine %20 sabit oranda uçucu kül ve ince agrega yerine %25, %50, %75 ve %100 oranlarında kömür dip külü ile beton üretimi gerçekleştirmişlerdir. Eğilme dayanımları referans beton ile

karşılaştırıldığında benzer davranış sergilemiştir. Yarmada çekme dayanımları ise kömür dip külü artışı ile değişikliğe uğramıştır. Ayrıca kömür dip külü kullanımı ile betonların kuruma büzülme davranışı olumlu etkilenmiştir (Rafieizonooz vd., 2016).

Baite ve arkadaşlarına (2016) göre ince agrega olarak kullanılan kömür dip külü gözenekliliği ve gaz geçirgenliğini arttırmıştır. SEM analizi, kürlenme yaşıyla birlikte geçirgen gözenek boşluğundaki azalmanın dayanıklılığı geliştirdiğini göstermiştir. Kürlenme yaşıyla birlikte ultrases geçiş hızı değerlerinin artması betonun geçirgen boşluk gözeneklerinin azaldığını doğrulamaktadır. Kömür dip külü kullanımı özgül ağırlık ve termal iletkenliği azaltmaktadır. Termal iletkenlikteki bu azalma iç kaplama gibi belirli uygulamalar için ilgi çekici olarak kabul edilebilir (Baite vd., 2016).

Singh ve Siddique (2014) yaptıkları çalışmada kömür dip külü ikame edilen betonların basınç dayanımlarında yaş faktörünün etkili olduğunu rapor etmişlerdir. Bu çalışmaya göre erken yaşta, betona kömür taban külünün dahil edilmesiyle basınç dayanımı marjinal olarak azalmış, ancak nehir kumunun kömür dip külü ile değiştirilmesinin betonun 28 günlük basınç dayanımını önemli ölçüde etkilememiştir. 28 günlük kürlenme süresinden sonra, taban külü beton karışımlarının basınç dayanımı gelişmiş ve kontrol beton karışımının basınç dayanımını geçmiştir. Mikro yapı incelemeleri de yapılan kömür dip külü ikameli betonların C-S-H jel yapısının kontrol betonununkinden biraz daha az monolitik olduğunu ve betona kömür dip külü ilavesiyle toplam etrenjit yoğunluğunun değişmediğini göstermiştir (Singh ve Siddique, 2014).

Kömür dip külünün görünümü ve parçacık boyutu dağılımı nehir kumununkine benzerdir. Kömür taban külünün bu özellikleri, beton üretiminde ince agrega olarak kullanılmasını çekici kılmaktadır. Önceki çalışmalar, betonda nehir kumunun kısmen veya tamamen değiştirilmesinde kömür dip külünün kullanımına ilişkin umut verici sonuçlar bildirmiştir (Singh ve Siddique, 2014). İncelenen çalışmalarda kömür külünün termik santral atığı olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışmada ise, çay fabrikasından temin edilen kömür külü ikamesi ile üretilen yol betonunun bazı özellikleri araştırılmıştır. Bu bağlamda, Türkiye’de çay üretimi, çay üretim aşamaları, fabrikalarda kömür kullanımı ve kül oluşumuna ait bilgiler aşağıda sunulmuştur.

1.3. ay Fabrikası Kömür K  l   Atığı

Dünya nüfusunun büyük bir bölümü tarafından tüketilen aylar, Camellia sinensis bitkisinin yapraklarından elde edilmektedir. ay yaprakları öncelikle ye  l, siyah veya oolong olarak   retilir ve tüketilen çay ürünlerinin yaklaşık %80'ini siyah çay oluşturur (Li ve Zhu, 2016). Küresel olarak çay tüketimi, ekonomik gelişmeyle birlikte son birkaç on yılda istikrarlı bir şekilde artmaktadır (Xu vd., 2021). Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım   rg  t   2021'de dünya çay   retiminin tahminen 6,5 milyon tona yükseldiğini rapor etmiştir (URL-8). Dünya'nın en büyük çay   reticisi %40,32 pay ile in, %21,72 Hindistan, %7,21 Kenya, %5,73 Sri Lanka, %4,26 Vietnam, %3,84 Türkiye, %2,28 Endonezya (geri kalan %14,64 ise diğer ülkeler) olmak üzere yaklaşık 50 ülkede çay yetiştirilmektedir (Khanali vd., 2021). 2021 yılında Türkiye'de 203381 ya   çay   reticisi ile 788988 dekar aylık alanı kaydı vardır. 2021 yılında 47 adet tasnifli dökme kuru çay fabrikası ve 1 adet pazarlama ve   retim bölge müdürlüğü mevcut olup, 155853 ton siyah tasnifli dökme, 27 ton organik ye  l dökme ile 0,066 ton tasnifli beyaz çay, 40 ton tasnifli granül çay ve 20 ton tasnifli çay pudrası olmak üzere 163308 ton tasnifli, 137475 ton paketli siyah, 148 ton paketli ye  l, 520 ton paketli siyah organik, 0.64 ton paketli beyaz çay, 30 ton paketli organik ye  l çay, 2 ton paketli çay pudrası olmak üzere toplam 138175 ton paketli çay üretimi gerçekleştirilmiştir (URL-9). Yapılan tespitlere göre aylık alanlarının illere göre dağılımı ve   retici sayılarının 2020 ve 2021 yıllarına ait değerleri Tablo 4'de gösterilmiştir.

Tablo 4. 2020-2021 yılları aylık alanı ve   retici sayıları

	2020		2021	
��ller	aylık Alanı (Dekar/Yüzde)	��retici (Adet/Yüzde)	aylık Alanı (Dekar/Yüzde)	��retici (Adet/Yüzde)
Rize	527999/67,11	127049/63,26	529320/67,09	128424/63,15
Trabzon	150782/19,16	47306/23,55	151454/19,20	48068/23,63
Artvin	91560/11,64	19272/9,60	91722/11,63	19562/9,62
Giresun-Ordu	16472/2,09	7218/3,59	16502/2,08	7327/3,60
Toplam	786813/100	200845/100	788998/100	203381/100

Tablolarda görüldüğü gibi üreticilerin çoğu Rize'dedir. Bunu sırası ile Trabzon, Artvin, Giresun ve Ordu illeri takip etmektedir.

Doğu Karadeniz Bölgesinin doğusunda ve deniz kıyısında yer alan Rize ilinin en temel özelliği, yaş çay üretiminin merkezi olmasıdır. İlin ekonomisine ve ticaretine, makinesiz yapılan çay tarımı damgasını vurur. Türkiye çay sektörünün en büyük ve lider kuruluşu olan Çay İşletmeleri Genel Müdürlüğü (Çaykur) de Rize il merkezindedir. Ülkemizin yaş çay üretiminin üçte ikisine yakını Rize'de yapılır. Rize ilinde yıllık yağışın çok fazla olması, yüksek oranda nisbi nemin olması, güneş ışığının yetersizliği ve tarım alanlarının genel olarak engebeli oluşu bitki desenini sınırlandırmaktadır. Tarım alanlarının %90'ını çay oluşturmaktadır (URL-10). Çaykur ve özel sektöre ait çay fabrikalarının illere göre sayı ve kapasiteleri Tablo 5'de görülmektedir (URL-11).

Tablo 5. Çaykur ve özel sektöre ait fabrikaların sayı ve kapasiteleri

İller	Çaykur fabrikaları		Özel sektör fabrikaları	
	Sayı	Kapasite (ton/gün)	Sayı	Kapasite (ton/gün)
Rize	33	6450	183	7955
Trabzon	8	1510	26	1225
Artvin	4	880	7	310
Giresun	1	180	12	480
Ordu	-	-	1	30
Toplam	46	9020	229	10000

Siyah çay üretiminde yer alan işlem aşamaları hasat, soldurma, yaprak kırma, fermentasyon ve kurutmadır. Bu adımların her biri, çeşitli ekipman veya bunların grupları tarafından gerçekleştirilebilir (Vargas ve Vecchiatti, 2016).

Soldurma, sıcak hava ile suyu buharlaştırılarak azaltılan çay yaprağının, fiziksel olarak kıvrma işlemi için uygun hale dönüştürülmesidir. Sıcaklık yaş çayın tazeliği, ıslaklık durumu, hava ve çalışma koşullarına göre ortam sıcaklığı 32-38° C arasında değişebilir. İdeal soldurma sıcaklığı 32° C'dir. Sıcak hava vasıtasıyla, yaş çay yapraklarında bulunan %70-80 nispetindeki su oranının buharlaştırılarak %50-55 düzeyine indirilmesi ve bu suretle çay yapraklarının fiziksel olarak kıvrma işlemi için

elverişli hale getirilmesi işlemidir. Fiziksel olarak kıvrırma işlemine uygun hale getirilen yaş çay yaprağı, gevşek ve yumuşak bir görünümde olmaktadır. Soldurma süresi ortalama 6 saattir.

Solmuş ay yapraklarının değişik çay imalat makinelerinde parçalanması, ezilmesi ve bükülmesiyle hücre öz suyunun kıvrılmış yaprak yüzeyine yayılması ve oksidasyonun başlama işlemi kıvrırma işlemidir.

Birinci kıvrırma; düz (yaprak) kıvrırma makinelerinde yapılır. Süresi, doldurulmaya başlandığından itibaren en az 45 dakikadır.

İkinci kıvrırma; birinci kıvrırmada yeterince parçalanmamış, kaba yaprakların basınç altında presli veya göbekli kıvrırma makinelerinde işleme tabi tutulmasıdır. Presli kıvrırmalarda kıvrırma müddeti 40 dakika, göbekli kıvrırmalarda ise 15 dakikadır. Presli kıvrırmalarda ki aylara bu süre içinde en az 3 defa pres tatbik edilir.

Kıvrılan yaş çay yapraklarının hücre öz suyunda bulunan kimyasal bileşiklerinin oksidaz enziminin tesiri ile biyolojik değişikliğe uğrayan siyah ayda istenen renk, burukluk, parlaklık, koku ve aromanın oluşması işlemi fermentasyon işlemidir. Bu süre kıvrırmanın başlamasından oksidasyonun tamamlanmasına kadar geçen zamandır ve 2,5-3 saat kadardır. Fermentasyon sırasında nispi rutubet %90-95, sıcaklık ise hava şartlarına bağlı olarak 21-32°C arasında olabilir. İdeal oksidasyon ise 24-26°C arasındadır (URL-12).

ay işlemede son adım olan kurutmada çay yaprakları genellikle termal kurutma yöntemleri ile kurutulur. Özellikle, ayın %45-50 olan nem seviyesi yaklaşık %2-3'e ulaşana kadar bu adım 20-25 dakika sürer. Genellikle bu adımda giriş havası sıcaklığı yaklaşık 120-140°C'dir ve kurutma tamamlandığında sıcaklık 80-90°C'ye düşer. En fazla enerji tüketen adım kurutma adımıdır (Khanali vd., 2021). Çayın karbon ayak izini artıran faktörlerden biri, ayı kurutmak için kömür yakılmasıdır (URL-13).

Rize'deki birçok çay işleme fabrikası, çay yapraklarını soldurmak ve kurutmak için kömür rezervlerini kullanır ve önemli miktarda kömür külü üretir. aykur'a ait fabrikaların 12 tanesi kömür ile çalışmaktadır. Tez kapsamında yapılan araştırmada çay fabrikalarında ortaya çıkan kömür külü atığının yerel yönetimler tarafından alındığı, istinat duvarları arkasında ve şehir içi altyapı çalışmaları için açılan çukurlarda dolgu malzemesi olarak kullanıldığı bilgisine ulaşılmıştır. Ancak, kömür

külü iyi oranda yanmamış karbon parçacıkları, ağır metaller ve karmaşık organik bileşikler içeren çeşitli organik ve inorganik bileşiklerin karışımıdır. Bununla birlikte, bileşenlerinin toprağı ve su kaynaklarını büyük ölçüde kirleten hem çözünür hem de çözünmez formda ağır metaller (Fe, Mn, Zn, Cu, Cr, Pb vb.) içerdiği bilinmektedir (Goswami vd., 2014; Sönmez ve Işık, 2020; Türkmenoğlu vd., 2014). Kömür külü su ile temas ettiğinde, kömürün içerdiği toksik bileşenler suya geçebilir ve su ile taşınabilmektedir (Sönmez ve Işık, 2020). Kömür külünün uygun arıtma olmadan bertaraf edilmesi, yeraltı suyunu ve bitişik toprağı kirletebilir, bu da biyolojik çeşitliliğin bozulmasına ve artan arazi kullanımı sınırlamalarına neden olduğu rapor edilmiştir (Chindasiriphan vd., 2023). Kömür külü içerisindeki toksik maddelerin yenmesi, içilmesi veya solunması durumunda kanser, bilişsel bozukluklar, gelişimsel gecikmeler, davranış sorunları gibi sinir sistemi etkilerine ve ayrıca kalp hasarı, akciğer hastalığı, solunum sıkıntısı, böbrek hastalığı, üreme sorunları, gastrointestinal hastalık, doğum kusurları ve çocuklarda kemik büyümesinde bozulma gibi rahatsızlıklara neden olabilmektedir (Sönmez ve Işık, 2020).

Kara ve Bekem (2018), Artvin’de Muratlı Çay Fabrikası yakma ünitesinden çıkıp, depolama yapılan alandan temin edilen kömür külü atığını 0.125 mm lik elekten eleyerek çimentoya %0, %5, %15 oranlarında ikame etmiştir. C20/25 beton tasarımına göre, atık ikamesi yapılan tüm betonlar en az dayanım (23,75 MPa) şartını sağladığı elde edilen sonuçlar arasındadır. İlgili beton sınıfında atık ikamesinin en iyi % 5’te sonuç verdiği görülmektedir. Çalışma sonunda, beton üretiminde atığın ince agrega ile ikame edilerek kullanılmasını kapsayacak çalışmaların yapılması önerilmektedir (Kara ve Bekem, 2018).

Bir başka çalışmada ise bu atığın özellikle çay fabrikalarının olduğu bölgelerde beton üretiminde kullanılmasının nakliye masrafları düşünüldüğünde daha uygun olacağı kanısına varılmıştır. Ayrıca, Bekem Kara (2020) tarafından aşınma dayanımının kül ikamesi ile artışı göz önüne alındığında bu atığın beton yollarda değerlendirilmesinin faydalı olacağı vurgulanmıştır (Bekem Kara, 2020). Bu bağlamda çalışma alanı olan Rize’de çay fabrikalarının çok olması nedeniyle ve taranan literatür bilgileri eşliğinde beton üretiminde ince agrega yerine kömür külü atığı (KKA) kullanılmasına karar verilmiştir. Tezin amacı, agrega gibi doğal olan kıt kaynakların kullanımını ve agrega üretimi için gerekli enerji tüketimini azaltmak,

KKA'nın depolama maliyetini ortadan kaldırmak ve atığın olumsuz özelliklerinin çevre kirliliğine neden olmadan beton içinde bertaraf edilebilirliğinin tespit edilmesi olarak belirlenmiştir.



2. MATERİYAL VE METOT

2.1. Materyal

Deneysel çalışma sürecinde bağlayıcı olarak CEM I 42.5 R çimentosu, Çaykur Derepazarı Tersane Çay Fabrikası'ndan (Rize/Türkiye) temin edilen kömür külü atığı, Artvin-Borçka'da bulunan taş ocağına ait kırmataş agrega, beton katkı maddesi, şebeke suyu, $MgSO_4$ ve HCl kullanılmıştır.

2.1.1. Çimento

Bu çalışmada CEM I 42.5 R çimentosu Ünye/Ordu Fabrikası olan OYAK Çimento'dan temin edilmiştir. Çalışmada kullanılan çimentoya ait kimyasal, fiziksel ve basınç dayanımı özellikleri Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Çimentoya ait kimyasal, fiziksel ve basınç dayanımı özellikleri

Analiz	Oksit	Değer (%)	Analiz	Deneyler	Değer
Kimyasal	SO ₃	2,90	Fiziksel	Özgül yüzey (cm ² /g)	3598
	Na ₂ O	0,57		Yoğunluk (g/cm ³)	3,12
	K ₂ O	1,10		Priz başlama süresi (dakika)	140
	Na (Eq)	1,29	Basınç Dayanımı	Deney Zamanı	MPa
	Klorür (Cl-)	2,88		2. gün	35,10
	Kızdırma kaybı	2,49		7.gün	43,20
	Çözünmeyen kalıntı	1,03		28.gün	50,50

2.1.2. Kömür Külü Atığı

KKA, Rize'de faaliyette olan Çaykur Derepazarı Tersane Çay Fabrikası'nın depolama ünitesinden temin edilmiştir. Tersane Çay Fabrikası, Çaykur'un kömür ile çalışan 12 fabrikasından biridir (Şekil 7).



Şekil 7. Çaykur Derepazarı Tersane Çay Fabrikası

Bu üretim faaliyeti için 1872 ton kömür kullanılmıştır. Kullanılan bu kömür Rusya'dan ithal edilen ceviz boyutlu bitümenli taş kömürüdür ve kömürün tane büyüklüğü 22-40 mm'dir. KKA, yakılan kömür miktarının yaklaşık %5'i kadar açığa çıkmaktadır. Kömürün küle dönüşümüne ait aşamalar Şekil 8'de gösterilmiştir. KKA fabrikanın uygun bir yerinde depolanmaktadır (Şekil 9).



Şekil 8. Kömürün küle dönüşüm süreci



Şekil 9. KKA depolama ünitesi

2.1.3. Agrega

Çalışmada kullanılan andezit kırmataş agrega Artvin ili Borçka ilçesinde faaliyet gösteren taş ocağından temin edilmiştir.

2.1.4. Beton Katkı Maddesi

Beton katkı maddesi olarak yüksek oranda su azaltıcı/süper plastikleştirici kullanılmıştır. Kullanılan kimyasal Master Rheobuild 3209 olup, katkı maddesine ilişkin teknik özellikler Tablo 7’de görülmektedir (URL-14)

Tablo 7. Katkı maddesine ilişkin teknik özellikler (URL-14)

Analiz	Sonuç
Yapısı	Naftalin Sülfonat Esaslı
Görünüm	Kahverengi
Özgür ağırlık (20 °C’de)	1,178 – 1,238 kg/lt
pH değeri	8 - 10
Alkali miktarı (%)	≤ 10
Klor iyon içeriği (%)	≤ 0,1

2.1.5. Beton Karma Suyu

Beton karışımında ve küründe TS EN 1008 standardına uygun olarak Artvin ili Borçka ilçesi şebeke suyu kullanılmıştır. Artvin Halk Sağlığı Müdürlüğü’nden temin edilen analiz sonuçları Tablo 8’de görülmektedir (Halk Sağlığı Müdürlüğü, 2022).

Tablo 8. Karma suyuna ait analiz sonuçları (Halk Sağlığı Müdürlüğü, 2022)

Analiz	Sonuç
Renk	Uygun
Koku	Uygun
Bulanıklık	Uygun
Amonyum (mg/L)	Tespit Edilemedi
İletkenlik (µS/cm)	69,1
pH	7,02

2.1.6. Kimyasallar

Deneyde çözelti hazırlamak üzere MgSO₄ ve HCl kullanılmıştır. Kullanılan HCl %37’lidir ve yoğunluğu da 1,19 g/cm³ dür. MgSO₄’ın ise görünümü beyaz kristalize renkte, yoğunluğu 1,68 g/cm³ dür.

2.2. Metot

Tez sürecinde yapılan deneyler Artvin Çoruh Üniversitesi Borçka Acarlar Meslek Yüksekokulu inşaat laboratuvarı ve Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Merkezi Araştırma laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Beton karışımı için kullanılan KKA ve agregaların fiziksel, kimyasal ve morfolojik özellikleri belirlenmiştir. Betonlar üzerinde taze hal özellikleri ve sertleşmiş hal özelliklerine ait deneyler gerçekleştirilmiştir.

2.2.1. Kömür Külü Atığı

Beton karışımlarında ince agreg (0-1 mm) yerine kullanılacak KKA'nın fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlenmiştir. Bu bağlamda KKA'nın yoğunluğu piknometre yöntemi ile tane büyüklüğü dağılımı ise lazer parçacık boyutu analizörü (Malvern, model "Mastersizer Hydro 2000 MU") ile saptanmıştır (Şekil 10). Malzemenin oksitli bileşenleri X-ışını floresansı (XRF) yöntemi ile tespit edilmiştir. Ayrıca, malzemenin morfolojik incelemeleri için SEM görüntüleri alınmıştır. KKA'ya ait gözenek boyutunu ve gözenek boyut dağılımını belirlemek amacıyla yüzey alanı BET cihazı ile ölçülmüştür.



Şekil 10. Piknometre ve lazer parçacık boyutu analizörü

2.2.2. Agrega

Çalışmada kullanılan andezit kırmataş agrega grupları; 0-5 mm, 5-12 mm, 12-25 mm'dir. Beton karışımında kullanılmak üzere agregaların bazı özellikleri deneysel olarak test edilmiştir. ASTM C127-C128'e göre yoğunluk, ASTM C127-C128'e göre su emme, ASTM C131/C131M'e göre Los Angeles aşınma kaybı, TS EN 933-3'e göre yassılık indeksi ve TS EN 933-1:2012'e göre tane büyüklüğü dağılımı analizi deneyleri gerçekleştirilmiştir (ASTM C127, 2015; ASTM C128, 2022; TS EN 933-3, 2012, TS EN 933-1:2012, 2012). Ayrıca, 0-1 mm ince agreganın SEM görüntüleri alınmış, tane büyüklüğü dağılımı lazer parçacık boyutu analizörü (Malvern, model 'Mastersizer Hydro 2000 MU') ile saptanmış ve BET cihazı ile yüzey alanı ölçümü gerçekleştirilmiştir.

2.2.3. Beton Tasarımı ve Karışımların Hazırlanması

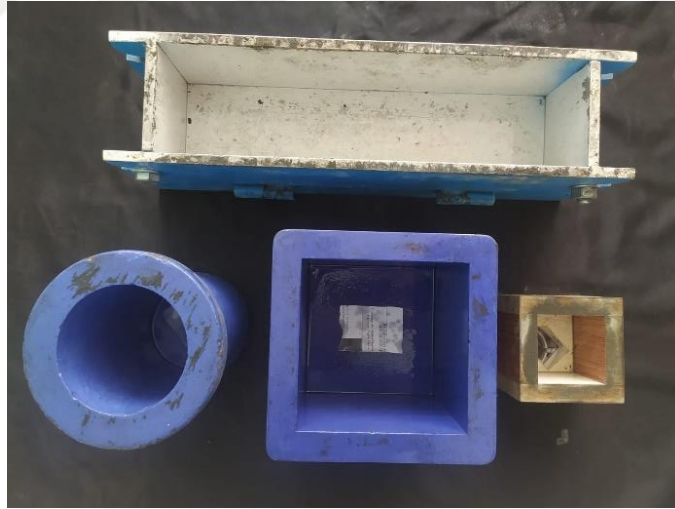
KKA'nın %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında 0-1 mm lik ince agrega yerine ikame edilmesiyle 5 farklı beton tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir (TS 1247, 2018; TS 802, 2016; TS EN 206+A2, 2021). Beton türleri aynı kıvam sınıfına ($S_1=10\sim40$ mm) sahip olacak şekilde karışımlara farklı oranlarda yüksek oranda su azaltıcı/süper plastikleştirici ilave edilmiştir. KKA'nın ince agregaya ikame oranları ve beton numunelerinin kodlaması Tablo 9'da görülmektedir. Karışımlar laboratuvar tipi beton mikserinde (Şekil 11) sabit hızla karıştırılmıştır. Beton yapım, döküm ve bakım kuralları (Normal Hava Koşullarında) standardında belirtilen esaslara uygun olarak betonun kalıplara dökümü, yerleştirilmesi ve sıkıştırılması gerçekleştirilmiştir (TS 1247, 2018). Taze beton karışımları kalıp yüzeyleri yağlandıktan sonra prizmatik (100x100x400 mm), silindir ($\phi 100 \times 200$ mm) ve iki farklı boyuttaki küp (150x150x150 mm ve 71x71x71 mm) kalıplara yerleştirilmiştir (Şekil 12) (TS EN 12390-1, 2021). M0, M25, M50, M75, M100 karışımlarına ait malzeme miktarları Tablo 10'da sunulmuştur.

Tablo 9. KKA ikame oranları ve beton numunelerin etiketlenmesi

Numune Etiketleri	M0	M25	M50	M75	M100
KKA Oranı (%)	0	25	50	75	100



Şekil 11. Laboratuvar tipi beton mikseri

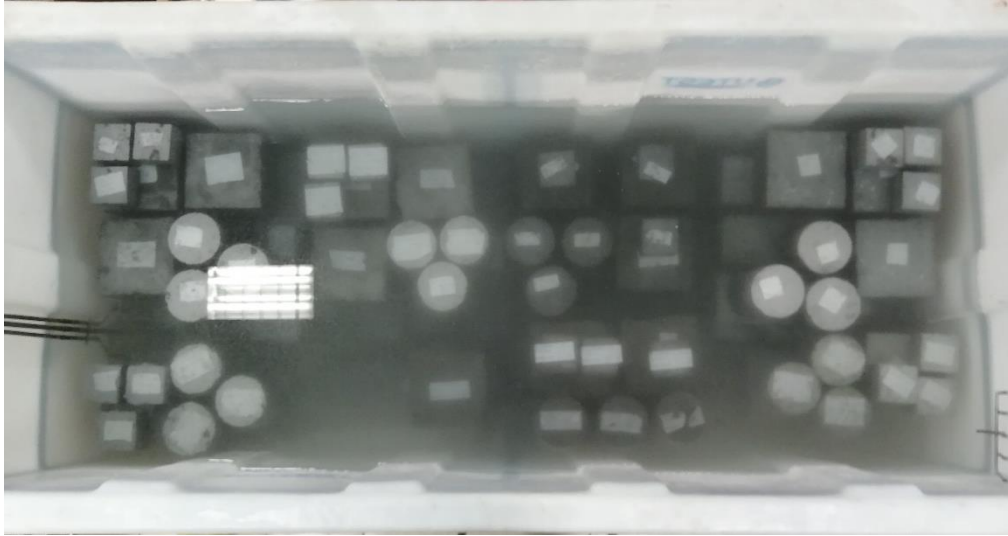


Şekil 12. Beton üretiminde kullanılan numune kalıpları

Tablo 10. Beton karışımlarına giren malzeme miktarları (kg/m³)

Malzemeler	M0(Kontrol Betonu)	M25	M50	M75	M100
Çimento (kg)	350,00	350,00	350,00	350,00	350,00
KKA (kg)	-	58,46	116,93	175,40	233,86
0-1 mm agrega (kg)	426,50	324,36	216,23	108,13	-
1-5 mm agrega (kg)	426,50	426,50	426,50	426,50	426,50
5-12 mm agrega (kg)	448,36	448,36	448,36	448,36	448,36
12-25 mm agrega (kg)	611,26	611,26	611,26	611,26	611,26
Su (kg)	173,46	189,66	203,10	219,30	235,50
Beton Katkısı (%)	1,50	1,62	1,74	1,86	2,00

Numuneler 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış ve deney gününe kadar 20±2 ° C sıcaklıktaki kirece doymun su içerisinde saklanmıştır (Şekil 13).

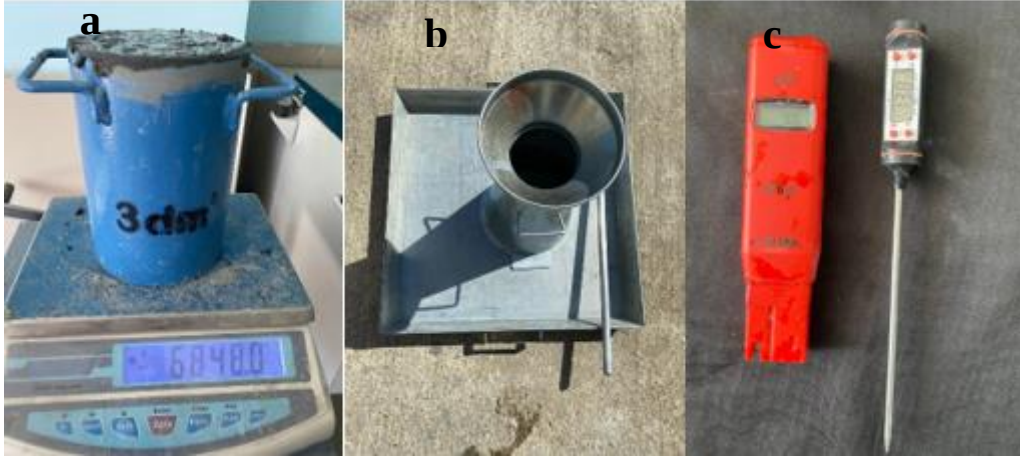


Şekil 13. Kür havuzu

2.2.4. Taze Beton Deneyleri

KKA ikamesi ile elde edilen M0, M25, M50, M75, M100 taze beton karışımlarının yoğunluk, çökme (Slump) miktarları, sıcaklıkları ve pH değerleri belirlenmiştir (TS EN 12350-2, 2019; TS EN 12350-6, 2019).

Taze beton için kullanılan deney düzenekleri ve cihazlar Şekil 14’de görülmektedir.



Şekil 14. Taze hal özelliklerinde kullanılan deney düzenekleri ve cihazlar

a) Yoğunluk ölçümü, b) Slump seti, c) pH metre ve sıcaklık ölçer

2.2.5. Sertleşmiş Beton Deneyleri

M0, M25, M50, M75, M100 olmak üzere farklı oranlarda KKA ikameli beton türleri hazırlanmıştır. Hazırlanan 100x100x400 mm prizmatik, $\varnothing 100 \times 200$ mm silindir, 150x150x150 mm küp ve 71x71x71 mm küp kalıplarında toplamda 120 adet beton numunesi üretilmiştir. Sertleşmiş beton numuneleri üzerinde tahribatlı ve tahribatsız deneyler gerçekleştirilmiştir. Her bir tahribatlı deney için 7. ve 28. günlerde 3'er adet numune kullanılmıştır. Tahribatsız deneyler için ayrıca numune üretimi yapılmamıştır. Her bir beton karışımı için Schmidt çekici, ultrases geçiş hızı, kapiler su emme, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve aşınma dayanımı testleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca mekanik test sonuçları irdelenerek bazı 28 günlük sertleşmiş beton numuneleri üzerinde sızma testi gerçekleştirilmiştir.

Beton kalitesinin belirlenmesinde tahribatsız yöntem olarak Schmidt çekici (TS EN 12504-2, 2021) ve ultrases geçiş hızı (ASTM C597, 2016) cihazı kullanılmıştır.

Her iki beton yaşı (7. ve 28.günler) için tahribatsız deneyler 150x150x150 mm boyutundaki küp numune üzerinde yapılmıştır. Kullanılan cihazlar Şekil 15'de görülmektedir.



Şekil 15. Tahribatsız deney cihazları (Schmidt çekici ve ultrases geçiş hızı cihazı)

Tahribatsız deneyler yapıldıktan sonra 150x150x150 mm boyutundaki küp numunelere basınç dayanımı (TS EN 12390-3, 2019), 100x100x400 mm boyutunda ki prizmatik numunelere ise eğilme dayanımı (TS EN 12390-5, 2019) deneyi yapılmıştır. Kullanılan cihaz Şekil 16’da görülmektedir. Yarmada çekme dayanımı testi $\phi 100 \times 200$ mm boyutundaki numunelere basınç-eğilme test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 16. Basınç ve eğilme dayanımı test cihazı

KKA ikameli beton karışımlarının aşınma miktarlarının belirlenmesi amacıyla Böhme cihazı kullanılmıştır. Numune boyutları 71x71x71 mm’dir. Deneye başlamadan önce numunenin ağırlığı hassas terazi ile ölçülür. Deneyde 30 ± 1 devir/dakika hızla dönen yaklaşık 750 mm çapında yatay olarak yerleştirilmiş döner bir aşındırma diski bulunmaktadır. Disk her 22 devirde cihazı otomatik olarak durduracak tertibata ve devir sayısını gösteren bir göstergeye sahiptir. Deneyde $20 \pm 0,5$ g aşındırma tozu sürtünme şeridi üzerine serilir ve manivela aracılığı ile numune

üzerine 294 ± 3 N'luk bir yük uygulanır. 22 devir sonunda otomatik olarak duran disk üzerinden aşındırma tozu ve numune atıkları temizlenir. Tekrar $20 \pm 0,5$ g aşındırma tozu sürtünme şeridi üzerine serilir ve numune düşey eksen etrafında 90° çevrilir. Her numune için 22 devirden meydana gelen deney, dört yüze dörder defa olmak üzere toplamda 16 kez uygulanır. Numune iyice temizlendikten sonra tekrar hassas terazi ile ağırlığı ölçülür (TS EN 13892-3, 2015; URL-7). Çalışmada kullanılan Böhme cihazı Şekil 17'de görülmektedir.



Şekil 17. Böhme cihazı

Kapiler su emme deneyi her bir beton karışımı için 3'er adet olmak üzere $71 \times 71 \times 71$ mm lik küp numunelerde gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri 28.gün kür havuzundan çıkarıldıktan sonra etüvde ($100 \pm 5^\circ \text{C}$) değişmez ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuş ve oda sıcaklığına (20°C) gelince tartılmıştır. Küp numunelerin yan yüzeyleri silikon ile kaplanarak yalnızca alt yüzeyden su emmesi sağlanmıştır. Numunelerin ağırlığı 0, 10, 20, 30, 60, 120, 360, 1440. dakikalarda tartılarak kapiler

su emme katsayıları hesaplanmıştır (TS EN 772-11:2011, 2011). Kullanılan deney düzeneği Şekil 18’de görülmektedir.



Şekil 18. Kapiler su emme deney düzeneği

Sızma testi, ince agrega yerine ikame edilen KKA’nın betonun ağır metal salınımını arttırıp arttırmadığını araştırmak için yapılmıştır. Sertleşmiş beton deneyleri sonucunda optimum sonucu veren M50 betonu ile M0 kontrol betonu karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda sözü edilen betonlardan 71x71x71 mm boyutlarında küp numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler hacimce kendilerinin 10 katı (3579 ml) ve ikisi pH’ı 4 olan HCl, diğer ikisi ise derişimi 3 g/lt olan $MgSO_4$ çözeltileri içerisinde 28 gün bekletilmişlerdir. 14. ve 28. günlerde numunelerin içerisinde bekletildiği çözeltilerden örnek alınmış ve ICP-OES (Perkin Elmer Optima 7000 DV) cihazında ağır metal salınımları incelenmiştir (Roziere vd., 2009; TS EN 12457-4, 2004; Tüzün vd., 2020). Hazırlanan deney düzeneği Şekil 19’da görülmektedir.

Tez çalışmasına ait akış diyagramı Şekil 20’de sunulmuştur.



Şekil 19. Sızma testi deney düzeneği

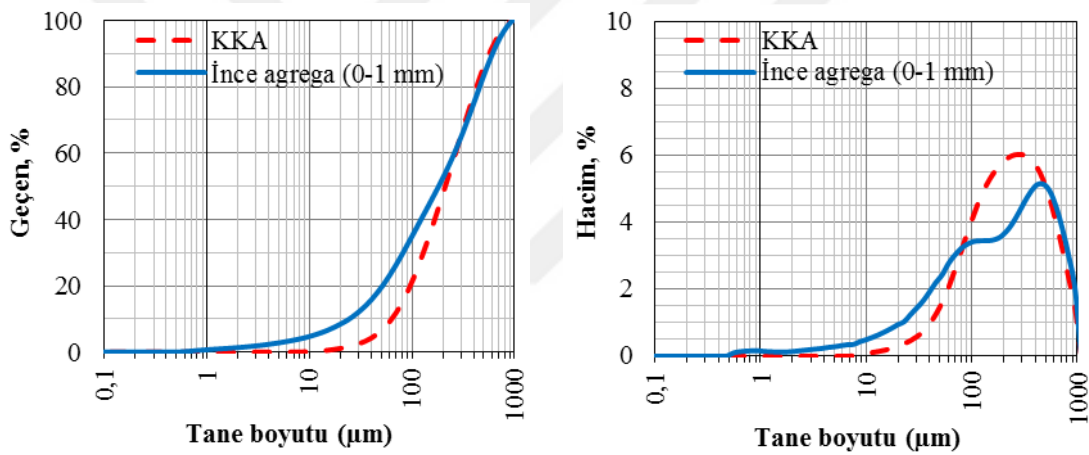


Şekil 20. Tez çalışmasına ait akış diyagramı

3. BULGULAR

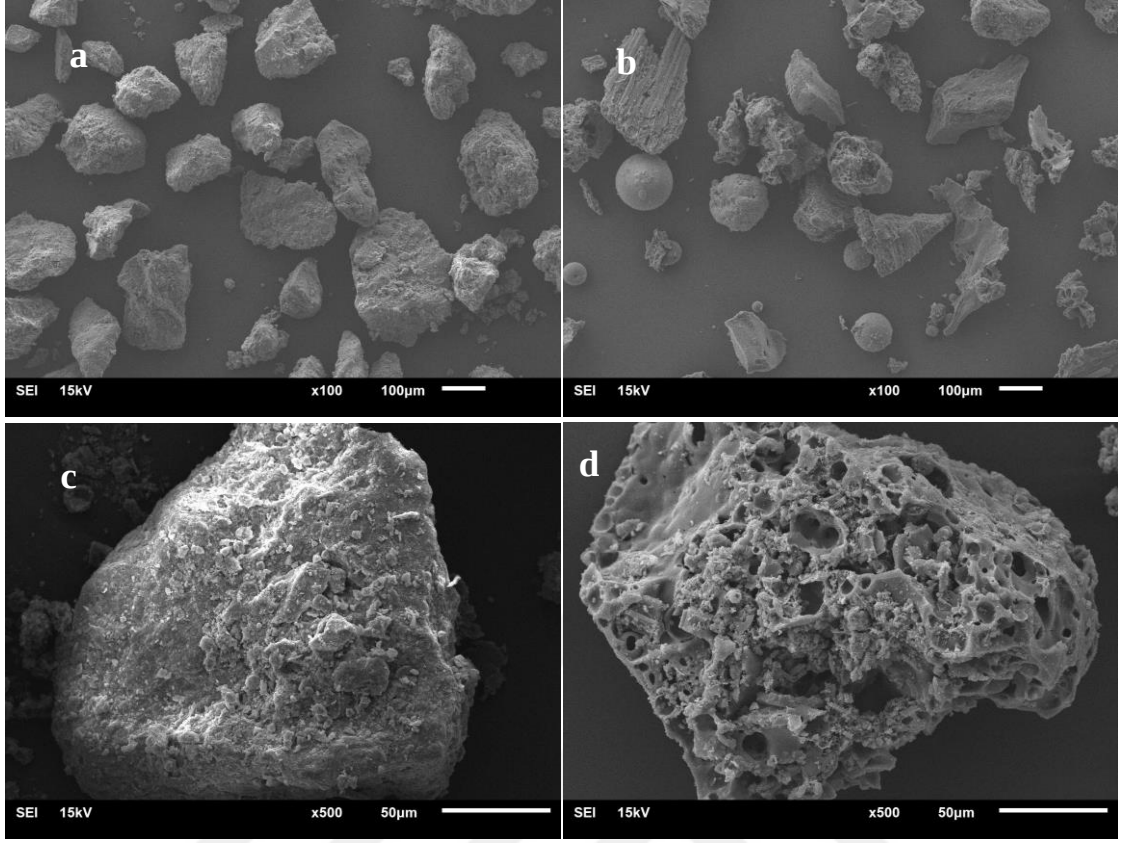
3.1. Kömür Külü Atığının Özellikleri

Çalışmada beton üretiminde kullanılan KKA'nın yoğunluğu $1,7011 \text{ g/cm}^3$ ve su emme değeri %28,4 olarak ölçülmüştür. KKA ve ince agrega (0-1 mm) malzemelerine ait tane boyutu dağılımları Şekil 21'de verilmiştir. 0-1 mm ince agrega ait D90, D50 ve D10 değerleri sırasıyla $605,580 \mu\text{m}$, $180,787 \mu\text{m}$ ve $24,136 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. KKA'nın D90, D50 ve D10 değerleri ise sırasıyla $565,727 \mu\text{m}$, $210,820 \mu\text{m}$ ve $63,316 \mu\text{m}$ tespit edilmiştir. 0-1 mm ince agrega tane boyutu dağılımları incelendiğinde en küçük tane boyutu $0,55 \mu\text{m}$ iken KKA analizinde ise en küçük tane boyutu $7,59 \mu\text{m}$ olduğu görülmüştür.



Şekil 21. KKA ve ince agrega (0-1 mm) tane boyutu dağılımları

KKA ve 0-1 mm ince agregaya ait SEM görüntüleri Şekil 22'de sunulmuştur. Şekil 22 (a) ve Şekil 22 (b) de sırasıyla agrega ve KKA'nın tane yapılarına ait görüntüler incelendiğinde KKA'nın düzensiz şekilli parçacıklardan oluştuğu ve bünyesinde küresel taneler içerdiği görülmektedir. Şekil 22 (c) ve Şekil 22 (d) de ise agrega ve KKA partikül boyutunda iken; agrega yüzeyinin pürüzlü olduğu, KKA'nın tane yapısının ise çok daha gözenekli olduğu tespit edilmiştir. 0-1 mm ince agrega ve KKA numunelerinden elde edilen BET analizi SEM görüntülerini desteklemektedir. 0-1 mm ince agrega numunesinin yüzey alanı $5,658 \text{ m}^2/\text{g}$ iken KKA'nın yüzey alanı $40,045 \text{ m}^2/\text{g}$ olduğu ölçülmüştür.



Şekil 22. İnce agrega (0-1 mm) ve KKA'ya ait SEM görüntüleri

KKA'ya kimyasal özellikler Tablo 11'de sunulmuştur. KKA'nın kimyasal içeriğinde tespit edilen SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 oksitli bileşenlerin toplamı %55,85 olarak hesaplanmıştır. Bu değer ASTM C618-19'da puzolan malzemeler için belirtilen %70 değerini sağlamadığı görülmüştür (ASTM C618, 2022). Atık malzemenin SO_3 miktarının %1,78 olduğu görülmektedir. Çimentolarda bu değer %4,5 ile sınırlandırılmıştır (TS EN 196-2, 2013). Bir diğer husus ise çimentolarda MgO miktarının maksimum %5'den fazla olmaması gerekliliğidir. KKA'nın MgO düzeyinin %3,05 olduğu tespit edilmiştir. Kömür küllerinin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri kömür madeninin yapısının yanı sıra yakma sistemi ve yakma süreci gibi değişkenlere bağlıdır (Zhou vd., 2022). Çalışmada kullanılan malzemenin kimyasal özellikleri incelendiğinde daha önce yapılan çalışmalardan farklılık gösterdiği söylenebilir. Literatürde yer alan kömür külü atıklarının termik santrallerden temin edildiği görülmektedir. Termik santrallerden elde edilen atıkların kızdırma kayıpları incelendiğinde bu tesislerde daha iyi bir yanma işlemi gerçekleştiği söylenebilir (Hamada vd., 2022). Çimento için belirlenmiş TS EN 197-1 standardında

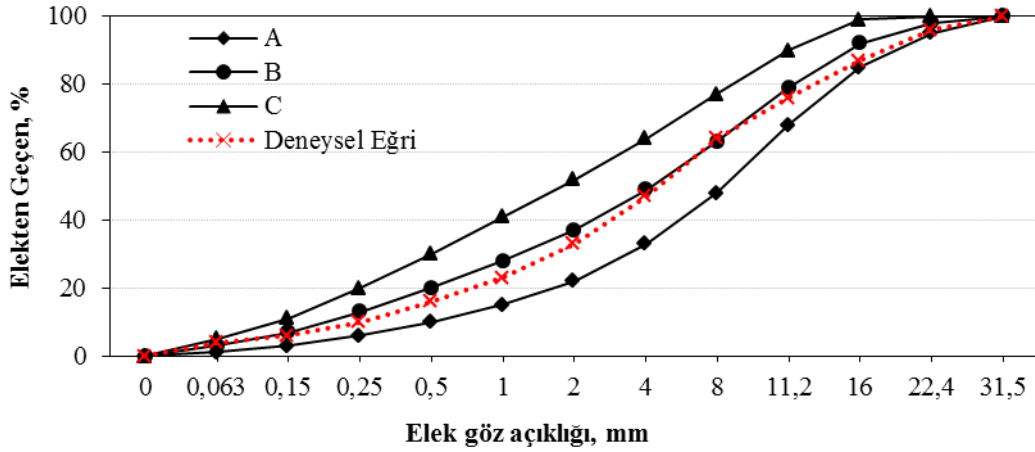
kızdırma kaybının %5'i geçemeyeceği belirtilmiştir. ASTM C618 standardı ise puzolan malzemeler için kızdırma kaybını %7 olarak sınırlandırmaktadır. KKA'ya ait tane dağılımı ve kimyasal yapısı incelendiğinde atık malzemenin çimento ikamesi olarak kullanılamayacağı kanısına varılmıştır.

Tablo 11. KKA'nın kimyasal özellikleri

Oksit	%
SiO ₂	26,55
Al ₂ O ₃	17,17
Fe ₂ O ₃	12,13
CaO	8,11
MgO	3,05
SO ₃	1,78
Na ₂ O	1,28
P ₂ O ₅	1,24
TiO ₂	1,10
BaO	0,73
K ₂ O	0,67
MnO	0,12
Cl	0,03
Kızdırma Kaybı	26,05

3.2. Agrega Özellikleri

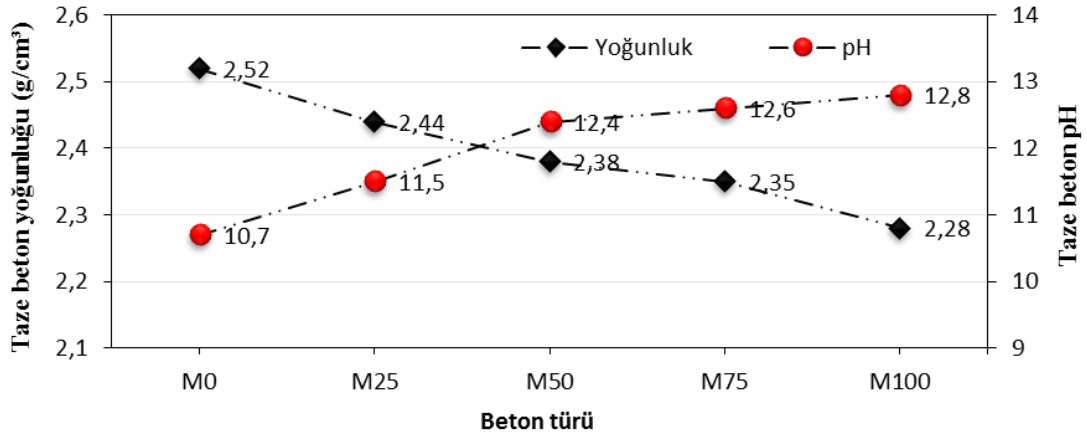
0-5 mm, 5-12 mm, 12-25 mm boyutlu agregaların yoğunlukları sırasıyla 2,83 g/cm³, 2,79 g/cm³ ve 2,81 g/cm³ dür. Su emme oranları ise %3,09 , %1,51 ve %1,14 olarak hesaplanmıştır. 5-12 mm agreganın yassılık indeksi %9 iken, 12-25 mm agreganın ise %6 bulunmuştur. 5-25 mm agregaların Los Angeles deneyi ile tespit edilen parçalanma direnci %25 bulunmuştur. Agregaların aşınma direnci değerleri standardın öngördüğü sınır değerinin altında sonuç vermiştir. Dolayısıyla andezit agregası aşınmanın yoğun olduğu beton veya asfalt yollarda kullanılabilir. Kırmataş agregaların tane dağılımının standarda uygun aralıkta olduğu görülmektedir (Şekil 23).



Şekil 23. Agregalara ait deneysel granülometri eğrisi

3.3. Karışımlara Ait Taze Hal Özellikleri

Beton karışımlarına ait taze hal özellikleri Şekil 24 ve Tablo 12’de görülmektedir. Kömür külü ikamesi ile birlikte elde edilen beton numunelerin yoğunlukları ikame oranının artması ile birlikte azaldığı tespit edilmiştir. Elde edilen taze beton numunelerin yoğunlukları 2,28 ile 2,52 g/cm³ aralığında bulunmuştur. Beton numunelerinin yoğunluklarının azalması 0-1 mm ince agreganın yerine ikame edilen KKA’nın ince agregaya göre daha düşük yoğunluğa sahip olması ile beklenen bir durumdur. Kömür külünün alkaliliği hafif alkali, orta alkali ve yüksek alkali olmak üzere üç kategoriye ayrılmaktadır (Zhou vd., 2022). KKA’nın %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında 0-1 mm ince agregaya ikamesi ile elde edilen taze betonların pH değerleri sırasıyla 10,7, 11,5, 12,4 ve 12,8 ölçülmüştür. KKA ikamesi ile birlikte elde edilen betonların alkaliliğinin de arttığı görülmüştür.



Şekil 24. Karışımlara ait yoğunluk ve pH değerleri

Tablo 12. Karışımlara ait taze hal özellikleri

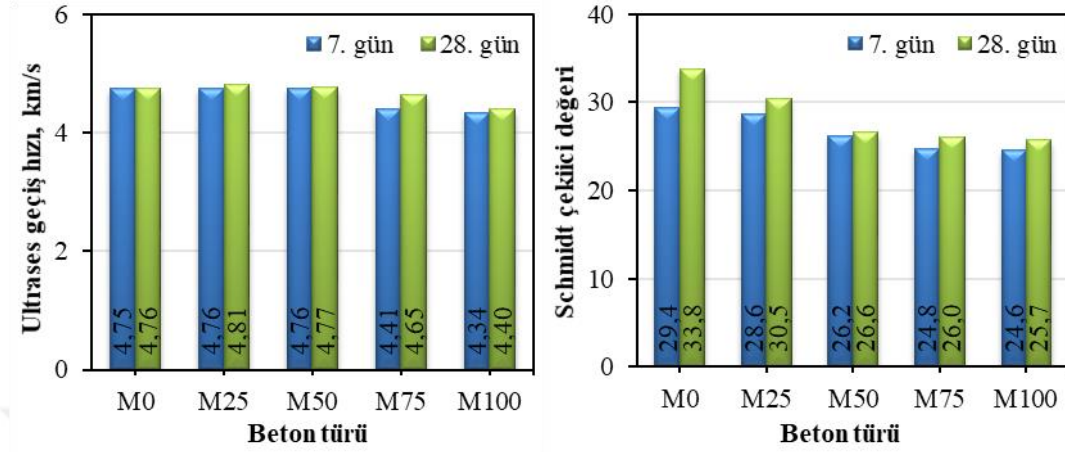
Karışım Türü	Yoğunluk(g/cm ³)	Çökme (cm)	Sıcaklık(° C)	pH
M0	2,52	3,0	23,6	10,7
M25	2,44	3,5	22,9	11,5
M50	2,38	4,0	19,4	12,4
M75	2,35	3,0	27,6	12,6
M100	2,28	4,0	24,0	12,8

3.4. Sertleşmiş Beton Deneyleri

3.4.1. Ultrases Geçiş Hızı ve Schmidt Çekici

Farklı oranlarda KKA ikameli beton türlerinin UPV ve Schmidt çekici değerleri Şekil 25’de sunulmuştur. 7. gün elde edilen UPV değerlerine göre M0, M25 ve M50 betonlarının kalitesi ‘çok iyi’ olarak değerlendirilmektedir. M75 ve M100 beton türlerinin UPV değerleri 4,5 km/s den küçük olduğu için Tablo 3’e göre beton kalitesi iyi olarak nitelendirilmektedir. 28. gün tüm betonların ultrases geçiş hızı değerlerinin 7.güne göre arttığı görülmektedir. En yüksek UPV değeri %25 KKA ikameli M25 beton türüne aittir. M100 betonu hariç beton türlerinin kalitesi çok iyi olarak nitelendirilmiştir. UPV testi beton numunelerin homojenlik ve boşluk yapılarının karşılaştırılmasında yaygın olarak tercih edilmektedir (Qasrawi, 2000). Şekil 25 incelendiğinde M25 ve M50 örneklerinin kontrol örneği olan M0 ile benzer homojenlik ve boşluk yapısına sahip olduğu söylenebilir. Schmidt çekici test sonuçları incelendiğinde ise 7. ve 28. gün elde edilen sonuçların $M0 > M25 > M50 > M75 > M100$

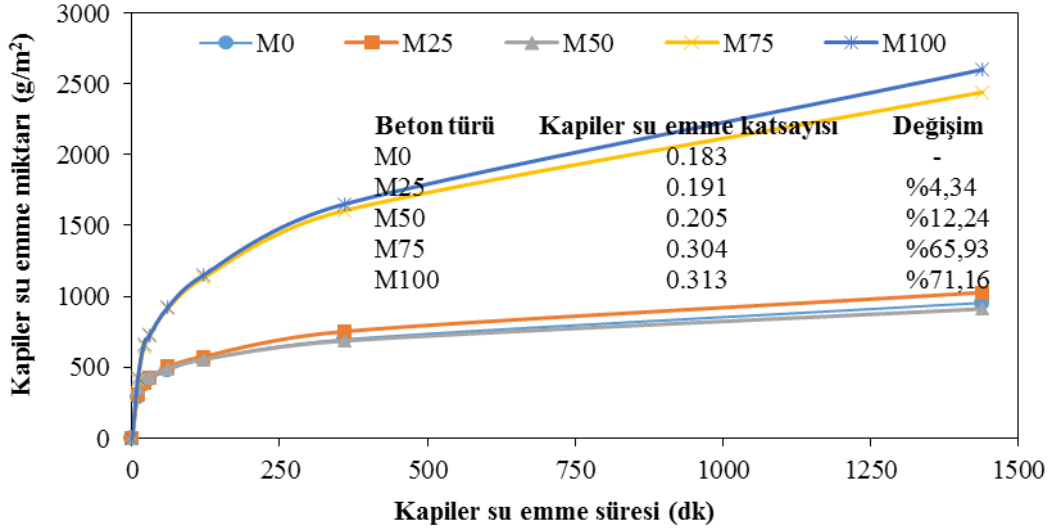
olduğu görülmüştür. KKA ikamesi ile birlikte beton yüzey sertliğinin, ikame oranı arttıkça azaldığı belirlenmiştir.



Şekil 25. Numunelerin ultrases geçiş hızı ve Schmidt çekici ölçüm sonuçları

3.4.2. Kapiler Su Emme

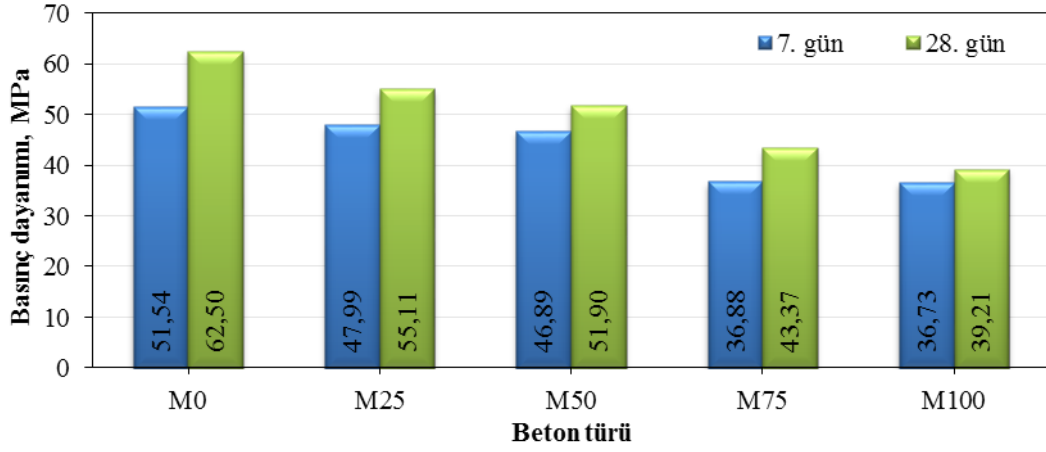
KKA ikameli beton türlerinin kapiler su emme değerleri Şekil 26'da verilmiştir. Kapiler su emme değerleri betonda bulunan boşluk yapısı ile ilgilidir (Singh ve Siddique, 2014). Şekil 26 incelendiğinde M25, M50, M75 ve M100 betonların kapiler su emme değerlerinin kontrol betonuna (M0) göre değişimi sırasıyla %4,34, %12,24, %65,93 ve %71,16 olarak hesaplanmıştır. KKA'nın gözenekli yapısı ve yüksek su emme değeri (%28,4) ile KKA bütün ikame oranlarında kapiler su emmeyi arttırdığı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar KKA'lı betonların su emme potansiyelinin geleneksel betonlardan yüksek olduğunu göstermiştir (Rafieizonooz vd., 2016).



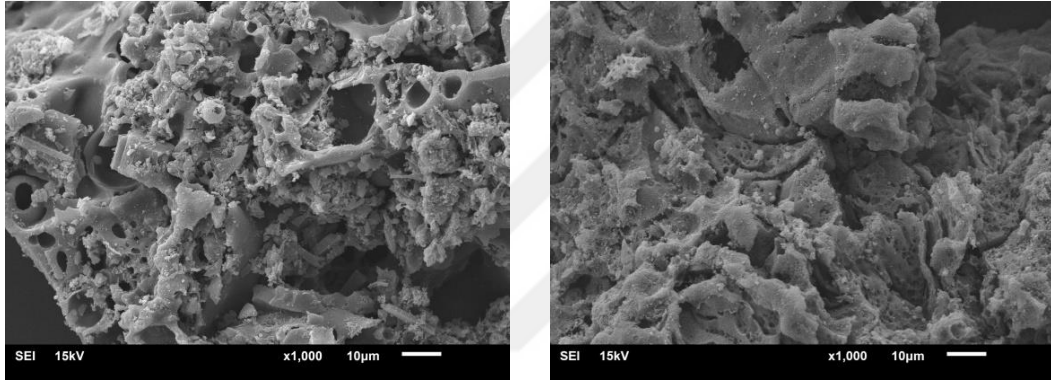
Şekil 26. Numunelerin kapiler su emme sonuçları

3.4.3. Basınç Dayanımı

KKA ikamesi ile üretilen beton numunelerin ölçülen basınç dayanımları Şekil 27’de verilmiştir. Bütün KKA ikame oranlarında betonun basınç dayanımının azaldığı tespit edilmiştir. KKA ikamesi ile elde edilen betonlar içerisinde düşük basınç dayanımı M100 numunesine aittir. KKA ile üretilen beton içerisinde en yüksek dayanım değeri ise M25 numunesi ile elde edilmiştir. KKA’nın basınç dayanımını azaltması KKA’nın yapısı ile açıklanmaktadır (Hasim vd., 2022; Singh ve Siddique, 2014). KKA’nın gözenekli yapısı (Şekil 28), yüksek su emme kapasitesi (%28,4) ve yüksek kızdırma kaybı değerleri (%26,05) betonun basınç dayanımı üzerinde etkili olmaktadır. KKA ikame oranı arttıkça daha boşluklu bir beton üretimi gerçekleşmektedir (Hamada vd., 2022). Üretilen betonlarda KKA ikamesi ile boşluk oranı artmakta ve basınç dayanımı azalmaktadır. M25, M50, M75 ve M100 olarak üretilen beton numunelerin 7. gün değerleri incelendiğinde sırasıyla basınç dayanımı kayıpları %6,9, %9,0, %28,4 ve %28,7 olarak hesaplanmıştır. 28. gün değerleri incelendiğinde ise elde edilen kayıplar sırasıyla %11,8, %17,0, %30,6 ve %37,3’tür. KKA kullanımının betonun basınç dayanımını azaltması daha önce yapılan çalışmalar ile uyumlu olduğu görülmüştür (Hamada vd., 2022; Hasim vd., 2022; Singh ve Siddique, 2014). Basınç dayanımı kayıpları ve KKA’nın atık bir malzeme olması birlikte değerlendirildiğinde KKA’nın %50’ye kadar 0-1 mm ince agregaya ikame edilebilir olduğu kanaatine varılmıştır.



Şekil 27. Numunelerin basınç dayanımı ölçümü sonuçları



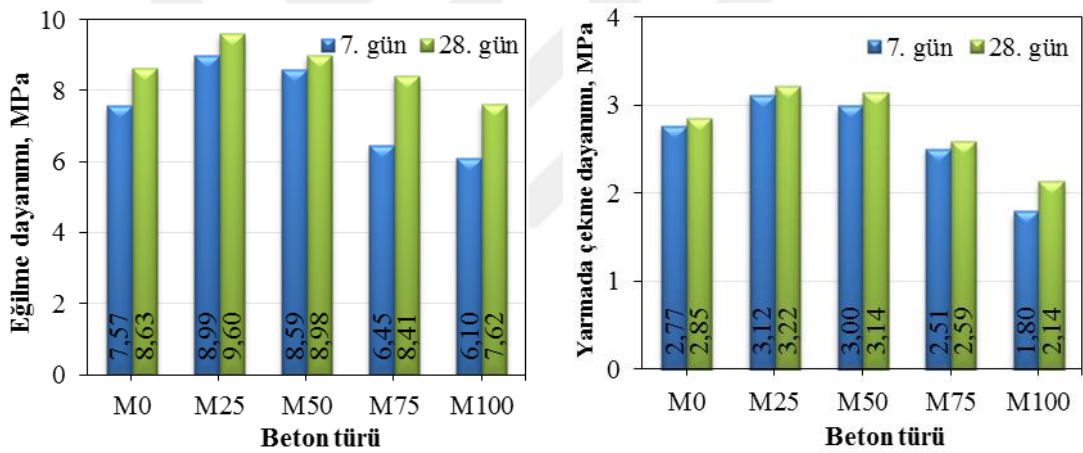
Şekil 28. KKA'ya ait SEM görüntüleri

3.4.4. Eğilme Dayanımı ve Yarmada Çekme Dayanımı

Beton türlerine ait eğilme ve yarmada çekme dayanımı sonuçları Şekil 29'da verilmiştir. M25 ve M50 betonları her iki yaşta da M0'a göre daha yüksek eğilme dayanımı göstermiştir. M0 beton türünün 7. gün ve 28. gün eğilme dayanımları sırasıyla 7,57 ve 8,63 MPa'dır. %25 KKA ikamesi eğilme dayanımını 7. günde %18,76, 28. günde ise %11,24 arttırmıştır. %50 KKA ikamesinin kontrol betonuna göre eğilme dayanımına olumlu katkı sağladığı görülmektedir. M75 ve M100 beton türlerinin 7. günkü eğilme dayanımı değerleri 6,45 ve 6,10 MPa iken, 28. gün bu değerler 8,41 ve 7,62 MPa olarak ölçülmüştür. %75 ve %100 KKA ikamelerinin 28. günde kontrol betonuna göre eğilme dayanımını sırasıyla % 2,55 ve %11,70 azalttığı tespit edilmiştir. Yarmada çekme dayanımı deneyine ait sonuçların eğilme dayanımı ile benzerlik göstermektedir (Şekil 29). Üretilen beton karışımlarında en yüksek

yarmada çekme dayanımına sahip beton türünün M25 olduğu tespit edilmiştir. %25 KKA ikamesinin yarmada çekme dayanımını M0 beton türüne göre 7. günde %12,64 arttırdığı, 28. günde ise %12,98 arttırdığı hesaplanmıştır. M50 beton türü de M0'a göre daha iyi yarmada çekme dayanımı sergilemiştir. M75 ve M100 beton türleri incelendiğinde ikame oranları arttıkça yarmada çekme dayanımının azaldığı belirlenmiştir.

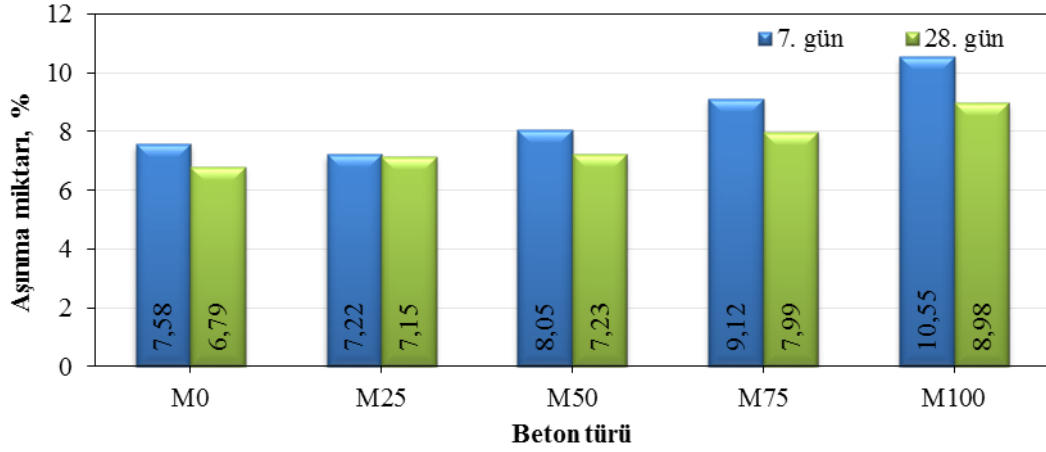
Betonun çekme dayanımı, basınç dayanımından çok hamurun kalitesine bağlıdır. Kömür külünün yarma çekme dayanımını ve basınç dayanımını farklı şekilde etkilediği bildirilmiştir (Singh ve Siddique, 2014). KKA ikamesi ile bağlayıcı kalitesinin arttığı ve KKA'lı betonların hamurundaki gözeneklerin varlığının çatlakların yayılmasını engelleyerek çekme dayanımını artırmaya yardımcı olduğu belirtilmiştir (Gooi vd., 2020; Singh ve Siddique, 2014).



Şekil 29. Numunelerin eğilme ve yarmada çekme dayanımı sonuçları

3.4.5. Aşınma Miktarı

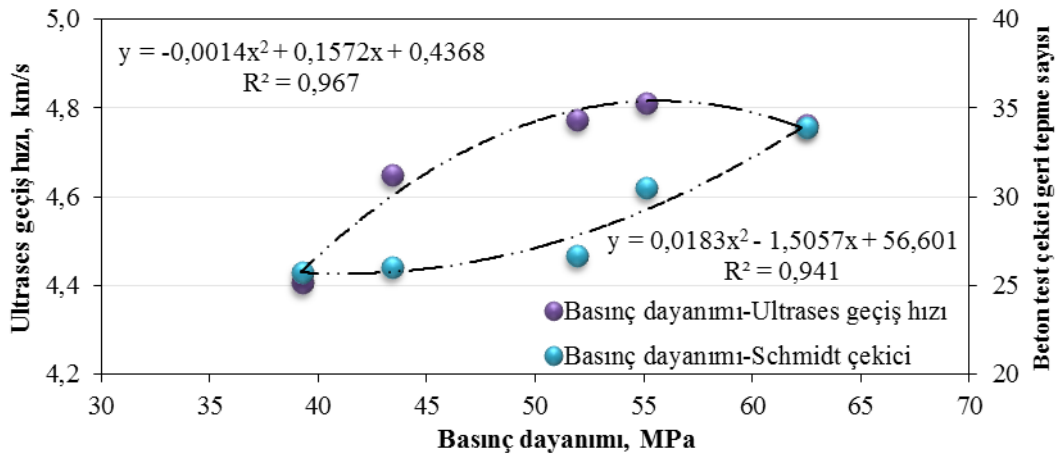
KKA ikamesinin betonun aşınması üzerindeki etkisi Şekil 30'da sunulmuştur. KKA içeren betonlar içerisinde en az aşınma gösteren beton türünün M25 olduğu, en fazla aşınma gösteren beton türünün ise M100 olduğu görülmektedir. Bütün beton türlerinde aşınmanın zamanla azaldığı görülmüştür. KKA ikamesinin betonun aşınma direncini azalttığı belirlenmiştir. 28. günün sonunda M0, M25 ve M50 beton numunelerin aşınma kayıpları incelendiğinde KKA ikamesi ile aşınma kaybı artmıştır. Ancak KKA ikamesinin %50'ye kadar kullanılması ile üretilen beton numunelerde aşınma kaybı önemli ölçüde artış göstermemiştir.



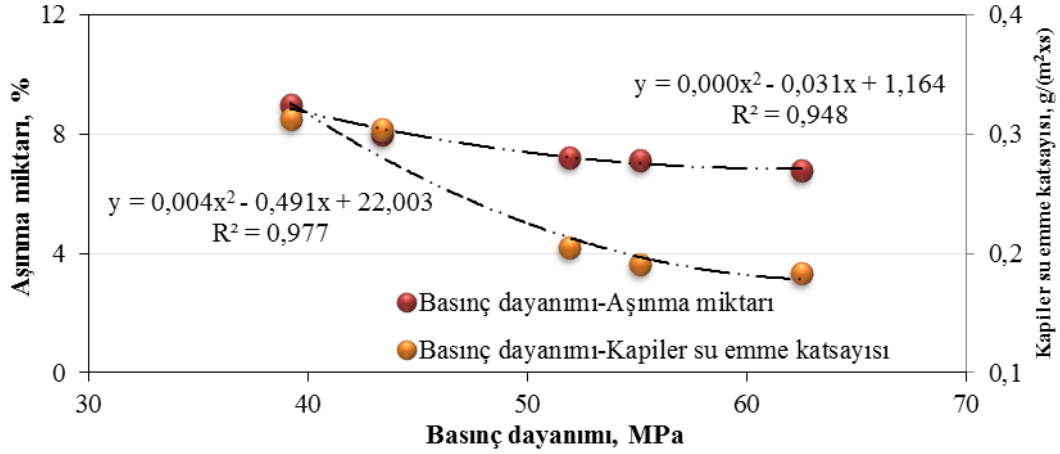
Şekil 30. Numunelerin aşınma miktarı ölçümü sonuçları

3.4.6. Basınç Dayanımı ve Testler Arası İlişkiler

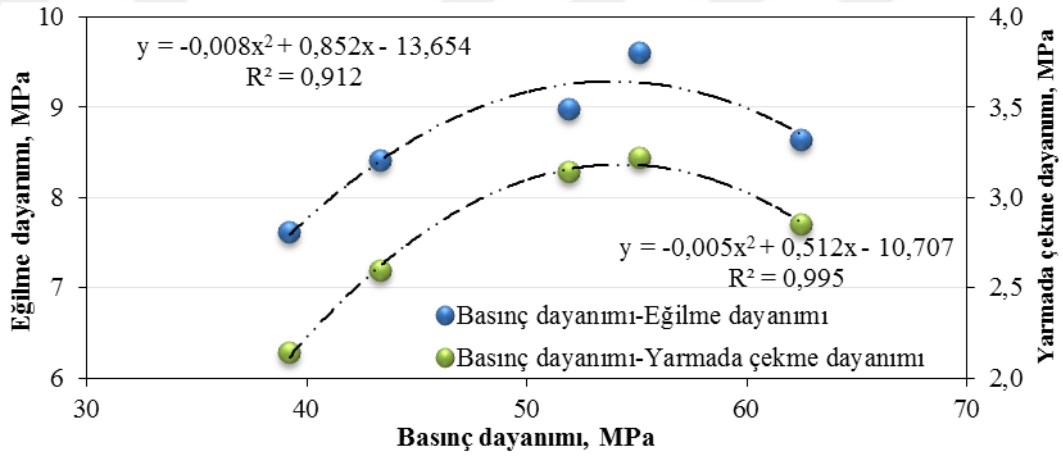
Beton için basınç dayanımı önemli bir parametredir ayrıca betonun tanımlanması ve sınıflandırılması basınç dayanımına göre yapılmaktadır. Çalışmada üretilen bütün numunelerin basınç dayanımları ile diğer test sonuçları arasındaki ilişkinin belirlenmesi için regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 31, Şekil 32 ve Şekil 33 basınç dayanımı ile diğer beton testleri arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Gerçekleştirilen regresyon analizi sonuçlarına göre basınç dayanımı ve diğer testler arasında 2. derece denklem ile açıklanabilen kuvvetli bir ilişki varlığı tespit edilmiştir. Yapılan analiz neticesinde elde edilen determinasyon katsayıları (R^2) 0.941 ile 0.995 aralığında belirlenmiştir.



Şekil 31. Basınç dayanımı ile ultras ses geçiş hızı ve beton test çekici arasındaki ilişki



Şekil 32. Basınç dayanımı ile aşınma ve kapiler su emme arasındaki ilişki.



Şekil 33. Basınç dayanımı ile eğilme ve yarmada çekme dayanımları arasındaki ilişki.

3.4.7. Ağır Metal Sızma Testi

Betonda ince agreganın ikamesi ile KKA kullanımının çevresel etkilerini değerlendirmek amacıyla ağır metal sızma testi yapılmıştır. Beton türlerinden kontrol betonu olan M0 ve sertleşmiş hal özelliklerinde olumlu davranış sergileyen M50 betonları tercih edilmiştir. Test sonucunda elde edilen salınımlar Tablo 13'de görülmektedir. 14 ve 28 günlük çözelti içinde bekleme süreleri sonunda M0 ve M50 beton türlerinde Cd, Pb, Zn, Cu, Co, Mn ve Ni ağır metallerine rastlanmamıştır.

14 günlük HCl çözeltisinde KKA oranının artması ile Cr miktarı 0,439 mg/L'den 0,146 mg/L'ye düşmüştür. %50 KKA ikamesi MgSO₄ çözeltisinde ise Cr miktarını 0,515 mg/L'den 0,148 mg/L'ye düşürmüştür. KKA'nın Cr salınımı

üzerindeki etkisi 28 günlük bekleme süresinde de benzer etkiyi göstermiştir. KKA ikamesi betonlarda her iki yaşta her iki çözelti türünde de Cr salınımını azalttığı kanaatine varılmıştır. Bekleme süreleri ele alındığında her iki çözelti ve her iki beton türünde yaş arttıkça Cr salınımlarının eser miktarda arttığı görülmüştür. Örnek olarak, MgSO₄ çözeltisi içerisinde bekletilen M50 numunenin Cr salınımı 14.günde 0,148 mg/L iken 28.gün 0,154 mg/L'ye çıkmıştır.

Bu metallerin KKA beton sızıntı suyundaki konsantrasyonları, cihazın dedeksiyon limit değerlerinden çok daha düşüktür. Bu bağlamda KKA'nın ikame ile betonda kullanım yönteminin, atıktan kaynaklanan çevresel sorunların ortadan kaldırılmasına katkıda bulunduğunu göstermektedir. Önceki çalışmalarda, Ağır metalleri etkili bir şekilde tutmak için çimento matrislerinin kimyasal bir bağ ve fiziksel tuzak oluşturduğu rapor edilmiştir (Argane, 2016; Choi, 2009; Mehra, 2016; Bekem Kara, 2022).

Tablo 13. M0 ve M50 beton türlerinin ağır metal salınımları (mg/L)

Numuneler	Kadmiyum (Cd)	Kurşun (Pb)	Çinko (Zn)	Bakır (Cu)	Kobalt (Co)	Mangan (Mn)	Nikel (Ni)	Krom (Cr)
14. gün	M0(HCl)	-	-	-	-	-	-	0,439
	M50(HCl)	-	-	-	-	-	-	0,146
	M0(MgSO ₄)	-	-	-	-	-	-	0,515
	M50(MgSO ₄)	-	-	-	-	-	-	0,148
28. gün	M0(HCl)	-	-	-	-	-	-	0,449
	M50(HCl)	-	-	-	-	-	-	0,148
	M0(MgSO ₄)	-	-	-	-	-	-	0,540
	M50(MgSO ₄)	-	-	-	-	-	-	0,154
Dedeksiyon Limitleri	0,0003	0,0288	0,0023	0,0005	0,0022	0,0001	0,0012	0,005

3.4.8. Maliyet

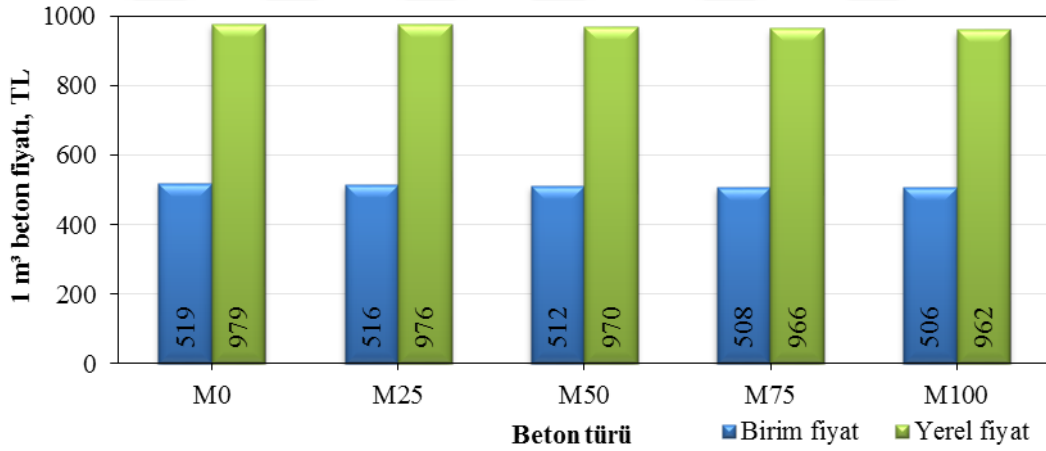
KKA'nın 0-1 mm ince agrega ikamesi yapılarak üretilen betonlar ekonomik açıdan incelenmiştir. 1 m³ beton maliyetleri iki şekilde hesaplanmıştır. Birinci hesaplama için yerel fiyatlar kullanılırken, ikinci hesaplamada Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı 'Yol, Köprü, Tünel, Bitümlü Kaplamalar, Bakım ve Trafik İşlerine Ait Birim Fiyat Listesi' ve Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı 'İnşaat ve

Tesisat Birim Fiyatları' esas alınmıştır (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2022; Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, 2022). Yerel fiyatlar ve birim fiyatlar Tablo 14'de verilmiştir.

Tablo 14. Yerel ve Birim Fiyatlar

Malzemeler	Yerel fiyatlar	Birim fiyatlar
Çimento (tl/ton)	1.831,00	970,00
İnce agregat (tl/ton)	125,00	68,57
İri agregat (tl/ton)	115,00	68,57
Beton katkısı (tl/kg)	21,00	9,10

Tablo 14 kullanılarak hesaplanan 1 m³ beton fiyatları Şekil 34'de görülmektedir. Yerel fiyat ve birim fiyat hesaplamaları arasında fark olsa da, beton türlerinin m³ fiyatları karşılaştırıldığında fark yok denecek kadar azdır. Bu çalışmada kullanılan KKA'nın beton maliyetini azaltmaya belirgin bir etkisi yoktur.



Şekil 34. Beton türlerinin m³ maliyetleri

4. SONUÇ

Bu tez çalışmasında çay fabrikasından temin edilen KKA %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında ince agregaya (0-1 mm) ikame edilerek beton yol tasarımı yapılmış ve elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

KKA'nın depolama ünitesinden alınarak herhangi bir işlem görmeden kullanımı göz önüne alındığında, tane dağılımının 0-1 mm'lik ince agregaya benzer olduğu görülmüştür.

KKA'nın karakterizasyon özellikleri incelendiğinde gözenekli yapısı, yüksek kızdırma kaybı ve yüksek su emme değerine sahip olduğu tespit edilmiştir.

KKA'lı betonların su emme potansiyelinin geleneksel betonlardan yüksek olduğu görülmüştür.

Basınç dayanımı kayıpları ve KKA'nın atık bir malzeme olması birlikte değerlendirildiğinde KKA'nın %50'ye kadar 0-1 mm ince agregaya ikame edilebilir olduğu kanaatine varılmıştır.

Ultrases geçiş hızı ve Schmidt çekici test sonuçları basınç dayanımı test sonuçlarını destekler niteliktedir.

Beton yollarda önemli bir parametre olan çekme dayanımı (eğilme ve yarmada çekme dayanımları) M25 ve M50 beton türlerinde kontrol betonuna göre olumlu sonuç verdiği ölçülmüştür. KKA ikamesinin %50'ye kadar çekme dayanımını iyileştirdiği görülmüştür.

KKA ikamesinin %50'ye kadar kullanılması ile üretilen beton numunelerin aşınma kaybı kontrol numunesine göre önemli ölçüde değişmemiştir.

Ekonomik açıdan KKA kullanımının üretilen betonların birim fiyatları üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı hesaplanmıştır.

ICP-OES testinden elde edilen verilere dayanarak, çalışmada ele alınan ağır metallerin dedeksiyon konsantrasyonundan daha fazla sızmadığı görülmüştür.

Agrega gibi doğal olan kıt kaynakların kullanımını ve agregaya üretimi için gerekli enerji tüketimini azaltmak, KKA'nın depolama maliyetini ortadan kaldırmak ve atığın olumsuz özelliklerinin çevre kirliliğine neden olmadan beton içinde bertaraf edilebilirliğini sağlamak amacıyla, beton yol tasarımında KKA'nın %50'ye kadar ince agregaya ikamesiyle kullanılabilir olduğu kanaatine varılmıştır.

4.1. ÖNERİLER

Kömür külü atığının 0-1 mm agregaya yerine ikame edildiğinde betonun basınç dayanımını düşürmesi atığın boşluk hacminin ve yüzey gözenekliliğinin agregaya oranla daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Yine ikame oranının artması ile birlikte aşınma dayanımında az da olsa bir düşüş söz konusudur. Belirtilen bu nedenlerden dolayı kömür külü atığı ikame oranı %50 ile sınırlı tutulmalıdır.

%50 ikame oranına kadar betonun eğilme dayanımında meydana gelen artış ve atık bir malzeme olan kömür külünün beton içerisine katıldığında ağır metal salınımında ölçülen azalma ise çalışmanın özellikle beton yollar için faydalı olabilecek olumlu tarafını oluşturmaktadır.

Mühendislik olarak yerinde gözlenebilir sonuçlar elde edilebilmesi ve kömür külü ikameli beton yolların sahadaki performanslarının izlenebilmesi için farklı iklim şartlarına, farklı trafik hacmi ve taşıt ağırlığına sahip yollarda beton yol deneme kesimleri oluşturulması düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

- Abdellatief, M., Al-Tam, S.M., Elemam, W.E., Alanazi, H., Elgendy, G.M., Tahwia, A.M. (2023). Development of ultra-high-performance concrete with low environmental impact integrated with metakaolin and industrial wastes. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01724. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01724>.
- Ağaoğlu, M.N., Çeviren, E., Alakara, E.H. (2022). Atık mermerlerin parke taşlarında ince agrega olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 14(1), 103-114. <https://doi.org/10.29137/umagd.956063>.
- Ağar, E., Süttaş, İ., Öztaş, G. (1998), *Beton Yollar*, İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Akgüngör, A.P. ve Demirel, A. (2004). Türkiye’de ki ulaştırma sistemlerinin analizi ve ulaştırma politikaları. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 10(3), 423-430.
- Alaskar, A., Alabduljabbar, H., Mohamed, A.M., Alrshoudi, F., Alyousef, R. (2021). Abrasion and skid resistance of concrete containing waste polypropylene fibers and palm oil fuel ash as pavement material. *Construction and Building Materials*, 282, 122681. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122681>.
- Al-Bayati, A.F. (2018). Statistical equations to estimate the in-situ concrete compressive strength from non-destructive tests. *Journal of Engineering*, 24(11), 53-67.
- Altan, M.F., Kızıltaş, M.Ç., Ayözen, Y.E. (2021). Yüksek hızlı demiryolları ve sürdürülebilirlik bağlamında yenilikçi uygulamalar. *Aurum Mühendislik Sistemleri ve Mimarlık Dergisi*, 5(2), 181-188.
- Altınok, S. (2001). Türkiye’de ulaştırma politikaları, karayolları ve demiryollarının mukayesesi. *The Journal of Social Economic Research*, 1(1-2), 72-87.
- Argane, R., Benzaazoua, M., Hakkou, R., Boumrane, A. (2016). A comparative study on the practical use of low sulfide base-metal tailings as aggregates for rendering and masonry mortars. *Journal of Cleaner Production*, 112, 914-925.
- Arık, A. (2022). *Beton yol kaplamalarında ultra yüksek performanslı lifli beton (uyplb) kullanılması üzerine bir araştırma (doktora tezi)*. YÖK tez merkezinden edinilmiştir (759230).
- ASTM C127, (2015). Standard test method for relative density (specific gravity) and absorbtion of coarse aggregate. American Society For Testing And Materials, Pennsylvania, 5 p.

- ASTM C128, (2022). Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of fine aggregate. American Society For Testing And Materials, Pennsylvania, 6 p.
- ASTM C597, (2016). Standard test method for pulse velocity through concrete. American Society For Testing And Materials, Pennsylvania, 4 p.
- ASTM C618, (2022). Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. American Society For Testing And Materials, Pennsylvania, 5 p.
- Aydemir, H. (2016). Türkiye'nin ulaştırma politikaları çerçevesinde demiryolu ulaştırma sisteminin genel durumunun irdelenmesi ve geleceğine bakış. *Demiryolu Mühendisliği*, 3, 41-46.
- Bağdatlı, M.E.C. ve Yıldırım, M.ř. (2017). Karayolu üstyapılarındaki bozulmaların bakım maliyetlerine etkisi. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6(1), 102-111.
- Baite, E., Messan, A., Hannawi, K., Tsobnang, F., Prince, W. (2016). Physical and transfer properties of mortar containing coal bottom ash aggregates from Tefereyre(Niger). *Construction and Building Materials*, 125, 919-926.
- Bakkaloğlu, A. ve İncekara, A. (2017). Osmanlı'dan modern Türkiye'ye ulaştırma. *Cappadocia Academic Review*, 1(2), 54-73.
- Balasubramaniam, T. and Stephen, S.J. (2022). Influence of industrial wastes on the mechanical and durability characteristics of high strength concrete. *Construction and Building Materials*, 317, 126202. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126202>.
- Bekem Kara, İ. (2020). Çay endüstrisi atık küllerinin beton üretiminde değerlendirilmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8, 983-992.
- Bekem Kara, İ. (2022). Characterization of copper tailings in Murgul copper plant, Turkey, and its utilization potential in cement mortar with nano-and micro-silica. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 36938-36950. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18077-y>.
- Bhanja, S. and Sengupta, B. (2005). Influence of silica füme on the tensile strength of concrete. *Cement and Concrete Research*, 35(4), 743-747. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.024>.
- Bixapathi, G. and Saravanan, M. (2022). Strength and durability of concrete using rice husk ash as a partial replacement of cement. *Materials Today:Proceedings*, 52, 1606-1610.
- Boğa, A.R. ve şenol, A.F. (2023). The effect of waste marble and basalt aggregates on the fresh and hardened properties of high strength self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 363, 129715. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129715>.

- Boztepe, M. (2011). *Beton yollardaki farklı yüzey tiplerinin gürültü düzeyi üzerindeki etkisinin incelenmesi* (yüksek lisans tezi). YÖK tez merkezinden edinilmiştir (295293).
- Chindasiriphan, P., Meenyut, B., Orasutthikul, S., Jongvivatsakul, P., Tangchirapat, W. (2023). Influences of high-volume coal bottom ash as cement and fine aggregate replacements on strength and heat evolution of eco-friendly high-strength concrete. *Journal of Building Engineering*, 65, 105791. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105791>.
- Choi, W.H., Lee, S.R., Park, J.Y. (2009). Cement based solidification/stabilization of arsenic-contaminated mine tailings. *Waste Management*, 29, 1766-1771.
- Cömert, A., Bayrak, E., Ünsal, A., Güngör, G. (2019). Beton yol kaplamaları teknik şartnamesi. *1.Beton Yollar Kongresi ve Sergisi*, Ankara, 13-14 Kasım, 241-253.
- Çelik, M., Seferoğlu, M.T., Akpınar, M.V. (2020). Beton yol uygulamalarında derz türlerine göre düşey deplasman oluşumlarının incelenmesi ve maliyet analizi: Trabzon-Rize örneği. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 7(2), 474-486.
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, (2022). İnşaat ve tesisat birim fiyatları, Ankara, 620.
- Demir, E. (2022). *Bitümlü sıcak karışımlarda kullanılan farklı lif boylarının karışımın fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi* (yüksek lisans tezi). YÖK tez merkezinden edinilmiştir (758503).
- Dey, D., Srinivas, D., Panda, B., Suraneni, P., Sitharam, T.G. (2022). Use of industrial waste materials for 3D printing of sustainable concrete: A review. *Journal of Cleaner Production*, 340, 130749. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130749>.
- Ding, Y., Zhou, Z., Tian, H., Peng, Z. (2022). Compressive behavior of concrete-filled ultra-high performance concrete tube with FRP stirrups. *Structures*, 46, 611-624.
- Erdoğan, T.Y. (2010), *Beton*, Ankara: ODTÜ Yayıncılık.
- Garcia, A., Castro-Fresno, D., Polanco, J.A., Thomas, C. (2012). Abrasive wear evolution in concrete pavements. *Road Materials and Pavement Design*, 13(3), 534-548. <https://doi.org/10.1080/14680629.2012.694094>.
- Gill, S. and Maharaj, D.K. (2015). Comparative study of design charts for rigid pavement. *American International Journal of Research in Science, Technology, Engineering and Mathematics*, 11(1), 94-98.
- Gooi, S., Mousa, A.A., Kong, D. (2020). A critical review and gap analysis on the use of coal bottom ash as a substitute constituent in concrete. *Journal of Cleaner Production*, 268, 121752. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121752>.

- Goswami, L., Sarkar, S., Mukherjee, S., Das, S., Barman, S., Raul, P., ... Bhattacharya, S.S. (2014). Vermicomposting of tea factory coal ash: metal accumulation and metallothionein response in *Eisenia fetida* (Savigny) and *Lampito mauritii* (Kinberg). *Bioresource Technology*, 166, 96-102. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.05.032>.
- Gül, N.İ.K. ve Koçkal, N. (2022). Usage of the plastic wastes as an aggregate in cementitious mixtures. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(Özel Sayı), 19-27. <https://doi.org/10.17780/ksujes.1150269>.
- Güner, N.U. (2019). *Öğütülmüş kalsine bor minerallerinin beton yollardaki etkisinin incelenmesi* (yüksek lisans tezi). YÖK tez merkezinden edinilmiştir (564028).
- Hamada, H., Alattar, A., Tayeh, B., Yahaya, F., Adesina, A. (2022). Sustainable application of coal bottom ash as fine aggregates in concrete: a comprehensive review. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e01109. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01109>.
- Hasim, A.M., Shahid, K.A., Ariffin, N.F., Nasrudin, N.N., Zaimi, M.N.S. (2022). Properties of high volume coal bottom ash in concrete production. *Materialstoday: Proceedings*, 48(6), 1861-1867. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.250>.
- Heras, M.G., Benavente, D., Pla, C., Martinez, J.M., Fort, R., Brotons, V. (2020). Ultrasonic pulse velocity as a way of improving uniaxial compressive strength estimations from Leeb hardness measurements. *Construction and Building Materials*, 261, 119996. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119996>.
- Hwang, E., Kim, G., Choe, G., Yoon, M., Gucunski, N., Nam, J. (2018). Evaluation of concrete degradation depending on heating conditions by ultrasonic pulse velocity. *Construction and Building Materials*, 171, 511-520.
- Islam, A., Alengaram, U.J., Jumaat, M.Z., Bashar, I.I., Kabir, S.M.A. (2015). Engineering properties and carbon footprint of ground granulated blast-furnace slag-palm oil fuel ash-based structural geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 101(1), 503-521. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.026>.
- Kara, C. ve Bekem, İ. (2018). Endüstriyel atıkların beton dayanımına etkisi üzerine bir çalışma: çay fabrikası kömür külü örneği. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 7(2), 75-85.
- Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı, (2019). Beton yol kaplamaları teknik şartnamesi, Ankara, 83.
- Kasinikota, P. and Tripura, D.D. (2022). Prediction of physical-mechanical properties of hollow interlocking compressed unstabilized and stabilized earth blocks at different moisture conditions using ultrasonic pulse velocity. *Journal of*

- Kaya, D., Topal, A., Güneş, M., Şengöz, B. (2018). Harç tipi kaplamaların yüzey özelliklerinin sıcak karışım asfalt kaplamalar ile karşılaştırılması. *Teknik Dergi*, 29(3), 8365-8384. <https://doi.org/10.18400/tekderg.374650>.
- Kazemi, M., Madandoust, R., Brito, J. (2019). Compressive strength assessment of recycled aggregate concrete using Schmidt rebound hammer and core testing. *Construction and Building Materials*, 224, 630-638. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.110>.
- Khanali, M., Bandbafha, H.H., Salehpour, T. (2021). Chapter 10-environmental impact of tea production/consumption chain. *Environmental Impact of Agro-Food Industry and Food Consumption*, 217-237. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821363-6.00003-5>.
- Kim, H.K. and Lee, H.K. (2011). Use of power plant bottom ash as fine and coarse aggregates in high-strength concrete. *Construction and Building Materials*, 25(2), 1115-1122. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.065>.
- Komut, M., Ünal, E.N., Altıok, Ş. (2019). Karayolları Genel Müdürlüğü ağındaki beton deneme yolların performans değerlemesi. *1.Beton Yollar Kongresi ve Sergisi*, Ankara, 13-14 Kasım, 119-133.
- Kong, F., Xue, Y., Qiu, D., Gong, H., Ning, Z. (2021). Effect of grain size or anisotropy on the correlation between uniaxial compressive strength and Schmidt hammer test for building stones. *Construction and Building Materials*, 299, 123941. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123941>.
- Kozak, M. (2011). Beton yollar ve beton yol yapımının araştırılması. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(1), 89-99.
- Kök, E. (2008). *Karayolu ve havaalanı üstyapı tasarım yöntemleri, karşılaştırması ve Türkiye uygulamaları* (yüksek lisans tezi). YÖK tez merkezinden edinilmiştir (252136).
- Kutluhan, S. ve Ağar, E. (2009). Bitümlü sıcak karışımlarda tekerlek izi oluşumunu etkileyen faktörler ve azaltmaya yönelik öneriler. *İTÜ Mühendislik Dergisi*, 8(6), 179-191.
- Li, H., Zhang, M.H., Ou, J.P. (2006). Abrasion resistance of concrete containing nano-particles for pavement. *Wear*, 260(11-12), 1262-1266. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.08.006>.
- Li, X. and Zhu, X. (2016). Tea: types, production and trade. *Encyclopedia of food and health*, 279-282. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00684-X>.
- Li, Q., Liu, P., Wang, M., Xia, H. (2023). Effects of elevated temperature on the mechanical properties of concrete with aggregate of waste porcelain tile.

- Liu, G. and Sun, B. (2023). Concrete compressive strength prediction using an explainable boosting machine model. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01845.
- Mehra, P., Gupta, R.C., Thomas, B.S. (2016). Assessment of durability characteristics of cement concrete containing jarosite. *Journal of Cleaner Production*, 119, 59-65.
- Patil, S., Rao, H.S., Ghorpade, V.G. (2022). The influence of metakaolin, silica fume, glass fiber and polypropylene fiber on the strength characteristics of high performance concrete. *Materialstoday: Proceedings*.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.051>.
- Prikryl, R. and Snizek, P. (2023). Critical assessment of the ‘non-destructiveness’ of Schmidt hammer test on monumental sandstones: a microscopic and microstructural approach. *Journal of Cultural Heritage*, 59, 247-254.
<https://doi.org/10.1016/j.culher.2022.12.011>.
- Pucinotti, R. (2015). Reinforced concrete structure: non destructive in situ strength assessment of concrete. *Construction and Building Materials*, 75, 331-341.
- Qasrawi, H.Y. (2000). Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted. *Cement and Concrete Research*, 30(5), 739-746.
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00226-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00226-X).
- Rafieizonooz, M., Mirza, J., Salim, M.R., Hussin, M.W., Khankhaje, E. (2016). Investigation of coal bottom ash and fly ash in concrete as replacement for sand and cement. *Construction and Building Materials*, 116, 15-24.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.080>.
- Roziere, E., Loukili, A., El Hachem, R., Grondin, F. (2009). Durability of concrete exposed to leaching and external sulphate attacks. *Cement and Concrete Research*, 39, 1188-1198.
- Sbartai, Z.M., Laurens, S., Elachachi, S.M., Payan, C. (2012). Concrete properties evaluation by statistical fusion of NDT techniques. *Construction and Building Materials*, 37, 943-950.
- Singh, M. and Siddique, R. (2014). Strength properties and micro-structural properties of concrete containing coal bottom ash as partial replacement of fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 50, 246-256.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.026>.
- Singh, M. and Siddique, R. (2015). Properties of concrete containing high volumes of coal bottom ash as fine aggregate. *Journal of Cleaner Production*, 91, 269-278.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.026>.

- Singh, M. and Siddique, R. (2016). Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on workability and strength properties of concrete. *Journal of Cleaner Production*, 112(1), 620-630. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.001>.
- Sönmez, G. ve Işık, M. (2020). Kömür yanma atıklarının çevresel etkileri ve kullanım alanları. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 72-83.
- Suryanita, R., Maizir, H., Zulapriansyah, R., Subagiono, Y., Arshad, M.F. (2022). The effect of silica fume admixture on the compressive strength of the cellular lightweight. *Results in Engineering*, 14, 100445. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100445>.
- Şahan, M.F. ve Canpolat, U. (2021). Kazınmış asfalt malzemelerin beton karışımında ince agregaya yerine ikame edilmesinin farklı ortam ısısı altındaki betonların basınç dayanımlarına etkisi. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15, 307-314.
- Taç, Ş.G. (2018). Karayolu ulaşımında meydana gelen trafik kazalarının önlenmesinde akıllı ulaşım sistemlerinin etkisi. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 1(2), 12-21.
- Tanyıldızı, M.M. ve Geçkil, T. (2019). AASHTO metodunda rijit ve esnek üstyapıların projelendirilmesinde kullanılan parametrelerin incelenmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 31(1), 187-194.
- TS 500, (2000). Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 79.
- TS 802, (2016). Beton karışım tasarımı hesap esasları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 43.
- TS 1247, (2018). Beton yapım, döküm ve bakım kuralları (Normal hava koşullarında). Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 34.
- TS EN 196-2, (2013). Çimento deney yöntemleri-Bölüm 2:Çimentonun kimyasal analizi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 75.
- TS EN 206+A2, (2021). Beton-özellik, performans, imalat ve uygunluk. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 105.
- TS EN 772-11:2011, (2011). Kâgir birimler-deney metotları-bölüm 11:betondan,yapay ve doğal taştan yapılmış kâgir birimlerde kapiler su emme ve kil kâgir birimlerde ilk su emme hızının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 8.
- TS EN 933-1:2012, (2012). Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımı tayini-Eleme metodu. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 18.

- TS EN 933-3, (2012). Agregaların geometrik özellikleri için deneyler-Bölüm 3:Tane şekli tayini-Yassılık endeksi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 12.
- TS EN 12350-2, (2019). Beton-Taze beton deneyleri - Bölüm 2:Çökme(slump) deneyi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 11.
- TS EN 12350-6, (2019). Beton -Taze beton deneyleri-Bölüm 6:Birim hacim kütlesi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 14.
- TS EN 12390-1, (2021). Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm1:Deney numunesi ve kalıplarının şekil, boyut ve diğer özellikleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 15.
- TS EN 12390-4, (2019). Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 4:Basınç dayanımı-Deney makinelerinin özellikleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 19.
- TS EN 12390-3, (2019). Beton-Sertleşmiş beton deneyleri – Bölüm3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 23.
- TS EN 12390-5, (2019). Beton-Sertleşmiş beton deneyleri – Bölüm 5: Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 13.
- TS EN 12457-4, (2004). Atıkların nitelendirilmesi – Katıdan özütleme analizi – Granül katı atıkların ve çamrların katı özütlemesi için uygunluk deneyi – Bölüm 4: Sıvı katı oranı 10 l/kg olan ve parçacık boyutu 10 mm’den küçük (ölçüsü azaltılmış veya azaltılmamış) malzemeler için tek aşamalı parti deneyi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 29.
- TS EN 12504-2, (2021). Yapılarda beton deneyleri – Bölüm 2: Tahribatsız muayene – Geri sıçrama sayısının belirlenmesi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 11.
- Turan, M. ve Tanrikulu, M.A. (2013). Hasarsız deney yöntemleri ile beton kalitesinin belirlenmesi. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 32, 41-56.
- Türkmenoğlu, M., Anıl, M., Erkuş, F.Ş. (2014). Ege bölgesindeki termik santrallerden alınan uçucu küllerin liç karakteristiklerinin belirlenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(2), 131-140.
- Tüzün, D.A., Kaman, D.Ö., Göncü, S. (2020). Çimento harcı içerisinde kullanılan atık döküm kumunun çevresel risklerinin ve harç mekanik özelliklerine olan etkilerinin değerlendirilmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(6), 1123-1132.
- Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, 2021. 12’inci Ulaştırma ve Haberleşme Şurası Sektör Raporları. Ankara, 628 s.

Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, (2022). 2022 yılı yol, köprü, tünel, bitümlü kaplamalar, bakım ve trafik işlerine ait birim fiyat listesi, Ankara, 44.

URL-1. (2022, Aralık 15). Retrieved from <https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Kurumsal/YolAgi.aspx>

URL-2. (2022, Aralık 15). Retrieved from <https://www.betonyol.org.tr/uploads/concreteroads/nicin-beton-yol.pdf>

URL-3. (2022, Aralık 18). Retrieved from <https://www.betonyol.org.tr/uploads/otherpublications/beton-yollar.pdf>

URL-4. (2022, Aralık 20). Retrieved from <https://www.haberturk.com/ordu-haberleri/67852150-12-yildir-bozulmayan-yolorduda-12-yil-once-test-amacli-olarak-dosenen-borlu-asfalt-yol>

URL-5. (2022, Aralık 22). Retrieved from <https://www.marmaragazetesi.com/beton-yol-sorununa-ilk-onlem-alindi-116842h.htm>

URL-6. (2022, Aralık 23). Retrieved from https://www.ktu.edu.tr/dosyalar/maden_64aa8.pdf

URL-7. (2022, Aralık 26). Retrieved from https://www.ktu.edu.tr/dosyalar/maden_2c241.pdf

URL-8. (2023, Ocak 8). Retrieved from <https://www.fao.org/3/cc0238en/cc0238en.pdf>

URL-9. (2023, Ocak 8). Retrieved from <https://www.caykur.gov.tr/CMS/Design/Sources/Dosya/Yayinlar/782.pdf>

URL-10. (2023, Ocak 10). Retrieved from <https://rize.tarimorman.gov.tr/Menu/13/Ekonomi#:~:text=%C4%B0limizde%2C%20ya%C5%9F%20%C3%A7ay%20tar%C4%B1m%C4%B1%2049.960,ton%20kuru%20%C3%A7ay%20%C3%BCretimi%20ger%C3%A7ekle%C5%9Fmektedir>

URL-11. (2023, Ocak 11). Retrieved from <https://www.caykur.gov.tr/Pages/Yayinlar/YayinDetay.aspx?ItemType=5&ItemId=721>

URL-12. (2023, Ocak 11). Retrieved from <https://www.caykur.gov.tr/Pages/Yayinlar/YayinDetay.aspx?ItemType=5&ItemId=701>

URL-13. (2023, Ocak 12). Retrieved from <https://www.passeportsante.net/fr/Actualites/Nouvelles/Fiche.aspx?doc=bilan-carbone-ecolo-votre-tasse-de-the-2009092590>

- URL-14. (2022, Kasım 12). Retrieved from <https://assets.master-builders-solutions.com/tr-tr/masterrheobuild%203209.pdf>
- Vargas, R. and Vecchietti, A. (2016). Influence of raw material moisture on the synthesis of black tea production process. *Journal of Food Engineering*, 173, 76-84. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.10.043>.
- Wang, M. and Wan, W. (2019). A new empirical formula for evaluating uniaxial compressive strength using the Schmidt hammer test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 123, 104094. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2019.104094>.
- Xu, Q., Yang, Y., Hu, K., Chen, J., Djomo, S.N., Yang, X., Knudsen, M.T. (2021). Economic, environmental and emergy analysis of China's green tea production. *Sustainable Production and Consumption*, 28, 269-280. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.04.019>.
- Yalçın, H. ve Gürü, M. (2006), *Çimento ve Beton*, Ankara: Palme Yayıncılık.
- Yayla, N. (2011), *Karayolu Mühendisliği*, İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Yentimur, M.F., Kütük, T., Kütük, S. (2022). Bor ve bor atığının inşaat yıkıntı atığı ile normal beton üzerindeki etkileri. *Journal of Innovations in Civil Engineering and Technology*, 4(2), 47-60.
- Yıldırım, D. (2012). *Karayolu üstyapı parametrelerinin belirlenmesinde kalite fonksiyon yayılımı yaklaşımı* (yüksek lisans tezi). YÖK tez merkezinden edinilmiştir (306988).
- Zhou, H., Bhattarai, R., Li, Y., Si, B., Dong, X., Wang, T., Yao, Z. (2022). Towards sustainable coal industry: turning coal bottom ash into wealth. *Science of The Total Environment*, 804, 149985. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149985>.