

Çay Fabrikalarında Açığa Çıkan Kömür Külünün Beton Yollarda İnce Agregada Olarak Değerlendirilmesi

Tunahan HACIMUSTAFAOĞLU¹, Tuba KÜTÜK SERT², İlknur BEKEM KARA^{3*}

¹ İller Bankası Kastamonu Bölge Müdürlüğü Kastamonu/Türkiye

² Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Rize, Türkiye

³ Artvin Çoruh Üniversitesi, Borçka Acarlar Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü Artvin, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author
E-mail: ilknurbekem@artvin.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article
Geliş Tarihi/Received: 17.08.2023
Kabul Tarihi/Accepted: 10.11.2023

ÖZ

İnşaat sektöründe en fazla talep edilen malzemelerden birisi betondur. Doğal kaynakların korunması, atık malzemelerin bertaraf sorununa çözüm bulunması ve atık malzeme kullanılarak inşaat maliyetlerinin düşürülmesi amacıyla agrega yerine kullanılabilir yeni malzeme arayışları devam etmektedir. Bu çalışmada çay fabrikalarında ortaya çıkan kömür külü atığının (KKA) yol betonu içerisinde ince agrega yerine kullanılarak bertaraf edilebilirliğinin belirlenmesi amaçlanmıştır. KKA fiziksel, kimyasal ve morfolojik özellikleri tespit edildikten sonra %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında 0-1 mm ince agregaya ikame edilerek beton yol tasarımı yapılmıştır. Taze betonların yoğunluk ve pH değerleri ölçülmüş ve kalıplara yerleştirilmiştir. Beton test çekici, ultrases geçiş hızı, kapiler su emme, basınç, eğilme, yarmada çekme ve aşınma dayanımlarından oluşan sertleşmiş beton deney ölçümleri 7. ve 28. günlerde 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, ince agrega, dayanım

Utilization of Coal Ashes from Tea Factory as Fine Aggregate in Concrete Roads

ABSTRACT

Concrete is one of the most demanded materials in the construction industry. The search for new materials that can be used instead of aggregate continues in order to protect natural resources, find solutions to the disposal problem of waste materials and reduce construction costs by using waste materials. In this study, it was aimed to determine whether the coal ash waste (CAW) generated in tea factories can be disposed of by using it instead of fine aggregate in road concrete. After the physical, chemical and morphological properties of CAW were determined, concrete pavement design was made by substituting 0-1 mm fine aggregate at the rates of 0%, 25%, 50%, 75% and 100%. Density and pH values of fresh concrete were measured and placed in molds. Hardened concrete test measurements consisting of Schmidt hammer, ultrasonic pulse velocity, capillary water absorption, compressive, flexural, splitting tensile and abrasion strength were carried out on the 7th and 28th days. Additionally, heavy metal leaching of 0% and 50% CAW substituted concretes was measured. As a result, it has been determined that CAW increases the capillary water absorption values of concrete types, reduces compressive strength, improves tensile strength up to 50% replacement rate, and does not create any change on abrasion resistance up to 50% replacement rate. According to the leakage test results, it has been determined that heavy metals can be eliminated by using CAW in concrete.

Keywords: Coal waste ash, concrete road, fine aggregate, strength

Cite as;

Hacimustafaoğlu, T., Kütük Sert, T., Bekem Kara, İ. (2023). Çay fabrikalarında açığa çıkan kömür külünün beton yollarda ince agrega olarak değerlendirilmesi, *Recep Tayyip Erdogan University Journal of Science and Engineering*, 4(2), 196-207. DOI: 10.53501/rteufemud.1377449

1. Giriş

Çay fabrikası kömür külü atığı (KKA) çay fabrikalarında çay üretimi sırasında ihtiyaç duyulan buharın elde edilmesi için kullanılan kömürün yanması ile meydana gelmektedir. KKA yanmamış karbon parçacıkları, ağır metaller ve karmaşık organik bileşikler içeren çeşitli organik ve inorganik bileşiklerin karışımıdır. Ayrıca KKA'nın toprak ve su kaynaklarını büyük ölçüde kirleten hem çözünür hemde çözünmez formda ağır metaller içerdiği bilinmektedir (Goswami vd., 2014; Türkmenoğlu vd., 2014; Sönmez ve Işık, 2020). Çalışma kapsamında gerçekleştirilen araştırmalarda KKA'nın yerel yönetimler tarafından istinat duvarları ve şehir içi altyapı işlerinde dolgu malzemesi olarak kullanıldığı bilgisine ulaşılmıştır. Ancak yapılan çalışmalardan bilinmektedir ki; KKA'nın uygun arıtma olmadan bertaraf edilmesi neticesinde yeraltı suyunu ve toprağı kirletmektedir (Sönmez ve Işık, 2020; Chindasiriphan vd., 2023). Kömür ile çalışan çay fabrikaları için KKA'nın çevresel sorun yaratmayacak şekilde bertaraf edilmesi önem arz etmektedir.

Beton teknolojisinde endüstriyel atıkların kullanımı üzerine birçok çalışma mevcuttur (Arrigoni vd., 2020). Bu atıkların veya birtakım yan ürünlerinin çimentoya kısmen ikame edilmesi önemli ekonomik ve çevresel faydalar sağlamaktadır (Kara vd., 2020). Araştırmacılar çalışmalarında çimento matrislerinin ağır metalleri etkili bir şekilde tutmak için kimyasal bağlanma ve fiziksel hapsedme sağladığı bildirilmektedir (Cocke, 1990; Argane vd., 2016). Türkiye'de çay fabrikaları Doğu Karadeniz ve özellikle Rize ilinde bulunmaktadır. Türkiye için Çay fabrikalarında ortaya çıkan KKA bölgesel bir sorun oluşturmaktadır. Ayrıca yine Türkiye

genelinde en uzun beton yol ağı Doğu Karadeniz Bölgesinde bulunmaktadır (Çelik vd., 2020). Bölgesel bir sorun gibi görünen bu KKA'nın yine bu bölgede tercih edilen beton yollarda kullanılması atığın bertarafı açısından önemli bir avantaj olacaktır.

Bu çalışmada bölgesel bir atık olan KKA'nın o bölgede tercih edilen beton yollarda kullanılabilirliği ve KKA'nın fabrikadan temin edildiği gibi kullanılması hedeflenmiştir. Gerçekleştirilen literatür incelemeleri sonucunda yol betonu üretiminde ince agrega yerine KKA kullanılmasına karar verilmiştir. Agrega gibi doğal olan kıt kaynakların kullanımını ve agrega üretimi için gerekli enerji tüketimini azaltmak, KKA'nın depolama maliyetini ortadan kaldırmak ve atığın çevre kirliliğine neden olmadan beton içinde bertaraf edilebilirliğinin tespit edilmesi araştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Beton karışımlarında bağlayıcı olarak CEM I 42.5 R çimentosu, Çaykur Derepazarı Tersane Çay Fabrikası'ndan (Rize/Türkiye) temin edilen KKA, 0-5 mm, 5-12 mm ve 12-25 mm boyutlarında kırmataş agrega, naftalin sülfonat esaslı yüksek oranda su azaltıcı/süper plastikleştirici beton katkı maddesi, şebeke suyu, MgSO₄ ve HCl kimyasalları 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. Oyak çimento fabrikasından (Ordu/Turkey) temin edilen yoğunluğu 3,12 g/cm³, özgül yüzey alanı ise 3598 cm²/g çimentonun kimyasal özellikleri Tablo 1'de sunulmuştur (TSE, 2012).

Tablo 1. Çimentoya ait kimyasal özellikler

Table 1. Chemical properties of cement

Oksit	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Na (Eq)	Cl ⁻	KK	ÇK
Değer	62,51	19,76	4,38	3,19	1,69	2,90	0,57	1,10	1,29	0,03	2,49	1,03

KK: Kızdırma kaybı, ÇK: Çözünmeyen kalıntı, Na(Eq): Eşdeğer alkali

2.2. Metot

2.2.1 KKA ve İnce Agrega Özellikleri

Beton karışımlarında KKA'nın fabrikadan temin edildiği gibi ince agregaya yerine ikame malzemesi olarak kullanılması amaçlanmıştır. KKA'nın en büyük tane boyutunun 1 mm tespit edilmesi ile karışımlarda 0-1 mm ince agregaya yerine ikamesi yapılmıştır. 0-1 mm ince agregaya ve KKA'nın fiziksel, kimyasal ve morfolojik özellikleri belirlenmiştir.

2.2.2. Beton Tasarımı ve Karışımların Hazırlanması

KKA'nın %0 (M0), %25 (M25), %50 (M50), %75 (M75) ve %100 (M100) oranlarında hacimce 0-1 mm ince agregaya yerine ikame edilmesiyle 5 farklı beton tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir (TSE, 2018; TSE, 2016; TSE, 2021a). Beton türleri aynı kıvam sınıfına (S1: 10~40 mm) sahip olacak şekilde karışımlara farklı oranlarda yüksek oranda su azaltıcı/süper plastikleştirici ilave edilmiştir. Taze beton karışımları prizmatik (100×100×400 mm), silindir (ø100×200 mm) ve iki farklı boyuttaki küp (150×150×150 mm ve 71×71×71 mm) kalıplara vibrasyon masasında sıkıştırma ile yerleştirilmiştir (TSE; 2019e). Toplamda 120 adet beton numunesi üretilmiştir. Karışımlara ait malzeme miktarları Tablo 2'de sunulmuştur. Numuneler 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış ve deney gününe kadar 20±2°C sıcaklıktaki kirece doymuş su içerisinde kür edilmiştir.

Tablo 2. Beton karışımlarına giren malzeme miktarları (kg/m³)

Table 2. Amounts of materials in concrete design (kg/m³)

Malzemeler (kg)	M0	M25	M50	M75	M100
Çimento	350,0	350,0	350,0	350,0	350,0
KKA	-	58,5	116,9	175,4	233,9
0-1 mm agregaya	426,5	324,4	216,2	108,1	-
1-5 mm agregaya	426,5	426,5	426,5	426,5	426,5
5-12 mm agregaya	448,4	448,4	448,4	448,4	448,4
12-25 mm agregaya	611,3	611,3	611,3	611,3	611,3
Su	173,5	189,7	203,1	219,3	235,5
Kimyasal Katkı	5,3	5,7	6,1	6,5	7,0

2.2.3. Sertleşmiş beton deneyleri

KKA ikamesi ile elde edilen M0, M25, M50, M75, M100 taze beton karışımlarının yoğunluk, çökme (Slump) miktarları ve pH değerleri belirlenmiştir (TSE, 2019a; TSE, 2019b). Her bir beton karışımı için beton test çekici, ultrases geçiş hızı, kapiler su emme, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve aşınma dayanımı testleri gerçekleştirilmiştir (TSE, 2021b; ASTM, 2016; TSE, 2011; TSE, 2019c; TSE, 2019d; TSE, 2010; TSE, 2015). Ayrıca test sonuçları irdelenerek bazı 28 günlük sertleşmiş beton numuneleri üzerinde sızma testi gerçekleştirilmiştir. Numuneler hacimce kendilerinin 10 katı (3579 ml) ve pH'ı 4 olan HCl ile derişimi 3 g/l olan MgSO₄ 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 (TSE, 2004; Rozière vd., 2009; Azak Tüzün vd., 2020).

3. Bulgular ve Tartışma

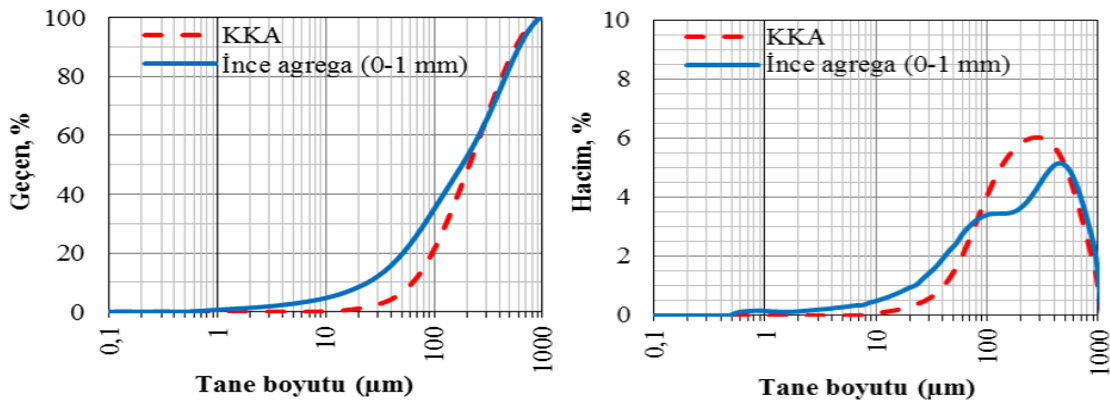
3.1. KKA ve ince agregaya özellikleri

KKA'nın yoğunluğu piknometre yöntemi ile KKA ve ince agregaya tane büyüklükleri dağılımı ise lazer parçacık boyutu analizörü (Malvern, model "Mastersizer Hydro 2000 MU") ile saptanmıştır.

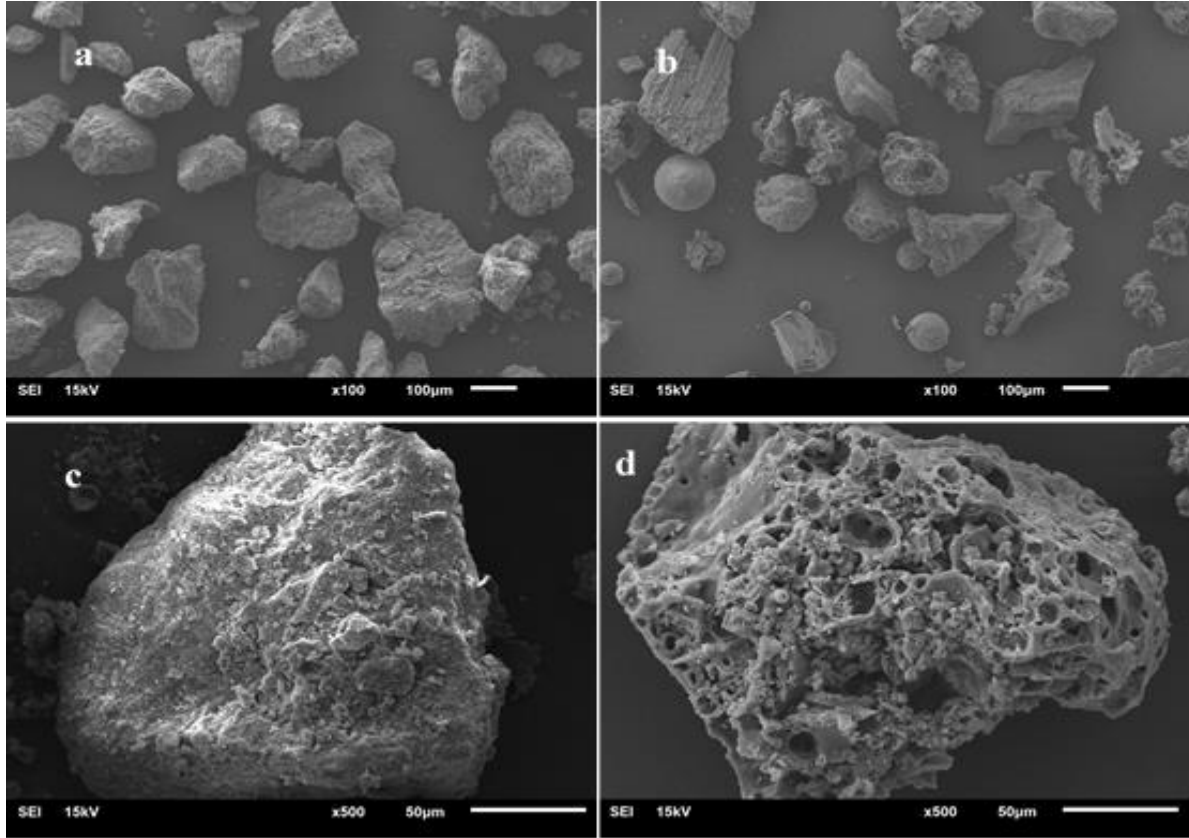
Malzemenin oksitli bileşenleri X-ışını floresansı (XRF) yöntemi ile tespit edilmiştir. Ayrıca, KKA ve ince agreganın morfolojik incelemeleri için SEM görüntüleri alınmıştır. KKA'ya ait gözenek boyutunu ve gözenek boyut dağılımını belirlemek amacıyla yüzey alanı BET cihazı ile ölçülmüştür. KKA'nın yoğunluğu $1,70 \text{ g/cm}^3$ ve su emme değeri %28,4 olarak ölçülmüştür. KKA ve ince agregası (0-1 mm) malzemelerine ait tane boyutu dağılımları Şekil 1'de verilmiştir. 0-1 mm ince agregası ait D90, D50 ve D10 değerleri sırasıyla $605,58 \mu\text{m}$, $180,79 \mu\text{m}$ ve $24,14 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. KKA'nın D90, D50 ve D10 değerleri ise sırasıyla $565,73 \mu\text{m}$, $210,82 \mu\text{m}$ ve $63,32 \mu\text{m}$ tespit edilmiştir. 0-1 mm ince agregası 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.

KKA ve 0-1 mm ince agregası ait SEM görüntüleri Şekil 2'de sunulmuştur. Şekil 2 (a) ve Şekil 2 (b) de sırasıyla agregası ve KKA'nın tane yapılarına ait görüntüler incelendiğinde KKA'nın düzensiz şekilli parçacıklardan oluştuğu ve bünyesinde küresel taneler içerdiği görülmektedir. Şekil 2 (c) ve Şekil 2 (d) de ise agregası ve KKA partikül boyutunda iken; agregası yüzeyinin pürüzlü olduğu, KKA'nın tane yapısının ise çok daha gözenekli olduğu tespit edilmiştir. 0-1 mm ince agregası numunesinin yüzey alanı $5,66 \text{ m}^2/\text{g}$ iken KKA'nın yüzey alanı $40,05 \text{ m}^2/\text{g}$ olduğu ölçülmüştür. Malzemeleri ait BET analizi SEM görüntülerini desteklemektedir.

KKA'ya kimyasal özellikler Tablo 3'de verilmiştir. KKA'nın kimyasal içeriğinde tespit edilen SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 oksitli bileşenlerin toplamı %55,85 olarak hesaplanmıştır. Bu değerini puzolan malzemeler için belirtilen %70 değerini sağlamadığı görülmüştür (ASTM, 2023). Atık malzemenin SO_3 miktarının %1,78 olduğu görülmektedir. Çimentolarda bu değer %4,5 ile sınırlandırılmıştır (TSE, 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 (TSE, 2012). 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.



Şekil 1. KKA ve ince agregası (0-1 mm) tane boyutu dağılımları
Figure 1. Particle size distributions of CAW and fine aggregate (0-1 mm)



Şekil 2. (a) 0-1 mm ince agrega (x100), (b) KKA (x100), (c) 0-1 mm ince agrega (x500) ve (d) KKA (x500) SEM görüntüleri

Figure 2. SEM images of (a) 0-1 mm fine aggregates (x100), (b) KKA (x100), (c) 0-1 mm fine aggregates (x500) and (d) KKA (x500)

Tablo 3. KKA'nın kimyasal özellikleri

Table 3. Chemical properties of CAW

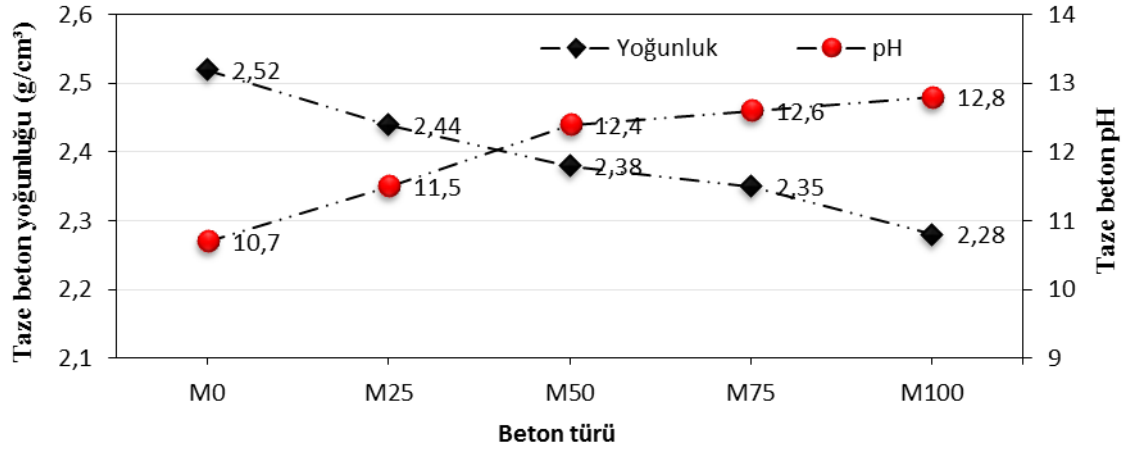
Oksit	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O
Değer (%)	26,55	17,17	12,13	8,11	3,05	1,78	1,28
Oksit	P ₂ O ₅	TiO ₂	BaO	K ₂ O	MnO	Cl ⁻	KK
Değer (%)	1,24	1,10	0,73	0,67	0,12	0,03	26,05

KK: Kızdırma kaybı

3.2. Taze beton özellikleri

Beton karışımlarına ait taze hal özellikleri Şekil 3'te görülmektedir. KKA ikamesi ile üretilen 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.

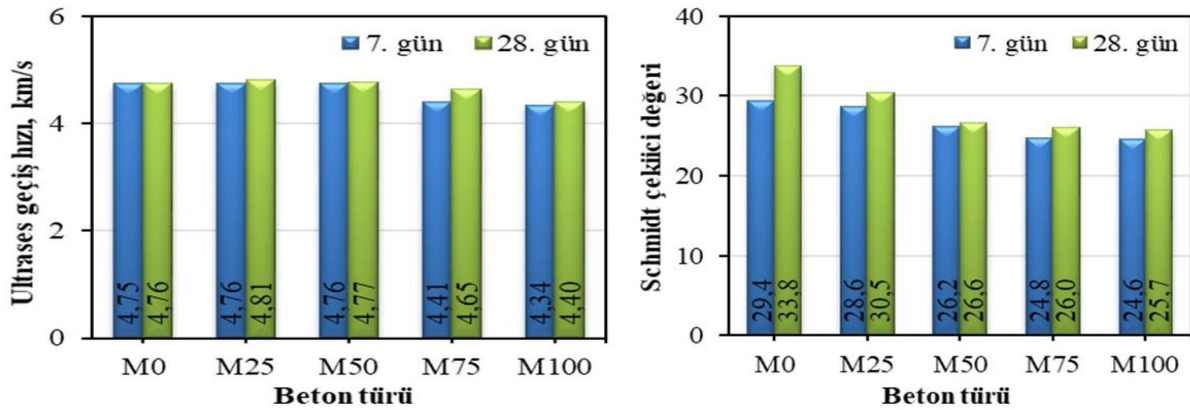


Şekil 3. Karışımlara ait yoğunluk ve pH değerleri
Figure 3. Density and pH values of mixtures

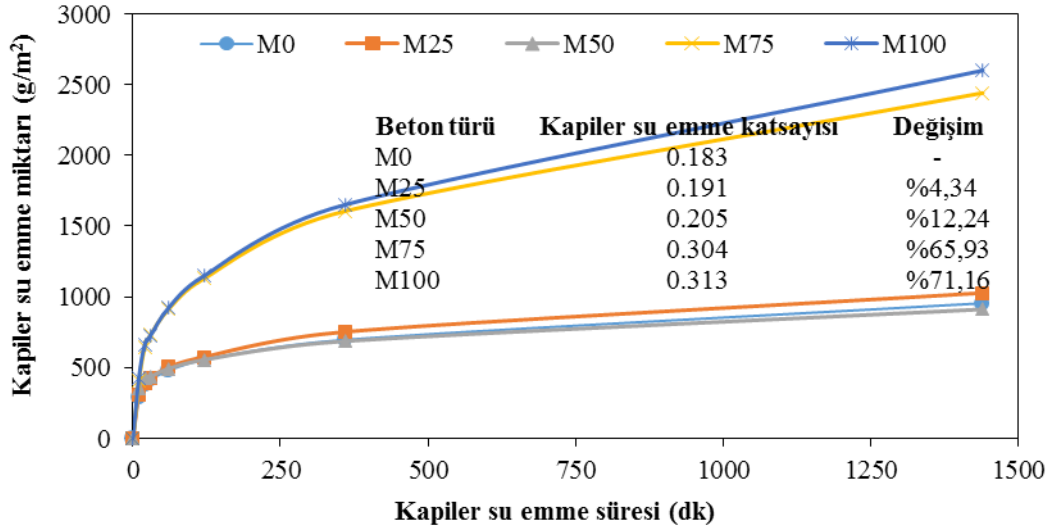
3.3. Sertleşmiş beton özellikleri

KKA ikameli beton türlerinin ultrases geçiş hızı ve beton test çekici değerleri Şekil 4'de sunulmuştur. Ultrases geçiş hızı değeri KKA ikameli numeler içerisinde en yüksek değeri M25, en düşük değeri ise M100 numunesine ile elde edilmiştir. Ultrases geçiş hızı testi beton numunelerin homojenlik ve boşluk yapılarının karşılaştırılmasında yaygın olarak tercih edilmektedir (Qasrawi, 2000). Şekil 4 incelendiğinde M25 ve M50 örneklerinin kontrol örneği olan M0 ile benzer homojenlik ve boşluk yapısına sahip olduğu söylenebilir. Beton test 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.

KKA ikameli beton türlerinin kapiler su emme değerleri Şekil 5'te verilmiştir. Kapiler su emme değerleri betonda bulunan boşluk yapısı ile ilgilidir (Singh ve Siddique, 2014). Şekil 5 incelendiğinde M25, M50, M75 ve M100 betonların kapiler su emme değerlerinin kontrol betonuna (M0) göre sırasıyla %4,34, %12,24, %65,93 ve %71,16 olarak artış gösterdiği 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 kapiler su emme potansiyelinin geleneksel betonlardan yüksek olduğunu göstermiştir (Rafieizonooz vd., 2016).



Şekil 4. Numunelerin ultrases geçiş hızı ve beton test çekici ölçüm sonuçları
Figure 4. Ultrasonic pulse velocity and Schmidt hammer results of samples

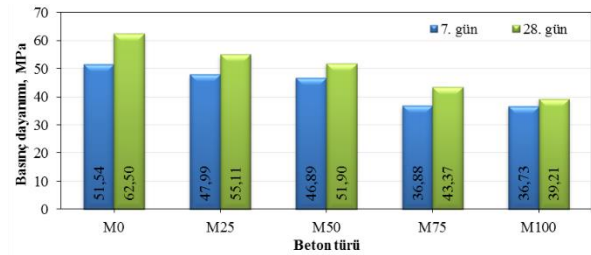


Şekil 5. Numunelerin kapiler su emme sonuçları
Figure 5. Capillary water absorption results of samples

KKA ikamesi ile üretilen beton numunelerin ölçülen basınç dayanımları Şekil 6’da verilmiştir. Bütün KKA ikame oranlarında betonun basınç dayanımının azaldığı tespit edilmiştir. KKA ikamesi ile elde edilen betonlar içerisinde en düşük basınç dayanımı M100 numunesine aittir. KKA ile üretilen beton numuneler içerisinde en yüksek dayanım değeri ise M25 numunesi ile elde edilmiştir. KKA’nın basınç dayanımını azaltması KKA’nın yapısı ile açıklanmaktadır (Singh ve Siddique, 2014; Hasim vd., 2022). KKA’nın gözenekli yapısı (Şekil 2), 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. KKA kullanımının betonun basınç dayanımını azaltması daha önce yapılan çalışmalar ile uyumlu olduğu görülmüştür (Singh ve Siddique, 2014; Hamada vd., 2022; Hasim vd., 2022). 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.

Beton türlerine ait eğilme ve yarmada çekme dayanımı sonuçları Şekil 7’de verilmiştir. M25 ve M50 betonları her iki yaşta da M0’a göre daha yüksek eğilme dayanımı göstermiştir. M0 beton

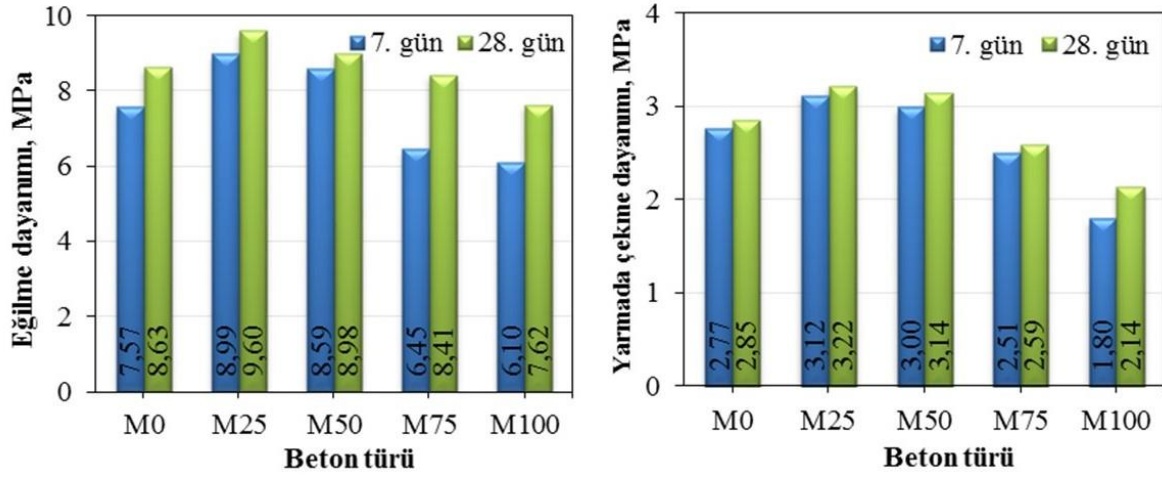
türünün 7. gün ve 28. gün eğilme dayanımları sırasıyla 7,57 ve 8,63 MPa’dır. %25 KKA ikamesi eğilme dayanımını 7. günde %18,76, 28. günde ise %11,24 arttırmıştır. %50 KKA ikamesinin kontrol betonuna göre eğilme dayanımına olumlu katkı sağladığı görülmektedir.



Şekil 6. Numunelerin basınç dayanımı ölçümü sonuçları

Figure 6. Compressive strength results of the samples

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 7). 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.



Şekil 7. Numunelerin eğilme ve yarımada çekme dayanımı sonuçları

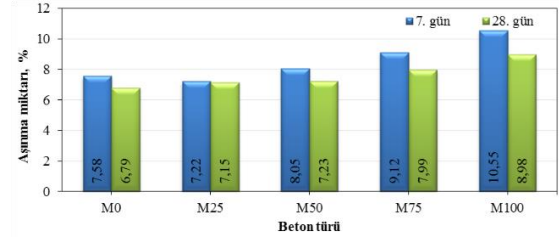
Figure 7. Flexural and splitting tensile strength results of the samples

M50 beton türü de M0'a göre daha iyi yarımada çekme dayanımı sergilemiştir. M75 ve M100 beton türleri incelendiğinde ikame oranları arttıkça yarımada 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 belirtilmektedir (Singh ve Siddique, 2014; Gooi vd., 2020).

KKA içeren betonlar içerisinde en az aşınma gösteren beton türünün M25 olduğu, en fazla aşınma gösteren beton türünün ise M100 olduğu görülmektedir (Şekil 8). 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.

3.4. Ağır metal sızma testi

Betonda ince agrega ikamesi ile KKA kullanımının çevresel etkilerini değerlendirmek



Şekil 8. Numunelerin aşınma testi sonuçları

Figure 8. Results of abrasion test of samples

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 4'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.

Tablo 4. M0 ve M50 beton türlerinin ağır metal salınımları (mg/L)**Table 4.** Heavy metal emissions of M0 and M50 concrete types (mg/L)

Numuneler	Kadmiyum (Cd)	Kurşun (Pb)	Çinko (Zn)	Bakır (Cu)	Kobalt (Co)	Mangan (Mn)	Nikel (Ni)	Krom (Cr)
M0(HCl)	-	-	-	-	-	-	-	0,439
14. gün	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

Bu metallerin KKA ikameli betonlara ait 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 (Choi vd., 2009; Argane vd., 2016; Mehra vd., 2016; Bekem Kara, 2022).

4. Sonuçlar

Bu çalışmada 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 beton test 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 sergilemiştir. 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.
- 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 agrega yerine kullanılabilir olduğu kanaatine varılmıştır.

Yazar Katkısı

T. Hacimustafaoglu: Kaynaklar, Araştırma, Doğrulama, Veri iyileştirme; **T. Kütük Sert:** Yazma-İnceleme ve Düzenleme; **İ. Bekem Kara:** Kavramsallaştırma, Metodoloji, Yazma-Orjinal Taslak, Görselleştirme.

Kaynaklar

- Argane, R., Benzaazoua, M., Hakkou, R., Bouamrane, 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. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.004>
- Arrigoni, A., Panesar, D.K., Duhamel, M., Opher, T., Saxe, S., Posen, I.D., MacLean, H.L. (2020). Life cycle greenhouse gas emissions of concrete containing supplementary cementitious materials: cut-off vs. substitution. *Journal of Cleaner Production*, 263, 121465. <https://doi:10.1016/J.JCLEPRO.2020.121465>
- ASTM (2016). Standard test method for pulse velocity through concrete. ASTM International (C597), West Conshohocken, PA.
- ASTM (2023). Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. ASTM International (C618-23e1), West Conshohocken, PA.
- Azak Tüzün, D., Över Kaman, D., 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. <https://doi:10.5505/pajes.2019.12571>
- 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(24), 36938–36950. <https://doi:10.1007/S11356-021-18077-Y/TABLES/6>
- Çelik, M., Seferoğlu, M.T., Akpınar, M.V., Güneş Seferoğlu, A. (2020). Beton Yol Uygulamalarında Derz Türlerine Göre Düşey Deplasman Oluşumlarının İncelenmesi ve Maliyet Analizi: Trabzon-Rize Örneği. *El-Cezeri*, 7(2), 474–486. <https://doi:10.31202/ECJSE.656138>
- 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:10.1016/J.JOBE.2022.105791>
- Choi, W.H., Lee, S.R., Park, J.Y. (2009). Cement based solidification/stabilization of arsenic-contaminated mine tailings. *Waste Management*, 29(5), 1766–1771. <https://doi:10.1016/J.WASMAN.2008.11.008>
- Cocke, D.L. (1990). The binding chemistry and leaching mechanisms of hazardous substances in cementitious solidification/stabilization systems. *Journal of Hazardous Materials*, 24(2–3), 231–253. [https://doi:10.1016/0304-3894\(90\)87013-8](https://doi:10.1016/0304-3894(90)87013-8)
- 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:10.1016/J.JCLEPRO.2020.121752>
- Goswami, L., Sarkar, S., Mukherjee, S., Das, S., Barman, S., Raul, P., Bhattacharyya, P., Mandal, N.C., Bhattacharya, S., 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:10.1016/j.biortech.2014.05.032>
- 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: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. *Materials Today: Proceedings*, 48, 1861–1867. <https://doi:10.1016/J.MATPR.2021.09.250>
- Kara, C., Kütük-Sert, T., Kütük, S. (2020). Öğütülmüş kölemanit içeren betonlarda sodyum klorür etkisi.

- Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8 (2020) 499-510.
<https://doi.org/10.29130/dubited.553523>
- 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.
<https://doi:10.1016/J.JCLEPRO.2016.01.055>
- Qasrawi, H.Y. (2000). Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted. *Cement and Concrete Research*, 30(5), 739–746.
- 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:10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.04.080>
- Rozière, E., Loukili, A., El Hachem, R., Grondin, F. (2009). Durability of concrete exposed to leaching and external sulphate attacks. *Cement and Concrete Research*, 39(12), 1188–1198.
<https://doi:10.1016/J.CEMCONRES.2009.07.021>
- Singh, M., 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:10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.09.026>
- Sönmez, G., Işık, M. (2020). Kömür yanma atıklarının çevresel etkileri ve kullanım alanları. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 72–83.
<https://doi:10.28948/ngumuh.546144>
- TSE, (2004). TS EN 12457-4, Atıkların nitelendirilmesi - Katıdan özütleme analizi-Granül katı atıkların ve çamurların 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 Standardları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TSE, (2010). TS EN 12390-6, Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 6: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TSE, (2011). TS EN 772-11, 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 Standardları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TSE, (2012). TS EN 197-1, Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TSE, (2013). TS EN 196-2, Çimento deney yöntemleri - Bölüm 2: Çimentonun kimyasal analizi. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TSE, (2015). TS EN 13892-3, Şap malzemeleri - Deney yöntemleri - Bölüm 3: Aşınma direncinin tayini - Böhme. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TSE, (2016). TS 802, Beton karışım tasarımı hesap esasları. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TSE, (2018). TS 1247, Beton yapım, döküm ve bakım kuralları (Normal hava koşullarında). Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TSE, (2019a). TS EN 12350-2, Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 2: Çökme (slump) deneyi. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TSE, (2019b). TS EN 12350-6, Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 6: Birim hacim kütlesi. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TSE, (2019c). TS EN 12390-3, Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayin. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TSE, (2019d). TS EN 12390-5, Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 5: Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TSE, (2019e). TS EN 12390-2, Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 2: Dayanım deneylerinde kullanılacak deney numunelerinin hazırlanması ve küre tabi tutulması. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TSE, (2021a). TS EN 206+A2, Beton - Özellik, performans, imalat ve uygunluk. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TSE, (2021b). TS EN 12504-2, Yapılarda beton deneyleri - Bölüm 2: Tahribatsız muayene - Geri sıçrama sayısının belirlenmesi. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.

- 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. <https://doi:10.21605/cukurovaummfd.242823>
- 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:10.1016/J.SCITOTENV.2021.149985>